Ecole doctorale
Matériaux, Ouvrages, Durabilité, Environnement et Structures

THESE DE DOCTORAT

DIPLOME DELIVRE PAR L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

Discipline : Structures et matériaux

Présentée et soutenue publiquement à Nantes par :

Shahinaz SAYAGH

le 12 décembre 2007
au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

APPROCHE MULTICRITERE DE L'UTILISATION DE MATERIAUX ALTERNATIFS DANS LES CHAUSSEES

COMPOSITION DU JURY

Hervé DI BENEDETTO Professeur, ENTPE	Président
Denis BOUYSSOU Directeur de recherche CNRS-LAMSADE, Université Paris Dauphine	Rapporteur
Zoubeir LAFHAJ Maître de conférences HDR, Ecole Centrale de Lille	Rapporteur
Jean Claude DEUTSCH Chercheur émérite, ENPC	Examinateur
Agnès JULLIEN Directrice de recherche HDR, LCPC	Directrice de thèse
Anne Ventura Chargée de recherche, LCPC	Conseillère d'étude
Laurent CHATEAU Ingénieur, ADEME	Chargé d'affaire

REMERCIEMENTS

J'adresse mes sincères remerciements à celles et ceux qui, par leur aide et leur soutien moral, ont contribué à la réalisation de ce travail,

Mme Agnès Jullien, Mme Anne Ventura et M Laurent Chateau pour avoir encadré mes travaux de recherches. Leurs qualités d'écoute, leur présence et conseils avisés ont permis l'aboutissement de ce travail.

M Gilles Laurent et M Jean Marc Hervouet pour leur disponibilité, leurs contacts et accompagnement ainsi que l'intérêt apportés aux travaux.

Je remercie Messieurs Denis Bouyssou, Zoubeir Lafhaj, Jean Claude Deutsch et Hervé Di-Benedetto, de m'avoir fait l'honneur de constituer mon jury de thèse.

Je remercie également mes proches collègues, en particulier Laurence Lumière, Pierre Monéron, Michel D'Auvergne et Henriette Dominiak pour leur précieuse aide.

Je remercie le LR de Nancy pour son accueil et plus particulièrement Chantal Godmel pour son investissement.

Je remercie M Borez et la Ville de Dunkerque, SANEF et plus particulièrement M Benchetrit pour leur collaboration.

Je remercie tous les membres du groupe Terrassement-Route du pôle Génie Civil Ouest et plus particulièrement M Le Duff et M Morlot pour leur intérêt apporté à mes travaux de recherche et nombreux échanges.

Je ne peux oublier par ailleurs ma famille et mes amis pour leurs encouragements. Mon époux surtout, pour la patience qu'il a eu pendant ces trois années de travail.

Que soient remerciés toutes celles et tous ceux, qui de près ou de loin, m'ont aidé, par leur travail et leur soutien, à accomplir cette recherche.

AVERTISSEMENT AUX LECTEURS

Ce travail de doctorat a été co-financé par l'ADEME et le LCPC. Cette thèse s'est déroulée sur le centre du LCPC à Nantes, au sein d'une unité de recherches qui développe des outils méthodologiques d'évaluation des infrastructures routières et collecte des données environnementales dédiées dans ce domaine. Il s'est réalisé en collaboration avec plusieurs partenaires :

- le cas d'étude du chapitre 3 a été réalisé en collaboration avec SANEF sur la section A4 prise en exemple sur le contournement Nord Est de Metz,
- le cas d'étude du chapitre 4 a été réalisé en collaboration avec la ville de Dunkerque et la communauté urbaine de Dunkerque,
- les interviews et l'enquête auprès des acteurs de la route ont été réalisées en s'appuyant notamment sur le Pôle Génie Civil Ouest.

L'encadrement de la thèse du LCPC et de l'ADEME remercie vivement l'ensemble des acteurs sollicités qui ont permis par leur contribution d'apporter les éléments nécessaires à la réalisation de ce travail.

Le LCPC et l'ADEME signalent que :

Ce travail s'est inscrit dans la suite logique du projet national OFRIR dans lequel le LCPC et l'ADEME se sont fortement impliqués (2002-2006). Le projet OFRIR portait sur l'utilisation de matériaux alternatifs dans les infrastructures routières, les connaissances synthétisées par les partenaires du projet au cours de celui-ci ont été mises à disposition de tout internaute à l'adresse suivante : http://ofrir.lcpc.fr.
Les résultats présentés dans le cadre de ce mémoire de doctorat sont issus pour certains d'études de cas précises pour lesquelles les donneurs d'ordre ont fourni en partie des données techniques, ou ont accepté d'exprimer leur avis sur des pratiques professionnelles. Les données recueillies ont été interprétées voire complétées ainsi qu'associées à des hypothèses de calcul.
Le lecteur ne doit donc pas considérer les valeurs obtenues comme ayant un caractère général voire générique.

SANEF signale que :

Selon les hypothèses d'allocation de flux utilisées, « le bilan énergétique établi dans l'étude place les Graves Laitiers parmi les techniques les plus consommatrices en énergie (du fait de la fabrication des laitiers de haut fourneau).
Il est intéressant toutefois de signaler deux points positifs même s'ils sortent a priori du contexte de l'étude :

- le fait de replacer l'utilisation des GL dans leur contexte régional du milieu des années 70 où la sidérurgie lorraine était encore très florissante,
- le fait que leurs performances techniques en font sur le plan structurel des matériaux hors pair 30 ans après leur mise en service. Une étude récente confiée par SANEF au Centre Expérimental de recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP) sur l'A4 a confirmé ce constat. »

PRESENTATION DU CONTEXTE ROUTIER NATIONAL…… 11

1. LES PROJETS ROUTIERS ET L'ENVIRONNEMENT…….. 12

2. REGLEMENTATION…… … 12

3. L'AIDE A LA DECISION…… 13

4. LE CONCEPT D'INDICATEURS ASSOCIES AU DEVELOPPEMENT DURABLE…… 13

5. ENJEUX GENERAUX DU TRAVAIL DE THESE…….. 14

CHAPITRE 1. PRESENTATION DES OBJECTIFS ET DE LA METHODE DE TRAVAIL…… 15

1. OBJECTIFS DU TRAVAIL DE THESE…… 16

1.1. Travaux antérieurs au LCPC…… 16

1.2. Objectifs……... 16

2. PRESENTATION DE L'OUTIL EXISTANT A DEVELOPPER…… 16

2.1. La méthode des modules routiers…….. 16

2.2. Principes généraux d'extension de l'outil MRE et de développement d'un outil pour l'urbain…….. 19

3. ORGANISATION DU MEMOIRE……... 22

CHAPITRE 2. DE L'ECHELLE DU PROJET A CELLE DU MATERIAU DE CHAUSSEE – ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES……... 23

INTRODUCTION……. 24

PARTIE I : CONCEPTION DES PROJETS ET DES OUVRAGES ROUTIERS…….. 24

1. ANALYSE DU PROCESSUS DECISIONNEL RELATIF A UN PROJET ROUTIER…… 24

1.1. Contexte……... 24

1.2. Identification des acteurs d'un projet routier…….. 26

1.3. Identification des étapes du processus décisionnel……... 28

1.4. Analyse du rôle des acteurs dans le processus décisionnel…… 29

1.4.1. Etudes de pré-programmation (ou examen d'opportunité)……. 29

1.4.2. Du pré-programme au programme (planification)……. 31

1.4.3. Du programme à l'avant-projet sommaire…….. 31

1.4.4. De l'avant-projet sommaire au projet définitif…… 33

1.4.5. Attribution des marchés aux entreprises routières…… 33

1.4.6. Exécution des travaux……. 34

1.5. Analyse des critères décisionnels par acteur…… 36

1.5.1. Intérêt et signification de la notion de critère……. 36

1.5.2. Critères décisionnels propres à chaque acteur……... 37

2. REGLES DE CONCEPTION LIEES AUX PROJETS ET OUVRAGES ROUTIERS……. **38**

2.1. Insertion de l'infrastructure dans le territoire au sens des études d'impact…… 38

2.1.1. Prise en compte des milieux physiques, naturels et des hommes… 38

2.1.2. Prise en compte du patrimoine et de l'aménagement de l'espace urbain…… 39
2.2. Conception et dimensionnement de chaussées neuves…… 40
2.2.1. Prise en compte du trafic……. 40
2.2.2. Spécificités des voies urbaines……. 40
2.2.3. Type de structures de chaussées…….. 41
2.2.4. Matériaux de chaussée et constituants associés…….. 42

PARTIE II : PRATIQUES ROUTIERES…….. 43

1. PRATIQUES DE VALORISATION DE MATERIAUX ALTERNATIFS DANS LES CHAUSSEES 43
1.1. Critères et types d'utilisation dans le monde…… 43
1.2. Conditions de caractérisation des déchets et matériaux alternatifs en Europe……. 47

2. ANALYSE DE QUELQUES FILIERES EXISTANTES PERENNES SUR LE TERRITOIRE……. 48
2.1. Les matériaux de démolition…….. 48
2.2. Les matériaux bitumineux recyclés…….. 50
2.3. Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères…….. 50
2.4. Les laitiers de haut fourneau…….. 51

3. GESTION DES INFRASTRUCTURES, ENTRETIEN ET EXPLOITATION DE LA ROUTE…… 52
3.1. Enquête sur l'état des réseaux, identification des besoins…….. 53
3.2. Modélisation de l'évolution du patrimoine et simulation de stratégies de gestion…….. 54

PARTIE III : ELEMENTS METHODOLOGIQUES D'EVALUATION POUR L'AIDE A LA DECISION…… 57

1. LES METHODES MULTICRITERES D'AIDE A LA DECISION……. 57
1.1. Terminologie …… 57
1.1.1. Processus d'étude…… 58
1.1.2. Les méthodes multicritères d'agrégation complète……. 58
1.1.3. Les méthodes multicritères discrètes ou d'agrégation partielle….. 59
1.1.4. Les méthodes interactives…… 59
1.1.5. Applications dans le domaine routier…….. 59
1.1.6. Exemples d'évaluation multicritère appliquée à des projets interurbains……... 61
1.1.7. Exemple d'application. Évaluation multicritère appliquée à des ouvrages urbains……... 62

2. METHODES D' EVALUATION DES PROJETS, OUVRAGES ET MATERIAUX…….. 64
2.1. Evaluation relevant des sciences de l'homme et la société…….. 64
2.1.1. Les processus de concertation…….…. 64
2.1.2. Les processus d'entretiens semi-directifs……. 65
2.1.3. Les approches par questionnaire……. 65
2.2. Méthodes d'évaluation économique…….. 65
2.3. Méthodes d'évaluation environnementale…… 66

CONCLUSION……. 76

CHAPITRE 3. EVALUATIONS MULTICRITERES D'UTILISATION DE MATERIAUX ALTERNATIFS DANS LES CHAUSSEES INTERURBAINES…. 79

INTRODUCTION…….……. 80

PARTIE I : EXTENSION DU MODULE ROUTIER ELEMENTAIRE A L'UTILISATION DE MATERIAUX ALTERNATIFS……. 82

1. PRINCIPES D'EVOLUTION DU MRE…….……. 82

1.1. Intégration de structures de chaussées aux laitiers de hauts fourneaux dans le MRE…… 82

1.2. Modélisation des travaux de construction et d'entretien de la solution alternative…… 84

1.2.1. Travaux de construction initiale…….. 84

1.2.2. Travaux d'entretien……. 86

1.2.3. Transport des matériaux et matériels…….. 87

1.3. Définition du système environnemental du MRE alternatif : chantier, procédés et transports…… 87

1.3.1. Présentation des procédés…… 87

1.3.2. Présentation de l'arbre des procédés pour les trois structures type de chaussées…… 88

2. EVALUATION DES FLUX ENVIRONNEMENTAUX……..…… 90

2.1. Flux entrants……. 90

2.1.1. Consommation des ressources et déchets……. 90

2.1.2. Consommation d'énergie…….. 91

2.2. Flux sortants……. 92

2.2.1. Emissions dans le compartiment air……. 92

2.2.2. Emissions dans le compartiment eau…… 95

3. BILAN METHODOLOGIQUE DE L'EXTENSION DU MRE A L'UTILISATION DE MATERIAUX RECYCLES……..…….. 96

PARTIE II : MISE EN PERSPECTIVE DE L'EXTENSION DE L'OUTIL AUX MATERIAUX RECYCLES AVEC LES PRATIQUES DES PROJETS ROUTIERS…… 97

1. ANALYSE DE LA PRISE EN COMPTE DES PREOCCUPATIONS ENVIRONNEMENTALES LORS DE LA REALISATION DE TRAVAUX ROUTIERS…….. 97

1.1. Présentation synthétique des interviews semi-directives……. 97

1.2. Bilan des interviews semi-directives et mise en perspective dans le processus décisionnel…….. 99

2. ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DE TRAVAUX D'ENTRETIEN ABORDES SOUS L'ANGLE ECONOMIQUE……..……. 100

2.1. Scénarii de travaux étudiés et hypothèse de modélisation……. 100

2.2. Evaluation économique…… 102

2.2.1. Coûts directs des travaux d'entretien…… 102

2.2.2. Coûts d'usage dus aux travaux…….. 102

2.2.3. Analyse coût-avantage……... 102

2.3. Evaluation environnementale à l'aide du MRE……. 103

2.3.1. Implémentation d'une loi d'évolution des émissions en fonction du temps…….. 103
2.3.2. Résultats obtenus avec le MRE pour les scénarii 1 à 4……. 105
2.4. Bilan de l'utilisation du MRE sous un angle économique……. 107

PARTIE III : IMPLEMENTATION D'INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX DANS L'OUTIL.. 109

1. ACTUALISATION DU CATALOGUE DE DONNEES ENVIRONEMENTALES MRE AVEC DE NOUVELLES SOURCES DE DONNEES…..…….. 109
1.1. Analyse de l'incidence d'un jeu de données expérimental pour la carrière et la centrale d'enrobage…… 109
1.2. Analyse de la qualité des données du jeu n° 4…….. 109

2. CHOIX DES INDICATEURS D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX……..……. 114
2.1. Sélection d'un panel d'indicateurs d'impacts environnementaux……. 114
2.2. Mode d'allocation des flux environnementaux…….… 115

3. RESULTATS D'INDICATEURS D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX……..……. 117

PARTIE IV : APPLICATION DU MRE A UN OUVRAGE INTERURBAIN AUTOROUTIER AVEC MATERIAUX CLASSIQUES ET LAITIERS DE HAUTS FOURNEAUX…….. 119

1. PRESENTATION DE L'ETUDE DE CAS…….. 119
1.1. Présentation des ouvrages étudiés…….. 119
1.2. Présentation des scénarii d'entretien……. 120

2. PARAMETRES DU MRE……... 120
2.1. Transports……. 120
2.2. Simulation des travaux……. 121

3. RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS INTERURBAINE……..…….. 121
3.1. Flux entrants……. 122
3.1.1. *Emissions dans le compartiment air*……. 123
3.1.2. Emissions dans le compartiment eau…… 125
3.2. Flux sortants…….. 123
3.3. Résultats d'indicateurs d'impacts……... 126

CONCLUSION…….. 128

CHAPITRE 4. MODELISATION GLOBALE DE TRONÇONS DE VOIRIE – DEVELOPPEMENT ET APPLICATION DE L'OUTIL MODULE DE VOIRIE URBAINE……. 131

INTRODUCTION……. 132

PARTIE I : DEVELOPPEMENT D'UN MODULE DE VOIRIE URBAIN AVEC MATERIAUX NEUFS…….. 132

1. PRINCIPES DE DEVELOPPEMENT DU MVU - PRISE EN COMPTE DES SPECIFICITES URBAINES……. 132
1.1. Cahier des charges de l'outil O-MVU……. 132

1.2. Définition de cas type de profil en travers……. 133
1.2.1. Découpage longitudinal des voies…… 133
1.2.2. Paramétrage de la largeur des voies…… 134
1.3. Principes d'intégration de structures de chaussées urbaines…….. 135
1.3.1. Classe de trafic et durée de service……... 135
1.3.2. Plate forme-support de chaussée…….…. 135
1.3.3. Modélisation de la couche de surface……... 136

2. MODELISATION DE TRAVAUX URBAINS…….…. 138
2.1. Modèle de mise en œuvre……. 138
2.2. Modélisation des travaux au cours de la vie en service des ouvrages….…. 141

PARTIE II : ETUDE PARAMETRIQUE DE CAS-TYPES ……..…… 142

1. DESCRIPTION DES CAS-TYPES TRAITES……. 142
1.1. Cas de référence de voirie urbaine avec voie principale à fort trafic – matériaux classiques……..... 142
1.2. Paramétrage d'une voie principale de circulation……. 142
1.3. Paramétrage d'un couloir de bus…… 143
1.4. Paramétrage par fonctionnalité de voie de circulation……. 143
1.5. Hypothèses de calcul pour les cas testés avec matériaux classiques…… 143

2. RESULTATS D'INDICATEURS D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX …….. 144

PARTIE III : APPLICATION A UN REAMENAGEMENT URBAIN AVEC LAITIERS DE HAUTS FOURNEAUX…… 150

1. PRESENTATION DE L'ETUDE DE CAS……. 150
1.1. Choix d'un territoire et d'un type de voirie…….. 150
1.2. Cahier des charges de l'aménagement étudié…… 150
1.3. Dimensionnement des équipements…… 151

2. PARAMETRES DU MVU……. 152
2.1. Transports…… 152
2.2. Simulation des travaux…… 153
2.3. Système environnemental …….. 154

3. RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS URBAINE…….…. 155

4. COMPARAISON AVEC DES NIVEAUX DE POLLUTION DANS L'AGGLOMERATION…….. 156

CONCLUSION…….…. 157

DISCUSSION GENERALE SUR L'UTILISATION DES OUTILS……. 159

1. APPORT ET LIMITATION DES MODELES DEVELOPPES…… 160
1.1. Rappel des fonctionnalités des modèles et les principes de la démarche proposée…… 160
1.2. Géométrie des chaussées…….. 160
1.3. Evaluation environnementale…….. 161
1.4. Approche multicritère…….. 161

2. ETUDE DE LA PERCEPTION DES PREOCCUPATIONS ENVIRONNEMENTALES DANS LES RELATIONS ENTRE ACTEURS…….... 162

2.1. Réalisation de questionnaires à destination des acteurs routiers sur le recyclage de matériaux dans la route……. 162

2.2. Analyse des réponses aux questions…… 163

2.2.1. Evaluation du mode de réponse au questionnaire…… 163

2.2.2. Evaluation du contenu des réponses……. 164

CONCLUSION GENERALE……... 171

REFERENCES…….. 175

ANNEXES……. 185

PRESENTATION
DU CONTEXTE ROUTIER NATIONAL

Ce travail de thèse est consacré à l'évaluation environnementale globale des chaussées réalisées avec des matériaux alternatifs. Avant d'entrer dans la présentation du travail de thèse proprement dit, on rappelle ci-après quelques éléments de contexte en matière de projets routiers, qu'ils soient implantés en milieu interurbain ou urbain. Une attention particulière est portée à l'environnement et à la manière dont les acteurs le prennent en compte.

1. LES PROJETS ROUTIERS ET L'ENVIRONNEMENT

Le projet routier est un acte d'aménagement, un projet global. Il s'insère dans un processus de modifications du système socioéconomique et de l'environnement au profit d'une configuration conforme aux objectifs d'aménagement du territoire. Les décisions qui sont prises dans le cadre d'un projet global sont diluées dans le temps et réparties entre de nombreux acteurs. Néanmoins, certains choix sont déterminants pour le déroulement du projet et vont orienter les décisions ultérieures. Quant au choix d'un site d'implantation, ceci est un acte réellement politique et stratégique, une fois qu'un minimum de contraintes techniques ont été satisfaites. D'une façon générale, les spécificités des milieux abordés résident principalement en :

- des différences d'échelles liées aux linéaires de projet, à la densité d'occupation de l'espace, ou à l'acuité des contraintes,
- des thèmes environnementaux dont le degré de sensibilité et le poids respectif sont différents d'un milieu à l'autre (par exemple : la faune ou le bruit),
- le nombre des partenaires et autres acteurs concernés par la transformation de l'espace, donc de l'environnement,
- la nature et la complexité des systèmes, l'importance des relations entre les thèmes environnementaux eux-mêmes, et entre le processus d'élaboration du projet et son évolution environnementale.

Même si la différence de nature des milieux peut conduire à des méthodes ou à des pratiques différentes, on ne peut pas faire de distinction fondamentale entre le milieu interurbain et le milieu urbain pour décrire et expliquer la pratique des études d'environnement. Par ailleurs, la réalisation de l'ouvrage engendre des nuisances de chantier dont il convient de minimiser les impacts. Pour y parvenir, cette préoccupation doit être introduite dès la conception et à tous les stades des études. C'est au cours du chantier que se concrétisent les premières atteintes physiques à l'environnement en termes de consommations d'espaces, d'altération de l'environnement et du cadre de vie. Le chantier engendre des impacts bien distincts de ceux de l'infrastructure proprement dite et qui nécessitent la mise en œuvre de mesures spécifiques. Ces impacts sont souvent présentés comme marginaux (à l'échelle du projet) et temporaires (parce que produits dans un temps déterminé).

2. REGLEMENTATION

Le code de l'environnement fait désormais peser sur l'Etat, les collectivités territoriales ou leurs groupements, et les établissements publics en dépendant l'obligation de réaliser une évaluation environnementale des plans, schémas, programmes et autres documents de planification qu'ils adoptent (art. 122-4 du code de l'environnement, inséré par ordonnance n°2004-489 du 3 juin 2004). Ces documents, qui n'autorisent ou ne prescrivent pas directement les travaux ou projets, doivent induire une évaluation environnementale qui fait l'objet d'un rapport qui « identifie, décrit et évalue les effets notables que peut avoir la mise en œuvre du plan ou du document sur l'environnement » et « présente les mesures prévues pour réduire et, dans la mesure du possible, compenser les incidences négatives notables que l'application du plan peut avoir sur l'environnement » ; il « expose les autres solutions

envisagées et les raisons pour lesquelles, notamment du point de vue de la protection de l'environnement, le projet a été retenu. » (art. l22-6 code de l'environnement).

D'autres part, la réglementation environnementale parue au journal officiel (loi n° 92-646 du 13 juillet 1992) concernant les déchets, vise à limiter la mise en décharge aux seuls déchets ultimes, et ainsi à favoriser la généralisation du recyclage. Or, la mise en pratique du recyclage, malgré une faisabilité technologique avérée, reste encore peu évaluée car elle nécessite l'implication et l'adhésion de plusieurs acteurs dont les intérêts peuvent être contradictoires.

3. L'AIDE A LA DECISION

L'aide à la décision ne consiste que partiellement en une « recherche de la vérité » mais est plus souvent utilisée comme une aide à la réflexion et à la communication destinée au décideur. Elle l'aide à construire et à faire partager ses convictions. Les caractéristiques de l'aide à la décision ainsi que la conduite du processus dépendant fortement des objectifs fixés par le décideur pour qui elle est réalisée, il est donc nécessaire d'identifier clairement celui-ci avant de débuter une étude. Une des premières étapes du processus de décision consiste à définir le type de problème auquel un décideur se trouve confronté et le type de solution qu'il souhaite dégager. Le recours aux méthodes multicritères dans ce cadre d'étude présente plusieurs types d'avantages. En effet, elles permettent de prendre en compte différents points de vue ; ceux-ci s'expriment à travers l'importance accordée par chacun des acteurs aux critères de jugement considérés. Le but est de pouvoir orienter la réflexion vers un ensemble de solutions possibles dans le choix de matériaux susceptibles d'être réemployés dans la chaussée.

Dans le cas des projets d'infrastructures routières où la décision d'une administration routière peut être entravée par les recours ou les oppositions d'autres acteurs, il paraît difficile de parler du décideur comme étant un acteur indépendant. Ainsi, la concertation entre acteurs de prise de décision dilue en quelque sorte la responsabilité dans un ensemble complexe d'individus.

4. LE CONCEPT D'INDICATEURS ASSOCIES AU DEVELOPPEMENT DURABLE

Le concept de développement durable qui a émergé du rapport Bruntland a depuis été décliné comme un compromis entre trois contradictions fondamentales :
- compromis entre les intérêts des générations actuelles et celui des générations futures ;
- compromis Nord/Sud entre les pays industrialisés et les pays en développement ;
- compromis entre les besoins des êtres humains et la préservation des écosystèmes.

Dans le cadre de toute activité humaine, la prise en compte de ces trois contradictions implique : i) de pouvoir projeter dans le temps les actions entreprises hier ou aujourd'hui ainsi que leurs conséquences, ii) de tenir compte des territoires, au sein desquels les activités s'insèrent ou sont liées, et enfin iii) de pouvoir évaluer les conséquences économiques et sociales en balance (ou pas) avec les conséquences environnementales de l'activité. Une politique de développement durable implique que les décisions humaines soient guidées par ces principes.

Le rapport Brundtland et le sommet de la terre de Rio (Juin 1992) ont mis en avant le besoin d'indicateurs environnementaux afin de valider la performance des politiques socio-économique et environnementale. Ainsi les indicateurs servent à la fois à l'évaluation des actions et à la prise de décisions. Des indicateurs environnementaux et de développement durable ont alors été activement recherchés par des organisations internationales, notamment

l'OCDE, des ONG comme le WWF, mais également par la communauté scientifique réunie dans le groupe SCOPE (Scientific Commitee On Problems of the Environment).

L'utilisation d'indicateurs et d'un système les structurant se justifie pleinement dans le cadre de la construction et l'entretien des infrastructures routières. En effet elles impliquent des éléments d'appréciation liés au rôle économique des transports, à la sécurité publique et au cadre de vie, ainsi qu'à la préservation de l'environnement. Les conséquences des choix effectués, notamment en termes d'aménagement de l'espace, se répercutent dans le long terme. Depuis le stade des études préliminaires jusqu'à la réalisation des travaux, un projet routier fait l'objet de décisions successives (opportunité, budget, tracé…), selon une procédure progressive. Cette démarche nécessite différents choix qui s'insèrent dans un faisceau de contraintes environnementales, techniques et financières dans le souci du bon emploi des fonds publics et du service rendu à l'usager, ce qui rend le processus décisionnel complexe, du fait notamment de la multiplicité des acteurs. Dans ce contexte, des outils d'évaluation globale des infrastructures routières, visant à intégrer des indicateurs de développement durable sont développés au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Jullien et François, 2006). Leur objet consiste à élaborer des méthodes pour permettre la prise en compte des principes du développement durable aux différentes échelles territoriales jugées pertinentes.

5. ENJEUX GENERAUX DU TRAVAIL DE THESE

Les infrastructures routières sont l'objet, dans le contexte actuel de la valorisation des déchets de travaux publics, de toutes sortes d'attentions et d'intentions, justement parce qu'elles pourraient permettre de résorber des stocks de déchets considérables. De plus, le coût des granulats double environ tous les 20 kilomètres selon les régions (UNPG, 2004), cette ressource est ainsi recherchée de manière prioritaire à proximité des chantiers. Cependant, cette conjoncture favorable n'a pas provoqué une expansion très forte de l'utilisation de matériaux recyclés dans les infrastructures routières, depuis la mise en application de la loi sur les déchets en juillet 2002.

Pour les routes interurbaines, l'approche couplée technique/environnement/économie est suffisante pour évaluer des variantes de structures et d'entretien des routes, et l'aspect social intervient au niveau des variantes de tracés. Par contre, pour les voiries urbaines l'aspect social peut intervenir dès la considération des variantes techniques. L'intérêt de la population pour les diverses actions impulsées par les communes va croissant, notamment lorsque celles-ci sont susceptibles de générer des nuisances, des impacts environnementaux et/ou sanitaires.

L'utilisation d'un modèle d'évaluation globale peut apporter un éclairage au décideur selon des critères qui sont les siens et en lien avec le processus décisionnel du projet. L'évaluation recouvrant l'ensemble des étapes de construction et séquences d'exploitation et entretien, le maître d'ouvrage peut obtenir des éléments d'appréciation dans les domaines environnementaux, économiques et sociaux, et intervenir différemment dès le stade des études préliminaires. Le développement d'un tel outil peut également permettre de projeter dans le temps les actions entreprises ainsi que leurs conséquences économiques et sociales en balance (ou pas) avec les conséquences environnementales de l'activité.

CHAPITRE 1. PRESENTATION DES OBJECTIFS ET DE LA METHODE DE TRAVAIL

1. OBJECTIFS DU TRAVAIL DE THESE

1.1. Travaux antérieurs au LCPC

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de l'opération de recherche « approche globale de l'environnement dans le domaine routier » menée par le LCPC sur la période 2004 - 2008. La thèse qui est une des actions entreprise dans cette opération est cofinancée par l'ADEME et le LCPC et s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés en partenariat notamment sur l'utilisation de matériaux recyclés dans la route, projet OFRIR (http://ofrir.lcpc.fr) et le retour d'expérience sur les ouvrages routiers, projet CAREX (François et al., 2005).

Un premier outil d'évaluation environnementale appelé Module Routier Elémentaire a été développé dans le cadre d'une thèse précédente (Hoang, 2005). L'outil s'applique à des tronçons linéaires de longueur réduite (un kilomètre) d'infrastructures routières de type autoroutes interurbaines. Il est basé sur la méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie (ISO 14044), et notamment l'inventaire de cycle de vie pour l'évaluation des pressions environnementales, qui permet une évaluation des travaux routiers sur une durée de service choisie. Aujourd'hui de par son caractère modulaire et paramétrable, le MRE permet de s'adapter à la multiplicité des choix techniques liés à la construction et à l'entretien d'un ouvrage interurbain sur son cycle de vie. L'outil précédemment développé n'est cependant pas nécessairement assez abouti en 2005 pour être utilisé par les professionnels de la route. D'une part, il est limité aux infrastructures interurbaines, et d'autre part, il ne traite pas du cas des matériaux alternatifs. Enfin, dans l'optique d'un tel usage, il se doit de fournir des résultats d'évaluation lisibles pour un utilisateur non-spécialiste de l'environnement afin que celui-ci s'approprie l'ensemble des critères environnementaux possibles et puisse s'engager dans une véritable démarche d'analyse multicritère.

1.2. Objectifs

L'outil doit être étendu aux spécificités techniques du milieu urbain. L'approche proposée tient compte des acteurs routiers et de leurs pratiques, afin d'adapter l'outil à leurs besoins et de leur rendre accessible. Il s'agit de réduire le nombre de données environnementales sous forme d'indicateurs environnementaux puis d'obtenir un retour de ces différents acteurs sur l'accessibilité et l'utilisation potentielle de l'outil.

L'outil doit être étendu aux ressources alternatives. Ceci implique de pouvoir s'appuyer dès le départ sur un ensemble vaste et diversifié de données. D'abords éparses et brutes, elles sont amenées à se préciser au fil des analyses et à révéler leur propre sens dans le contexte où elles ont été recueillies.

2. PRESENTATION DE L'OUTIL EXISTANT A DEVELOPPER

2.1. La méthode des modules routiers

La méthode existante sur laquelle s'appuie ce travail de thèse, consiste à définir un tronçon routier type associé à un système pour lequel sont calculés des flux environnementaux et leur monétarisation, sur la base de la méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie. La méthode intègre des scénarios de terrassement, de construction et entretien de chaussées interurbaines type autoroutes avec des matériaux neufs. Différents modèles de procédés ont été développés afin d'évaluer les flux à partir des scénarios de travaux au cours du cycle de vie de l'ouvrage. Globalement, le MRE a été établi pour calculer les flux environnementaux dus aux travaux de terrassement, à la construction initiale, à l'exploitation et à l'entretien de la chaussée pour une

durée de service fixée. La démarche développée conduit à considérer successivement deux types de MRE : un MRE terrassement (25 km) et un MRE chaussée (1km). Le résultat global est la somme des contributions respectives de chaque module par tronçon d'autoroute de 1 km.

Le principe méthodologique du MRE est schématisé en *Figure 1 - 1*. Dans ce schéma :

- les ellipses représentent les paramètres pris en compte dans les pratiques routières, dans la conception et la réalisation des travaux.
- les différents scénarii explicitent la discrétisation spatio-temporelle du modèle, la discrétisatisation spatiale concerne les paramètres géométriques et de structure (identification des constituants et leurs propriétés), la discrétisation temporelle couvre les scénarii de mise en œuvre et d'entretien (comprenant les phases d'organisation de chantier)

La partie du modèle développée dans ce travail est encadrée en *Figure 1 - 1* en lien avec l'introduction de nouvelles structures à base de nouveaux matériaux.

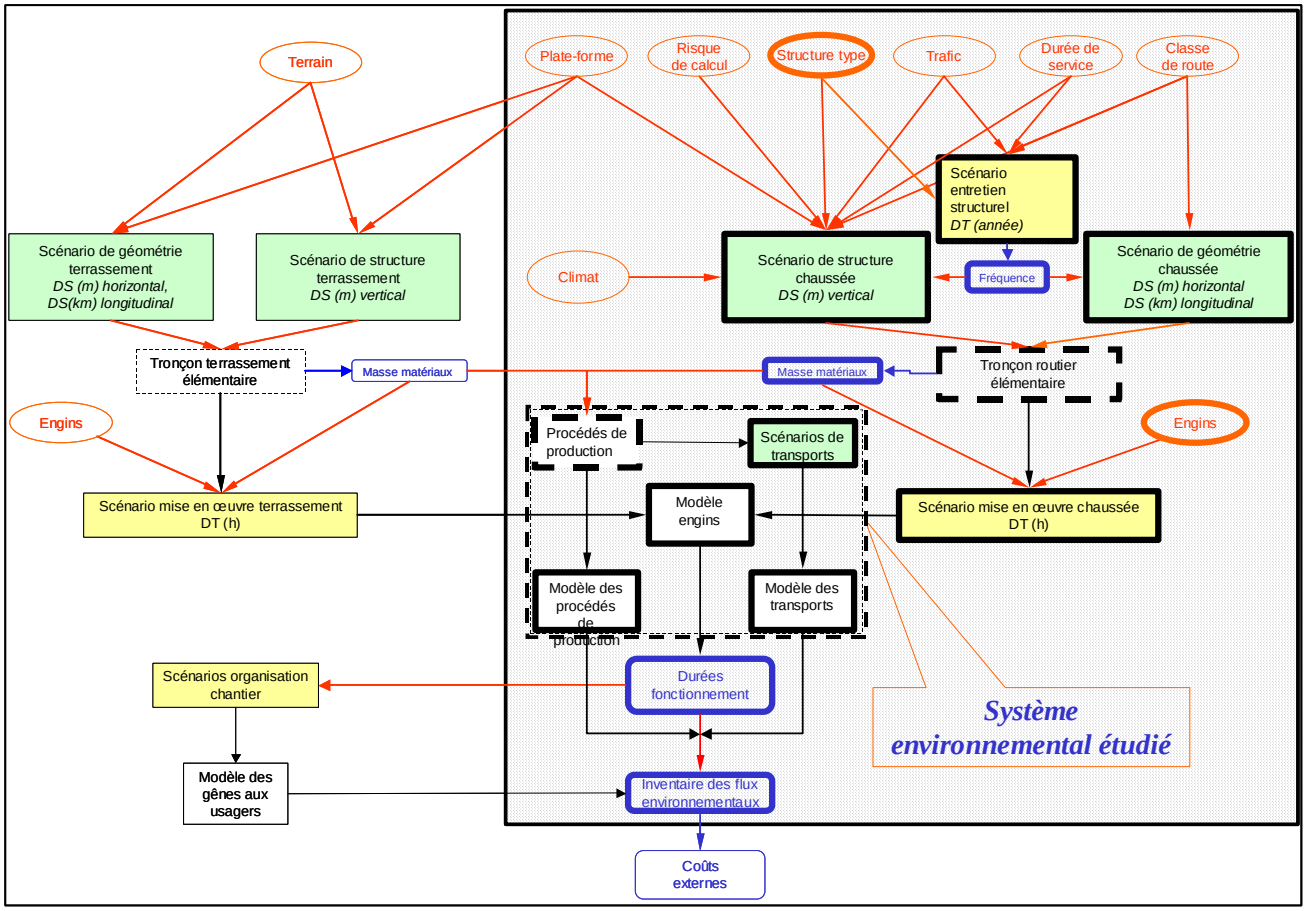


Figure 1 - 1. Prise en compte des procédés dans le cadre du Module Routier Elémentaire d'après (Hoang, 2005)

Le système environnemental étudié (*Figure 1 - 2*) comprend l'ensemble des sous-systèmes suivants :

- l'élaboration des matériaux au sein des industries (raffinerie, cimenterie, carrière et aciérie),
- les transports de matériaux, des engins et déchets,
- la fabrication des mélanges (en centrale d'enrobage et de béton),
- la construction et l'entretien (chantiers).

Le système environnemental utilisé pour la modélisation a été défini à partir des principaux flux de matière. Dans le cas du module routier, l'objet étudié est la route, et le procédé permettant de produire directement la route est le chantier de construction qu'il soit de terrassements, de chaussée neuve ou d'entretien dans son ensemble appelé procédé « construction ». Les masses des matériaux, données d'entrée du modèle, entrant dans la composition de l'objet étudié sont déterminées par la géométrie et la structure du tronçon élémentaire et permettent de définir les phases de transport entre les procédés. De façon générale, l'élaboration et l'entretien des matériels (engins et procédés) n'ont pas été inclus dans les systèmes associés aux procédés « construction », car ils sont considérés comme étant en dehors de l'objectif de l'étude qui est focalisée sur l'objet route.
D'autre part, si les flux d'énergie nécessaires au fonctionnement des procédés et des engins sont inclus, les procédés de production d'énergie ne le sont pas. Il en est de même pour les déchets dont les flux sont inclus mais pas les procédés de traitement ultérieurs. Hormis la carrière, les procédés d'extraction des matières premières ne sont pas inclus dans le système. Certains flux de matériaux ainsi que leurs procédés de production ont aussi été négligés du fait de leurs faibles masses, il s'agit des additifs ajoutés au ciment et au bitume. La *Figure 1-2*. présente à titre d'exemple le système associé au MRE de chaussée.

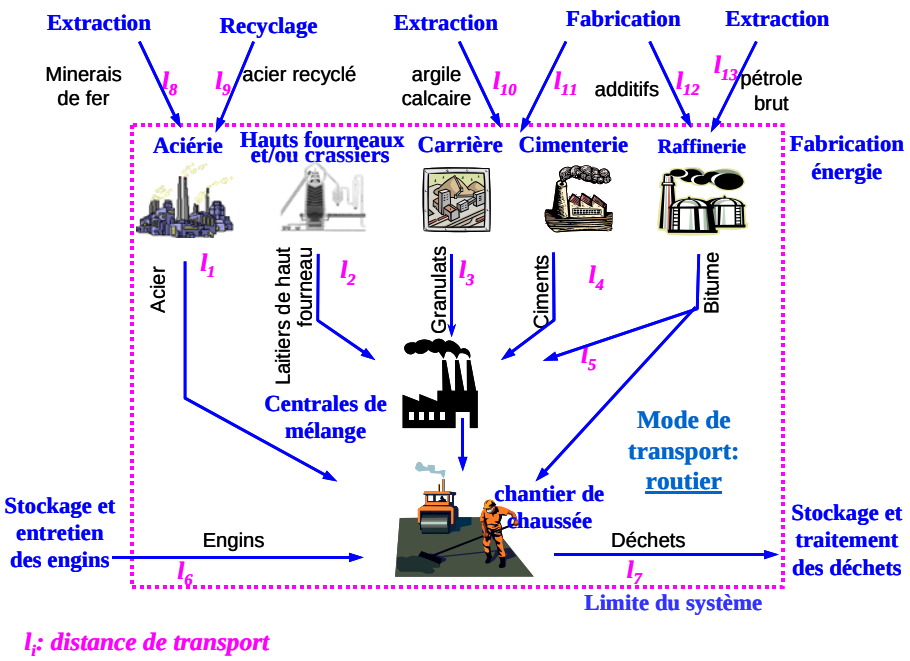


Figure 1 - 2. Système environnemental étudié pour le $MRE_{Chaussée}$

Le Module Routier Elémentaire a été développé à partir de modules séparant chaussées et terrassement :
- *La Modélisation des différentes phases de construction/entretien de la chaussée* qui consiste à reconstituer les phases de construction/maintenance des différentes couches de chaussée (technique de mise en œuvre et engins associés) et ceci pendant toute la durée de service prise en compte. Les paramètres de dimensionnement et entretien du corps de chaussée sont définis à partir du catalogue de structures (SETRA/LCPC, 1998).
- *Le calcul d'inventaire* qui consiste à répertorier et à quantifier les flux de consommations et de rejets, d'une part entre les différents sous-systèmes identifiés, d'autre part entre l'intérieur et l'extérieur du système. Le calcul d'inventaire est effectué à partir des données bibliographiques collectées. Le jeu de données utilisées est bien sur très important et peut être facilement modifié.

Un programme approprié à l'analyse, sous Excel (l'O-MRE), a été développé pour le calcul d'inventaire. Le programme s'applique aux cas de chaussées étudiées (bitumineuses, rigides et mixtes). L'ensemble des données de calcul sont introduites dans le programme (dimensions des coupes transversales de chaussée, matériaux, épaisseurs structurelles de chaussées, distances de transport…). Les flux environnementaux correspondant à une étape d'analyse des différents sous systèmes peuvent être représentés graphiquement à partir du programme.
Un exemple de flux d'inventaire calculé par le MRE proposé par Hoang (2005) est présenté dans la *Figure 1 - 3*. Les structures étudiées sont des Voies du Réseau Structurant supportant un trafic de 2000 PL/j/sens de voie ($TC6_{30}$) sur une plate forme PF3.

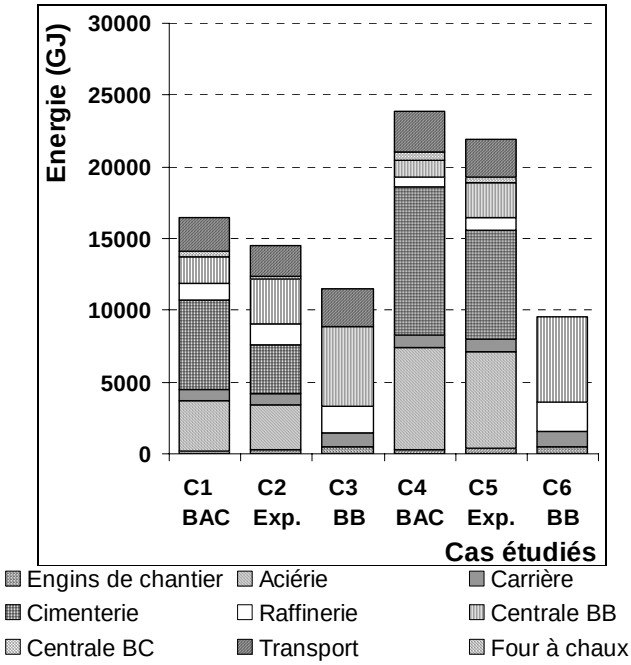


Figure 1 - 3. Consommation d'énergie des chaussées
(Valeurs cumulées pendant 30 ans ramenées à un km et à deux sens de circulation)
BAC : béton armé continu, Exp. : expérimentale mixte, BB : bitumineuse épaisse

L'approche méthodologique développée ici s'appuie sur l'outil existant, tout en étant fondée à la fois sur les pratiques des acteurs routiers rencontrés et les connaissances scientifiques et techniques acquises. Pour définir des scénarii de construction et entretien de structures de chaussées conventionnelles à base de matériaux alternatifs, il convient de s'appuyer sur des données fiables, facilement vérifiables et dont les sources sont connues.

2.2. Principes généraux d'extension de l'outil MRE et de développement d'un outil pour l'urbain

Les développements visés dans ce travail de thèse ont été réalisés en plusieurs étapes.
Etape 1 : définition des principes d'intégration d'un nouveau matériau. Ce point nécessite d'une part de prendre la mesure des pratiques des acteurs routiers en matière de recyclage et d'autre part d'acquérir des connaissances sur les procédés d'élaboration des ressources secondaires.
Etape 2 : intégration de nouveaux paramètres d'entrée dans le modèle. S'agissant de nouveaux matériaux, il s'agit d'une part de redéfinir les systèmes environnementaux et d'autre part d'enrichir la base de données dédiées. Pour aller au-delà de la seule analyse basée

sur les flux matières proposée dans le MRE, des indicateurs d'impacts environnementaux ont été sélectionnés et implémentés dans le modèle.
Etape 3 : développement d'un nouveau modèle adapté à des ouvrages urbains, on le nommera Module Voirie Urbain (MVU) pour le différencier de l'interurbain.
Etape 4 : analyse de sensibilité du modèle sur différents cas-type et études de cas. L'analyse de sensibilité concerne plusieurs points : celui de la sensibilité aux données environnementales entrées dans le modèle, celui du type de chaussée considérée (fonction et milieu abordé). Les études de cas quant à elles s'appuient sur des données recueillies sur des sites ciblés du réseau national, leurs paramètres sont issus des documents contractuels qui ont servi au marché de travaux.
La mise en oeuvre de ces étapes s'est faite progressivement selon la démarche proposée dans la *Figure 1 - 4*, en intégrant les éléments suivants :
Intégration des critères de recherche (Ni, numérotés de 1 à 5)
- N1 de nouveaux scénarii de construction ;
- N2 de nouveaux scénarii d'entretien ;
- N3 de nouveaux granulats ;
- N4 de nouveaux liants ;
- N5 de nouvelles techniques de mise en œuvre associée aux matériaux alternatifs ou à la réalisation en urbain.

Prise en considération des acteurs routiers (ARi, numérotés de 1 à 5)
- AR1 la solution technique choisie doit être réaliste et utilisée ;
- AR2 l'analyse des pratiques et critères de construction et d'entretien doit être prise en compte, ce qui peut être fait notamment par collecte de documents techniques, contractuels et normatifs ;
- AR3 la prise en compte de granulats alternatifs doit faire l'objet d'identification des procédés et processus d'élaboration grâce à des visites de plate forme de recyclage ;
- AR4 la prise en compte de retraitement en place par l'ajout de liant adéquat doit être justifiée ;
- AR5 la prise en compte de procédés de fabrication des mélanges doit faire l'objet de collecte de données dédiées sur site de centrale d'enrobage ou de centrale à béton.

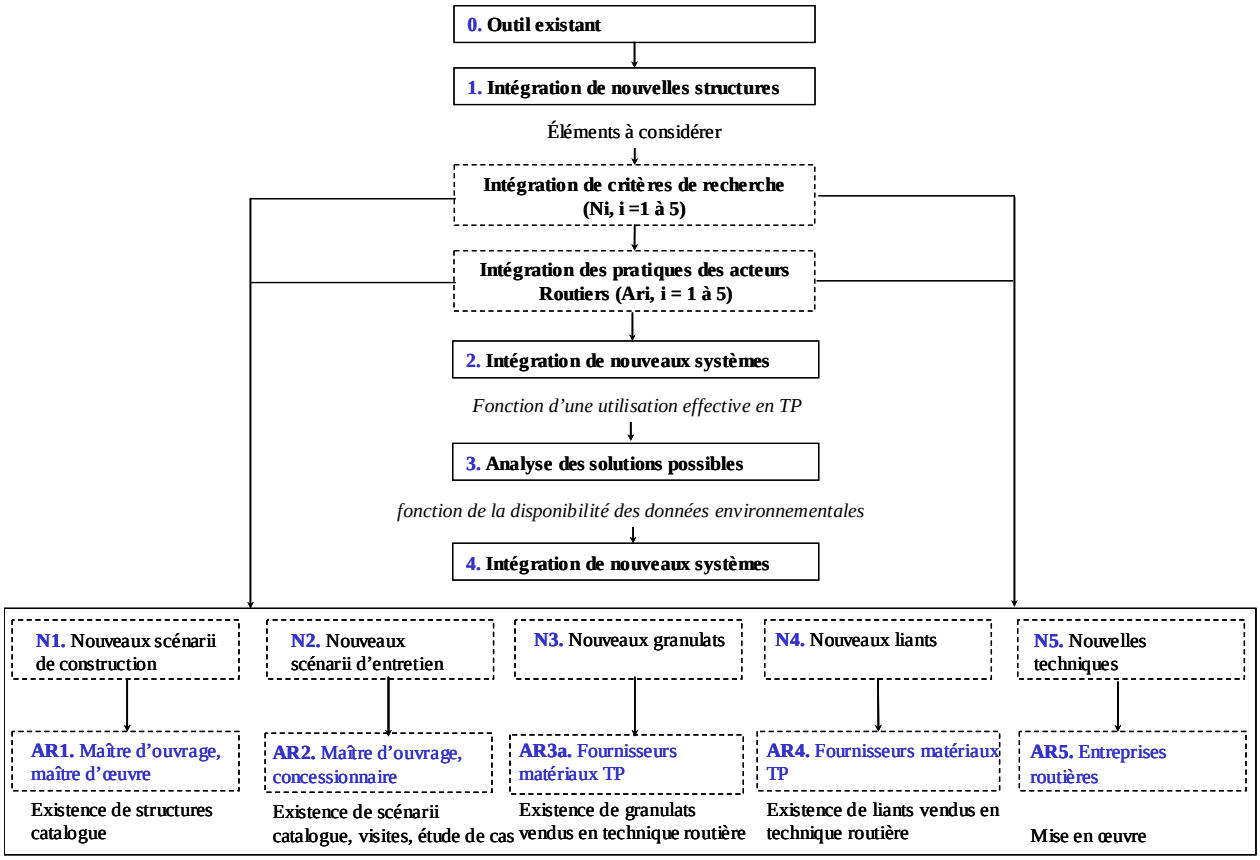


Figure 1 - 4. Démarche générale de développement de l'outil pour des matériaux alternatifs. Méthode d'intégration du point de vue des acteurs

L'ensemble des échanges qui ont lieu entre les différents acteurs contribuant à la réalisation de projets routiers quels qu'ils soient ne peut être mis a priori par écrit, car ils sont aussi clairement dépendants des acteurs eux-mêmes et de leur sensibilité que du contexte local dans le cadre duquel les échanges se déroulent. Par contre, ces échanges sont régis par des règles, des usages et des pratiques qui fondent le déroulement des projets. Ainsi, pour aborder cette étape des acteurs et des critères qui fait partie du développement visé au cours de ce travail, une série d'entretien avec différents acteurs a été entreprise afin d'ancrer la démarche sur des bases plus larges que celles fournies par la seule consultation des documents techniques. L'engagement du LCPC dans le cadre du Pôle Génie Civil Ouest (PGCO) a servi de point d'ancrage à ce travail. Des entretiens semi-directifs et des visites de sites nous ont semblé nécessaire pour poursuivre le développement de l'outil. Ceci nous a permis de connaître avec précision les paramètres indispensables à l'étude, à savoir : le type de structure mis en place, les entretiens réalisés avec leurs fréquences d'intervention ainsi que les techniques de mise en oeuvre.

La démarche méthodologique d'introduction de matériaux recyclés dans l'outil impose de procéder à une collecte de données de procédés suffisamment large pour permettre de choisir des indicateurs environnementaux adaptés. L'élaboration de nouveaux indicateurs s'est appuyée sur les connaissances ACV de la littérature et acquises au LCPC ainsi que sur la perception des acteurs routiers rencontrés sur le recyclage.

3. ORGANISATION DU MEMOIRE

Dans le deuxième chapitre, une synthèse bibliographique a été effectuée regroupant un ensemble d'éléments sur les ouvrages routiers, l'état des pratiques de valorisation de matériaux alternatifs dans les chaussées et de gestion du patrimoine routier. Des éléments sont ensuite rassemblés sur les méthodes multicritères d'aide à la décision et les méthodologies globales d'évaluation appliquées ou applicables à la route : méthodes relevant des sciences de l'homme et de la société, méthodes d'évaluation économique et méthodes d'évaluation environnementale.

Le troisième chapitre est consacré aux résultats de simulation du modèle interurbain pour les différents cas de chaussées étudiés avec des matériaux alternatifs retenus pour l'étude. Ensuite, l'analyse des critères de conception des acteurs routiers à partir d'interview semi-directives est faite et suivie d'une proposition d'un jeu d'indicateurs d'impacts environnementaux pour l'outil. Enfin, une analyse de sensibilité du modèle au jeu de données d'entrée est traitée. Pour un type de matériau alternatif choisi, une application est proposée pour un tronçon d'autoroute.

Le quatrième chapitre est centré sur l'étude des voiries urbaines et de leurs matériaux constitutifs dans des conditions classiques d'usage afin d'être en mesure d'étudier différentes solutions. Les spécificités prises en compte sont : diversité des géométries et matériaux associés, pluralité des trafics, mise en œuvre de mesures facilitant l'intégration environnementale de l'infrastructure. Ce chapitre permet de montrer l'écart d'effet environnemental entre chaque type de voie : trottoir, voie de stationnement, voies de circulations, ce qui est tout à fait spécifique aux voiries urbaines. Une étude de cas est proposée.

Le cinquième chapitre est une discussion générale présentant les limites du modèle développé, ainsi que de la perception de différents acteurs routiers d'un jeu d'indicateurs environnementaux pertinents, rassemblant les indicateurs environnementaux proposés afin de mettre en perspective les modélisations proposées et les pratiques routières.

CHAPITRE 2. DE L'ECHELLE DU PROJET A CELLE DU MATERIAU DE CHAUSSEE – ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

INTRODUCTION

Une analyse des critères décisionnels propres à chaque acteur dans l'ensemble du processus décisionnel est nécessaire avant tout développement additionnel. Ces éléments nous ont donc amené à l'examen détaillé de ces critères. Ainsi, nous nous sommes attachées à identifier dans un premier temps, d'une part, l'ensemble des étapes décisionnelles correspondant à l'élaboration d'un projet routier, et d'autre part à la fonction de chacun des acteurs impliqués dans ce projet. Une analyse des rôles des acteurs dans le processus décisionnel est ensuite établie afin d'élaborer une liste de critères de décision permettant d'alimenter nos réflexions.
Le recyclage et la réutilisation des déchets dans les voiries provoquent une modification dans la profession du fait des nouvelles techniques qui en découlent. Progressivement, on commence à observer une profession nouvelle centrée sur les deux actions combinées de tri et d'élaboration. Il en est de même au niveau des professions routières proprement dites, avec développement des techniques de retraitement et de recyclage des matériaux de chaussées. Cette évolution correspond à une technicité plus pointue pour compenser l'hétérogénéité amont de ces matériaux. En effet, le recyclage implique une préparation du résidu afin d'en faire un produit à part entière, condition de pérennité de la filière.

Ce chapitre présente dans les différents domaines abordés des éléments bibliographiques destinés à développer les outils modules routiers d'évaluation globale à destination de la maîtrise d'ouvrage. La première partie rappelle les règles de conception utilisées pour les projets et ouvrages routiers. L'utilisation éventuelle d'un matériau alternatif en technique routière dépendant de ses aptitudes et de la disponibilité du gisement, la deuxième partie recense les pratiques routières et les critères de valorisation de ces matériaux dans les chaussées. Enfin la troisième partie présente les éléments méthodologiques d'évaluation pour l'aide à la décision. Dans ce travail il s'agit de développer un outil d'aide à la réflexion qui s'articule avec l'aide à la décision (en aval), les pratiques de recyclage, les acteurs routiers, et les principes de l'évaluation globale dans une perspective de développement durable.

PARTIE I : CONCEPTION DES PROJETS ET DES OUVRAGES ROUTIERS

Il s'agit, en premier lieu, d'évaluer et synthétiser séparément l'ensemble des actions relatives à chaque étape du projet, dans la perspective de décliner ensuite les actions recensées pour les différents acteurs du projet en critères, afin de dégager différents points de vue et axes d'évaluation dans la perspective du développement d'un outil multicritère d'évaluation des pratiques routières. Les résultats de ces réflexions sont présentés en s'appuyant sur la définition de catégories de critères par acteur du projet.

1. ANALYSE DU PROCESSUS DECISIONNEL RELATIF A UN PROJET ROUTIER

1.1. Contexte

Au stade dit des études de projet, consécutives à la déclaration d'utilité publique, le « sous-dossier entretien », établi avec le responsable de la gestion des routes (maître d'ouvrage), devrait préciser les points à considérer dans la maintenance et le coût des diverses interventions. En fait, on constate à plusieurs reprises lors de contrôles que les dossiers d'Avant Projet Sommaire ne contiennent pas de dossiers d'entretien ou qu'ils se bornent à chiffrer les disponibilités financières. Il existe de multiples types de projets routiers qu'il est intéressant de classer selon les modalités suivantes :

- le territoire environnant et les milieux traversés qui lui sont associés, on peut aussi distinguer les projets urbains des projets interurbains,
- son articulation avec la vie de l'infrastructure, il peut s'agir d'une *construction neuve,* d'un nouvel *aménagement*, ou de l'*entretien* d'une route existante ;
- la maîtrise d'ouvrage concernée, celle-ci est dans la majeure partie des cas, rattachée à une entité publique (état, département, commune ou communauté de communes) mais elle peut être aussi privée.
Au travers d'un ensemble d'indicateurs, l'échelle temporelle permet une décomposition chronologique du début de la conception du projet et de sa planification jusqu'à la phase de réalisation. L'échelle spatiale situe quant à elle le projet au niveau d'un réseau routier : il peut s'agir d'un aménagement linéaire, ou même d'un tronçon très localisé ; les modalités d'intervention sont fixées par des questions de service aux usagers ou aux riverains.

Les analyses de statistique descriptive décrites par (Jeanneaux et Kirat, 2005) ont en particulier permis de mesurer l'activité contentieuse par objet :
i) les *projets d'infrastructures* impliquant une enquête ou une déclaration d'utilité publique, qui renvoient aux conflits liés à des opérations ayant une dimension d'utilité publique (construction ou agrandissement d'infrastructures de transport terrestre, aérien ou maritime ou d'infrastructures de production ou de transport d'énergie : barrage hydraulique, ligne haute-tension) ;
ii) les *règles d'urbanisme et d'occupation des sols*, qui concernent des conflits relatifs aux plans d'occupation des sols et aux aménagements fonciers et aux permis de construire ou autres documents d'urbanisme ;
iii) les *activités réglementées*, notamment les installations classées pour la protection de l'environnement relevant de la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976. Plus généralement, sont concernées toutes les activités supposant une autorisation administrative d'exploitation ou de rejets ;
iv) l'*environnement*, pris dans trois composantes: les nuisances olfactives ou sonores, la pollution de l'air, de l'eau ou du sol et la dégradation du milieu naturel touchant la faune ou la flore sauvages ;
vi) d'*autres objets* de conflits tels que l'expropriation pour cause d'utilité publique, les restrictions d'accès à des parcelles ou propriétés, la valeur du foncier bâti ou non bâti, les troubles ordinaires de voisinage.

Dans le système institutionnel français, rares sont les situations de développement local dont la concrétisation échappe à l'intervention de la puissance publique, qu'il s'agisse des collectivités territoriales, des services extérieurs de l'Etat ou de l'administration centrale.
L'intervention publique est plus ou moins directement liée au processus de développement, mais elle est toujours présente. On peut tenter d'en établir une typologie, qui suit une échelle de réglementation croissante :
- le développement de l'attractivité du territoire communal pour des populations susceptibles de s'y installer suppose la réalisation d'opérations d'aménagement et de viabilisation de parcelles susceptibles d'accueillir des maisons ou immeubles d'habitation, ainsi que la délivrance d'un permis de construire par le maire ;
- l'implantation d'une entreprise industrielle ou commerciale ordinaire est *a minima* dépendante des règles d'urbanisme et suppose, de ce fait, une décision de la collectivité locale du territoire concerné : l'octroi d'un permis de construire ou d'un certificat d'urbanisme positif, le cas échéant une délibération du conseil municipal permettant de réviser le plan d'occupation des sols – désormais plan local d'urbanisme – de manière à rendre possible l'implantation de l'entreprise ;

- l'implantation ou l'extension d'une entreprise industrielle ou agricole soumise à une réglementation spéciale (installations classées pour la protection de l'environnement relevant de la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 et du décret n° 77-1133 du 21 septembre 1977, installations relevant de la directive n° 96/82/CE dite SEVESO) présuppose une autorisation administrative, généralement de la compétence du préfet, et la conduite préalable d'une étude d'impact environnemental ;
- la création ou l'extension d'ouvrages ou d'infrastructures de transport terrestre (ponts, routes, autoroutes, voies de chemin de fer), aérien ou de production ou de transport d'énergie (centrales électriques, barrages, lignes haute tension) relèvent d'un régime de réglementation qui en font des opérations d'utilité publique, qui présupposent (le cas échéant) la mise en oeuvre de procédures d'expropriation, la conduite d'une enquête publique, une déclaration d'utilité publique et l'intervention de l'administration au nom de l'intérêt général.

1.2. Identification des acteurs d'un projet routier

Le terme « acteur d'un projet » (Tille, 2000) concerne l'ensemble des individus, des collectivités, et des personnes morales privées ou publiques qui participent à l'élaboration du projet. Cette définition n'a pas été utilisée comme telle dans cette étude, car la notion d'individus reste difficilement applicable. En effet, au travers de nos contacts avec différents acteurs, il s'est révélé très courant de constater qu'un même individu pouvait endosser plusieurs rôles, et que l'on ne pouvait le distinguer d'un autre pour analyser son rôle que sous l'angle de ses fonctions dans le processus décisionnel et non de ce qu'il représente en tant qu'individu. Ainsi nous avons attribué le terme « acteur » à une fonction bien définie du processus décisionnel, sachant que cette fonction peut être remplie par une personne physique ou morale. Les acteurs et leurs fonctions identifiés dans l'élaboration d'un projet routier sont détaillés ci après.

Le maître d'ouvrage : cette fonction est remplie par une personne morale pour le compte de laquelle un ouvrage est construit (article 2 de la loi MOP). La maîtrise d'ouvrage doit mener ou commander des études de faisabilité et d'opportunité, définir un programme, arrêter une enveloppe financière prévisionnelle, conclure avec **la maîtrise d'œuvre** et les **entrepreneurs** qu'elle choisit les contrats ayant pour objet les études et l'exécution des travaux. Selon le type de projet à conduire, la maîtrise d'ouvrage peut disposer ou non en interne de l'expérience et des compétences nécessaires. Dans certains cas, elle peut être amené à rechercher une assistance à l'extérieur, vers l'acteur que nous appellerons **assistance à maîtrise d'ouvrage**, qui peut être de nature très diverse : l'étude prospective, la programmation, la conduite de projet, l'accompagnement d'une réalisation, l'aide à la gestion de l'exploitation, aide juridique, l'expertise environnementale.

Le maître d'œuvre : cette fonction est remplie par une personne morale choisie par la maîtrise d'ouvrage. Le maître d'œuvre a la charge et la responsabilité de la conception et du contrôle d'exécution de l'ensemble des ouvrages à réaliser, notamment celles de s'assurer du respect des choix arrêtés par la maîtrise d'ouvrage, de la réglementation, des stipulations contractuelles et des règles de l'art. Il participe à la traduction des choix de la maîtrise d'ouvrage en termes de conception. Il assiste la maîtrise d'ouvrage dans la passation des contrats de travaux, et il s'assure, lors des opérations de réception, de la bonne exécution et de la conformité de l'ouvrage. A ce titre, il concourt à la qualité du projet, du délai et du coût et assure le rôle de coordination des entreprises et de direction des contrats de travaux jusqu'à la réception. La maîtrise d'œuvre peut s'appuyer sur des personnes réalisant des expertises nécessaires à la réalisation de sa mission (compétences techniques et économiques). Ces expertises font partie de la maîtrise d'œuvre, nous les appellerons **prestations externes**.

L'entrepreneur routier : cette fonction ne fait l'objet d'aucune définition dans les textes. Son activité est régie par les termes contractuels du marché. L'entrepreneur est chargé d'exécuter les travaux prévus au marché ou de les faire exécuter par des tiers **sous-traitants**. La définition de cette fonction est plus ou moins large, elle exclut parfois la maîtrise de chantier (hypothèse du projet mis au point par le maître d'œuvre ou réalisation des travaux par marchés séparés), et elle s'étend parfois à la conception de l'ouvrage (cas des marchés de conception-réalisation prévus aux articles 37 et 69 du code des marchés publics.

Le fournisseur : cette fonction se distingue de celle du **sous-traitant** en ce qu'elle n'assure pas directement la réalisation des travaux, mais se borne à l'exécution d'une prestation mobilière (vente de matériaux ou de matériel, mise en œuvre de procédés, transports, services…).

L'exploitant : cette fonction concerne la phase d'exploitation et de la maintenance de l'ouvrage. L'exploitant peut être le maître d'ouvrage, ou une entité séparée faisant l'objet d'un contrat spécifique avec le maître d'ouvrage.

Entités associatives : ces acteurs regroupent plusieurs fonctions selon les intérêts qu'ils défendent. Il peut s'agir des utilisateurs de la route, **les usagers**, concernés essentiellement par l'étape d'exploitation. Il peut s'agir des personnes morales ou physiques qui séjournent durablement à proximité de la route, **les riverains**. Il peut aussi s'agir **d'associations de défense de l'environnement**, dont la portée est locale, nationale ou internationale. Ces différentes fonctions ne sont pas réglementées mais peuvent avoir une influence directe dans le processus décisionnel, dans le cas d'une concertation, ou bien indirecte par le canal politique.

La prise en compte des différents acteurs dans notre approche se réfère aux différences entre deux grands types de territoires : interurbains et urbains. En zone interurbaine, les **entités associatives** interviennent a minima dans le cadre des procédures de déclaration d'utilité publique définies par la loi n° 83-630 Bouchardeau (1983), elles peuvent être associées au processus décisionnel à l'initiative du maître d'ouvrage. Les décisions portent essentiellement sur le tracé et concernent directement l'ouvrage routier. En zone urbaine, les choix d'aménagements sont déterminés dans le cadre des plans locaux d'urbanisme, dont les décisions sont prises par la voie politique, dans laquelle l'entité associative peut avoir une influence indirecte. Le plan local d'urbanisme ne concerne pas un projet routier mais l'ensemble des aménagements : il est à l'origine et enclenche le processus décisionnel du projet routier, sans y être inclus directement. Ainsi, ce type d'acteurs n'est pas inclus dans l'approche qui est développée en milieu urbain, car leur influence est supposée avoir lieu en amont du projet routier.
Des différenciations importantes des trajectoires spatiales et économiques des territoires sont à l'œuvre. Certains départements s'orientent vers une prédominance de ce que nous appelons une économie résidentielle, exprimée par des formes de sanctuarisation d'espaces dont l'attribut principal est la qualité de vie. Cette catégorie de territoires se différencie nettement des départements orientés dans une trajectoire de développement économique où se combinent des fonctionnalités antagonistes et où des conflits d'usage importants s'expriment. Ainsi, nous formulons l'hypothèse que si, à l'échelle micro, des phénomènes d'interpénétration et de juxtaposition des fonctionnalités existent avec plus ou moins d'intensité dans tous les territoires, ils s'inscrivent dans une dynamique spatiale d'ensemble marquée par des différenciations et des spécialisations spécifiques.

1.3. Identification des étapes du processus décisionnel

Le projet routier peut être décomposé en trois grandes étapes : les études de planification et de conception, la réalisation, et l'exploitation. Chacune de ces grandes étapes est composée elle-même de plusieurs sous étapes, comme détaillé dans la *Figure 2 - 1*. La planification et la conception visent à établir au travers des étapes d'études d'opportunité, de planification, d'avant-projet puis de projet définitif, l'ensemble des contraintes auxquelles le projet doit répondre, et les choix techniques qui en découlent. Cette procédure est essentiellement réglementée par la loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 dite « loi MOP ». Les dispositions de la présente loi sont applicables à la réalisation de tout ouvrage de bâtiment ou d'infrastructure ainsi qu'aux équipements industriels destinés à leur exploitation dont les maîtres d'ouvrage sont l'Etat et ses établissements publics, ainsi que les collectivités territoriales. Toutefois, les dispositions de la présente loi ne sont pas applicables aux ouvrages destinés à une activité industrielle dont la conception est déterminée par le processus d'exploitation. Un décret en Conseil d'Etat détermine les catégories d'ouvrages mentionnés au présent alinéa et aux ouvrages d'infrastructure réalisés dans le cadre d'une zone d'aménagement concerté ou d'un lotissement au sens du titre premier du livre III du code de l'urbanisme ;
Lorsqu'ils sont destinés à s'intégrer à des constructions relevant d'autres régimes juridiques, les ouvrages édifiés par les organismes énumérés à l'article L. 411-2 du code de la construction et de l'habitation peuvent être dispensés de tout ou partie de l'application de la présente loi. Cette dispense est accordée par décision du représentant de l'Etat dans le département.
Lorsque l'ensemble des choix techniques est arrêté, la procédure de réalisation, qui comprend les appels d'offres, l'exécution et la réception des travaux, est réglementée par le Code des Marchés Publics. Enfin l'exploitation de la route et son entretien ne relèvent pas d'une procédure réglementaire, mais reste à l'initiative de l'acteur qui en a la charge.

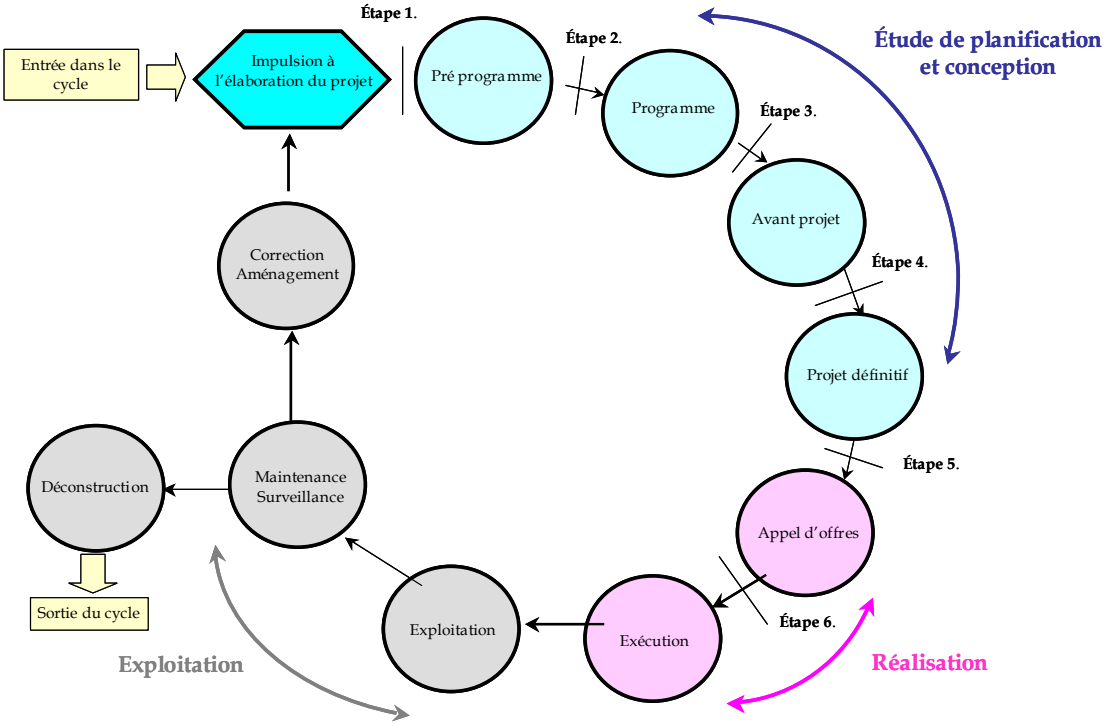


Figure 2 - 1. Schéma général de déroulement d'un projet routier

1.4. Analyse du rôle des acteurs dans le processus décisionnel

Le schéma d'élaboration d'un projet routier et ses acteurs ayant été identifiés, il s'agit ensuite de comprendre le rôle de chacun des acteurs dans le processus décisionnel et les enjeux de leurs actions afin d'identifier leurs critères et axes de travail. Les différentes étapes décisionnelles d'un projet routier en lien avec les acteurs concernés, ont été synthétisées ci-après à partir des références disponibles (MIQCP, 1994), (MIQCP, 1998), (MIQCP, 2005), (MIQCP, 2006), (Bloch, 2005 a.), (Bloch, 2005 b.), loi MOP n° 85-704, (code des marchés publics, J.O. 2004). Cette synthèse recouvre les deux grandes phases d'étude et de réalisation du projet représentées en *Figure 2 - 1*, la phase d'exploitation n'y figure pas.

La dynamique du processus décisionnel est jalonnée de temps forts où sont arrêtées de multiples options conditionnant ce que sera la décision globale. Celle-ci apparaît alors comme la synthèse des diverses options prises au cours du processus et le choix final n'englobe qu'une faible part de ce qui constitue réellement la décision. Une analyse du rôle de chaque acteur à chaque étape, détaillée ci-après en s'appuyant sur l'ensemble des objectifs et contraintes s'inscrit dans une logique d'action. Rendre compte de ces logiques d'action, c'est rechercher ce qui fonde les choix des acteurs, c'est comprendre quelles rationalités sont à l'œuvre derrière chaque action. Il s'agit de recenser les éléments et délimiter le système dans lequel chaque acteur a la possibilité d'agir. De même, l'étape correspondant à l'impulsion préalable à l'élaboration du projet est une étape qui précède le projet. Elle n'en fait pas partie. Cependant, elle influence nettement les caractéristiques du projet. Une infrastructure routière est la concrétisation d'une expression purement politique de satisfaction de certains besoins individuels ou collectifs. Le décideur, qui est généralement une administration publique s'occupant des infrastructures routières, donne l'impulsion à l'élaboration du projet. L'examen d'opportunité du projet consiste à vérifier si cette dernière est fondée. Le débat qui est ainsi ouvert a pour but de donner au décideur une vue d'ensemble des conséquences de la réalisation d'une infrastructure routière. La faisabilité ou les aspects financiers du projet ne sont pas traités dans cette étape car ils sont admis à ce stade comme n'étant pas déterminants. Comme le précise L. Veuve, cité par Tille (2000), si ce n'était pas le cas, l'examen d'opportunité n'aurait aucune raison d'être.

1.4.1. Etudes de pré-programmation (ou examen d'opportunité)

Le contenu et le déroulement des tâches à accomplir pendant cette phase ne peuvent pas faire l'objet d'une description détaillée applicable à tout ouvrage. Ils dépendent du contexte de l'opération envisagée. Seul l'objectif d'arriver à un pré-programme reste le même. Parmi les éléments qui constituent le contexte, on peut citer le tracé de l'infrastructure, ses fonctions (nombre de voies, gabarit, charge, site propre pour les deux roues) et qualité de service à remplir, les données géotechniques du site, le contexte politique, social, urbain et économique du projet. Les études de pré-programmation se terminent par l'établissement du pré-programme. C'est un document de synthèse des études de pré-programmation définissant le projet du maître d'ouvrage. Dans le cas présent des infrastructures routières, il comporte les principaux éléments suivants :

- présentation de l'opération : nature, principaux acteurs, genèse et cohérence dans le réseau routier ;
- fonctions et qualité de service de l'ouvrage : expression fonctionnelle des besoins, exigences techniques du maître d'ouvrage (vitesse, charge, gabarit,…), qualité de service à l'usager (gratuité ou péage, fermeture pour maintenance…) et aux riverains (niveau de bruit en fonctionnement, nuisances en phase chantier,…);
- qualité du projet : attentes du maître d'ouvrage en termes d'image, de symbole d'insertion et de pérennité de l'ouvrage ;

- contexte physique : périmètre des études, contraintes majeures (géologiques, géotechniques et d'environnement), données et études existantes ;
- évaluation sommaire du coût de l'ouvrage et du budget à mobiliser pour l'opération ;
- calendrier prévisionnel d'études et de réalisation de l'ouvrage.

Le maître d'ouvrage est le seul acteur impliqué dans cette phase. Il peut être amené à rechercher une assistance. Il s'agit de répondre à un besoin, un problème ou un changement de situation, de définir l'objet du projet et de mener (commander) les études de faisabilité et d'opportunité.

A l'issue de cette première étape s'effectue l'attribution de commande à maîtrise d'œuvre. Les procédures de choix du maître d'œuvre, permises par le code des marchés publiques, et énoncées à son article 74, peuvent être classées en deux familles différentes : l'une permet de choisir un maître d'œuvre avant que ce dernier ne propose des débuts de solutions (procédure négociée) qui représente le cas le plus général, l'autre permet de choisir un maître d'œuvre sur la base d'une proposition de solution. Cette dernière démarche n'est possible que dans le cadre d'une procédure de concours ou de marchés de définition simultanés. Cette procédure ne donne son plein effet que dans des cas particuliers, pour des opérations complexes ou prestigieuses d'aménagement urbain, où interviennent plusieurs maîtres d'ouvrage, et où subsistent des incertitudes majeures sur les fonctions à remplir par l'équipement public.

La procédure négociée offre la possibilité d'un dialogue fructueux entre le maître d'ouvrage et le futur maître d'œuvre pour l'élaboration du contrat qui va les lier tout au long de l'opération.
La procédure négociée spécifique décrite à l'article 74 du code des marchés publics se décline en trois temps : choix des candidats admis à négocier, négociation et attribution du contrat de maîtrise d'œuvre.
Choix d'au moins trois candidats admis à négocier : un avis d'appel public à la concurrence est obligatoire en application de l'article 40 du code des marchés publics. Pour définir la composition du dossier de candidature on se réfère aux articles 45 et 46 du code des marchés publics qui définissent les pièces administratives à fournir. Il ne peut être exigé que des renseignements permettant d'évaluer les capacités du candidat. Un jury dont la composition est définie à l'article 25 du code des marchés publics est chargé de proposer au maître d'ouvrage une liste d'au moins 3 candidats admis à négocier.
La négociation est l'occasion d'instaurer un dialogue prospectif sur l'opération projetée. Il s'agit d'enrichir la perception, par le maître d'ouvrage des aptitudes respectives des équipes candidates à traduire dans l'espace le programme proposé et symétriquement la perception, par les candidats, des objectifs et des contraintes du maître d'ouvrage. Le maître d'ouvrage transmet le pré-programme, l'enveloppe financière (et les modalités de son élaboration) et le projet de marché de maîtrise d'œuvre aux équipes admises à négocier. Après avoir laissé aux candidats le temps de prendre connaissance des documents qu'il leur a adressés, le maître d'ouvrage reçoit séparément chaque équipe. Chaque équipe fait état de sa perception des objectifs du maître d'ouvrage tels qu'ils ressortent des documents fournis (programme, calendrier prévisionnel, enveloppe financière, projet de contrat…) et expose sa manière d'aborder la problématique posée et l'organisation qu'elle envisage de mettre en place pour exécuter sa mission sous forme d'une offre.
A l'issue d'une deuxième rencontre, le maître d'ouvrage attribue le marché (pour l'Etat), ou présente le résultat de la négociation à son assemblée délibérante qui attribue le marché (pour une collectivité territoriale).

Le maître d'ouvrage conclut au cours de cette étape le choix de son maître d'œuvre.
Les acteurs impliqués dans cette phase sont le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre.

1.4.2. Du pré-programme au programme (planification)

Les études préliminaires doivent permettre au maître d'ouvrage de fixer un programme et une enveloppe financière réalistes. Il s'agit de trouver la meilleure adéquation entre les différents objectifs poursuivis, les contraintes extérieures imposées ou délibérément choisies et les solutions techniques vraisemblables, tout en restant conscient que toutes les solutions ne peuvent pas être balayées de manière exhaustive. Des études préliminaires sous la responsabilité du maître d'œuvre explorent une ou plusieurs solutions techniques, suffisamment détaillées, pour permettre de répondre aux fonctions, exigences et contraintes du pré-programme. Ces solutions doivent être élaborées avec suffisamment de précision et de justification pour établir leur faisabilité, notamment sur le plan économique. Ces études ont un champ d'investigation très large, puisqu'elles couvrent des sujets très variés tels que : la topographie, la géotechnique, l'hydraulique, l'acoustique, l'environnement, le paysage, le climat, le contexte urbain et socio-économique, historique et culturel. L'interactivité maître d'œuvre / maître d'ouvrage peut conduire le maître d'ouvrage à amender certains des objectifs ou exigences énoncés dans le pré-programme, afin de les rendre compatibles avec des contraintes mises en évidence par les études préliminaires. Ainsi, le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre chargé des études préliminaires travaillent par approches successives.

Le programme est un document de synthèse des études préliminaires. Le programme doit donner une estimation de l'enveloppe financière prudente et réaliste et qui découle d'une réelle analyse économique. Il définit également les processus de suivi, d'expertise et de contrôle qu'il entend mettre en œuvre tout au long de la conception et de la réalisation de l'ouvrage. Ce n'est pas pour autant un document complètement finalisé dans tous ses détails. Il a le niveau de détail nécessaire et suffisant pour permettre au maître d'œuvre d'apporter un premier niveau de réponse équivalent à l'avant-projet sommaire scindé par la loi MOP n° 85-704.

Pour ce qui concerne les éléments de mission de conception (avant projet sommaire et projet définitif), ils sont explicitement définis en termes d'objectifs à atteindre par les textes d'application de la loi MOP n° 85-704.

Le maître d'ouvrage lors de cette phase doit définir un programme, arrêter une enveloppe financière prévisionnelle sur la base des études préliminaires.

1.4.3. Du programme à l'avant-projet sommaire

Fondées sur la solution retenue et le programme précisé à l'issue des études préliminaires, l'étude d'avant projet sommaire a pour objet de :

- confirmer la faisabilité de la solution retenue compte tenu des études et reconnaissances complémentaires et en particulier de celles du sous-sol éventuellement effectuées;
- préciser pour la solution retenue, ses principales caractéristiques, la répartition des ouvrages et leurs liaisons, contrôler les relations fonctionnelles de tous les éléments majeurs du programme;
- proposer une implantation topographique des principaux ouvrages;
- vérifier la compatibilité de la solution retenue avec les contraintes du programme et du site ainsi qu'avec les différentes réglementations, notamment celles relatives à l'hygiène et à la sécurité;
- apprécier, le cas échéant, la volumétrie, l'aspect extérieur des ouvrages, et les aménagements paysagers ainsi que les ouvrages annexes à envisager;
- proposer, le cas échéant, une décomposition en tranches de réalisation, signaler les aléas de réalisation normalement prévisibles, notamment en ce qui concerne le sous-sol et les réseaux souterrains, et préciser la durée de cette réalisation;

- permettre au maître d'ouvrage de prendre ou de confirmer la décision de réaliser le projet, d'en arrêter définitivement le programme ainsi que certains choix d'équipements en fonction des coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance, d'en fixer les phases de réalisation et de déterminer les moyens nécessaires, notamment financiers;
- établir l'estimation du coût prévisionnel des travaux, en distinguant les dépenses par partie d'ouvrage et nature de travaux, et en indiquant l'incertitude qui y est attachée compte tenu des bases d'estimation utilisées;
- permettre l'établissement du forfait de rémunération dans les conditions prévues par le contrat de maîtrise d'œuvre.

Au regard des objectifs d'aménagement mais aussi des contraintes à prendre en compte, il s'agit de choisir une variante (de tracé) et de définir son coût. Le maître d'œuvre est chargé de la conception des différents équipements. Le maître d'ouvrage, quant à lui, doit confirmer la décision de réalisation du projet, arrêter définitivement le programme et en fixer les moyens nécessaires. La population locale peut être impliquée également lors d'un recours à la concertation.

Un projet doit faire preuve d'une acceptabilité sociale. Le code de l'urbanisme et la loi SRU n° 2000-1208 du 13 décembre 2000 relative à la solidarité et au renouvellement urbain ont consacré le recours à la concertation avec le public. Même lorsqu'elle n'est pas obligatoire, il y a tout intérêt à la mettre en oeuvre. Cet exercice n'est pas encore naturel pour les maîtres d'œuvre public, il l'est plus pour les maîtres d'ouvrage public.
Cette concertation peut être mise en oeuvre à plusieurs niveaux. Dès les études préliminaires, elle doit permettre de faire émerger des paramètres environnementaux qui auraient pu ne pas être anticipés. Au stade de l'avant projet, la concertation va permettre de recueillir l'avis de la population sur chaque variante, mais aussi les remarques et les pistes d'améliorations.
Le bilan de la concertation doit guider le maître d'ouvrage pour le choix de la solution qui sera retenue. Cette concertation peut prendre plusieurs formes: exposition, plaquettes, réunions. Elle a pour but de réduire la distance qui existe entre les concepteurs et les riverains à qui s'imposera le projet. Elle doit permettre de faire disparaître les zones d'ombre, les imprécisions pour le public. Elle doit aussi permettre aux maîtres d'ouvrage et d'œuvre d'intégrer des préoccupations qui n'auraient pas été envisagées.

Le dossier d'enquête publique, qu'il soit préalable ou non à la déclaration d'utilité publique, est établi à partir des études d'avant projet sommaire. Il comporte une pièce essentielle : l'étude d'impact. Cette dernière est réalisée sur les bases d'études environnementales. Pour les projets de grande importance, le dossier comprend en outre, une étude socioéconomique. C'est la loi LOTI (1982) d'Orientation sur les Transports Intérieurs qui a défini cette obligation. Le maître d'ouvrage saisit le préfet qui prend alors l'arrêté de mise à l'enquête publique du projet. Le tribunal administratif complète la démarche en nommant un commissaire enquêteur ou une commission d'enquête si le projet le justifie. Dès que le principe de mise à l'enquête est arrêté, le maître d'ouvrage a en charge des mesures de publicité de cette enquête. Des articles doivent être publiés aux rubriques annonces légales de journaux de presse quotidienne régionale, des panneaux doivent indiquer, en périphérie de l'emprise du projet, les dates, heures et lieux où le dossier d'enquête est consultable, ainsi que les horaires de permanence du commissaire enquêteur. L'enquête publique dure au moins 1 mois. Au cours de cette période, le public peut porter toute remarque, interrogation, contradiction qu'il juge pertinent par rapport au projet. Le commissaire enquêteur peut recevoir le public et porter lui-même les remarques du public.

A l'issue de cette enquête, où il peut être amené à interroger le maître d'ouvrage, le commissaire enquêteur établit son rapport, à l'intérieur duquel, il peut faire porter ses remarques, ses interrogations. En conclusion, il donne son avis sur le projet. Ce rapport et cet avis sont transmis au préfet. Ce dernier décide alors du caractère d'utilité publique ou non du projet.

1.4.4. De l'avant-projet sommaire au projet définitif

Fondées sur le programme arrêté et les études d'avant-projet approuvées par le maître d'ouvrage, les études de projet ont pour objet de:
- préciser la solution d'ensemble au niveau de chacun des ouvrages d'infrastructure qu'elle implique;
- confirmer les choix techniques, architecturaux et paysagers et préciser la nature et la qualité des matériaux et équipements et les conditions de leur mise en oeuvre;
- fixer, avec toute la précision nécessaire, les caractéristiques et dimensions des différents ouvrages de la solution d'ensemble ainsi que leurs implantations topographiques, en vue de leur exécution;
- vérifier, au moyen de notes de calculs appropriées, que la stabilité et la résistance des ouvrages est assurée dans les conditions d'exploitation auxquelles ils pourront être soumis;
- préciser les tracés des alimentations et évacuations de tous les fluides ainsi que des réseaux souterrains existants et, en fonction du mode de dévolution des travaux, coordonner les informations et contraintes nécessaires à l'organisation spatiale des ouvrages;
- préciser les dispositions générales et les spécifications techniques des équipements répondant aux besoins de l'exploitation;
- établir un coût prévisionnel des travaux décomposés en éléments techniquement homogènes;
- permettre au maître de l'ouvrage d'arrêter le coût prévisionnel de la solution d'ensemble ou, le cas échéant, de chaque tranche de réalisation, et d'évaluer les coûts d'exploitation et de maintenance;
- permettre au maître de l'ouvrage de fixer l'échéancier d'exécution et d'arrêter, s'il y a lieu, le partage en lots;

Le tracé est défini précisément, ainsi que l'ensemble des détails de construction, la durée et le coût de réalisation. Maître d'ouvrage et maître d'œuvre sont les acteurs concernés.

Dès que le projet est déclaré d'utilité publique, les études précises sont lancées. Parallèlement, l'ensemble des autres enquêtes est lancé:
- l'enquête parcellaire: elle permet de connaître précisément les propriétaires de chaque parcelle touchée par le projet. C'est sur sa base que les acquisitions ou le cas échéant, les expropriations ont lieu. Cette enquête peut aussi être réalisée simultanément avec l'enquête publique ;
- l'enquête loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau, si le projet doit faire l'objet d'une autorisation au titre de la loi sur l'eau ;
- les éventuelles enquêtes publiques liées à la mise en compatibilité des documents d'urbanisme (Schéma de COhérence Territoriale ou du Plan Local d'Urbanisme). En effet l'infrastructure peut être contraire voir interdite par les documents d'urbanisme. Dans ce cas, c'est le document d'urbanisme qui s'adapte.

1.4.5. Attribution des marchés aux entreprises routières

L'appel d'offres, par définition, est la procédure de droit commun de passation des marchés publics. Il repose fondamentalement sur l'appel à la concurrence pour le choix de l'entrepreneur, mais la décision du maître d'ouvrage ne repose pas seulement sur le prix de la prestation : la personne publique peut également prendre en considération d'autres critères

(comme la valeur technique de l'offre, le caractère innovant de la proposition, les performances en matière de protection de l'environnement).
En lançant une consultation, le maître d'ouvrage peut avoir en vue, non seulement d'obtenir une offre de prix correspondant à une prestation déterminée, mais aussi de rechercher les variantes possibles à la solution technique adoptée au départ. Le choix entre l'une ou l'autre dépend, non seulement de la nature de l'ouvrage, mais aussi de l'intention du maître d'ouvrage (caractère plus ou moins répétitif de la construction, désir de recourir à l'innovation, …). Une fois précisé ce qu'il attend de la consultation, le maître d'ouvrage peut déterminer les personnes à consulter.
Les offres ainsi adressées sont ouvertes à la date prévue et les propositions des concurrents sont enregistrées au cours d'une séance non publique (art. 58 et 63 du code des marchés publics). La décision est prise par la personne responsable du marché (pour les marchés de l'État) et par la commission d'appel d'offres (pour les marchés des collectivités territoriales).
L'autorité compétente procède d'abord au jugement des offres. L'article 53-II du code des marchés publics donne les critères de base permettant de choisir le mieux-disant ; citons notamment :

i) prix des prestations ;
ii) coût d'utilisation de l'ouvrage (coût global de la réalisation augmenté des frais de fonctionnement, de son amortissement éventuel, de la facilité de rénovation, de transformation) ;
iii) valeur technique de l'offre (dispositions techniques de l'ouvrage, incluant la sécurité des personnes et des structures pendant l'exécution des travaux, pérennité des prestations) ;
iv) caractère innovant de l'offre ;
v) performances de l'offre en matière de protection de l'environnement ;
vi) délai d'exécution des travaux (si sa détermination est laissée à l'appréciation des concurrents).

Le même article admet que d'autres critères dits additionnels puissent être pris en considération, mais seulement à la condition d'avoir été annoncés à l'avance dans le règlement particulier d'appel d'offres. Tous les critères de choix des offres doivent de toute façon être « pondérés ou à défaut hiérarchisés » (art. 53-II du code des marchés publics).
L'autorité compétente effectue ensuite une étude comparative des différentes offres, compte tenu des critères de jugement retenus. Il reste alors à procéder à la conclusion définitive du marché. Jusque là, l'entreprise retenue ne bénéficie que d'une présomption d'en devenir titulaire, le maître d'ouvrage ayant toujours la possibilité de ne pas donner suite à l'appel d'offres pour des motifs d'intérêt général.
Les marchés de travaux dont le montant est égal ou supérieur à 230 000 € HT ont un caractère écrit (art. 11 du code des marchés publics), l'acte d'engagement et les cahiers des charges en étant les pièces constitutives.

Il s'agit de choisir l'entreprise contractante, de définir les conditions économiques et réglementaires de réalisation des travaux. Le dossier de consultation des entreprises définira les conditions de mise en concurrence et les critères de jugement des offres. Les acteurs impliqués sont donc le maître d'ouvrage, le maître d'œuvre et les entrepreneurs. L'entreprise lors de cette phase consulte ses fournisseurs.

1.4.6. Exécution des travaux

Les règles applicables à l'exécution des travaux sont définies par le code des marchés publics et surtout par les cahiers des charges. Les droits et obligations des intéressés (maître d'ouvrage, maître d'œuvre et entrepreneur) pendant la réalisation des travaux ont un objet à la fois administratif (exécution technique d'une prestation) et financier (versement d'une

rémunération). Pour des raisons pratiques, la désignation du titulaire du marché ne déclenche pas l'exécution matérielle immédiate des prestations. Même pour des travaux de faible importance, il est nécessaire de prévoir une phase de préparation du chantier. Le début de la phase de préparation des travaux est fixé à la date de la notification du marché qui est l'acte par lequel le maître d'ouvrage signifie officiellement au titulaire l'engagement de l'administration. En principe, cette notification vaut en même temps ordre de commencement des travaux. Ainsi, il incombe au maître d'ouvrage de prendre toutes mesures pour mettre à la disposition de l'entrepreneur les terrains nécessaires et il doit, à cette occasion, lui délivrer un plan général d'implantation de l'ouvrage.
De son côté, le maître d'œuvre a, dès ce moment, un certain nombre de tâches précises. En particulier, il va procéder à l'ordonnancement de l'ensemble des opérations administratives et financières du marché, préparer la coordination s'il est maître du chantier … Mais surtout et de manière plus générale, il doit vérifier que l'entrepreneur a bien exécuté les obligations lui incombant durant cette période.

Quant à l'entrepreneur, il doit, dès ce moment, prendre toutes dispositions ou établir tous documents nécessaires à la réalisation de l'ouvrage, ce qui comporte d'abord l'exécution d'opérations matérielles : aménagement des voies et moyens de transport, logement du personnel, installation du chantier proprement dit, approvisionnements … Cela implique surtout la mise au point de toutes les mesures qui détermineront le déroulement du chantier : programme d'exécution des travaux qui indique notamment les moyens du chantier et le calendrier d'exécution, et qui est soumis pour visa au maître d'œuvre ; plan d'exécution des ouvrages (définissant le dimensionnement des ouvrages et les caractéristiques des matériaux, produits et composants de construction, ce document étant en principe soumis à l'approbation du maître d'œuvre) ; enfin, mise au point du plan de sécurité et d'hygiène. Ces documents sont tous établis sur la base des pièces contractuelles.

D'une manière générale, le marché de travaux publics étant fondamentalement une convention, le titulaire est tenu d'exécuter les prestations dans les conditions définies par les stipulations contractuelles. À ce titre, un certain nombre d'obligations particulières pèsent sur lui. Ainsi l'entrepreneur doit-il assurer une exécution conforme des prestations. De même encore l'entrepreneur doit-il exécuter les travaux dans le délai prévu au marché (art. 19 du cahier des clauses administratives générales). Le délai d'exécution des travaux est un élément fondamental de l'économie du contrat puisqu'il détermine, au moins partiellement, le coût global de l'opération. Le délai d'exécution des travaux part en principe de la date de notification du marché et expire à la date d'achèvement des travaux fixée par le maître de l'ouvrage à l'occasion des opérations de réception.

Les métiers étant bien distincts, les fournisseurs de matériaux sont peu impliqués dans les choix techniques. Leur offre de produits et la disponibilité de ceux-ci conditionnent toutefois certains de ces choix ; ils peuvent aussi réagir aux demandes des acteurs - ne serait-ce que pour améliorer la pénétration de leurs produits - ou conseiller la clientèle. Le lien producteurs-utilisateurs est donc plus serré lors de la phase d'exécution. De manière générale, les relations entre producteurs de matériaux et acteurs de la construction sont d'autant plus étroites que les produits sont utilisés directement sur les chantiers. Si les producteurs de matériaux ont peu de prise sur les options de construction au cas par cas, ils sensibilisent en amont les maîtres d'œuvre afin d'influencer leur prescription.

L'exécution technique et financière est le sujet de cette étape. Les acteurs impliqués sont l'entreprise pour réaliser les travaux et le maître d'ouvrage pour rémunérer l'entreprise. Le maître d'œuvre intervient pour contrôle technique.

A l'issue de cette étape s'effectue la réception des travaux. Dès l'achèvement des travaux par le titulaire, le maître d'ouvrage doit prendre possession des ouvrages et il lui incombe donc de vérifier que les prestations ont bien été exécutées conformément aux pièces contractuelles. C'est ce à quoi répondent les opérations de réception des travaux et le mécanisme de garantie mis en place à cette date.

L'article 41.8 du cahier des clauses administratives générales stipulant que la « prise de possession des ouvrages par le maître d'ouvrage doit être précédée de leur réception », cette réception, est tout à la fois indispensable et préalable à tout envoi en possession.

La procédure de réception est la suivante. L'initiative appartient à l'entrepreneur, qui doit aviser par écrit le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre de la date à laquelle les travaux sont achevés ou devront l'être. Le maître d'œuvre doit convoquer l'entrepreneur aux opérations préalables à la réception. À ce stade, les parties effectuent contradictoirement toutes les constatations utiles (reconnaissance des ouvrages, état d'exécution ou d'inexécution des prestations). Elles procèdent à tous essais ou épreuves prévus. Ces différentes opérations font l'objet d'un procès verbal signé sur-le-champ par le maître d'œuvre et par l'entrepreneur. Le maître d'œuvre doit ensuite adresser le procès-verbal à la personne responsable du marché ; il doit par ailleurs faire connaître à l'entrepreneur s'il a proposé la réception, et dans l'affirmative, la date d'achèvement des travaux.

Il appartient enfin au maître d'ouvrage d'accepter ou de refuser la réception. Dans le premier cas, il détermine les modalités de réception et fixe la date d'achèvement des travaux qui constitue la date d'effet de la réception. La décision ainsi prise doit être notifiée à l'entrepreneur.

Le fait de réceptionner et fixer la date d'achèvement des travaux ne libère pas définitivement l'entrepreneur. Conformément d'ailleurs au droit commun, ce dernier reste tenu envers le maître d'ouvrage de garantir un ouvrage de qualité promise et apte à l'usage initialement prévu. Les marchés de travaux publics définissent dans ce but des garanties, dites contractuelles découlant de la responsabilité spéciale des constructeurs.
La garantie contractuelle normalement exigée de l'entrepreneur consiste en une obligation de parfait achèvement dont le régime est défini par l'article 44 du cahier des clauses administratives générales. Cette obligation implique seulement la mise (ou remise) en conformité des ouvrages par rapport aux stipulations contractuelles.
Au cours de cette même période, l'entrepreneur doit remettre au maître d'œuvre les plans des ouvrages conformes à leur exécution ainsi que les notices de fonctionnement et d'entretien. Le délai pendant lequel s'exerce cette garantie court à compter de la date d'effet de la réception. Sa durée est, sauf stipulation contraire du cahier des clauses administratives particulières, égale à un an (ou six mois pour les travaux d'entretien et de terrassement).

L'entrepreneur avise le maître d'ouvrage de la fin des travaux. Le maître d'œuvre assure le contrôle des opérations de réception.

1.5. Analyse des critères décisionnels par acteur

1.5.1. Intérêt et signification de la notion de critère

Aider à décider, c'est, en tout premier lieu, aider à clarifier la formation, la transformation et l'argumentation des préférences. A ce niveau, le concept clé est celui du **critère** ». Pour l'essentiel, un critère vise à résumer les évaluations d'une action selon diverses dimensions pouvant se rattacher à un même « axe de signification », ce dernier étant la traduction opérationnelle d'un « point de vue » au sens usuel du terme. Roy et Bouyssou (1993) précisent que : « Face à un modèle d'évaluation, les préférences d'un acteur impliqué

dans un processus de décision ne sont pas nécessairement toujours rigoureusement définies a priori et stables. L'appréciation de certaines des conséquences peut être plus ou moins bien étayée ; d'autres peuvent être hypothétiques et décrites en termes probabilistes. Le jugement de préférence peut varier selon l'importance plus ou moins grande que l'acteur accorde à tel ou tel aspect des conséquences. Ce jugement apparaît donc fréquemment comme la résultante d'aspects conflictuels qui s'affrontent, tant dans l'esprit d'un acteur donné qu'entre acteurs différents concernés par le processus de décision. Dans la plupart des processus de décision, aussi complexes et conflictuels soient-ils, il est souvent possible de mettre à jour un certain nombre d' « axes de signification » concrets, communs aux différents acteurs, autour desquels ils justifient, transforment et argumentent leurs préférences. Bâtir différents critères autour de ces axes de signification, c'est alors tenter de modéliser ce qui peut apparaître comme la partie stable de la perception du problème qu'ont ces acteurs.

Construire plusieurs critères permet au chargé d'étude de gérer, au niveau de chaque axe de signification, les éléments affectant les « données » du problème. De même, c'est admettre qu'une décision sera inévitablement le résultat d'un compromis entre plusieurs objectifs conflictuels. Mais tous les acteurs n'ont pas la même vision de ce compromis. Un acteur particulier peut même avoir des difficultés à élaborer sa propre conviction parce que ses préférences sont changeantes et/ou insuffisamment structurées.

Lors de la construction d'un critère, le chargé d'étude doit chercher avant tout à faire en sorte que les acteurs du processus de décision reconnaissent le bien-fondé des comparaisons qui découlent de ce modèle. Ceci implique un certain nombre de conséquences importantes. Les axes de signification autour desquels sont construits les critères doivent être compris et admis par tous les intervenants du processus de décision, même si ceux-ci divergent sur l'importance relative du rôle qu'ils souhaitent voir jouer à chacun d'entre eux. Ces axes de signification devront être suffisamment familiers à ces différents acteurs pour que ceux-ci acceptent de raisonner et de discuter sur cette base. Pouvoir associer à un axe de signification un critère s'exprimant dans une unité physique claire présente de nombreux avantages à cet égard.

Le choix des axes de signification pertinents pour comparer les actions dépend fortement de la nature du problème considéré. Ce choix peut être utilement raisonné en :
- analysant les diverses dimensions du principe d'évaluation en les regroupant de façon judicieuse et/ou,
- raisonnant de manière « hiérarchisée » en décomposant, de manière progressive, un point de vue unique en « sous points de vue », eux-mêmes décomposés à leur tour et ainsi de suite.

1.5.2. Critères décisionnels propres à chaque acteur

En fait, tout acteur d'un projet routier a une influence réelle ou potentielle sur celui-ci, qu'elle soit reconnue ou non. Dans ce cadre, il s'agit de définir dans ce qui suit l'ensemble des critères établis par acteur et ce pour l'ensemble du processus décisionnel précédemment défini.

- *Maître d'ouvrage*

L'objectif de la maîtrise d'ouvrage est : 1) l'analyse de la situation actuelle et des besoins en matière d'infrastructures routières ; 2) la présentation des politiques d'urbanisation et de déplacement ; 3) l'étude comparative des variantes de schéma directeur ou de voirie. Il s'agit de répondre à un besoin individuel ou collectif en termes d'accessibilité. L'implantation de l'infrastructure a un impact d'insertion de l'ouvrage dans le paysage. Sa conception devrait prendre en considération l'intégration au site.
La démarche d'élaboration des projets repose sur des choix successifs (niveaux d'étude) de parties d'aménagement et de variantes, fondés sur l'analyse d'un ensemble de critères

techniques, économiques et urbanistiques. Pour la plupart des opérations, un budget travaux est indiqué dans le programme et a le plus souvent le caractère de budget plafond. Le maître d'ouvrage est confronté à la validation technique des ouvrages, à l'enveloppe budgétaire et aux délais de réalisation.

- *Maîtrise d'œuvre*

Le maître d'œuvre a la charge et la responsabilité de la conception et du contrôle d'exécution des travaux, notamment celle de s'assurer du respect des choix arrêtés par la maîtrise d'ouvrage, de la réglementation et des stipulations contractuelles. Par sa participation à la sélection des entreprises, le maître d'œuvre peut avoir la possibilité de proposer aux entreprises des variantes (techniques) qu'il précise lui-même ou bien laisser libre choix à celles-ci de proposer leurs propres variantes.

- *Entreprises de réalisation des travaux routiers*

Pour les entreprises routières, il ressort un fort intérêt économique et financier. Des contraintes réglementaires leur imposent de minimiser la gêne à l'usager et au riverain, en particulier en milieu urbain. Parmi les critères, l'aspect social intervient donc en réponse à des délais d'exécution, ainsi qu'à l'importance de l'entrave à la circulation. Enfin le respect des règles d'hygiène et de sécurité relèvent de la législation.

- *Fournisseur de matériaux de construction*

Sur la base des éléments recueillis, le seul centre d'intérêt du fournisseur de matériaux est le prix de production. Sa préoccupation majeure est de répondre aux exigences de la réglementation.

Les critères proposés sont donc d'ordre économique, réglementaire et législatif. On compte notamment les documents d'application des normes traitant des techniques routières, publiés par les maîtres d'ouvrages (note d'information, technique de l'ingénieur) qui fixent les catégories de granulats les mieux adaptées aux conditions d'emploi. Les spécifications d'usage ont été établies en fonction du trafic.

2. REGLES DE CONCEPTION LIEES AUX PROJETS ET OUVRAGES ROUTIERS

Au-delà du déroulement du processus de projet routier en lui-même, il est important de préciser quels sont les types de considérations à prendre en compte vis-à-vis de l'insertion de l'infrastructure dans le territoire ainsi que celles qui concernent la conception de l'ouvrage.

2.1. Insertion de l'infrastructure dans le territoire au sens des études d'impact

2.1.1. Prise en compte des milieux physiques, naturels et des hommes

Impact de l'implantation. Un aménagement routier peut provoquer une perturbation de l'hydrologie (modification des écoulements de surface, pollutions accidentelles), des écosystèmes (faune, flore) et des paysages. Il en est de même de l'environnement humain qui peut être amené à subir des nuisances sonores qu'il ne supportait pas avant l'aménagement. La route constitue de fait un élément nouveau dans le paysage. Après une étude paysagère caractérisant le paysage existant, un parti d'aménagement doit être retenu tant pour l'insertion du tracé proprement dit dans le relief (déblais-remblais) que dans le paysage.

La notion de paysage comprend l'ensemble des éléments pouvant être appréhendés et décodés par la perception visuelle mais aussi par tous nos autres sens, et à partir des références culturelles. Les paysages font partie intégrante de notre quotidien et participent activement à

la qualité de notre cadre de vie. L'approche paysagère reflète et révèle une réalité complexe et recoupe ainsi de nombreux autres domaines comme par exemple :
- le milieu physique : éléments marquants du relief, présence d'eau ;
- le milieu biologique : persistance de la végétation naturelle et sa place dans le paysage et les pratiques urbaines, formes et essences végétales…
- l'urbanisme : organisation spatiale, formes urbaines et architecturales…
- la socio-économie : tendances de l'évolution de l'espace urbain, ses différences pratiques, qualité paysagère en tant qu'enjeu économique…
- le patrimoine : éléments forts du patrimoine naturel et bâti et leur relation au paysage, éléments identitaires.

Un aménagement routier a généralement pour conséquence directe la consommation de surfaces agricoles, pastorales ou sylvicoles situées dans l'emprise de l'ouvrage et de ses annexes. L'impact se traduit par un effet de coupure (déstructuration du parcellaire) et un effet de substitution (réduction de la surface agricole utilisée liée à l'emprise et augmentation de la pression foncière).

2.1.2. Prise en compte du patrimoine et de l'aménagement de l'espace urbain

Les études d'impact ont longtemps été limitées à l'impact sur l'environnement naturel. Le décret du 25 février 1993 pris suite à la directive des communautés européennes n° 85/337 du 27 juin 1985 a étendu le domaine au patrimoine culturel. Il s'agit du patrimoine protégé par les différentes législations existantes (archéologie, monuments historiques, secteurs sauvegardés, ZPPAUP), mais cette notion ne se limite pas au patrimoine protégé. A priori tout élément pouvant être considéré comme faisant partie de notre patrimoine culturel doit être pris en compte.
Tout comme pour la notion de paysage, aucune définition clairement délimitée du concept de patrimoine culturel ne peut être donnée. Les critères de prise en compte sont nombreux : qualité du bâti, témoignage du passé, rareté du patrimoine… et doivent être appréciés au coup par coup. Les domaines d'impact et de sensibilité se rencontrent essentiellement au niveau de la valorisation et l'organisation de l'espace et la composition urbaine.
Un projet d'infrastructure peut avoir plusieurs impacts sur la valorisation de l'espace : <u>l'impact de l'implantation</u> (échelle des abords immédiats). Dégager l'emprise de la nouvelle voie entraîne un impact sur le foncier et peut en entraîner sur des bâtis (nécessité de démolition). Il importe d'analyser les possibilités de traiter les délaissés et de chercher à les valoriser ; de ménager la meilleure valorisation possible des territoires traversés : éviter les effets de morcellement, respect des unités spatiales homogènes, optimisation des potentialités d'aménagement, d'organisation, de desserte plutôt que de laisser subsister quelques bâtiments enclavés, le choix du tracé peut préférer optimiser la consommation foncière à l'échelle de l'îlot voire d'un quartier qu'à celle trop restrictive des seules unités foncières.
On peut mettre aussi en évidence des effets de remodelage des espaces, dus aux modifications d'accessibilité. Enfin on prendra en compte les modifications qui sont susceptibles d'intervenir sur des espaces libérés des contraintes et des nuisances par des reports de trafic, mais également les nouvelles affectations qui peuvent pénaliser certains secteurs ou revaloriser certains quartiers (reconquête urbaine, modération de vitesse,…).
<u>L'organisation de l'espace</u>. Le projet routier introduit un élément de rigidité, des points durs, des contraintes, pour l'organisation spatiale. On est également confronté à un changement des repères, à des effets de désorientation. Le projet modifie les accès, les flux et les axes de déplacement, en particulier pour les modes qui ne sont pas a priori pris en compte dans les objectifs du projet : transports en commun, itinéraires de promenade…on peut ainsi mettre en évidence toute une série d'impacts possibles.

La composition de l'espace. Au-delà du domaine de l'organisation de l'espace, les préoccupations relatives à la composition de l'espace, qui recoupent d'ailleurs en partie les domaines du paysage, permettent de prendre en compte des structures hiérarchisées, des proportions, des axes d'organisation, le jeu des contrastes et des oppositions volontaires, dans le traitement de l'espace.
Effet de limite. On constate très souvent que des infrastructures lourdes se substituent à d'anciennes limites, ou en créent de nouvelles. Cet effet doit être valorisé en relation avec le contexte humain et social.
Effet de coupure. Il s'agit de rupture de relations : fréquentation de lieux, de services, déplacements, mais aussi relations visuelles, sentiment d'appartenance…
Effet d'isolement, de ségrégation et de relégation. Constaté très fréquemment dans les grands ensembles en crise, cet effet peut toucher aussi des acteurs économiques et a des répercussions sur les valeurs patrimoniales

2.2. Conception et dimensionnement de chaussées neuves

Les infrastructures routières ont pour but principal de répondre à un besoin d'accessibilité, les principes de leur dimensionnement sont régis par le trafic.

2.2.1. Prise en compte du trafic

Le dimensionnement mécanique d'une structure de chaussée a pour objet de fixer les épaisseurs des différentes couches de matériaux constituant la chaussée, afin de lui permettre, tout au long de la durée de service choisie, de résister au chargement (fatigue de contact notamment).

2.2.2. Spécificités des voies urbaines

En ville, la voirie publique fait partie des *espaces communs*, au sens d'accessibles à tous, avec la particularité que cette accessibilité est permanente. Ce sont les mailles de son réseau qui structurent la cité. C'est ce réseau qui l'alimente et dessert tous les organes vitaux ainsi que leurs cellules.
Seules les voies à caractère multimodal sont représentées (*Figure 2 - 2*). Elles y sont classées traditionnellement en trois niveaux hiérarchiques établis par rapport aux fonctions circulatoires d'une part, et urbaines d'autre part (artères ou voies de liaison inter-quartier, voies de quartier où les voies de distribution disparaissent et se répartissent soit dans les artères pour les plus importantes, soit dans les voies de quartier pour les autres).

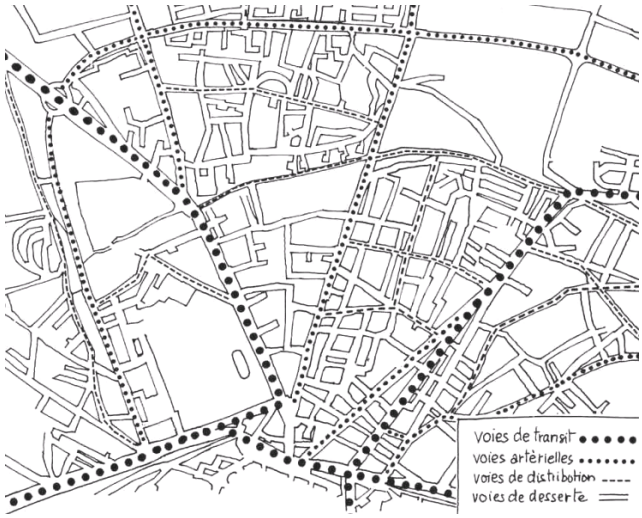


Figure 2 - 2. Hiérarchisation schématique de voirie urbaine

Etudier un profil en travers d'une voirie urbaine ne consiste pas à juxtaposer des bandes, chacune étant dimensionnée en fonction des besoins locaux : voies de circulations, pistes cyclables, haies de séparation, trottoirs.

2.2.3. Type de structures de chaussées

Une chaussée se présente sous la forme d'une structure multicouche (*Figure 2 - 3*), posée sur un support ouvragé. La plate-forme support, constituée du sol après terrassement (le sol support) et généralement d'une couche de forme. La couche de forme ne fait pas partie intégrante de la chaussée, elle dépend de la portance de la plate-forme et de l'état de la partie supérieure des terrassements. Elle peut se limiter éventuellement à une couche de réglage et facultative en urbain. L'assise de chaussée, constituée généralement d'une couche de fondation et d'une couche de base, assure la résistance mécanique vis-à-vis des sollicitations dues au trafic. Elle permet également une répartition des contraintes verticales sur la plate-forme support afin d'éviter des déformations trop importantes de celle-ci.
Enfin, la couche de surface composée d'une couche de roulement et éventuellement d'une couche de liaison, donne à la chaussée les propriétés nécessaires pour son utilisation par les véhicules, en particulier l'uni et l'adhérence. Elle assure également un rôle d'étanchéité vis-à-vis du corps de la chaussée, contribuant ainsi à sa durabilité.

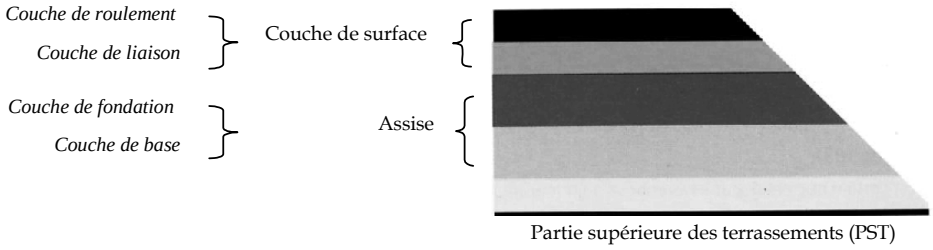


Figure 2 - 3. Désignation des couches de chaussées.

Le réseau routier français est caractérisé par une grande diversité de structures de chaussées que l'on peut regrouper en six grandes familles.
- Les chaussées souples sont constituées d'une couche de fondation en grave non traitée et d'une couche de base bitumineuse d'épaisseur inférieure à 15 cm. La couche de surface est constituée d'une faible épaisseur de matériaux bitumineux parfois réduite à un simple enduit.
- Les chaussées bitumineuses épaisses sont constituées de matériaux bitumineux en assise (fondation et base) d'épaisseur totale pouvant aller jusqu'à 40 cm, recouverts d'une couche de surface bitumineuse.
- Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques, ou chaussées semi-rigides, comportent, sous une couche de surface bitumineuse, des couches de base et de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (grave-ciment, grave laitier, grave-cendres volantes). L'assise a une épaisseur totale comprise entre 20 et 50 cm.
- Les chaussées à structure mixte présentent une couche de surface et une couche de base (de 10 à 20 cm) en matériaux bitumineux sur une couche de fondation (de 20 à 40 cm) traitée aux liants hydrauliques.
- Les chaussées à structure inverse sont des chaussées à structure mixte dans lesquelles une couche de grave non traitée vient s'intercaler entre les couches bitumineuse et hydraulique.
- Les chaussées en béton comportent une couche de béton de ciment de 15 à 40 cm d'épaisseur éventuellement recouverte d'une couche de roulement mince en matériaux bitumineux. La couche de béton repose soit sur une couche de fondation (qui peut être en matériaux traités aux liants hydrauliques, en béton de ciment, ou drainante non traitée), soit directement sur le support de chaussée avec, dans ce cas, interposition fréquente d'une couche

bitumineuse. La dalle de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal (« béton armé continu ») ou discontinue avec ou sans éléments de liaison aux joints.

2.2.4. Matériaux de chaussée et constituants associés

La politique poursuivie depuis 1968 avec la publication, par la Direction des routes, de directives et de recommandations pour la formulation et la mise en œuvre des matériaux de chaussée a permis une certaine standardisation des familles de matériaux, par une limitation des variations de leurs propriétés mécaniques. De l'application de cette politique s'est dégagée la possibilité de définir des portraits types des divers groupes de matériaux de chaussée, avec des caractéristiques minimales garanties servant de référence, et sur lesquels a été « calée » la méthode de dimensionnement pour les différentes structures.

Les différentes techniques ont fait l'objet depuis la fin des années soixante d'une codification par le biais d'un ensemble de documents : directives, recommandations et notes techniques, publiés par la direction des routes. Ces textes traduisent les exigences de l'Etat, maître d'ouvrage, pour le réseau routier national. Ils explicitent les dispositions techniques relatives :
- au choix des constituants et des mélanges que forment les matériaux routiers élaborés,
- aux études de formulation et à la caractérisation des propriétés mécaniques,
- aux techniques de mise en œuvre et aux contrôles d'exécution.

Le respect de cet ensemble d'exigences permet d'obtenir, à partir d'un minimum d'études préalables, des structures de qualité adaptées à un contexte marqué par une charge maximale à l'essieu de 130 kN et des périodes de gel pouvant être importantes.

Le catalogue de dimensionnement des structures du (Corté et al., 1994), introduit les différents matériaux de chaussées utilisés aujourd'hui. D'autres maîtres d'ouvrages ont, depuis lors, édicté des spécifications particulières, en fonction des besoins de leur propre réseau. Cette diversité de textes a fait progressivement place, pour les aspects techniques, à un ensemble homogène de normes couvrant : les essais, les constituants, les produits et la qualification des matériels de fabrication et de mise en œuvre. Les normes sur les constituants et produits en définissent nature et performance, et établissent des classifications selon des procédures codifiées. En revanche, elles ne donnent en général pas de spécification d'emploi. Le choix de celles-ci relève du maître d'ouvrage. Les différents matériaux de chaussée sont classés par famille, leur utilisation est ou non encadrée par des normes.

Les exigences sur la qualité des constituants et les performances des mélanges sont en général d'autant plus élevées que le trafic est fort et que la couche de chaussée est proche de la surface. Dans le cas des chaussées à faible trafic (T inférieur ou égal à T3), une plus large plage de matériaux et de caractéristiques peut répondre aux besoins du fait de sollicitations plus faibles, et de risques de détérioration généralement plus élevés admis pour la chaussée. Granulats, liants hydrauliques ou pouzzolaniques, liants hydrocarbonés et constituants divers (eau, activants, retardateurs…) sont les *matériaux* constitutifs des mélanges. Les constituants utilisés dans cette thèse sont cités en annexe du chapitre 2.

Il se produit une dégradation des matériaux et structures de chaussées sous trafic. A partir du relevé des dégradations, des descripteurs d'état *structurel* et de *surface* sont définis pour appréhender le comportement et l'évolution des chaussées, et pour définir des scénarios d'entretien. Des détails des indicateurs liés aux relevés de dégradations sont rappelés dans l'annexe du chapitre 2.

PARTIE II : PRATIQUES ROUTIERES

Quelle que soit la solution technique retenue (ressources classiques ou recyclées) il s'agit pour les acteurs routiers, d'une part de contribuer à maintenir ou rétablir un niveau de service satisfaisant pour les usagers d'aujourd'hui, et d'autre part de garantir un niveau de service satisfaisant et un coût acceptable pour les usagers de demain. En d'autres termes, l'enjeu du développement d'outils méthodologiques pour la gestion des infrastructures de services publics réside dans la mise en place ou la consolidation de pratiques de gestion patrimoniale : constituer et maintenir un patrimoine de données et de connaissances, pour maintenir un patrimoine physique et anticiper les besoins futurs.

1. PRATIQUES DE VALORISATION DE MATERIAUX ALTERNATIFS DANS LES CHAUSSEES

1.1. Critères et types d'utilisation dans le monde

L'utilisation éventuelle d'un matériau alternatif en technique routière dépend de ses aptitudes et de la disponibilité du gisement. Les déchets et sous-produits dont on dispose et leur potentiel d'utilisation dans la construction routière sont examinés dans les deux rapports fondateurs de l'OCDE (OCDE, 1977), (OCDE, 1997). A l'exception notamment du laitier de haut fourneau ou d'aciérie les déchets et sous-produits qui conviennent à la construction des couches de chaussées sont peu nombreux et leur utilisation se limite de toute manière à la couche de fondation, à défaut de transformation.
L'un de ces procédés d'élaboration des déchets consiste à fabriquer du granulat artificiel. Les sortes de déchets qui s'y prêtent sont nombreuses et aucune objection de principe ne s'oppose à leur substitution au granulat naturel. Elles ne présentent toutefois aucun avantage par rapport au granulat naturel et leur coût élevé est susceptible d'en limiter l'emploi à des cas spécifiques. Une méthode plus applicable consiste à les stabiliser au ciment, à la chaux ou au bitume afin d'en améliorer la tenue et d'en faire un matériau de fondation et de couche de base. Les matériaux ainsi stabilisés sont peu utilisés parce que la stabilisation en augmente le coût et qu'elle entraîne par ailleurs un supplément d'essais, aussi bien avant les travaux que sur le chantier, que les entrepreneurs n'admettent pas volontiers.

D'après ces considérations, l'OCDE (OCDE, 1977) a établi une liste de critères généraux indiquant les possibilités d'emploi d'un déchet en technique routière. L'utilisation d'un déchet dépend non seulement de sa faisabilité technique mais encore de sa disponibilité et de l'emplacement des sources d'approvisionnement. La quantité annuelle disponible à chaque emplacement devrait être d'au moins 50000 tonnes (lorsque les circonstances l'exigent), les distances de transports doivent être acceptables, les matériaux ne doivent pas présenter une toxicité élevée et ils ne doivent pas être trop solubles dans l'eau. Ces critères sont utilisés conjointement avec les possibilités techniques, pour établir une classification globale des déchets (*Tableau 2 - 1*).
En technique routière, l'utilisation d'un matériau donné peut généralement se classer dans l'une des cinq catégories suivantes : matériaux de remblais et de couche de forme, granulats pour couches de fondation, de base et de revêtement, fillers, liants ou agents stabilisateurs. Certains auteurs les classent en trois catégories seulement : granulats, filler et liants. Un inventaire de déchets et sous-produits susceptibles d'être utilisés en technique routière a été établi par l'OCDE (OCDE, 1977) à partir de questionnaires remplis par les douze pays participant au groupe de travail. Ce rapport étudie en détail une vingtaine de types principaux, en précisant pour chaque déchet son origine, ses principales caractéristiques, ses utilisations actuelles et potentielles et les recherches à entreprendre pour parvenir à une meilleure utilisation.

Tableau 2 - 1. Critères de classement pour l'utilisation des déchets en technique routière selon (OCDE, 1977)

Classe I **Usage courant**	**Classe II** **Traitements lourds**	**Classe III** **Usage ponctuel**	**Classe IV** **Usage rare**
Laitier de haut fourneau Cendres volantes Soufre Laitier d'aciérie Laitier de chaudière Cendres de trémies Laitier de nickel Matériaux de démolition Schistes houillers Schistes bitumineux Gangue de Taconite Sable de Kaolin Gangue de pyrite Résidus de pyrolise	Laitier de phosphate Laitier de cuivre Déchets de carrière Stérile de mine Déchets d'ardoisière Ecorce et sciure Gangue de spath fluor Pneumatiques et caoutchouc Laitier de zinc Laitier de plomb Cendres mélangées Résidus d'incinérateur	Gangue d'or Gangue de cuivre Gangue de plomb-zinc Fraisil de coke Sable de fonderie Céramique et déchets réfractaires Résine Lignine Déchets des mines de sels de potassium Kiesabbrand Déchets de verre Déchets de plastique Cellulose	Gangue de minerai de fer Boues de dragage Boues rouges Clinker et laitier de four Goudron de laminoir Boues de papeterie Coquillages Huiles usées

Une classification de ces déchets est proposée dans le *Tableau 2 – 2* : déchets et sous-produits de mines et de carrière, déchets et sous-produits de métallurgie, déchets et sous-produits industriels, déchets urbains (matériaux de démolition et résidus d'incinération), déchets et sous-produits agricoles et forestiers.

En parallèle, Imtiaz (Imtiaz, 1993) présente un état des pratiques du recyclage des déchets en infrastructure routière de chacun des états américains. Une évaluation subjective issue de questionnaires et basée sur des facteurs économiques, techniques et environnementaux indique que les matériaux issus de démolition de chaussées, cendres volantes et laitiers de haut fourneau ont un réel potentiel de réutilisation en technique routière. 52 questionnaires ont été envoyés, 42 états ont répondu (l'équivalent de 80% de réponses). 27 sous-produits ont été recensés, 11 sont utilisés par plus de 5% des correspondants (dans l'ordre décroissant du nombre d'utilisateurs rapportés : matériaux de démolition routière, cendre volante, déchets pneumatiques, laitiers de haut fourneau, laitier d'aciérie, cendre de foyer, huiles usées, papiers recyclés, déchets miniers et boues de dragage). Les 6 déchets utilisés recensés dans cette étude sont : les moellons, les déchets de verre, la sciure, les céramiques, les MIOM et les déchets d'équipement routier.

Tableau 2 - 2. Inventaire des déchets et sous-produits utilisables en technique routière d'après (OCDE, 1977)

● : produit et utilisé en technique routière, □ : produit mais peu utilisé en technique routière, ○ : produit mais d'emploi expérimental en technique routière, ▲ : produit mais inutilisé en technique routière, ■ : non produit, blanc : inconnu ou inutilisable.

Déchets et sous produits			Pays											
			Allemagne	Belgique	Canada	Danemark	Espagne	Etats-Unis	Finlande	France	Italie	Pays-Bas	Royaume-Uni	Suisse
Déchets et sous-produits de mines et de carrières														
1. Déchets de mines et de carrières	a	Schistes houillers (stérile de mine de charbon)	●	●	▲	■	●	□	■	●	■	●	●	■
	b	Déchets de carrières, découverte incluse	□	▲	●	▲	●	□	●	●	●	●	●	▲
	c	Stérile de mine	●	▲	●	■	●	●	●	●	■	■	●	■
	d	Déchets d'ardoisière	▲	□	▲	■	●	▲	□	▲	□	■	□	■
	e	Schistes bitumineux	■	■	■	■	●	▲	■	○	●	■	●	■
	f	Sable de kaolin		□	■	▲	▲	▲	■		▲	■	●	■
	g	Sels de mine de potassium	□	■	■				■	□		■		
2. Gangue	a	Minerai de fer	▲	▲	●	■	▲	▲		●	■	■	▲	■
	b	Taconite	■	■	▲	■			■	■	■	■	■	■
	c	Spath fluor	▲	■	▲	■		□	■		▲	▲	▲	■
	d	Plomb-zinc		■	▲				■	■		■		
	e	Cuivre	▲	■	▲	■		□	▲	■	■	■	■	■
	f	Or	■	■	▲	■		□	■		■	■	■	■
3. Boues, coulis, suspensions	a	Boues rouges (alumine)	□	■	▲	■		▲	■	▲	▲	■	▲	■
Déchets et sous-produits de la métallurgie														
1. Laitiers ferreux	a	Laitier de haut fourneau	●	●	●	■	●	●	●	●	●	●	●	■
		- cristallisé	●	●	●	■	●	●	●	●	●	●	●	■
		- granulé	●	●	■	■	●	●	□	●	●	●	□	■
		- bouleté	■	■	●	■				□	■	■		■
		- expansé		■	■	■			■	□	■	■		■
	b	Laitier d'aciérie	●	●	●			●	●	□	●	●	●	■
2. Laitiers non ferreux	a	Zinc	□	□	▲	■		□	●	■	▲		▲	■
	b	Cuivre	□	□	●	■		□		■			▲	■
	c	Nickel	□	■	●	■		□	▲	■	▲		▲	■
	d	Phosphate	■	■	▲	■		□	■	■		●		■
	e	Plomb	□	□	▲	■		▲	■		▲	■	▲	■
3. Déchets de fonderie	a	Sable	▲	▲	□	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	●	■
4. Déchets de laminoir	a	Goudron	▲	▲	□	■	▲	■		●		■	●	■
5. Céramique et déchets réfractaires			▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	■	□	■
Déchets et sous-produits industriels														
1. Cendres	a	Cendres volantes	○	▲	●	○	▲	●	□	●	▲	●	●	□
	b	Cendres de trémie	●	▲	○	●	▲	●	□	●	▲	■	●	■
	c	Mélange						▲	□			■		
2. Sulfate et chaux	a	Poussière de four à ciment	▲	▲	○	▲	▲	□	▲	▲	●	■	□	▲
3. Soufre			■	▲	●	▲	▲	○	○	●	○	■	■	■
4. Boues de dragage			▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	●	▲	▲
5. Clinker et laitier de four			●	▲	□	●	▲	●	□	▲	▲	□	●	■
6. Déchets de plastique			▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	□	▲	▲	▲	▲
7. Kiesabbrand			□						■			■		
Déchets urbains														
1. Résidus d'incinération	a	Cendres	●	▲	▲	▲	▲	○	▲	▲	▲	▲	●	▲
	b	Mâchefer	●	▲	▲	●	▲	○	○	●	▲	▲	●	●
2. Matériau de démolition	a	Moellons	▲	▲	▲	▲	□	▲	▲	▲	▲	●	●	■
	b	Chaussées asphaltiques	●	▲	●	□	●	●	□	▲	●	□	●	●
	c	Chaussées en béton	▲	▲	▲	▲	▲	○	■	▲	■	●	●	■
	d	Briques	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	●	▲
3. Pneumatiques			○	▲	○	□	▲	●	▲	●	□	▲	▲	□
4. Huiles usées			▲	▲	●	▲	▲	●	▲	▲	▲	■	▲	▲
Déchets et sous-produits agricoles et forestiers														
1. Déchets du bois	a	Ecorce	▲	▲	●	▲	▲	□	▲		▲	▲	▲	▲
	b	Sciure	▲	▲	●	▲	▲	□	▲	▲	▲	□	▲	▲
	c	Lignine		■	●	▲		□	▲	□	▲	■	▲	
	d	Boues de papeteries			▲				●	□		■		
2. Déchets alimentaires		Coquillage	■	■	▲	▲	■	●	■	■	▲	■	■	■

- **Effets induits sur les filières d'approvisionnement**

Plusieurs facteurs dont il faut tenir compte avant d'utiliser un déchet ou un sous-produit en technique routière ont été mis en évidence par l'OCDE (1977). L'utilisation des déchets a pour avantages de supprimer les crassiers et de diminuer la quantité de matériaux destinés à ceux-ci, d'éviter l'ouverture de carrière d'emprunt et pour inconvénients éventuels, le coût supplémentaire du transport des déchets et les perturbations qui résultent de ce transport.

a) *Effets bénéfiques de la suppression des crassiers: s*i l'on admet qu'un crassier dépare le paysage et constitue un certain inconvénient pour la population locale il est possible, du moins en principe, d'évaluer le coût de cet inconvénient et la communauté aura intérêt à dépenser une somme équivalente (mais pas davantage) pour supprimer le crassier. Il est possible de déterminer de manière assez précise le coût de l'aménagement paysager (s'il y a lieu) et il est possible de quantifier les avantages qui découlent de l'utilisation des déchets pour la construction routière en supposant qu'ils sont équivalents au coût du traitement qui consiste à fondre les crassiers dans le paysage.

b) *Inconvénients des carrières d'emprunt:* une carrière peut se trouver à proximité du projet routier de sorte que les distances de transport et les sollicitations exercées sur chaussées peuvent être très réduites. Ce sont là de gros avantages qui auraient tendance à faire oublier les désavantages réels qui peuvent résulter d'une carrière d'emprunt. En effet, l'impact de la défiguration temporaire ou permanente dépend dans une certaine mesure d'aménagements prévus dans les règles de planification mais elle dépend également du relief. Dans un pays accidenté il est relativement facile de restaurer le paysage et bien que le relief puisse s'en trouver modifié la différence n'est pas apparente pour ceux qui ne se souviennent pas du paysage antérieur. Dans un pays plat toutefois et notamment quand la nappe phréatique est proche de la surface l'aménagement du paysage est plus difficile ou même impraticable de sorte que la remise en état de la carrière exige un apport de matériaux de remblayage qui ne sont pas obligatoirement disponibles sur place et qu'il faut importer de loin. La quantification des atteintes portées au paysage n'est pas facile ; il n'existe aucune méthode admise par tous et celles qui ont été employées jusqu'à présent sont empiriques.

c) *Coût du transport :* de tous les facteurs le *coût du transport* est le plus facile à évaluer. Il s'agit uniquement du supplément de coût que représente le transport des déchets jusqu'au chantier. L'analyse apportée par (OCDE, 1977) suppose que le coût du transport est un coût supplémentaire qui résulte de l'utilisation des déchets en supposant que les carrières d'emprunt sont pratiquement toujours plus près du chantier. Si par contre le crassier se trouve à pied d'œuvre les avantages de son exploitation sont si manifestes que l'analyse coût bénéfice est superflue.

d) Perturbations du fait du transport: il s'agit dans ce contexte de l'atteinte portée à l'environnement par la circulation sur la voie publique des camions et par la congestion, le bruit et les déversements, au passage, de matériaux sur la chaussée qui en résultent. Du fait que ces effets sont difficiles à chiffrer, on tend à les ignorer mais ils n'en demeurent pas moins réels pour les riverains. L'exploitation d'un crassier peut très bien substituer pendant un certain temps une nuisance mobile généralisée à un inconvénient statique auquel la population locale s'est accoutumée. Il n'existe aucune méthode admise par tous de quantification des perturbations qui résultent d'un tel trafic mais les décisions sont à prendre à la lumière d'une évaluation des distances de transport, du volume de trafic engendré et de l'importance de la population qui subirait les répercussions. Ceci peut être décidé à partir d'une évaluation raisonnable de la gène créée par le transport à partir d'une carrière d'emprunt envisagée.

e) Décision : crassier ou carrière d'emprunt ?

Comme indiqué ci dessus, l'utilisation des déchets comporte un avantage (A) qui résulte de la suppression du crassier mais elle entraîne un inconvénient qui consiste en frais de transport

(C) et en perturbations créées par le trafic de camions à benne (D). Par conséquent, étant donné le principe selon lequel la dépense consentie en vue de remédier à un inconvénient ne doit pas dépasser le coût de ce même inconvénient il est possible d'exprimer la relation entre A, C et D comme ci-après :

$$A \geq C + D$$

Si l'on décide toutefois de ne pas utiliser de déchets il faut prélever du matériau dans une carrière d'emprunt, ce qui entraîne un désavantage (B). il faut donc modifier la relation ci-dessus qui devient :

$$A \geq C + D - B$$

La simplicité de cette relation est plus apparente que réelle. Même s'il était possible de mesurer tous les facteurs à considérer, seuls A et C sont susceptibles d'être évalués en terme monétaire, et même si l'on faisait une évaluation de B et D les résultats ne seraient pas exprimés dans les mêmes unités de mesure. Ce principe a pour défaut majeur d'être entaché de subjectivité.
L'emploi direct (sans stockage) des déchets et des sous-produits est en général moins onéreux, il s'agit d'un domaine où les avantages pour le producteur et l'utilisateur sont les plus apparents.

1.2. Conditions de caractérisation des déchets et matériaux alternatifs en Europe

De façon générale, la pression puis l'effet environnemental d'un matériau alternatif intégré dans une chaussée est lié aux cibles potentielles considérées :
- transfert vers les eaux de surface, études du comportement à la lixiviation du matériau et modélisation hydraulique ;
- transfert vers les eaux souterraines, études du comportement à la lixiviation du matériau et modélisation hydraulique et hydrogéologique ;
- impacts sur la faune et la flore (directs ou indirects), études du comportement à la lixiviation du matériau et études écotoxicologiques sur plusieurs bio-marqueurs ;
- impacts sur l'homme (directs ou indirects), évaluation des risques sanitaires.

Les différentes méthodes appliquées pour l'estimation du potentiel d'impact environnemental et pour démontrer son acceptabilité pour un éventuel emploi sont selon (Lidelöw et Lagerkvist, 2004) : l'essai de lixiviation (mesure des propriétés fondamentales de lixiviation telles disponibilité, solubilité et coefficient de diffusion), l'évaluation du risque (dans la mesure de la qualité du sol et de l'eau) et l'analyse de cycle de vie.
L'évaluation du risque est une méthode d'évaluation des effets environnementaux de ces matériaux. Des procédures spécifiques sont présentées dans divers pays comme le Danemark, la Suède, la Finlande, les Pays-Bas et la France (Hartlen et al., 1999 ; Eikelboom et al., 2001 ; Domas et al., 2003). Enfin l'analyse de cycle de vie est présentée comme un outil d'évaluation de la construction. D'autre part on note qu'il existe quatre niveaux d'évaluation (Roth et Eklund, 2003) : niveau du matériau, niveau de l'environnement local où le matériau est employé, niveau du cycle de vie et niveau du système industriel où les procédés de production du co-produit sont décrits. Mroueh (Mroueh et Wahlström, 2002) expose différentes méthodes d'évaluation environnementales : mesure des concentrations de composants nocifs, lixiviation de ces composants dans la structure et l'évaluation des risques.

De nombreux essais de laboratoire ont été élaborés afin de déterminer les grandeurs caractéristiques du comportement des déchets (comme la vitesse d'altération, la solubilité…) et l'influence de certains paramètres (comme le pH, la température, la nature de la solution de

lixiviation…) sur ces grandeurs. De même, depuis quelques années, des travaux sont en cours en vue de développer des modèles prédictifs du comportement et de l'impact potentiel du matériau en place à partir des résultats des essais de laboratoire. Ce même type d'essai a été appliqué aux matériaux alternatifs pour la route (http://ofrir.lcpc.fr) sans qu'ils suffisent à caractériser le comportement des matériaux dans l'ouvrage. Des essais de terrain instrumentés sur de longues périodes, avec des caractéristiques connues de l'ouvrage, restent indispensables, et permettent de valider le comportement réel du matériau en place (François et al, 2005).

Essais à l'échelle des matériaux

Les différents types d'essais existants selon l'observatoire français du recyclage en infrastructures routières (http://ofrir.lcpc.fr) sont les essais de caractérisation de base, les essais conventionnels (conditions simples et arbitraires), les essais qualitatifs, les modèles réduits (casiers lysimétriques) et les chantiers de présérie (ouvrages instrumentés en grandeur réelle).

Etude à l'échelle des ouvrages

La norme méthodologique AFNOR XP ENV 12920 (2006) fournit une méthodologie pour la détermination du comportement à la lixiviation d'un déchet dans des conditions spécifiées, c'est-à-dire dans un scénario d'élimination ou d'utilisation sur une période de temps donné. Cette méthodologie vise à garantir la prise en compte des propriétés spécifiques du déchet et des conditions du scénario. La méthodologie comporte plusieurs étapes, dont certaines peuvent nécessiter la réalisation d'essais chimiques et/ou biologiques et/ou physiques et/ou de caractérisation minéralogique et/ou d'essais de lixiviation. Les essais sont choisis en fonction de l'objectif, du déchet considéré, du scénario (géométrie de l'ouvrage, conditions d'exposition, horizon de temps) et de la hiérarchisation des paramètres d'influence du scénario sur le déchet. Cette norme a été largement utilisée en France (et en Europe) pour étudier le relargage de déchets utilisés comme matériaux en travaux publics.

2. ANALYSE DE QUELQUES FILIERES EXISTANTES PERENNES SUR LE TERRITOIRE

A partir des travaux internationaux rassemblés ci-dessus, ainsi que des travaux français ayant aboutit à un état de l'art sur l'utilisation des matériaux recyclés dans les infrastructures routières (http://ofrir.lcpc.fr), une sélection de matériaux alternatifs les plus couramment utilisés a été effectuée dans le but de conduire la démarche. L'analyse des filières existantes est abordée ci-dessous selon trois axes : origine et élaboration, gisement et utilisation.

2.1. Les matériaux de démolition

- Origine et élaboration

La valorisation des bétons et matériaux de chaussées recyclés dans la construction routière implique qu'une sélection et un tri soient effectués afin d'éliminer les éléments indésirables, qui nuiraient aux caractéristiques géotechniques du produit recyclé. Ils peuvent être réalisés directement sur le site de démolition, ou après acheminement des matériaux vers des plates formes de regroupement et de tri. Cinq étapes majeures permettent d'élaborer des granulats recyclés (*Figure 2 - 4)*.

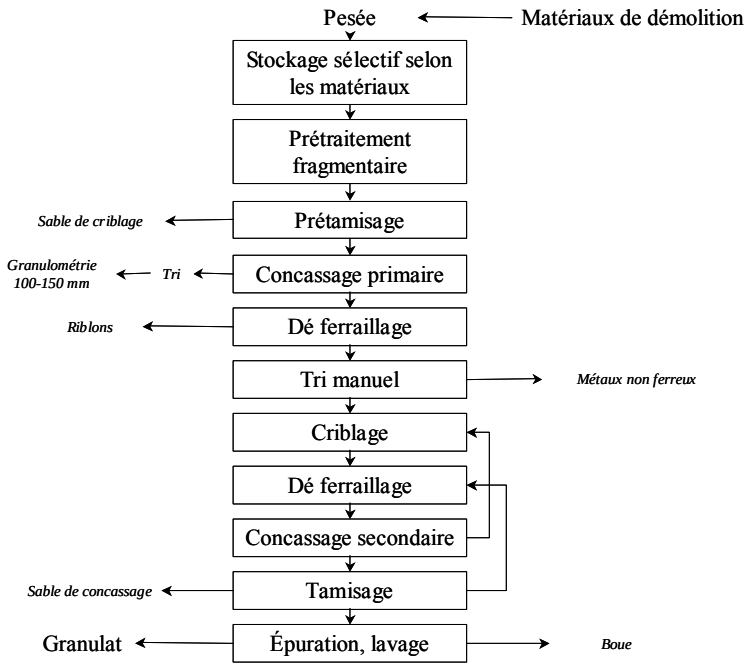


Figure 2 - 4. Cycle de traitement des bétons de démolitions (exemple d'installation)

- Une sélection visuelle du lot (tri). Cette sélection peut intervenir sur le site de démolition, ou à l'arrivée sur les plates-formes de regroupement ou de recyclage. Elle consiste à refuser les lots jugés trop riches en éléments indésirables. La sélection est primordiale pour obtenir des matériaux recyclés homogènes et propres à des emplois dans la route.
- Une réduction primaire au brise roche pour réduire les plus gros éléments et extraire mécaniquement le ferraillage. Au cours de cette phase, un contrôle visuel des matériaux et un second tri peuvent être faits.
- Un concassage primaire avec des concasseurs à mâchoires ou à percussion, afin de réduire les gros éléments et d'obtenir ainsi des matériaux dont la taille n'excède pas 100 à 150 mm. Le système d'alimentation peut être équipé d'un scalpeur afin d'éliminer la fraction fine. Le type de concasseur influe sur la granularité du produit en sortie. Si les concasseurs à mâchoires permettent de traiter des blocs volumineux, la réduction de la granularité est plus faible qu'avec un concasseur à percussion.
- Un déferraillage par un séparateur électromagnétique, le plus souvent de type « overband »;
- Un criblage et un tri manuel pour éliminer les impuretés résiduelles.

Ces opérations s'accompagnent éventuellement d'un concassage secondaire sur la fraction supérieure, issue du concassage primaire afin de réduire la granularité du matériaux et, plus rarement, d'un traitement par des dispositifs d'épuration afin d'éliminer les impuretés légères (lavage, tables densimétriques, …).

Les produits issus de ces traitements peuvent être assimilés, en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques et de fabrication, à des matériaux de précriblage, graves non calibrées, graves 0/D, sable, gravillons ou cailloux.

- Gisement

La production totale des déchets de chantier de bâtiment est estimée à 31 Mt (http://ofrir.lcpc.fr). Les déchets minéraux (inertes) représentent pratiquement les deux tiers du gisement total, les bétons de démolition en étant le principal constituant. Les quantités de déchets de chantiers TP sont estimées à 280 Mt. Les déblais constituent pratiquement 93% du total. Les enrobés routiers représentent quant à eux environ 3 %. Les bétons (de démolition)

représentent pour leur part 5 Mt, le potentiel global de recyclage de déchets minéraux étant estimé à 15 Mt (remblais, sous-couches routières, bétons...)

- Utilisation

Pour la construction d'infrastructures routières, les domaines d'emploi des matériaux issus du recyclage des bétons et des matériaux de chaussées sont nombreux. Selon leurs caractéristiques, ces matériaux sont utilisés dans les remblais et couche de forme (matériaux de pré-criblage et grave non calibrée), en couche de fondation et de base (grave 0/D, sable 0/D et gravillons d/D), avec ou sans traitement aux liants hydrauliques.

2.2. Les matériaux bitumineux recyclés

- Origine et élaboration

Les matériaux de *provenance unique* - issus de grands chantiers - obtenus par un fraisage respectant des consignes de travail définies à l'aide d'une planche de référence, présentent une homogénéité convenable et leur composition d'origine est souvent connue. Ils constituent, selon la norme AFNOR XF P 98-135 (2001), des agrégats d'enrobés de classe (a) et sont recyclables en l'état.
Les *matériaux de provenances diverses stockés de façon individualisée* sont issus de chantiers de moyenne importance, et stockés en fonction de la provenance de l'enrobé. Obtenus essentiellement sous la forme de fraisats, ces agrégats d'enrobés de classe (b) nécessitent généralement un conditionnement destiné à les homogénéiser avant réutilisation.
Les autres *matériaux de provenances diverses* regroupent les enrobés issus de la déconstruction de chaussées (fraisats et *croûtes*), les fonds de camion et les surplus de centrale d'enrobage. Ces agrégats d'enrobés, de classe (c), sont souvent hétérogènes et subissent un conditionnement pour réduire leur dimension maximale et les homogénéiser.
Dans le cas d'une mise en stock de mélanges bitumineux de provenances diverses, l'élaboration d'agrégats d'enrobés conformes à la réutilisation comprend les phases de stockage des mélanges, de reprise des mélanges sur stocks, de conditionnement et de stockage des agrégats prêts à être réutilisés. Il existe donc deux types de stockage, avant et après conditionnement.

- Gisement

En dehors des rebus de fabrication, les agrégats d'enrobés sont constitués pour une grande part des « déchets » provenant des activités d'entretien du réseau routier national. L'ensemble du réseau routier (national, départemental et communal) représente potentiellement un gisement de plusieurs milliards de tonnes constitué d'un mélange de granulats et de liant, réparti sur l'ensemble du territoire. Le tonnage annuel d'agrégats d'enrobés est estimé à environ 6,53 Mt (enquête USIRF, 2003).

- Utilisation

En dehors de l'utilisation en remblais routiers, pour laquelle il convient de se référer au Guide Technique des Remblais et couches de formes (SETRA, LCPC 2000), les autres techniques sont complètement décrites dans des documents spécifiques, tels que les guides techniques du CFTR (CFTR, 2003), (CFTR (a), 2004), (CFTR (b), 2004).

2.3. Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères

- Elaboration

Les MIOM sont issus de l'incinération à la fois des ordures ménagères, des déchets dits « assimilés » aux déchets ménagers et provenant des commerces, des industries et administrations. Avant l'incinération proprement dite, dans la partie amont du four, les

déchets subissent une phase de séchage. Ensuite, sous l'effet de l'air insufflé dans le four, la combustion est initiée. Les fours fonctionnent en auto-combustion. La sortie des mâchefers du four se fait en règle générale à travers un bac à eau permettant leur refroidissement rapide ainsi que la fermeture du four. Il existe des dispositifs d'extraction à sec, moins répandus. A ce stade, on parlera de « MIOM bruts ». Dès la sortie du four et avant leur sortie du site de l'usine d'incinération, les MIOM bruts peuvent subir un certain nombre d'opérations d'homogénéisation. Ces opérations pourront être plus poussées par la suite dans des Installations de Maturation et d'Elaboration (IME) pour améliorer l'ensemble de leurs caractéristiques. Les MIOM admis à rejoindre une IME en vue de leur préparation à l'emploi en technique routière, doivent remplir au minimum les conditions de la catégorie « M » définie par la circulaire n° 94-IV-1 du 9 mai 1994. Les opérations visant à améliorer l'homogénéité et la qualité des MIOM en vue de leur utilisation en technique routière sont :
- le criblage, éventuellement complété par un concassage, en vue de faire rentrer le matériau dans un fuseau granulométrique de *Grave Non Traitée* ;
- le retrait des métaux ferreux par over-band ;
- le retrait des métaux non-ferreux par machine à courant de Foucault ;
- le retrait des imbrûlés résiduels par soufflage (papiers, cartons et plastiques).
Ces opérations peuvent être réalisées une ou plusieurs fois pour améliorer le résultat final et être conduites sur différentes fractions granulométriques des MIOM. Les matériaux extraits rejoignent des filières de valorisation matière.

- Gisement

Du fait des exigences d'homogénéité et de qualité requises sur les matériaux de construction routière, on ne peut considérer comme MIOM utilisables en application routière que les MIOM élaborés, et donc comme source de matériau que les IME et non les usines d'incinération. Des données ADEME complétées par une enquête de mise à jour réalisée dans le cadre d'OFRIR par le LCPC aboutissent au recensement de 56 IME de plus ou moins grande taille, réparties sur 36 départements métropolitains, traitant 2,8 Mt de MIOM par an. Il existe quatre projets d'installations nouvelles, concernant trois départements. Pour deux départements, il s'agira des premières installations (Haute-Vienne, Marne). Enfin, il existe une installation en Martinique, traitant 10 000 tonnes/an.

- Utilisation

L'annexe V de la circulaire n° 94-IV-1 de Mai 1994 limite l'utilisation des MIOM :
- aux structures routières et de parking (couches de forme, de fondation et de base) à l'exception des chaussées réservoir ou poreuses ;
- aux remblais compactés de moins de 3 mètres de hauteur, sans aucun dispositif d'infiltration et à condition qu'il y ait en surface une structure routière ou de parking ; un bâtiment couvert ou un recouvrement végétal sur un substrat d'au moins 50 cm.
La circulaire précise aussi des exclusions d'emploi : elle indique que les MIOM de catégorie V (valorisable) doivent être utilisés en dehors des zones inondables et des périmètres de protection rapprochés des captages d'alimentation en eau potable ainsi qu'à plus de 30 mètres de tout cours d'eau. La mise en place des MIOM doit être effectuée en veillant à limiter les contacts avec les eaux de pluies, les eaux superficielles et souterraines.

2.4. Les laitiers de haut fourneau

- Elaboration

Il existe plusieurs types de laitiers de haut fourneau selon la méthode de refroidissement employée. Le *laitier cristallisé* est produit à partir d'un laitier en fusion évacué immédiatement en poche, dès la sortie du haut-fourneau, vers des zones spécifiques nommées

crassiers, pour y être déversé, coulée après coulée. Il s'y refroidit lentement, se transformant ainsi en roche dure artificielle. Le laitier cristallisé, chimiquement stable, est destiné à être concassé. Le *laitier vitrifié* est brutalement refroidi à l'eau (trempe), il présente une structure vitreuse désordonnée, susceptible, sous certaines conditions, d'évoluer vers une forme cristalline stable. Il existe deux types de laitier vitrifié :
- le *laitier granulé*, pour lequel le refroidissement se fait en bassin ou par jet d'eau sous pression;
- le *laitier bouleté* qui est soumis à deux types d'actions, un jet d'eau et une action mécanique. Le laitier en fusion se déverse sur un tambour tournant cannelé qui comporte des trous en périphérie, alimentés en eau sous pression. Les particules de laitiers sont alors projetées à plusieurs mètres du tambour, ce qui permet une trempe à l'air pendant la durée du trajet des particules ; cette technique n'est appliquée qu'à Fos-sur-Mer.

- Gisement

Il existe en France trois pôles de production de laitier de haut-fourneau appartenant au groupe ARCELOR. Une production plus modeste de laitiers cristallisés de haut-fourneau est à signaler également aux fonderies de Blénod lès Pont-à-Mousson. Une production moyenne annuelle est estimée à 3,8 Mt/an (fraîche production dont 1,33 Mt cristallisé et 2,47Mt vitrifiés). (source CTPL)

- Utilisation

Ce qui différencie les laitiers de haut fourneau des ressources alternatives précédentes est la diversité de leurs utilisations. En remblai, selon leur granulométrie, les laitiers cristallisés de haut-fourneau peuvent être assimilés à des matériaux D2 ou D3. En couche de forme, ils peuvent être classés D21 ou D31 (SETRA/LCPC, 2000). Le laitier cristallisé et concassé est employé comme granulats dans les couches d'assises de chaussées (GNT) ou traité aux liants hydrauliques ou hydrocarbonés. Lorsque le liant est constitué de laitier vitrifié, le mélange est désigné sous le nom de grave laitier tout laitier. En technique routière, le laitier vitrifié est utilisé essentiellement comme liant pour la réalisation d'assises de chaussées sous la forme de *graves* traitées classées en G1, G2, G3 ou G4 (AFNOR NF P 98 – 116, 2000), ou de *sables* traités classées en S0, S1, S2, S3, S4 ou S5 (AFNOR NF P 98 – 113, 1999). Le laitier vitrifié est utilisé le plus couramment comme liant sous forme de laitier granulé ou de laitier granulé pré-broyé. La technique de pré broyage le rend plus réactif.
Enfin, les granulats de laitier concassé, par leur angularité, leur rugosité et leurs propriétés mécaniques mesurées, conviennent pour la fabrication des enrobés hydrocarbonés, y compris pour la réalisation des couches de surface (couches de roulement et de liaison).

3. GESTION DES INFRASTRUCTURES, ENTRETIEN ET EXPLOITATION DE LA ROUTE

La fonction « entretien du patrimoine » est une composante fondamentale de la politique routière de l'État. L'action en matière d'entretien routier est précisée par des circulaires ministérielles annuelles, reposant sur un mode spécifique de classement des routes qui distingue dans l'ordre décroissant du trafic, les voies rapides urbaines, les voies à caractère autoroutier, les grandes liaisons d'aménagement du territoire, les routes nationales de liaison et les routes nationales ordinaires. Les projets d'infrastructures nouvelles ne prennent pas en considération les besoins financiers relatifs à l'entretien. Les textes relatifs à l'élaboration et à l'instruction des dossiers d'investissement prévoient que l'entretien sera pris en compte dans la phase d'avant-projet sommaire, l'impact des choix de conception sur les moyens en entretien étant explicité.

3.1. Enquête sur l'état des réseaux, identification des besoins

La définition rationnelle de la politique d'entretien à mettre en œuvre sur un réseau routier résulte nécessairement :

- d'une définition du niveau de service qu'on veut obtenir, à terme, sur chaque catégorie de routes;
- d'un constat de l'état « initial » du réseau routier, à travers une évaluation;
- des moyens, notamment financiers, qu'on est prêt à y affecter;
- éventuellement, d'autres contraintes d'ordre technique ou stratégique.

L'acquisition de données liées à des outils pour l'aide à la gestion des éléments du patrimoine permet de constituer un tableau de bord sur lequel va s'appuyer la conception des plans d'entretien et programmes de réhabilitation. Il va servir également à concevoir les plans d'investigation. Il correspond à un ensemble d'indicateurs de performance et de critères destinés à évaluer et à comparer des tronçons routiers vis-à-vis d'un ensemble d'objectifs de performance. Le *Tableau 2 – 3* précise et regroupe les éléments sur lesquels se fondent les décisions, quelques précisions supplémentaires sont apportées en annexe du chapitre 2.

Observer et évaluer un réseau, prévoir son évolution, enrichir et fiabiliser les données et les modèles de ce réseau, définir les actions de réhabilitation à mener, constituent des volets indispensables et complémentaires d'une gestion patrimoniale du réseau. La démarche méthodologiques vis-à-vis de ces différentes questions s'appuie sur :

- des indicateurs de performance et critères de décision pour la programmation des investigations ;
- des indicateurs de performance et critères de décision pour la programmation d'actions de réhabilitation ;
- une esquisse d'indicateurs relatifs à la qualité du patrimoine immatériel : données et modèles du patrimoine physique ;
- une mise en perspective de ces outils pour la simulation de programmes de gestion.

La politique d'entretien est définie en affectant à chaque catégorie de routes une stratégie d'entretien (groupe de règles déterminant les décisions d'entretien en fonction de l'état de la chaussée).

Tableau 2 - 3. Eléments de gestion du patrimoine pour une éventuelle prise de décision

Décision	Etude(s) nécessaire(s) à la décision	Informations utilisées (et sources)
A) Budget alloué à la réhabilitation	1) Estimation des besoins en réhabilitation à court terme (3-5 ans) 2) Estimation des besoins futurs et de la nécessité d'anticipation pour lissage des dépenses	1a) **Les impacts estimés** de l'état de santé des tronçons investigués (acceptable ?) 1b) **Extrapolation** sur l'ensemble du patrimoine 2) **Prévision** des problèmes à venir
B) Budget alloué aux investigations (inspections, études, diagnostics etc)	Estimation des besoins en investigations à court terme (3-5 ans) pour : 1) alimenter le programme de réha. 2) améliorer la connaissance du patrimoine	1) indicateurs relatifs à l'état estimé 2) **indicateurs relatifs à la qualité des informations et des modèles** disponibles sur l'ensemble du patrimoine
C) Réhabilitation du tronçon k: intégré dans le programme annuel ou pluriannuel, compte tenu d budget alloué)	Hiérarchisation des besoins par comparaison des tronçons candidats à partir des profils multicritères des tronçons : évaluation des différents **impacts** de leur état de santé, par la prise en compte de la **vulnérabilité** des environnements urbain ou aquatique	1) les impacts estimés à partir de : - l'**état constaté** par inspection, - les dysfonctionnements estimés (modèles d'évaluation) - les dysfonctionnements observés - la vulnérabilité d'environnement 2) **voire des impacts constatés**
D) Type de réhabilitation : réparation, rénovation ou renforcement	Etude du profil longitudinal d'état de santé du tronçon (désordres localisés ou répartis) et des objectifs de réhabilitation	1) indicateur de concentration des désordres constatés par inspection, 2) profil multicritère du tronçon
E) Inspection pour évaluer et/ou **améliorer la connaissance du patrimoine**	Définition des catégories de tronçons prioritaires pour une amélioration des données et des modèles disponibles	**Indicateurs relatifs à la qualité des informations et des modèles disponibles**
F) Première ou nouvelle inspection pour **améliorer la connaissance d'un tronçon**	Hiérarchisation des besoins par comparaison des tronçons candidats à partir des profils multicritères des tronçons : évaluation des différents impacts de leur état de santé **estimé**	1) **Les impacts estimés** à partir de : - l'**état estimé** (avec un modèle de vieillissement+éventuellement l'état constaté lors de la dernière inspection) ; - les dysfonctionnements estimés ; - les dysfonctionnements observés ; - la vulnérabilité de l'environnement 2) voire des impacts constatés.

En vue d'établir un bilan global de la politique routière menée depuis 20 ans sur le réseau de routes nationales (renforcements coordonnés et entretien préventif), la Direction des Routes française a mis en place un système de recueil de données à grande échelle : l'opération *IQRN* (Image Qualité du Réseau National) (SETRA, 2000). Cette opération a été initiée en 1992 par le réseau technique de l'équipement. L'objectif essentiel est l'évaluation de l'état des chaussées qui s'appuie sur un recueil d'états élémentaires de chaussée. Les données recueillies permettent d'établir une notation de l'état de la surface (note surface) et de la structure de chaussée (note patrimoine). La base de données IQRN constituée représente une photographie globale de l'état du réseau.

3.2. Modélisation de l'évolution du patrimoine et simulation de stratégies de gestion

Dans le but d'améliorer les techniques de gestion, les services de l'équipement ont progressivement développé une gamme de logiciels, la gamme *GiRR* (Freitas et al., 1998), en vue de gérer de manière plus optimale l'entretien du réseau de routes nationales et départementales. L'opération IQRN permet de collecter une masse importante de données permettant d'élaborer un tel outil. La méthode d'étude reste tout de même applicable à toutes catégories de voies (voies de type autoroutier, routes nationales, routes départementales, voies communales et urbaines, routes forestières et voies privées) et tous les types de structure de chaussée revêtue, à l'exception des chaussées à structure en dalles de béton et des chaussées pavées. Le gestionnaire attend de :

- disposer à tout moment d'une image de l'état et des performances (confort, sécurité) de son réseau aussi bien à l'échelle d'un tronçon spécifique que pour un linéaire voir un réseau particulier ;
- disposer d'outils de simulation lui permettant de justifier des choix techniques (établissement de priorités de réhabilitation, choix d'un taux d'inspection…) et de comparer les effets à plus ou moins long terme de ces choix (validation de stratégies de gestion)

- *Les indicateurs d'état*

Les indicateurs sont les informations utiles à GiRR pour caractériser la nature et l'état des chaussées composant le réseau étudié et, par conséquent, pour pouvoir appliquer sa logique de décision. Selon l'objectif d'une étude (évaluation de réseau, programmation d'entretien, étude particulière), selon la finalité à laquelle on s'intéresse (conservation du patrimoine, caractéristiques de surface), certains indicateurs sont plus pertinents que d'autres. Outre les indicateurs décrivant la nature de la chaussée, GiRR.P prend en compte pour son analyse des indicateurs décrivant l'état de la structure de chaussée et des indicateurs décrivant l'état de sa surface.
Quatre indicateurs traduisent la *nature* de la chaussée :
- Le type de chaussée, ou structure : souple, bitumineuse, semi-rigide ou mixte.
- Le type de la couche de roulement,
- L'âge de la couche de roulement,
- Le trafic.

Deux familles d'indicateurs sont retenues pour caractériser l'*état structurel* d'une chaussée :
- Les dégradations de surface, relevées conformément au mode opératoire de la méthode LPC,
- La déformabilité de surface, mesurée conformément au mode opératoire de la méthode LPC.

Quatre types d'indicateurs ont été retenus pour caractériser l'*état de la surface* de la chaussée :
- Les déformations, relevées conformément au mode opératoire de la méthode LPC,
- L'uni longitudinal, mesuré à l'aide de l'APL (analyseur de profil en long) en référence à la note d'information SETRA,
- Le profil transversal, mesuré à l'aide du Transversoprofilomètre à ultrasons en référence au projet de méthode LPC de mesure et d'interprétation du profil en travers,
- L'adhérence, mesurée à l'aide du Rugosimètre à laser et du SCRIM (Sideway force Coefficient Routine Investigation Machine) en référence à la note d'information SETRA.

- *Modèle GiRR-ÉVALUE*

Pour gérer de façon rationnelle l'entretien d'un réseau routier, le maître d'ouvrage a besoin d'avoir une vision globale de l'état des routes, dans le double but :
- de présenter – aux usagers, aux élus, aux financiers – sous forme lisible et fidèle, l'état du réseau à un moment donné, ou son évolution,
- de planifier des budgets d'entretien et de les répartir entre les différentes composantes, régionales ou fonctionnelles, de son réseau.

Dans la gestion des fonds publics mis à sa disposition, le responsable de l'entretien d'un réseau routier doit concilier deux types de préoccupations. D'une part, il doit préserver le patrimoine que représente son réseau. D'autre part, il doit garantir aux usagers un niveau de service adéquat. Ces deux préoccupations se traduisent par deux objectifs sensiblement différents, dont l'importance respective dépend de la fonction de la route. Les routes qui relient les grands pôles industriels supportent un trafic élevé de véhicules lourds, qui sollicite beaucoup la structure de chaussée. L'entretien y a nécessairement un *objectif structurel.* Sur les routes qui servent à la circulation rapide de véhicules légers, la sécurité des usagers (notamment vue à travers l'uni et l'adhérence du revêtement) devient un critère économique sensible. L'entretien a ici un *objectif de surface.*

GiRR-ÉVALUE (Lepert et Goux, 1994) est un outil de suivi qui permet au Maître d'Ouvrage d'avoir une idée précise de l'état global du réseau. La démarche méthodologique consiste à suivre l'évolution de l'ensemble du réseau et à s'en servir comme indicateur descriptif de l'effet de la politique routière mise en oeuvre. GiRR-ÉVALUE attribue à chaque section de chaussée de 200 mètres de longueur une note relative à l'état de la structure de la chaussée et une note présentant la qualité de surface.

L'évaluation des notes repose sur l'estimation des travaux que nécessiterait une remise en état. La notation est donc directement reliée aux coûts des travaux conventionnels pour remettre la chaussée en un état de référence qui est la chaussée neuve. Ainsi, une chaussée en parfait état aura une note patrimoine et une note surface égales à 20, et une chaussée de note patrimoine égale à 0 nécessitera les travaux maximums pour être remise en état. Pour faciliter l'exploitation de ce système, il a été établi une notation synthétique (*Tableau 2 - 4*) comportant cinq niveaux de qualité (A à E) correspondant chacun à une classe de notes globales.

Tableau 2 - 4. Classes de notes d'état et niveau de qualité du réseau.

Classe de notes	Niveau de qualité	Définitions
20	A	Excellent (absence de dégradation)
19	B	Bon (présence de dégradations mineures localisées)
18 –17	C	Acceptable (présence de dégradations mineures étendues)
16 – 13	D	Médiocre (présence de dégradations graves étendues)
< 13	E	Mauvais (présence de dégradations graves généralisées)

Ce système de notation présente un double aspect, technique et économique. Il apporte les éléments pour l'évaluation des budgets de remise ou de maintien en état du réseau de routes.

- *Modèle GiRR-STRATÈGE*

Le module d'analyse de stratégies permet à son utilisateur de simuler l'effet à long terme des politiques qu'il envisage, à la fois en termes de budget à prévoir et d'effet sur l'état des routes. *GiRR-STRATÈGE* (Renault *et al.,* 1995) est un processus itératif qui permet de simuler l'évolution de l'état du réseau à moyen ou long terme. Chaque itération simule l'évolution du réseau en une année. Partant de l'état actuel, le processus applique une loi d'évolution déterminée en fonction de l'entretien réalisé.
A l'issue du calcul, on peut visualiser l'évolution des notes d'état moyennes, de leur répartition par classe, et mettre en regard de ces évolutions les coûts d'entretien. Le gestionnaire dispose ainsi des éléments nécessaires pour apprécier l'intérêt relatif des différentes politiques d'entretien qu'il envisage et choisir la plus pertinente dans son contexte.

PARTIE III : ELEMENTS METHODOLOGIQUES D'EVALUATION POUR L'AIDE A LA DECISION

En quoi les méthodes d'aide multicritère à la décision sont-elles utiles au maître d'ouvrage routier ? Comme nous l'avons vu dans les paragraphes précédents, les projets d'infrastructures routières affectent directement ou indirectement de nombreux domaines comme la mobilité, l'environnement, les activités économiques, l'aménagement du territoire, les activités sociales. Cette multiplicité des domaines concernés va aussi de pair avec la variété des acteurs intervenant dans le projet, ceux-ci ayant souvent des systèmes de valeurs différents, voir antagonistes. De plus, la prise en compte du développement durable nécessite d'analyser le projet à court, à moyen et à long terme. Et finalement, le projet peut avoir au cours de l'analyse des champs variables d'étude. L'environnement de l'étude du projet présente ainsi des limites floues et variables et l'on est dans une problématique complexe avec :

- critères multiples selon les contraintes prises en compte dans l'élaboration du projet. De plus, ces critères sont parfois difficilement quantifiables, notamment les critères concernant l'aspect environnemental.
- systèmes de valeurs différents selon les acteurs intervenant dans le projet,
- plusieurs périodes d'analyse, notamment pour considérer le cycle de vie du projet,
- dimensions du périmètre d'étude variables. Ce problème est résolu par la définition stricte de la dimension spatiale du champ de l'étude.

On constate donc que la problématique des projets d'infrastructures routières est fortement multicritère. Il est primordial de s'intéresser au plus haut point aux différentes méthodes d'aide multicritère à la décision. Elles sont présentées ci-dessous.

Les méthodes d'aide multicritère à la décision utilisées dans les projets routiers, quand elles existent, sont parfois assez sommaires et souvent fortement réductrices (Tille, 2000). Elles consistent souvent en l'utilisation de notes pondérées, la notation étant du ressort du chargé d'étude, la détermination des poids l'étant aussi parfois.

1. LES METHODES D'AIDE MULTICRITERES A LA DECISION

Il existe de nombreuses méthodes d'aide multicritère à la décision permettant de répondre à une problématique précise. Leur typologie est décrite brièvement ici ainsi que les caractéristiques des principales méthodes.

1.1. Terminologie

Variante : Il s'agit des éléments qui font l'objet de l'analyse multicritère. Les ouvrages de référence de cette discipline parlent plutôt d'*actions potentielles*. L'ensemble des variantes V comprend n variantes (v_1 à v_n) et quand il s'agira de désigner deux variantes particulières de cet ensemble (cas des méthodes d'agrégation partielle), les termes de variante v_i et de variante v_k seront utilisés.

Critère : Un critère est défini comme étant une expression qualitative ou quantitative permettant de juger la conséquence, désignée aussi par le terme de performance, d'une variante vis à vis d'un objectif ou d'une contrainte, tous deux relatifs au projet considéré. L'ensemble des critères C comprend m critères (c_1 à c_m). La performance, ou évaluation, de la variante v_i pour un critère c_j donné est définie par le terme $g_j(v_i)$. Un critère se doit d'être utile et fiable. Il est associé à une échelle ordinale (excellent, bon, moyen ou mauvais) ou cardinale (francs, notes) et dispose d'un sens de préférence (minimisation ou maximisation).

Dans le domaine des projets d'infrastructures routières, les critères peuvent être nombreux et il est nécessaire de les regrouper en familles de critères afin de faciliter notamment

l'appréciation de leur importance relative par le décideur (Tille, 2000). Il est en effet plus facile de procéder à une pondération sur six ou sept critères que sur une vingtaine de critères. Le choix de ces derniers doit être cohérent. Cette cohérence est vérifiée si les trois conditions suivantes sont respectées :

- *exhaustivité :* Il s'agit de ne pas oublier un critère. Le test d'exhaustivité proposé par (Roy et Bouyssou, 1993) est simple : quand les conséquences de deux variantes sont identiques pour l'ensemble des critères en présence, il doit exister une relation d'indifférence entre ces deux variantes.
- *cohérence :* Il doit y avoir une cohérence entre les préférences locales de chaque critère et les préférences globales. C'est-à-dire que si une variante *a* est égale à une variante *b* pour tous les critères sauf un où elle lui est supérieure, ceci signifie que la variante *a* est globalement supérieure à la variante *b.*
- *indépendance :* Il ne doit pas y avoir de redondance entre les critères. Leur nombre doit être tel que la suppression d'un des critères ne permet plus de satisfaire les deux conditions précédentes (Maystre et al., 1994). Les critères ne sont pas toujours directement mesurables. On utilise parfois un *indicateur* qui est une variable mesurable servant à quantifier une situation ou la tendance du critère en question.

1.1.1. Processus d'étude

Le processus d'étude d'une aide multicritère à la décision se déroule en cinq étapes indépendantes. Ces étapes ne sont pas nécessairement successives et peuvent faire l'objet de rétroactions :

- *Inventorier des variantes* Il s'agit de procéder à l'inventaire des variantes (on désigne aussi les variantes par le terme d'actions potentielles) à évaluer. Cette liste n'est pas exhaustive et définitive. Elle peut évoluer tout au long de l'étude (suppression ou ajout de variantes)
- *Lister les critères* Il s'agit d'élaborer la liste de critères à prendre en considération. Ces critères doivent être en relation avec les contraintes et les objectifs utilisés dans la génération des variantes.
- *Pondérer les critères* Un critère peut être plus important qu'un autre. Cette importance relative est exprimée par un nombre appelé poids, terme qui a plus un sens imagé que physique
- *Juger les actions* Il s'agit de juger chaque variante par rapport à chacun des critères. Les critères ne sont pas toujours directement mesurables et dans ce cas un **indicateur** leur est associé. L'ensemble des évaluations est présenté dans un tableau à double entrée, appelé *tableau des performances* ou matrice des évaluations, dans laquelle chaque ligne représente une variante et chaque colonne un critère.
- *Agréger les jugements* Il s'agit ensuite d'agréger les jugements pour définir quelle solution jouit globalement des meilleures évaluations Les quatre premières étapes sont pratiquement communes à toutes les méthodes d'aide multicritère à la décision. Par contre, la cinquième étape, qui est une étape technique, est propre à chaque méthode.

Trois problématiques d'agrégation des jugements sont à distinguer dans le domaine des méthodes d'aide multicritère à la décision : agrégation complète, agrégation partielle ou agrégation locale itérative.

1.1.2. Les méthodes multicritères d'agrégation complète

Ces méthodes (de l'*école nord-américaine*) consistent à attribuer une fonction d'utilité partielle, qui est parfois très complexe, à chaque critère. Ensuite, pour chaque variante, une fonction mathématique agrège les différentes utilités partielles propres à chaque critère. On obtient ainsi une réponse synthétique qui est unique (critère unique de synthèse). Celui-ci est parfois appelé valeur d'utilité globale de la variante.

Ces méthodes autorisent la compensation des jugements, qui sont transitifs, entre les différents critères. Un défaut de ces méthodes provient du fait que la détermination de la fonction d'utilité est parfois très complexe. Ainsi, après avoir adopté une logique multicritère, on revient finalement à un problème monocritère en « *mollissant* » sur l'absence de commensurabilité des critères (Schärlig, 1985). Ainsi les critères qualitatifs doivent être retranscrits sous forme de notes.

1.1.3. Les méthodes multicritères discrètes ou d'agrégation partielle

Ces méthodes (de l'*école européenne)* consistent tout d'abord à comparer les variantes deux par deux, critère par critère. Ceci permet d'établir les relations de surclassement qui existent entre elles (préférence forte ou faible, indifférence ou incomparabilité). Ensuite, une synthèse de ces relations entre les différentes variantes est effectuée, sous forme généralement d'un graphe des relations, afin de réaliser un tri, de procéder à un rangement ou de faire sortir la meilleure variante du lot.

Ces méthodes admettent les postulats d'incomparabilité et d'intransitivité. Elles autorisent une plus grande richesse dans les relations entre les variantes. Comme les critères sont considérés séparément et qu'il n'y a pas de fonctions d'utilité à définir, ceux-ci peuvent être qualitatifs ou quantitatifs et de natures très différentes.

En comparaison des méthodes d'agrégation complète, les résultats des méthodes d'agrégation partielles sont parfois peu clairs car ils sont basés sur une analyse du graphe des relations qui est difficile et complexe.

De plus, le nombre d'opérations de comparaisons à réaliser sur chaque paires de variantes (pour n variantes, on a $n.(n-1)$ comparaisons à réaliser) peut se révéler considérable en présence de nombreuses variantes.

1.1.4. Les méthodes interactives

Les deux méthodes précédentes peuvent se révéler lourdes à utiliser en présence d'un grand nombre de variantes, voir d'un nombre de variantes quasi infini si l'on est en présence d'un ensemble V continu. Il s'agit alors de procéder à une exploration locale en fixant tout d'abord une solution de départ correspondant à une variante initiale qui est aussi bonne que possible. Ensuite, on regarde dans l'ensemble des variantes proches de la variante initiale s'il n'existe pas une variante qui soit meilleure. Si c'est le cas, cette variante devient la variante initiale d'un nouveau processus de recherche. On procède ainsi par itérations.

Ces jugements locaux mettent en jeu un petit nombre de variantes en renonçant à une vision globale du problème posé. Il est ainsi tentant de vouloir augmenter le nombre d'itérations à réaliser de manière à limiter le risque d'« oublier » une variante qui pourrait s'avérer intéressante. Ces méthodes sont aussi d'un contenu théorique ardu ce qui fait que le décideur doit avoir une totale confiance envers le chargé d'étude. Joerin (Joerin, 1998) souligne aussi que ce genre de méthode n'est pas à conseiller si le décideur est un groupe d'acteurs, car cette approche ne favorise pas la négociation, les nombreuses itérations et la complexité des opérations étant autant d'occasions de remise en question de la procédure.

1.1.5. Applications dans le domaine routier

Il n'existe pas de méthodes d'aide multicritère à la décision qui soit parfaite et idéale pour chaque cas donné. Le choix de la méthode à utiliser est en soi une problématique qui dépend du décideur, du chargé d'étude, des caractéristiques du projet, de son environnement, des variantes considérées, du résultat attendu, des objectifs fixés à l'aide à la décision.

La détermination des performances des variantes pour un critère donné se base sur un **indicateur** qui est une variable mesurable servant à quantifier une situation ou la tendance du

critère en question. Si plusieurs indicateurs servent à qualifier le critère, il s'agit de procéder alors à une **pondération technique** entre ces indicateurs partiels de manière à disposer d'un indicateur agrégé unique pour le critère. Cette pondération technique est une agrégation complète réalisée entre ces différents indicateurs partiels. Pour r indicateurs partiels IP_p relatifs au critère c_j, on peut qualifier l'état d'une variante v_i relativement au critère c_j avec un indicateur agrégé $I_j(v_i)$ en procédant de la manière suivante :

$$I_j(v_i) = \sum_{p=1}^{p=r} IP_p(v_i) PT_p \qquad 2 - 1$$

Avec :
• $I_j(v_i)$ indicateur agrégé qualifiant l'état du critère c_j pour la variante v_i
• $IP_p\ (v_i)$ indicateur partiel qualifiant partiellement (pour le domaine p) l'état du critère c_j pour la variante v_i
• PT_p pondération technique de l'indicateur partiel $IP_p\ (v_i)$
La somme des pondérations techniques PT_p pour un critère c_j donné vaut 1 :

$$\sum_{p=1}^{p=r} IP_p = 1 \qquad 2 - 2$$

La pondération technique des différents indicateurs partiels est réalisée uniquement par le projeteur ou par le groupe d'étude. Elle doit cependant être clairement définie et étayée dans le rapport technique.

En présence de nombreux critères, comme c'est souvent le cas dans le domaine des infrastructures routières qui affectent de multiples domaines, il est nécessaire de procéder à une agrégation des critères en **famille de critères**. La pondération s'effectue ainsi en deux niveaux sur un nombre de critères qui idéalement ne devrait pas dépasser sept par catégorie (Tille, 2000). Cependant, on ne procède pas à deux niveaux d'application d'une méthode d'aide multicritère à la décision mais à un seul en attribuant une pondération croisée à chaque critère. Cette pondération croisée est obtenue en multipliant le poids du critère au sein de sa famille par le poids de sa famille. C'est ce procédé qui a été retenu par Tille (Tille, 2000).

Ainsi, l'ensemble des critères C comprend m critères c_j répartis en f familles de critères F_i. Le poids P_j d'un critère se détermine ainsi de la manière suivante :

$$P_j = P_{j,i}.P_i \qquad 2 - 3$$

Avec :
• P_j poids du critère c_j relativement à l'ensemble des autres critères de l'ensemble C
• Pj,i poids du critère c_j relativement à l'ensemble des autres critères de la famille de critères F_i à laquelle appartient le critère c_j
• Pi poids de la famille de critère F_i à laquelle appartient le critère c_j relativement à l'ensemble des autres familles de critères
Pour t critères c_j d'une famille de critères F_i définie, on a :

$$\sum_{j=1}^{j=t} P_{j,i} = 1 \qquad 2 - 4$$

De même, pour l'ensemble des poids Pi des f familles de critères, on a :

$$\sum_{i=1}^{i=f} P_i = 1 \qquad 2 - 5$$

1.1.6. Exemples d'évaluation multicritère appliquée à des projets interurbains

Plusieurs études d'aide à la décision existent concernant le choix d'un tracé routier qui soit le moins dommageable du point de vue de l'environnement. (Marchet et Siskos, 1979), (Siskos et Assimakopoulos, 1989), (Gomes et Lima, 1991) et (Mladineo et al., 1992). Marchet et Siskos (1979) ont mis au point un éventail de méthodes multicritères à la décision afin d'évaluer et de classer des tracés dits « candidats ». La méthode s'appuie sur un découpage du terrain en tronçons homogènes (58 tronçons ont ainsi été obtenus). Tout tracé est défini comme le résultat d'une succession de tronçons. Chaque tronçon homogène, est évalué sur 4 critères : complexité de l'occupation humaine, fonctions de protection du milieu, fonctions de production et paysage.

Le choix de nouveaux tracés routiers en Adriatique (Mladineo et al., 1992) a provoqué un grand nombre de discussions, de dilemmes, d'intérêts contradictoires, suite aux deux solutions proposées : une côtière et l'autre continentale. Les méthodes classiques (études préliminaires) ont abouti presque aux même résultat. La méthode PROMETHEE a été utilisée avec le logiciel GAIA. Les poids des différents critères issus des conflits ont été évalués par une équipe d'experts. Différents scénarios ont été pris en compte pour analyser l'influence des poids de chaque critère exercée sur la solution obtenue.

L'article de Gomes et Lima (1991), présente des structures de préférence entre trois profils distincts : environnement, qualité de vie et impacts économiques.

Le *Tableau 2 - 5* présente l'ensemble des familles de critères ainsi que les critères pris en compte par les différents auteurs.

Tableau 2 - 5. Identification des critères existants de choix de nouveaux tracés routiers

Références	**Famille de critères**	**Critères**
(Marchet, Siskos, 1979) *(Siskos, Assimakopoulos, 1989)*	- Complexité de l'occupation humaine - Protection de l'environnement - Production - Paysage	- Elément humain et ses manifestations dans l'environnement - **Protection des eaux de surface et souterraine** - **Protection de la faune et la flore** - **Protection des sols** - **Production agricole** - Production forestière - Cloisonnement - Topographie
(Mladineo et al., 1992)	- Trafic - Technique/ingénierie - Développement - Environnement - Socio-économie	- Complexité du réseau - Mode de circulation - **Coûts d'exploitation, d'investissement et maintenance** - Faisabilité technique - Développement économique - **Agriculture et sylviculture** - Organisation spatiale du trafic, **intégration au territoire** national et raccordement aux centres de développement - Influence sur le potentiel défensif du pays - Impacts des travaux - Aspects fonctionnels - Impact sur le patrimoine paysager et culturel - **Nuisances** dues au trafic - Coefficient de production sociale - Emploi - Revenu national brut (par habitant) - **Développement économique**
(Tille, 2000)	- Besoins de transport motorisé - Moyens financiers - Aménagement du territoire - Nuisances sur l'environnement - Développement économique - Nuisances dues aux travaux	- Transport - **Agriculture** - **Coûts d'investissement** - **Coût d'entretien et d'exploitation** - Utilisation mesurée du sol - **Buts et plans de l'A.T** - Environnement humain - **Environnement naturel** - **Economie micro-régionale** - **Economie macro-régionale** - **Nuisances**

Parmi les critères communs, nous pouvons citer le coût d'investissement, d'exploitation et d'entretien, la protection agricole et sylvicole, la protection de l'environnement (humain, faune et flore, eaux et sols) ou encore l'intégration de l'ouvrage dans le territoire. Aucun indicateurs n'est définis par les auteurs sauf par (Marchet et Siskos, 1979) qui en citent quelques uns comme le nombre d'occupation du sol (type d'habitat, nombre d'éléments d'occupation humaine, volume agricole/sylvicole produit, qualité du produit, potentialité du terrain et sensibilité attractif). Seules quelque scores peuvent être attribués (1 - 6).

1.1.7. Exemple d'application. Évaluation multicritère appliquée à des ouvrages urbains

La voirie urbaine en particulier se trouve confrontée à de multiples spécificités technique et réglementaires de par la présence de différents réseaux. L'étude présentée ci-après traite d'une analyse multicritère appliquée à la gestion des eaux pluviales en milieu urbain. Bien que la gestion de l'eau en urbain ne soit pas l'objet de cette thèse, des éléments de réflexion concernant l'approche méthodologique peuvent être intégrés dans le cadre de notre étude. Une approche d'évaluation multicritère a été abordée au sein du LCPC (Martin et al. 2004), en s'appuyant sur la méthode multicritère ELECTRE III. Il s'agit de guider le gestionnaire de l'eau dans la ville vers la ou les meilleures solutions possibles. Du fait de la diversité des techniques de gestion à la source et de la définition souvent insuffisante des besoins, les gestionnaires de l'eau se trouvent confrontés à de nombreuses difficultés. Huit types de variantes désignées BMP « Best Management Practices » ont été considérées : les bassins à ciel ouvert en eau (Bass1) et bassins à ciel ouvert secs (Bass2), les bassins enterrés (Bass3), les noues, les chaussées poreuses à structure réservoirs (CPSR), les tranchées d'infiltration (Tranc), les toitures stockantes (Toitu), et les puits d'infiltration (Puits).
Dans cette étude, une enquête de satisfaction a été réalisée pour l'étude auprès d'un échantillon de 524 organismes incluant des établissements publics (DDE), des collectivités territoriales et des aménageurs privés. Avec un taux de réponse de 20%, cet échantillon représente environ 13 millions d'habitants et 3500 BMPs disséminées dans l'ensemble des régions de France. Le questionnaire portait sur les BMPs en place sur un secteur de référence : quel type de BMP est implanté de façon privilégiée, quelle est la satisfaction des utilisateurs au regard de différents critères (technique, hydraulique, environnemental, sociologique, développement urbain, opération et maintenance, coûts).
Hormis les critères de site, pouvant être discriminants dans le choix de telle ou telle BMP, six critères principaux sont considérés dans le processus d'analyse multicritère :
Le critère scientifique et technique permet de prendre en compte l'efficacité de la solution compensatoire et des capacités d'adaptation ou de modification de la solution dans le temps et l'espace.
Le critère d'opération et de maintenance permet de prendre en compte l'ensemble des opérations de maintenance (entretiens préventifs ou curatifs), que ces dernières soient régulières ou occasionnelles.
Le critère environnemental (ENV) permet de prendre en compte l'impact en termes quantitatifs et qualitatifs des rejets de la solution sur le milieu naturel.
Le critère social et porteur de bénéfices à la communauté urbaine permet de prendre en compte l'impact paysager, le caractère multi-fonctionnel de la solution, l'impact sur la population (en terme d'information et de risques), la contribution aux politiques de développement durable (consommation d'énergie, recyclage des déchets,…).
Le critère économique permet de prendre en compte les coûts d'investissement, de fonctionnement, d'opération et de maintenance (incluant les prix des terrains, les charges liées à l'assainissement pluvial,…), ainsi que les risques financiers liés au projet et la rentabilité à long terme du projet.

Le critère réglementaire permet de prendre en compte le respect des différentes législations (locales, nationales, européennes), la conformité aux normes de construction, ainsi que le statut légal de l'ouvrage.
L'évaluation des performances de l'ensemble des BMP au regard des différents critères proposés a été effectuée en combinant plusieurs types d'outils ou documents : études bibliographiques, travaux et études sur sites, retours d'expérience des utilisateurs. Les unités proposées ne sont que des suggestions. Il faut noter aussi que les paramètres spécifiques à un site particuliers ne sont pas pris en compte.
La comparaison des alternatives entre elles nécessite un système d'évaluation commun. Dans le cas d'ELECTRE III, les alternatives sont comparées deux à deux, pour un même critère (le système d'évaluation doit être le même pour un même critère). En effet, la comparaison entre deux alternatives ne se traduit pas par la différence entre ces deux alternatives, mais par le degré de crédibilité de l'hypothèse de surclassement que l'auteur va tester. Ainsi, pour chaque paire d'alternatives et pour chaque critère, le degré de crédibilité est une valeur comprise entre 0 et 1.
La pondération des critères, ensuite, permet de donner un poids plus important à un ou plusieurs critères parmi le jeu initial de critères. Trois jeux de poids sont ainsi définis, représentatifs de trois types d'acteurs :
acteur 1 : logique de planification
acteur 2 : logique de développement urbain
acteur 3 : logique de protection de l'environnement
L'acteur 1 choisit de privilégier les critères économiques (coût d'investissement et d'entretien, besoin et fréquence des opérations de maintenance).
L'acteur 2 choisit, dans une optique de développement durable urbain d'accorder une importance plus forte aux critères sociaux et porteurs de bénéfices à la communauté urbaine (niveau d'agrément et contribution aux politiques de développement durable).
L'acteur 3, dans un souci de protection des milieux naturels, privilégiera les critères environnementaux (rétention de la pollution et impact sur la qualité des eaux souterraines).
A titre indicatif, les relations finales de surclassement issues de l'exploitation d'ELECTRE III (le logiciel) sont présentées sur la *Figure 2 - 5* (situation témoin, acteurs 1, 2 et 3). Lorsque deux actions sont indifférentes, elles sont contenues dans la même case (exemple des bassins à ciel ouvert, secs ou en eau, qui sont systématiquement indifférents, quelle que soit la stratégie). Lorsque deux actions sont incomparables, elles sont placées dans deux cases différentes, non reliées par une relation de surclassement.

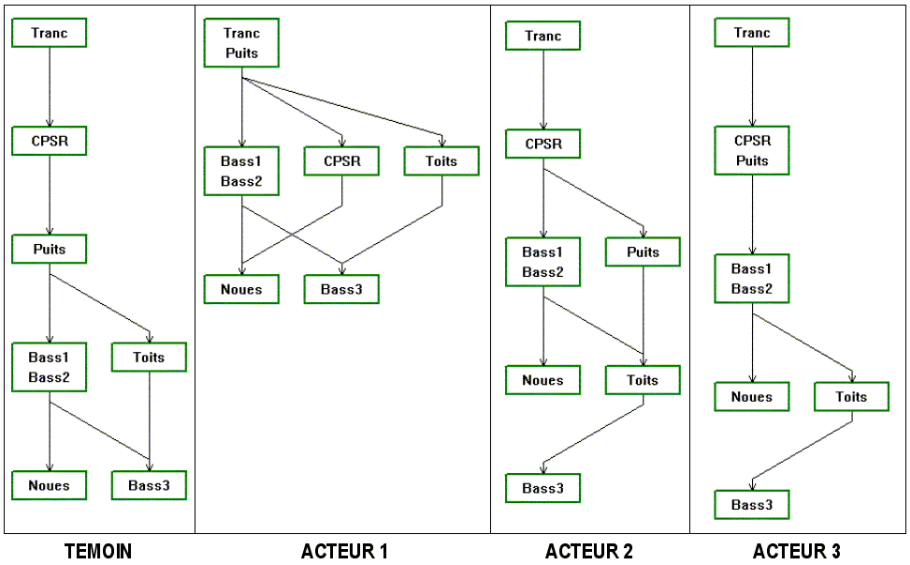


Figure 2 - 5. Relations finales de surclassement pour les différentes stratégies étudiées (Martin et al., 2004)

Le résultat des stratégies de planification, de développement urbain et de protection de l'environnement ne diffère pas de façon importante de la situation témoin.

2. METHODES D' EVALUATION DES PROJETS, OUVRAGES ET MATERIAUX

2.1. Evaluation relevant des sciences de l'homme et la société

2.1.1. Les processus de concertation

La « concertation » est aujourd'hui une pièce essentielle d'un projet quel que soit le contexte. Des questions reviennent de façon récurrente : Qui associer ? Les participants au processus sont-ils représentatifs ? Comment entendre ceux qui ne s'expriment pas ? Quelle part accorder à la négociation ? Quelle règle du jeu adopter pour que les décideurs et les personnes associés à la démarche puissent jouer chacun leur rôle ? Comment présenter le projet : à partir de diagnostics ? Sur des variantes élaborées ? Ces questions servent à élaborer un outil d'analyse permettant au projeteur de trouver la méthode de travail appropriée au contexte particulier de son projet.

L'examen des Plans de Déplacements Urbains de Grenoble, de Lille, de Lyon et de Nancy montre qu'il n'y a pas une méthode pour assurer un vrai débat public mais des démarches ancrées dans autant de terrains que de projets. Les exposés et les débats qui se sont tenus le 14 juin 2003 à Lyon à l'occasion de la sortie de l'ouvrage du CERTU « La Concertation en aménagement » et en collaboration avec l'agence des villes, ont permis de vérifier les conditions d'obtention d'une réelle concertation sur des questions stratégiques de moyen et long terme comme celles posées par les PDU. Ils confirment ainsi la nécessité d'adopter des démarches associant le temps dans les ingrédients de la réussite et de permettre à l'enquête publique de jouer véritablement son rôle d'information pour une expression formelle de l'usager mieux éclairée.

Une méthodologie dite « actualisée » a été abordée par (Tille, 2000). L'auteur procède à une identification des problèmes inhérents aux projets d'infrastructures routières. Il propose ensuite une démarche permettant au projeteur d'évoluer au mieux au sein de la procédure actuelle de manière à proposer un projet de qualité. Dans son étude, l'accent a été porté notamment sur la participation du public, les rapports entre les acteurs ainsi que sur les méthodes d'aide multicritère à la décision. Des « outils de travail» ont été développés par l'auteur permettant au projeteur routier de réaliser une infrastructure qu'il qualifie d'infrastructure de qualité, durable et acceptée par tous. Ces différents éléments sont réunis au sein d'une méthodologie dite actualisée ou encore méthodologie concertative. Elle consiste plus en un cheminement intellectuel à adopter par le projeteur qu'en une méthode strictement définie pour un type de projet donné.

Il faut noter que la décision est une activité subjective. La subjectivité reflète les systèmes de valeurs des membres du groupe de pilotage qui conditionnent la décision. L'objectivité concerne les valeurs des indicateurs descriptifs qui sont déterminés sans contestation majeure par le groupe d'étude. Les aspects subjectifs et objectifs étant intimement liés dans tout le processus de décision, il est donc important de les distinguer et de les identifier clairement tout au long de l'étude.

Différents facteurs sont à l'origine des problèmes rencontrés. Ceux-ci peuvent être de nature endogène au projet, comme la procédure qui est souvent rigoureuse ou les méthodes de travail qui sont inadaptées, ou de nature exogène au projet, comme l'apparition de nouveaux paradigmes sociétaux, tel le développement durable, la multiplicité des domaines affectés et acteurs concernés par une infrastructure routière ou l'évolution des attentes sociales.

2.1.2. Les processus d'entretiens semi-directifs

L'entretien semi-directif est une des techniques qualitatives les plus fréquemment utilisées. Il permet de centrer le discours des personnes interrogées autour de différents thèmes définis au préalable par les enquêteurs et consignés dans un guide d'entretien. Il s'oppose en cela à l'entretien non directif qui se déroule très librement à partir d'une question. Ce type d'entretien permet ainsi de compléter les résultats obtenus par un sondage quantitatif en apportant une richesse et une précision plus grandes dans les informations recueillies, grâce notamment à la puissance évocatrice des citations et aux possibilités de relance et d'interaction dans la communication entre interviewé et intervieweur. L'entretien révèle souvent l'existence de discours et de représentations profondément inscrits dans l'esprit des personnes interrogées et qui ne peuvent que rarement s'exprimer à travers un questionnaire. L'entretien a d'abord pour fonction de reconstruire le sens « subjectif », le sens vécu des comportements des acteurs ; le questionnaire a pour ambition première de saisir le sens « objectif » des conduites en les croisant avec des indicateurs des déterminants sociaux. Le questionnaire sélectionne donc les éléments pertinents des conduites étudiées et les facteurs sociaux. Pendant l'avant questionnaire, il faut mener de front :

- lire ce qui a été écrit auparavant sur le thème étudié, repérer la manière dont les chercheurs ont essayé antérieurement d'expliquer la conduite, leurs découvertes et leurs impasses ;
- écouter ce que les acteurs sociaux disent de leurs propres pratiques afin de se familiariser avec les pratiques à analyser. Il faut non seulement savoir comment parler aux individus, comment les interroger, mais aussi être sensible à la manière dont ils décrivent leurs activités. D'où la nécessité d'une pré-enquête par entretien ;
- élaborer progressivement une problématique, un questionnement théorique qui servira de support à la seconde phase, celle de la formulation du questionnaire.

2.1.3. Les approches par questionnaire

L'enquête est un long jeu de construction. L'objectivité (au sens ordinaire) n'est pas un idéal à atteindre, l'enquête par questionnaire n'ayant pas pour fonction de décrire les conduites des acteurs sociaux avec le plus de détails possibles. L'enquête doit appréhender l'identité sociale des individus, pour établir un rapport de causalité entre une pratique étudiée et le milieu social (au sens large de Durkheim)

2.2. Méthodes d'évaluation économique

Le calcul du coût global d'une chaussée nécessite la prise en compte du coût d'investissement, de celui des entretiens réalisés pendant la durée de service et des coûts d'usage supportés par les utilisateurs. L'emploi de matériaux non conventionnels induit la question que peut se poser le maître d'ouvrage de savoir si, malgré un coût d'investissement (qui reste à définir) plus élevé, l'entretien pendant la durée de service de la chaussée est d'un coût plus faible que celui de chaussées classiques. Le coût supporté par les usagers dû aux travaux sur chaussées peut également être pris en compte par la collectivité et venir compléter celui du maître d'ouvrage, pour déterminer le coût global : investissement-entretien-coût d'usage. Une analyse économique des coûts globaux de chaussées doit se faire à partir d'étude réalisées. On recense une liste de références à partir du document de Laurent (Laurent, 2004) (*Tableau 2 – 6*). L'auteur précise que ces ouvrages, pour la plupart à caractère méthodologique, permettent de construire des axes autour de deux grands thèmes : le calcul des coûts d'investissement et d'entretien et celui des coûts supportés par les usagers, coûts induits par les travaux d'entretien.

Tableau 2 - 6. Synthèse de recherche bibliographique (d'après Laurent, 2004)

Références	Points importants
Life Cycle Cost Analysis in Pavement Design Auteur : US departement of transportation Federal highway administration 1997 - Durée d'analyse 35 ans	- coût global, d'investissement, d'entretien et d'usage (taux d'actualisation 4%) - prise en compte des coûts d'usage (retard dû aux travaux), coûts d'accidents dû aux travaux. - prise en compte de l'incertitude sur les calculs économiques en fonction des différents scénarii (Modèle Monté Carlo).
A comparaison of life cycle costs of asphalt and concrete pavements by computer modeling Auteur : Helbek Hede, Danemark Symposium International de Lisbonne 1998 - sections de l'ordre de 10 km de chaussées à 2x2 voies.	- coûts d'entretien et d'usage (véhicule Operating Costs)
Coût sur toute la durée de service Auteur : Bowskill (RU) routes souples (AIPCR-C8) HUVSTIG (Suède) routes en béton (AIPCR–C7) Publication Routes, AIPCR, n° 302, 1999	- coût global investissement et entretien. Les paramètres à prendre en compte pour les coûts d'usage sont : le trafic cumulé, l'état de la chaussée, l'entretien, le coût des travaux, le coût de l'usager et le coût à la société.
Application de la valeur actualisée nette à l'analyse des coûts globaux de projets de construction et de conservation des chaussées Auteur : Gouvernement du Quebec, Ministère des transports, 1999. - Période d'analyse 30 ans - des scénarios d'entretien des chaussées souples et rigides sont proposées sur 40 ans	- sensibilité du projet mesurée en fonction des taux d'actualisation (taux d'actualisation de 5 à 9%)
Coûts des routes sur toute leur durée de service Auteur : AIPCR sous comité C8, 2000	- coût du maître d'ouvrage pour la construction et l'entretien des chaussées, mais aussi le coût à l'usager (congestion du trafic, accidents) et à l'environnement.
Revêtement hydrocarboné et en béton armé continu – comparaison économique. Auteur : Direction Générale des autoroutes et des routes ; ministère Wallon de l'Equipement et des transports, 2001. - durée d'analyse 50 ans - coût de construction, année de référence 2000	L'étude a été réalisée en comparant sur un même itinéraire une chaussée en BAC et une en enrobé à fort trafic (équivalent classe TEX française) (taux d'actualisation 2,6 et 3,5 %)

Pour comparer plusieurs types de structures pendant leur durée de vie en prenant en compte le coût de l'investissement et de l'entretien, il convient de s'appuyer sur des données fiables et dont les sources sont connues. Chaque couple de chaussées doit supporter le même trafic poids lourds, construit avec les mêmes hypothèses de dimensionnement trafic-plate forme, avec les mêmes matériaux locaux et dans un contexte climatique identique.

2.3. Méthodes d'évaluation environnementale

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une évaluation des impacts sur l'environnement d'un système comprenant l'ensemble des activités associées à un produit, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination des déchets (du berceau à la tombe). Cette définition a été proposée à l'occasion du premier atelier du travail sur les ACV, organisé par la SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) en 1993. Au sens de la norme ISO 14 044 (2006), l'ACV est définie comme la compilation et l'évaluation des entrants et des sortants, ainsi que des impacts potentiels environnementaux d'un système de produits au cours de son cycle de vie. Il s'agit d'évaluer un système de procédés et de transports associés à un produit ou un service en identifiant et en quantifiant les flux entrants (énergie, masses de matériaux) et les flux sortants émis dans chacun des compartiments du milieu environnant

(eau, air, sol), puis d'en évaluer les impacts environnementaux potentiels. En principe, toutes les phases du cycle de vie du produit ou du service sont prises en compte, depuis l'extraction et la fabrication des matières premières, jusqu'à la fin de vie (recyclage et/ou mise en décharge) en intégrant les étapes de transformation, transport, distribution, utilisation, maintenance…

Les deux problématiques spécifiques associées à la valorisation des déchets en technique routière sont d'une part le choix d'une filière de traitement pour un déchet donné et d'autre part le choix de filière de production pour un produit ou un service remplissant une fonction donnée.

Les analyses de cycle de vie sont fondamentalement des problèmes d'affectation d'impacts environnementaux à une fonction en considérant tous les types d'impacts environnementaux et toutes les étapes du cycle de vie de l'extraction des ressources naturelles aux traitements finaux. La fonction peut être de production, de transport, ou de traitement…La résolution des problèmes d'affectation est un des aspects de l'étape de définition des objectifs car pour affecter, il faut commencer par définir le système. Toutefois, elle fait partie de l'étape de l'inventaire. Les problèmes d'affectation sont des problèmes d'affectation de charges à des fonctions. La notion de charges correspond dans notre cas à tous les flux amenant des impacts environnementaux, par exemple, des besoins en énergie ou en transport, des consommations de ressources naturelles, des émissions de polluants. L'*affectation à fonction* consiste souvent à répartir la charge environnementale d'un système entre toutes les fonctions assurées par ce système. Il n'existe pas de méthode d'affectation générale acceptée (Schneider et al., 1998), puisque les choix effectués sont susceptibles de modifier largement les résultats des études.

Les valorisations associent fonctions de traitement et fonctions de production. Elles incluent les réemplois, les recyclages et les autres valorisations de déchets. Lors des valorisations, les fonctions sont remplies à des instants différents grâce à la conservation de propriétés utiles des ressources. L'étude des processus de valorisation peut engendrer l'étude d'arbres de valorisation encore appelés *vies de ressource* ou *cascades de valorisation.*

Application de l'ACV dans le domaine routier

Une recherche bibliographique a permis de répertorier neuf études ACV appliquée aux routes.

Analyse des systèmes utilisés : Les différents systèmes utilisés sont présentés dans le *Tableau 2 – 7*. Ils correspondent à des objectifs qui sont différents selon les études, et qui peuvent être regroupés en trois types d'objectifs : l'établissement d'un *inventaire* (Stripple, 2000), la comparaison de variantes de matériaux recyclés et non recyclés (Mroueh et al., 2000), (Ventura et al., 2004) ainsi que la comparaison de variantes de matériaux et dimensionnement (Chappat et Bilal, 2003), (Lundström, 1998), (Pontarollo et Smith 2001), (Peuportier, 2003), (Stripple, 2001), (Rouwette et Schuurmans, 2001).

L'étude cherchant à établir un inventaire est réalisée pour un seul type de chaussée composée de matériaux neufs utilisant du béton bitumineux (Stripple, 2000). La durée d'analyse est de 40 ans. Du point de vue des phases du cycle de vie de la route prises en compte, cette étude considère le terrassement dans l'étape de construction. Les étapes d'entretien sont considérées uniquement du point de vue structurel, mais elles ne prennent en compte, ni les entretiens courants (salage, fauchage…), ni les effets de congestion du trafic causés par les travaux. Lors de l'étape d'exploitation, la signalisation n'est pas prise en compte, mais les effets du trafic sont inclus. Enfin, l'étude ne considère pas de fin de vie de la route. L'unité fonctionnelle considère un tronçon de (9 m de largeur x 1 km de longueur) sans inclure les accotements.

Les études de comparaison de variantes de matériaux recyclés et non recyclés ont des objectifs différents. Les études (Mroueh et al., 2000), (Birgisdottir, 2005) comparent différents types de structures répondant aux mêmes performances mécaniques, mais utilisant

une ou plusieurs solutions de matériaux alternatifs. Les étapes du cycle de vie de la route incluses dans le système sont les étapes de terrassement et construction de la chaussée, entretien structurel et courant de la chaussée (sauf congestion du trafic due au chantier), exploitation de la route (trafic et signalisation). L'étude Ventura et al. (2004) s'intéresse uniquement à des solutions à différents taux de recyclage d'enrobé dans une couche de liaison d'une même chaussée. Cette étude analyse une phase du chantier d'entretien de la chaussée et l'unité fonctionnelle est basée sur la quantité d'enrobé de la couche de liaison produite en une heure de fonctionnement de centrale d'enrobage (100 tonnes correspondant à un tronçon routier de 3,8m x 150 m). Les étapes incluses au système sont restreintes à celles ayant une interaction avec le matériau utilisé dans la couche de liaison : déconstruction de la couche de liaison et des couches supérieures, extraction et transport des matières premières naturelles, transport des matériaux à recycler, mélange en centrale d'enrobage, mise en œuvre.

Les études de comparaison de variantes de matériaux et de dimensionnement sont les plus nombreuses, et ont toutes pour objectif de comparer des chaussées utilisant, de l'enrobé, du béton ou les deux. Les durées de vie de route considérées varient de 20 à 50 ans en fonction des pays. Les étapes du cycle de vie de la route peuvent différer d'une étude à l'autre. Les étapes d'entretien incluent l'entretien structurel pour toutes les études, l'entretien courant n'est abordé que dans deux cas (Park et al., 2003) et (Birgisdottir, 2005). Les effets de congestion du trafic pendant les phases de chantier ont été abordés dans une seule étude (Hoang, 2005). Durant la phase d'exploitation, seuls (Lundström, 1998), (Stripple, 2001) et (Birgisdottir, 2005) incluent la viabilité hivernale. Certaines études considèrent les effets du trafic (Lundström, 1998), (Pontarollo et Smith 2001), (Peuportier, 2003), (Stripple, 2001), les effets de la signalisation ne sont pas inclus. Deux études (Peuportier, 2003), (Rouwette et Schuurmans, 2001) considèrent le démantèlement de la route en fin de vie. La plupart des études prennent en compte un tronçon de longueur de 1 km, et dont la largeur est souvent supérieure ou égale à celle de la chaussée d'un sens de circulation, excepté l'étude de (Chappat et Bilal, 2003) qui analyse un tronçon de (1 m x 1 m).

Tableau 2 - 7. Synthèse des travaux bibliographique dans le domaine des ACV routières

N°	Références	Pays	Type structure	Géométrie	Durée de service (ans)	Milieux considérés			Matériaux considérés		Phases de cycle de vie							
											Construction			Entretien		Exploitation		Fin de vie
						Interurbain	Périurbain	Urbain	Naturels	Recyclés	Terrassement	Ouvrage d'art	Chaussée	Courant	Structurel	Circulation	Hivernale	
1	(Pereira et al., 1997)	France	Non précisé	Longueur: 10km Largeur: non précisé	50	x	(-)	(-)	x	(-)	x	x	x	(-)	x	x	(-)	(-)
2	(Lundström, 1998)	Finlande	BB, BC	Longueur: 1km Largueur: non précisé	50				x	(-)	(-)	(-)	x	(-)	x	x	x	(-)
3	(Mroueh et al., 2000)	Finlande	BC	Largeur: 13m Longueur: 1km	50		x		x	x	x	(-)	x	(-)	x	x	(-)	(-)
4	(Stripple, 2000)	Suède	BB	Largeur: 9m Longueur: 1km	40				x	(-)	x		x		x	x	x	(-)
5	(Mroueh et al., 2001)	Finlande	BB, CV, LHF, BD	Largeur: 12m Longueur: 1km	50	(-)	x	(-)	x	x	x	(-)	x	(-)	x	x	(-)	(-)
6	(Pontarollo et Smith, 2001)	Canada	BB, BC	Longueur: 1km Largeur: 7,5m	50	x		(-)	x	(-)	(-)		x			x	(-)	(-)
7	(Rouwette, Schuurmans, 2001)	Belgique	BAC	Largueur: 1m Largueur: 1m	40				x	(-)	(-)		x					x
8	(Stripple, 2001)	Suède	BB, BC	Largeur: 13m Longueur: 1km	40				x	(-)	x		x		x	x	x	(-)
9	(Chappat et Bilal, 2003)	France	BB, BC, Semi-rigide	Longueur: 1m Largueur: 1m	30	x	(-)	(-)	x	(-)	(-)		x			(-)		(-)
10	(Park et al., 2003)	Etas-Unis	BB, BC	Largeur: 14m Longueur: 1km	20	x	(-)	(-)	x	(-)	(-)	(-)	x	x	x	(-)	(-)	(-)
11	(Peuportier, 2003)	France	BB, BC, Mixte	Longueur: 1km Largeur: 14m	30	x	(-)	(-)	x	(-)	(-)	(-)	x	(-)	x	x	(-)	x
12	(Ventura et al., 2004)	France	BB	Largeur: 3,8m Longueur: 150m	(*)	x	(-)	(-)	x	x	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
13	(Birgistottir H, 2005)	Danemark	BB, BC MIOM	Longueur: 1km Largeur: 17,2 m	100	(-)	(-)	x	x	x	(-)	(-)	x	x	x	(-)	x	(-)
14	(Hoang, 2005)	France	BB, BAC, Mixte	Longueur: 1km Largeur: 14m	30	x	(-)	(-)	x	(-)	x	(-)	x	(-)	x	(-)	(-)	(-)

Analyse des hypothèses de transport : En ce qui concerne le transport des matériaux et matériels dans les systèmes retenus, il est récapitulé dans le *Tableau 2 – 8*. Globalement, on peut constater que les études abordent principalement le transport des mélanges, des matériaux et des déchets. En détail, dans les différents pays, pour chaque type de marchandise à transporter, les distances de transport sont différentes mais souvent inférieures à 500 km, et le mode de transport choisi est principalement le transport routier. Le mode maritime est utilisé dans deux études pour le transport des sels de viabilité hivernale (Stripple, 2000), (Stripple 2001).

Tableau 2 - 8. Récapitulatif de la prise en compte du transport dans les études.
(*) non précisée.

Marchandises	Distance (km)	Trajets	Mode	Pays	Références
Bitume	300	Raffinerie à Centrale	Routier	Canada	(Pontarollo et Smith, 2001)
	400			Suède	(Stripple, 2001)
	300			France	(Chappat et Bilal, 2003)
	285			France	(Ventura et al., 2004)
	300			France	(Peuportier, 2003)
Granulats pour assise et accotements	20	Carrière à chantier	Routier	Suède	(Stripple, 2001)
Granulats pour mélange	10	Carrière à centrale	Routier	Finlande	(Mroueh et al., 2000)
	100			Canada	(Pontalrollo et Smith, 2001)
	50			Belgique	(Rouwette et Schurmans, 2001)
	5			Suède	(Stripple, 2001)
	10				(Stripple, 2001)
	75			France	(Chappat et Bilal, 2003)
	170				(Ventura et al., 2004)
	100				(Peuportier, 2003)
Ciment pour grave hydraulique	300	Cimenterie à chantier		Suède	(Stripple, 2001)
Ciment	100	Cimenterie à centrale	Routier	Finlande	(Mroueh et al., 2000)
	150			Canada	(Pontalrollo et al., 2001)
	60			Belgique	(Rouwette et Schurmans, 2001)
	300			Suède	(Stripple, 2001)
	150			France	(Chappat et Bilal, 2003)
	150				(Peuportier, 2003)
Acier	500	Aciérie à chantier	Routier	Canada	(Pontalrollo et Smith, 2001)
	500			France	(Chappat et Bilal, 2003)
	500				(Peuportier, 2003)
Cendres volantes	10	Centre de production à chantier	Routier	Finlande	(Mroueh et al., 2000)
Laitiers	50		Routier	Finlande	(Mroueh et al., 2000)
Mélanges	10	Centrale à chantier	Routier	Finlande	(Mroueh et al., 2000)
	25			Belgique	(Rouwette et Schurmans, 2001)
	30			Suède	(Stripple, 2001)
	2				(Stripple, 2001)
	20			France	(Chappat et Bilal, 2003)
	56				(Ventura et al., 2004)
	20				(Peuportier, 2003)
Déchets	20	Du chantier au centre de stockage	Routier	Canada	(Pontalrollo et al., 2001)
	25			Belgique	(Rouwette et Schurmans, 2001)
	10			Suède	(Stripple, 2001)
	3			France	(Ventura et al., 2004)
	20			France	(Peuportier, 2003)
Sels	(*)	De Allemagne à Suède	Maritime	Suède	(Stripple, 2000)
	(*)				(Stripple, 2001)

Analyse des inventaires des flux entrants considérés : au niveau des entrants, la consommation d'énergie est quantifiée dans toutes les études. Dans les études (Peuportier, 2003), (Chappat et Bilal, 2003), (Pontalrollo et Smith, 2001), (Rouwette et Schurmans, 2001), la source d'énergie n'est pas présentée. En revanche, dans les autres études, les sources d'énergie telle qu'électricité, fuel, gaz naturel, charbon…sont détaillées. Les matières premières naturelles qui sont à la base des matériaux utilisés sont : l'eau, les granulats, le pétrole brut, le minerai de fer, l'argile, le calcaire. Les flux en granulats sont inclus dans la plupart des études, auxquels s'ajoute parfois l'eau. Les autres matières premières ne sont pas incluses. Les flux de matériaux issus de procédés et des mélanges ne sont pas toujours inclus. Les études (Stripple, 2000), (Ventura et al., 2004) n'analysent que la chaussée en BB. Par conséquent, dans ces études, le béton de ciment et l'acier ne sont pas pris en compte. Au contraire, dans les études (Mroueh et al., 2000), (Rouwette et Schuurmans, 2001), seulement les chaussées en béton de ciment sont analysées.

Analyse des inventaires des flux sortants considérés : trois types de données sont présentés comme des flux dans les inventaires de cycle de vie trouvés dans la littérature. Les inventaires peuvent préciser la ***nature chimique des molécules*** (CO_2, SO_2, N_2O, CH_4, CO, NOx, chlore, sulfate et phénol), peuvent considérer des ***familles chimiques***, ou peuvent également fournir des ***indicateurs d'état*** (*Tableau 2 – 9*). Ces deux derniers types de données d'inventaire sont commentés ci-dessous.

Les ***familles chimiques*** trouvées (COV, HC, métaux, huiles, N-Tot, huiles) ou ***physiques*** (ou particules PM) sont peu précises car elles regroupent des éléments nombreux, et il semble utile ici de préciser leurs définitions.

- Les *huiles* sont des molécules organiques, à longue chaîne majoritairement hydrocarbonées mais avec des structures chimiques très diverses.
- Les valeurs de *PM* (Particulate Matter) ne spécifient en général qu'une masse totale de particules, sans en préciser le passant (la valeur réglementaire des passants peut varier d'un pays à l'autre), et *a fortiori* de courbe granulométrique.
- La famille des *métaux* est très large et n'apporte pas d'information pertinente du point de vue environnemental, qui serait fournie notamment en connaissant au minimum leur nature chimique et dans le meilleur des cas, leur spéciation (état d'oxydation, liaisons avec des composés organiques…).
- Le N-tot (azote total) regroupe l'azote présent dans les composés organiques, l'azote sous forme ammoniacale, et l'azote oxydé présents dans un effluent aqueux.
- *Les COV* (Composés Organiques Volatils) sont par définition, des molécules organiques, à l'état de vapeur <u>à température et à pression ambiantes</u> (20-25°C, 1 atm). Le méthane étant l'hydrocarbure le plus léger, il figure par définition parmi les COV, mais il est parfois exclu du comptage, et dans ce cas, on parle de *COVNM* (non méthanique).
- On utilise le terme *COT* (Composés Organiques Totaux) au lieu de *COV* lorsque les conditions de pression et de température lors de la mesure sont différentes des conditions ambiantes. En toute rigueur, le terme COT devrait être accompagné des valeurs de pression et de température, mais c'est rarement le cas dans les données d'inventaire trouvées.
- Les *HC* (Hydrocarbures) sont également des molécules organiques, exclusivement composées d'atomes de carbone et d'hydrogène. Lorsqu'elles sont volatiles, elles sont donc comprises dans les *COV* dans les conditions ambiantes, ou dans les *COT* dans d'autres conditions. Certaines références (Stripple, 2001), (Stripple, 2000), (Blomberg et al., 1999) mentionnent les deux types d'émissions atmosphériques (COV et HC), mais aucune explication n'est donnée permettant de les différencier.

Ainsi, notamment dans le cas des émissions atmosphériques, l'utilisation de familles chimiques porte parfois à confusion. De plus, comparer des résultats de COV ou COT entre différentes sources de données, peut s'avérer parfois hasardeux car l'unité de la mesure est

exprimé par rapport à un gaz de référence (gaz étalon) qui peut varier selon les mesures (éthane, propane…). L'unité de mesure des COV est donnée dans la littérature en unité de masse sans référence au gaz étalon, et nous avons du considérer pour cette étude qu'elles étaient toutes en kg d'équivalent Carbone. Enfin, il a été choisi de ne pas les agréger afin de conserver un regard critique sur la qualité des données disponibles.

Tableau 2 - 9. Flux analysés pour les études des routes.
x : flux renseigné, - : flux non renseigné

Flux	**Référence**	(Lundström, 1998)	(Stripple, 2000)	(Mroueh et al., 2000)	(Pontarollo et Smith, 2001)	(Rouwette etSchuurmans, 2001)	(Stripple, 2001)	(Peuportier, 2003)	(Chappat et Bilal, 2003)	(Ventura et al., 2004)	(Pereira et al., 1997)	(Hoang, 2005)
Consommation de ressources	**Acier**	-	-	-	X	X	-	-	X	-	-	X
	Granulats	-	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X
	Bitume	-	-	X	X	-	X	X	X	X	-	X
	Ciment	-	-	X	X	X	-	X	X	-	-	X
	Energie	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Eau	-	-	X	X	X	-	X	-	X	-	-
Emissions dans l'air	**CO_2**	X	X	X	X	-	X	X	X	X	-	X
	CH_4	X	X	-	X	-	X	-	-	X	-	X
	N_2O	X	X	-	-	-	X	-	-	X	-	X
	CO	X	X	X	-	-	X	-	-	X	-	X
	NO_x	X	X	X	X	-	X	-	-	X	-	X
	SO_2	X	X	X	-	-	X	X	-	X	-	X
	COV	X	X	X	-	-	X	-	-	X	-	X
	HC	X	X	-	-	-	X	-	-	X	-	X
	PM	-	X	X	-	-	X	-	-	X	-	X
	Métaux	X	-	-	-	-	-	-	-	X	-	X
Emissions dans l'eau	**DBO (aq)**	-	X	-	-	-	X	-	-	X	-	X
	DCO (aq)	-	X	-	-	-	X	-	-	X	-	X
	Huiles (aq)	X	X	-	-	-	X	-	-	X	-	X
	Métaux	X		X	-	-	-	-	-	X	-	X
	Phénol	-	X	-	-	-	X	-	-	X	-	X
	Solides	X		-	-	-	-	-	-	X	-	X
	N-Tot (aq)	X	X	-	-	-	X	-	-	X	-	X
Emissions dans le sols	**Chlore**	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	X
	Sulfate	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	X
	Métaux	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	X
Déchets		-	X	-	-	X	X	X	-	X	-	-
Bruit		-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-

De manière plus générale sur les familles chimiques, le fait de ne pas connaître précisément la nature chimique des molécules (par exemple le Chrome VI parmi les métaux, ou les HAP parmi les COT) empêche dans la plupart des cas, de poursuivre la démarche vers l'étape ACV ultérieure qui est de calculer des indicateurs d'impacts. De même, dans le cas des particules,

la granulométrie a une influence directe sur les effets sanitaires potentiels, alors que la masse totale n'est pas exploitable.
Enfin, certaines valeurs qui figurent dans les inventaires ne sont pas des flux mais des ***indicateurs d'états chimiques*** de l'effluent. C'est le cas de la DBO et de la DCO.
Les déchets sont considérés comme des flux sortants, mais les flux sortants associés en fonction des scénarios possibles (mise en décharge, réutilisation, recyclage) ne sont pas forcément inclus dans le système. Le bruit est considéré comme un flux sortant dans une seule étude (Mroueh et al., 2000).

Analyse des indicateurs d'impacts environnementaux : Le choix des indicateurs d'impact n'est pas nécessairement identique d'un auteur à l'autre.

Dans un premier temps, la classification des impacts impose de définir une liste de catégories d'impacts, qui représente les phénomènes environnementaux que l'on souhaite prendre en compte. Les catégories d'impact utilisées sont celles définies dans les méthodes d'évaluation CML (Tukker et Kleijn, 1996) et eco-indicator 95 (Goedkoop, 1996). Elles font l'objet d'une liste générale, applicable à toutes les études d'ACV.

Les phénomènes mis en jeu pour chaque catégorie d'impact sont rappelés ci-dessous, ainsi que les connaissances minimales relatives à chaque catégorie d'impact et nécessaires à la compréhension de la logique de la démarche.
1. l'effet de serre est provoqué par l'accumulation de certains gaz dans l'atmosphère qui absorbent une partie du rayonnement infra-rouge réfléchi par la surface de la terre. Une partie de l'énergie solaire reste ainsi piégée dans les basses couches de l'atmosphère et provoque une augmentation de la température globale du globe.
2. l'épuisement des ressources naturelles signifie que la consommation d'énergie et de ressources naturelles se traduit par l'épuisement des matières premières présentes dans la nature et nécessaires aux activités humaines, soit non renouvelable (par exemple le pétrole), soit dont le taux de renouvellement est essentiel à prendre en compte pour en éviter l'épuisement (par exemple la ressource en bois). Cette catégorie sera représentée par les flux et non par un indicateur calculé.
3. l'eutrophisation est une réduction de la qualité de l'eau, qui devient opaque, malodorante et de goût déplaisant, due à un excès en matière organique et en micro-organismes. L'eutrophisation modifie aussi la composition des espèces.
4. l'acidification est due à une augmentation de substances à propriétés acides dans l'air, qui au contact de l'humidité atmosphérique forment des pluies ou brouillards acides qui corrodent les métaux, altèrent les édifices en pierre, détruisent la végétation et acidifient les lacs en provoquant la mort des espèces aquatiques.
5. la formation d'ozone troposphérique est liée à une série de réactions impliquant des espèces carbonées et l'action de rayons ultraviolets. Le principal effet de l'augmentation de ces photo-oxydants est la formation d'un brouillard (smog) en milieu urbain, renfermant des acides, des nitrates, des sulfates, des sels d'ammonium, des métaux, des composés carbonés oxydés et de l'eau. Seuls les effets de l'ozone sont bien connus, ils accentuent les difficultés respiratoires des personnes fragiles (enfants, vieillards), et sont reconnus pour augmenter les taux de mortalité chez ces populations.
6. la toxicité est liée aux effets toxiques de substances ayant des effets sur l'homme (maladies aiguës et chroniques et mortalité).
7. l'écotoxicité est liée aux effets toxiques de substances causant la disparition directe ou indirecte (par exemple affectant la reproduction) des espèces animales ou végétales d'un écosystème.

- Indicateur d'effet de serre

L'indicateur le plus courant est le Potentiel de Réchauffement Global (GWP) défini par l'intégrale, sur une durée donnée, du forçage radiatif (augmentation ou diminution de l'échange d'énergie par rayonnement) généré par 1 kg de ce gaz, injecté instantanément dans l'atmosphère. Le GWP est rapporté au CO_2 et il est calculé de la manière suivante (Khalifa, 2000), (Goedkoop, 1996) :

$$GWP_i = \frac{\int_0^T a_i.c_i(t).dt}{\int_0^T a_{CO_2}.c_{CO_2}(t).dt} \quad \text{(sans dimension)} \qquad 2 - 6$$

avec a_i : absorption de la radiation thermique suite à une augmentation de la concentration du gaz i, $c_i(t)$: concentration du gaz i restant au temps t après son émission, T le nombre d'années sur lesquels l'intégration est effectuée (a_{CO2} = 1)

Le coefficient ainsi déterminé est multiplié par les flux des substances concernées, donnant une valeur finale exprimée en kg d'équivalent CO_2.

- Indicateur d'acidification du milieu

On utilise le potentiel d'acidification comme étant le rapport du nombre des équivalents du potentiel en protons H^+ par unité de masse de la substance, sur la valeur de référence du dioxyde de soufre (SO_2) (Khalifa, 2000):

$$AP_i = \frac{n_i^{H^+}}{\mu_i} . \frac{\mu_{SO_2}}{n_{SO_2}^{H^+}} \quad \text{(sans dimension)} \qquad 2 - 7$$

avec n_i : le nombre de protons H^+ correspondant à la forme acide de la substance i, μ_i : la masse molaire de la substance i (n_{SO2}=2), (μ_{SO2} = 64 g.mol^{-1}).

Le coefficient ainsi déterminé est multiplié par les flux des substances concernées, donnant une valeur finale exprimée en kg d'équivalent H^+.

- Indicateur d'eutrophisation

L'indicateur correspond à la somme de tous les précurseurs d'eutrophisation, en multipliant la masse mesurée par son facteur d'équivalence, et exprimés sous la forme d'équivalents phosphates (PO_4^{3-}). Les facteurs d'équivalence sont basés sur un ratio massique constant dans la biomasse, des éléments Carbone-Azote-Phosphore (C :N :P) de 106 :16 :1 (EPA, 2000).

$$EP_i = \frac{m_i^P}{\mu_i} . \frac{\mu_{PO_4^{3-}}}{m_{PO_4^{3-}}^P} \quad \textit{(sans dimension)} \qquad 2 - 8$$

avec m_i : le potentiel de biomasse en équivalents phosphates, μ_i : la masse molaire de la substance i ; m_{PO4} : le potentiel de biomasse d'une unité de phosphate ; μ_{PO4} : la masse molaire du phosphate (μ_{PO4} = g.mol^{-1}).

Le coefficient ainsi déterminé est multiplié par les flux des substances concernées, donnant une valeur finale exprimée en kg d'équivalent PO_4^{3-}.

- Indicateur de formation d'ozone troposphérique

L'indicateur POPC (Photochemical Ozone Potential Creation), exprimé en kg d'équivalent éthylène, correspond à la quantité maximale d'ozone formé pour chaque composé organique volatil pris individuellement, pendant 5 jours suivant son émission, par rapport à celle produite pour une même quantité d'éthylène émis (Altenstedt et Pleijel, 2000). Le phénomène faisant intervenir de multiples espèces chimiques, le calcul des masses d'ozone émises est

basé sur des valeurs statistiques de concentrations moyennes des précurseurs en Europe, et sur des modélisations cinétiques (Altenstedt et Pleijel, 2000).

$$POPC_i = \frac{m^i_{O_3}}{m^{\text{éthylène}}_{O_3}} \text{ (sans dimension)} \qquad 2 - 9$$

avec m_{O3}^i la masse d'ozone produite par 1 kg du précurseur chimique i (kg) émis dans la basse atmosphère.

Le coefficient ainsi déterminé est multiplié par les flux des substances concernées, donnant une valeur finale exprimée en kg d'équivalent éthylène.

- Indicateur de toxicité et d'écotoxicité

(Huijbregts et al., 2000) ont proposé un modèle d'indicateur de toxicité et d'écotoxicité adapté à l'ACV en adoptant une démarche issue de la méthodologie d'analyse des risques. Le modèle proposé :
- est identique pour les effets toxicité et écotoxicité mais calcule deux indicateurs différents ;
- différencie les facteurs d'équivalence pour une même substance, en fonction du compartiment d'émission ;
- prend en compte les phénomènes de transferts entre compartiments.

Le modèle (Huijbregts et al., 2000) calcule un facteur d'équivalence (EF) pour chaque unité massique d'une substance émise dans un compartiment initial (eau douce, eau de mer, air, sol industriel et sol agricole). La dispersion dans les compartiments finaux (eau douce, eau de mer, sédiments d'eau douce, sédiments marins, sols émergés et homme) est modélisée pour trois grands types de climats (arctique, tempéré et tropical) grâce à l'utilisation du logiciel EUSES 2.0 Ensuite, un Ratio de Caractérisation du Risque (RCR) est calculé comme le rapport entre la dose modélisée et la dose maximale sans effet. Le potentiel toxique est alors calculé à partir des RCR :

$$TP_{i,c_1 \to c_2} = w_i . \frac{RCR_{i,c_1 \to c_2}}{RCR_{\text{réf}}} \qquad \text{(sans unité)} \qquad 2 - 10$$

où $TP_{i,c1 \to c2}$ est le potentiel toxique de la substance i émise dans le compartiment c_1 et transférée dans le compartiment c_2 ; wi est un facteur de pondération dépendant des échelles géographiques des compartiments c_1 et c_2 ; $RCR_{i,c1 \to c2}$ est le Ratio de Caractérisation du Risque de la substance i émise dans le compartiment c_1 et transférée dans le compartiment c_2 ; et $RCR_{réf}$ le Ratio de Caractérisation du Risque de la substance de référence choisie comme étant le 1,4-dichlorobenzène.

Les données publiées calculent des facteurs d'équivalence toxiques et écotoxiques pour environ 180 substances, et ne prend donc pas encore en compte toutes les substances répertoriées comme toxiques ou écotoxiques, comme le CO et certains HAP.

Le *Tableau 2 - 10* présente les catégories d'indicateurs d'impacts utilisés par les études ACV routière de la littérature.

Tableau 2 - 10. Catégories d'indicateurs analysés pour les études des routes.
x : indicateur *renseigné, - :* indicateur *non renseigné*

Références **Indicateurs d'impacts environnementaux**	(Lundström, 1998)	(Stripple, 2000)	(Mroueh et al., 2000)	(Pontarollo et Smith, 2001)	(Rouwette et Schuurmans, 2001)	(Stripple, 2001)	(Peuportier, 2003)	(Chappat et Bilal, 2003)	(Ventura et al., 2004)	(Pereira et al., 1997)	(Hoang, 2005)
Effet de serre	-	-	-	X	X	-	X	-	X	-	-
Epuisement des ressources naturelles (consommation d'énergie notamment**)**	-	-	-	X	X	-	X	X	X	X	-
Eutrophisation	-	-	-	-	X	-	X	-	X	-	-
Acidification	-	-	-	-	X	-	X	-	X	-	-
Formation d'ozone troposphérique	-	-	-	-	X	-	X	-	X	-	-
Toxicité	-	-	-	-	X	-	X	-	X	-	-
Écotoxicité	-	-	-	-	X	-	X	-	X	-	-
Autres: déchets, déchets radioactifs, bruits, odeurs	-	-	-	-	X	-	X	-	-	-	-

CONCLUSION

Après cette recherche bibliographique, la première conclusion porte sur l'analyse proposée du rôle de chacun des acteurs en vue de prendre une décision. Ceci est effectué à travers un ensemble de critères relatifs au contexte réel, qui permettent d'apprécier diverses alternatives dans le cadre des activités de la maîtrise d'ouvrage publique régie par la loi n° 85-704 du 12 juillet 1985 dite loi MOP. Ces critères sont mis en exergue, ce qui conduit à montrer que très peu d'entre eux concernent l'environnement dans la prise de décisions. Des disparités de critères sont apparues entre les acteurs. Les seuls critères utilisés, dans les pratiques courantes, qui régissent le choix de variantes sont d'ordre technique, réglementaire, économique et d'aménagement du territoire. Le recours aux méthodes multicritères dans ce cadre présente plusieurs types d'avantages. En effet, elles permettent de prendre en compte différents points de vue ; ceux-ci s'expriment à travers l'importance accordée par chacun des acteurs aux critères de jugement considérés (selon la procédure d'action). Le but est de pouvoir orienter la réflexion vers un ensemble de solutions possibles. Pour avancer dans l'optique de la constitution d'un modèle d'évaluation, en fonction des moyens de mesures et des données disponibles, ces critères nécessitent d'être déclinés en indicateurs les reflétant.
La deuxième conclusion concerne les règles de conception des projets routiers. Il s'agit de prendre en compte de très nombreux paramètres liés au site d'implantation de l'ouvrage, à sa structure, sa construction, son exploitation et son entretien. La mise en pratique du recyclage, malgré une faisabilité technologique avérée, reste encore peu évaluée, notamment au niveau environnemental.
La troisième conclusion relative à l'approche méthodologique, concernant les ACV, propose des indicateurs de la littérature qui peuvent être implémentés dans les modèles développés, à condition de préciser les règles d'affectation des flux aux catégories d'impacts. A l'issue de cette analyse bibliographique, nous nous sommes attachées à retenir au moins un matériau bien connu pour fonder l'approche globale avec les matériaux recyclés. En se basant sur les outils de dimensionnement existants et sur la base des données environnementales recueillies, on s'est donc intéressé aux laitiers de haut fourneau. On a ensuite cherché à intégrer ces

produits au module routier élémentaire interurbain existant. Cette nouvelle variante fait l'objet d'une évaluation globale en se basant sur des méthodes d'évaluation environnementale au chapitre 3.

CHAPITRE 3.
EVALUATIONS MULTICRITERES D'UTILISATION DE MATERIAUX ALTERNATIFS DANS LES CHAUSSEES INTERURBAINES

INTRODUCTION

La première partie de ce chapitre est dévolue à l'extension du module routier élémentaire à l'utilisation de matériaux alternatifs. Ce travail est réalisé pour les laitiers de hauts fourneaux retenus pour cette étude, en raison d'une bonne connaissance des pratiques routières avec ce matériau. Cette étape est réalisée en intégrant le matériau laitier dans un cas de structure.
La seconde partie du chapitre s'intéresse à la façon dont l'outil est susceptible d'être utilisé par des non-spécialistes de l'environnement, afin de réfléchir au type d'indicateurs à intégrer dans l'outil développé. Cette partie s'articule d'une part autour d'une synthèse d'un ensemble d'entretiens semi-directifs menés avec différents acteurs de la profession, et d'autre part autour d'une simulation environnementale de scénarios d'entretien réalisée à partir d'objectifs économiques.
La troisième partie est consacrée à l'enrichissement de la base de données environnementales et à l'implémentation d'indicateurs environnementaux dans l'outil. Concernant la base de données environnementales, l'accent est mis notamment sur l'analyse de la qualité des données à l'entrée du modèle, au préalable de la mise en place dans l'outil des indicateurs d'impacts environnementaux. Les cas traités dans la première partie sont repris avec le nouveau jeu de données et en calculant les indicateurs.
Enfin la dernière partie traite d'un cas réel de chaussées utilisant du laitier de hauts-fourneaux.

Plusieurs jeux de données environnementales ont été utilisés dans ce chapitre, en fonction des problèmes rencontrés et de la progression du développement de l'outil. Pour clarifier la lecture, leur utilisation et leur contenu est dans cette partie, à laquelle il sera fait référence dans les autres parties du chapitre.
Jeu de données n°1 : Ce jeu de données est issu des travaux précédents (Hoang, 2005) lors du premier développement du MRE (liste des références en annexe du chapitre 3). Les valeurs environnementales unitaires sont présentées en annexe du chapitre 3.
Ce jeu est utilisé dans la première partie de ce chapitre, dans lequel les cas précédemment étudiés par (Hoang, 2005) sont comparés à une nouvelle structure équivalente en terme de trafic supporté, et contenant des laitiers de hauts-fourneaux. Le même jeu de données que (Hoang, 2005) est donc conservé. Ce jeu est également utilisé dans la deuxième partie de ce chapitre, dans lequel des scénarios d'entretien de chaussées sont comparés d'un point de vue économique.
Jeu de données n°2 : Ce jeu de données concerne les recherches bibliographiques menées sur les laitiers de hauts-fourneaux. Très peu de données ont été trouvées. Ce jeu est donc issu des références bibliographiques suivantes : (Burteaux, 1993), (Commission des communautés européennes, 1980) et (Nouvion et al, 2004). Les valeurs environnementales unitaires sont présentées en annexe du chapitre 3.
Ce jeu est utilisé dans la première partie de ce chapitre, dans lequel une nouvelle structure contenant des laitiers de hauts-fourneaux, et équivalente en terme de trafic supporté, est comparée à des structures précédemment étudiés par (Hoang, 2005). Le même jeu de données que (Hoang, 2005) est donc conservé pour les structures sans laitiers et la structure avec laitiers utilise le jeu n°1 complétée par le jeu n°2.
Jeu de données n°3 : Ce jeu de données concerne des données expérimentales issues de mesures effectuées par le LCPC sur différents sites (voir données et références en annexe du chapitre 3).
Ce jeu de données est utilisé dans la partie III de ce chapitre afin de comparer les inventaires bibliographiques aux données expérimentales.

Jeu de données n°4 : Ce jeu de données regroupe l'ensemble des jeux n°1, 2 et 3, auxquels ont été ajoutées de nouvelles données dans le but d'enrichir la base existante et d'avoir une vision plus critique de la qualité et de la dispersion des données existantes. Ce jeu est utilisé à la fin de ce chapitre lors des études de sensibilité, ainsi qu'au chapitre suivant concernant le MVU. Les valeurs et les références sont présentées en annexe du chapitre 3.

PARTIE I : EXTENSION DU MODULE ROUTIER ELEMENTAIRE A L'UTILISATION DE MATERIAUX ALTERNATIFS

1. PRINCIPES D'EVOLUTION DU MRE

L'outil développé pour l'évaluation globale des chaussées, noté MRE (*Module Routier Elémentaire)*, intègre des scénarii (travaux) de construction/maintenance des chaussées interurbaines de type autoroutes, comprenant l'extraction, l'élaboration, le stockage des ressources naturelles utilisées, et l'entretien structurel. Nous avons intégré les aspects techniques et environnementaux des nouvelles structures de chaussée à partir du modèle existant en interurbain en y intégrant des matériaux recyclés sous forme de Graves traitées aux liants hydrauliques. Le schéma d'évolution de l'outil développé est représenté dans la *Figure 3 - 1*.

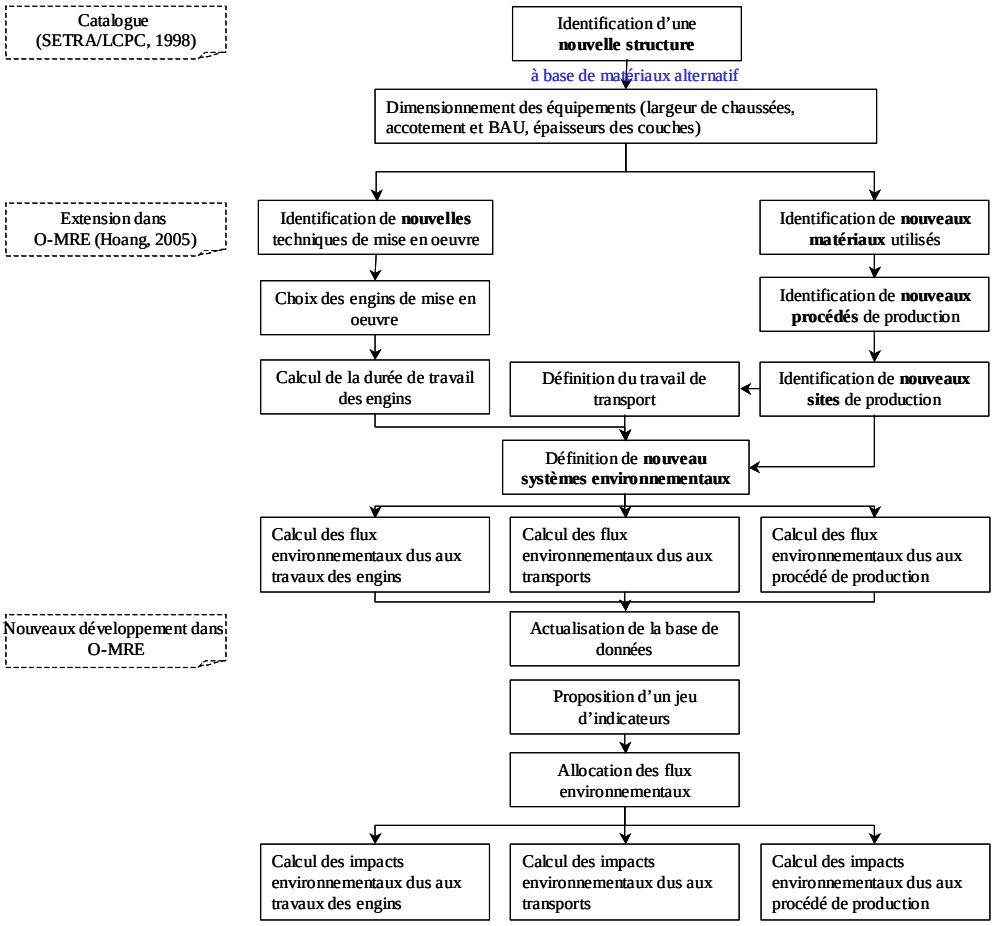


Figure 3 - 1. Schéma d'évolution du cahier des charges de l'outil

1.1. Intégration de structures de chaussées aux laitiers de hauts fourneaux dans le MRE

On a cherché à intégrer les laitiers de hauts fourneaux au module routier élémentaire existant, en se basant sur les mêmes paramètres de dimensionnement (classe de route VRS, Trafic TC_6^{30}, plate forme de classe PF3 et durée de service de 30 ans). A partir des fiches techniques du catalogue SETRA/LCPC, on retient différents types d'assises (*Figure 3 - 2*) : GLp2/SL3, GLp/GLp, GLg/GLg, GLp/SL2, GB3/GLp, GB3/SL3 ou encore SL3. Ces chaussées comportent, sous une couche de surface bitumineuse, des couches de base et de fondation en

matériaux traités. L'assise a une épaisseur totale comprise entre 20 et 50 cm. Les chaussées à structure mixte (GB3/GLp) présentent une couche de surface et une couche de base (de 10 à 20 cm) en matériaux bitumineux sur une couche de fondation (de 20 à 40 cm) traitée. La structure GLp/SL3 a été choisie arbitrairement pour comparaison.
Trois variantes issues du catalogue (SETRA/LCPC, 1998) ont été prises en compte pour comparaison : deux variantes courantes à base de matériaux naturels qui servent de référence et une à base de laitier. Toutes ces variantes (*Figure 3 - 2*) répondent aux mêmes sollicitations de trafic imposées.

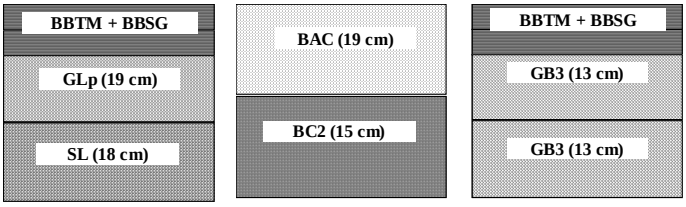


Figure 3 - 2. Cas types de structures de chaussées de l'outil O-MRE

BBTM: béton bitumineux très mince, BBSG: béton bitumineux semi grenu, GLp: grave laitier prébroyé, SL: sable laitier, BAC: béton armé continu, BC2: béton de ciment de classe 2, GB 3: grave bitume de classe 3.

La *Figure 3 - 3* présente les profils en travers des trois structures de chaussées étudiées.

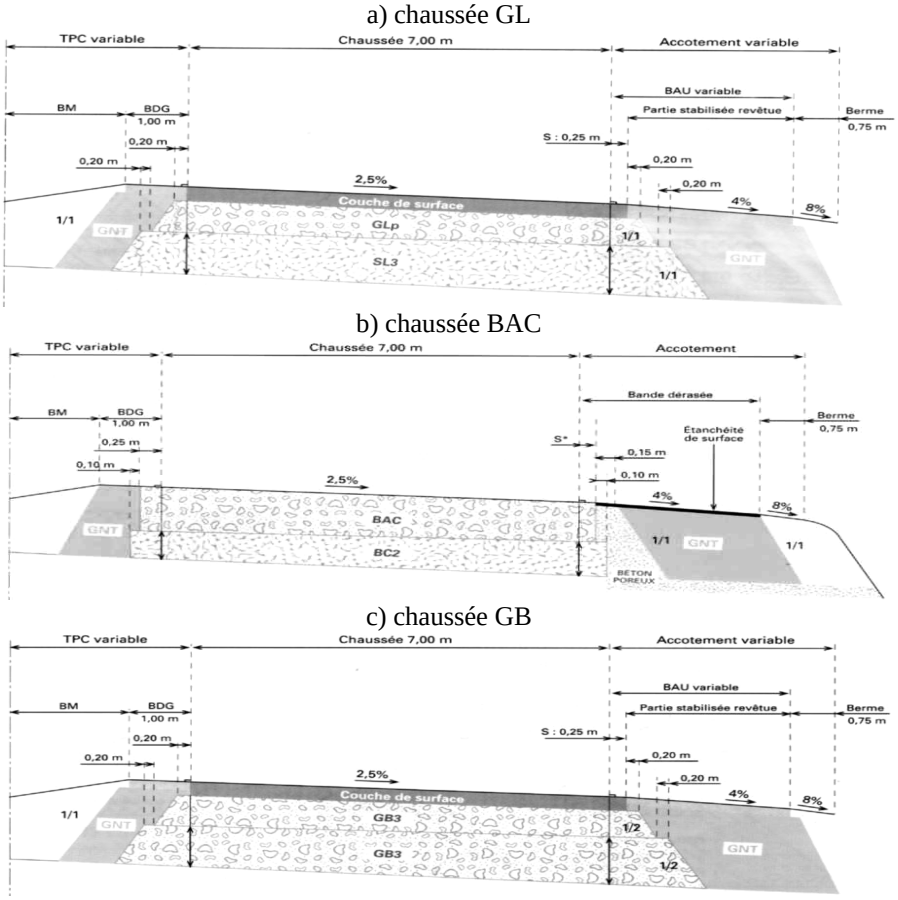


Figure 3 - 3. Profils en travers (SETRA/LCPC, 1998)

1.2. Modélisation des travaux de construction et d'entretien de la solution alternative

1.2.1. Travaux de construction initiale

La technique de mise en œuvre des structures ci-dessus dépend de plusieurs paramètres mais le plus important est le type de matériaux utilisés dans la structure à construire. Ce paramètre décide non seulement des procédés mais aussi des matériels utilisés lors du chantier de construction (ou d'entretien) de la chaussée.

Le *Tableau 3 - 1* présente l'ensemble des opérations associées à la mise en œuvre de la structure grave laitier. Seules les opérations associées à cette mise en œuvre seront traitées dans ce qui suit. Celles des deux types de structure ne demandent aucun apport à la démarche par rapport au modèle initial.

Tableau 3 - 1. Opérations de mise en œuvre de la structure au laitier de haut fourneau, présentées en partant de la surface de la chaussée

Couche	Etapes	Travaux	Matériel	Référence
Couches roulement et liaison (BBTM, BBSG)	BB1	Répandage de la couche d'accrochage (250g/m2)	Répandeuse des liants hydrocarbonés	(NF P 98 150, 1992)
	BB2	Répandage du mélange	Finisseur	
	BB3	Compactage	Compacteur	
Graves traitées aux liants hydrauliques (GLp, SL)	GL1	Répandage du mélange	Niveleuse, machine à coffrage glissant, finisseur ou auto grade	(NF P 98 115, 1992)
	GL2	Pré compactage (1/3 à 2/3 de l'énergie totale de compactage).	Rouleaux vibrants	
	GL3	Réglage	Calibreur de cordon ou bouteur régleur suivi d'une niveleuse	
	GL4	Compactage	Compacteurs à pneus	
	GL5	Couche de protection (enduit de cure comprenant la pulvérisation d'une émulsion cationique de bitume et un gravillonage)	Epandeuse d'émulsion + gravilloneur porté + compacteur	
Accotement (GNT)	GNT1	Répandage du GNT	Gravillonneur porté + niveleuse	(SETRA, LCPC, 1997)
	GNT2	Compactage du GNT	Compacteur	

Pour ce qui est des couches de roulement et de liaison en béton bitumineux, l'ensemble des procédés est repris. Les graves et sables laitier (GLp, SL) demandent une technique particulière de mise en œuvre.

Le répandage du mélange d'une couche d'assise est assuré en une seule fois, compte tenu de la surépaisseur nécessaire pour assurer le réglage. Dans un premier temps le mélange est précompacté à raison d'1/3 à 2/3 de l'énergie totale de compactage. Il est ensuite réglé. Le réglage en nivellement est effectué par rabotage systématique de toute la largeur de la chaussée. Les matériaux issus du rabotage sont éliminés, les flux ne sont pas pris en compte dans les résultats du MRE. Enfin le dernier compactage donne à l'ensemble de la couche les compacités visées. A l'achèvement de l'assise, et suivant les conditions climatiques, l'assise est revêtue par un enduit de cure comprenant : la pulvérisation d'une émulsion cationique de bitume (400 à 600 g de bitume résiduel), et un gravillonage (6 à 7 l/m^2 de gravillons 4/6).

L'atelier de répandage-compactage dédié aux graves laitiers et sables laitiers repose sur deux engins : niveleuse et compacteurs. Avec la niveleuse on peut escompter un rendement normal de 600 t/j par engin (Prandi, 1965)

Etape GL1 - répandage des graves laitiers : Ce travail est effectué par une niveleuse Caterpillar 14H, moteur équipé CAT 3306 avec une puissance de 160 kW.

Etape GL2 - précompactage : Deux types de compacteurs sont utilisés pour le compactage des assises de chaussées : les rouleaux vibrants et les rouleaux à pneus : ces deux types d'engins peuvent être utilisés individuellement ou simultanément (SETRA/LCPC, 1982). Dans un premier temps le mélange est précompacté à raison d'1/3 à 2/3 de l'énergie totale de compactage. Le *Tableau 3 - 2* précise les engins pris en compte. La démarche de dimensionnement de l'atelier de compactage est présentée en annexe du chapitre 3.

Tableau 3 - 2. Engins nécessaires au compactage de la structure laitier

	Paramètres utilisés dans le modèle	
Compacteur VT2, Dynapac CC432, moteur équipé Cummins 4BTA3.9	Largeur de travail	1,68 m
	Vitesse de travail	3 km/h
	Puissance de moteur	89 kW
	Nombre de passe	16
Compacteur Dynapac CC232, classe VT0, moteur équipé BF4L1011F	Largeur de travail	1,45 m
	Vitesse de travail	4 km/h
	Puissance du moteur	53 kW
	Nombre de passe	16

Le *Tableau 3 - 3* représente le type de compacteur et le nombre de passes à effectuer par type de chantier, concernant les étapes GL2 à GL4 (*Tableau 3 – 1*).

Tableau 3 - 3. Atelier de compactage pour graves traitées aux liants hydrauliques

Matériaux	**Epaisseur (cm)**	**Nombre de passes**							**Rendement moyen par jour et par atelier**
		P1	P2	VT0	VT1	VT2	VT3	VT4	
Graves traitées Aux liants hydrauliques (GL, SL)	15 à 25	8 à 12		-	-	10 à 16	8 à 14		400 à 600 t
		8 à 12		-	-	10 à 16	8 à 14	8 à 12	1000 à 1500 t
		8 à 12		-	-		8 à 14	8 à 12	2000 à 2500 t

Etape GL3 - réglage : L'objet de cette opération est de réaliser une couche de matériaux dont l'épaisseur finale est conforme à la valeur considérée dans la conception de structure de la chaussée, compte tenu des tolérances de nivellement admises. L'engin utilisé pour ce travail est la niveleuse Caterpillar 14H avec le système guidé manuellement ou électronique. Pour une section autoroutière courante, le rendement moyen est de 250 m^2/h (SETRA/LCPC, 2000).

Etape GL4 – compactage final : Cette opération sert à achever le compactage à raison de 25% de l'énergie de compactage qui reste après le compactage partiel.

Etape GL5 – protection superficielle : L'opération de mise en œuvre de la protection superficielle de l'assise est réalisée pour maintenir l'état hydrique du matériau et favoriser le contact entre les différentes couches. En pratique, il existe plusieurs types de protections superficielles. Le cas le plus courant utilisé est un enduit mono couche composé de 1,3 à 1,6 kg d'émulsion (65% de bitume) et 7 à 8 litres de gravillons 4/6 pour un m^2 de la surface recouverte (SETRA/LCPC, 2000). Les valeurs moyennes associées sont 1,45 kg d'émulsion et de 7,5 litres de gravillons 4/6 pour un m^2 de surface.
Pour la mise en oeuvre de cette couche, l'émulsion est d'abord répandue par une répandeuse ERMONT PI42 dont les caractéristiques sont représentées dans le *Tableau 3 - 4*. Les granulats sont ensuite répandus par un gravillonneur porté. Enfin, il faut compacter les granulats répandus.

Tableau 3 - 4. Engins utilisés au chantier de mise en œuvre de la protection superficielle de l'assise traitée aux laitiers (Commission du Matériel de la FNTP, 2000)

Type d'engins	**Paramètres utilisés dans le modèle**	
	Catégories de paramètres	**Valeur de paramètres**
Répandeuse ERMONT PI42	Largeur du travail	4,2 m
	Vitesse du travail	4 km/h
	Véhicule porté (assimilé)	Semi-remorque
Compacteur Dynapac CC232, classe VT0	Largeur du travail	1,45 m
	Vitesse du travail	3 km/h
	Nombre de passe à effectuer	2
	Puissance du moteur	53 Kw
Gravillonneur porté ACMAR 900 PC	Largeur du travail	2,5 m
	Vitesse du travail	5 km/h

La prise du laitier, comme celle de tous les liants hydrauliques, est affectée par une dessication. Un arrosage modéré est nécessaire. Lorsque le trafic est supérieur ou égal à TC6, la préfissuration des matériaux traités en couche de base est obligatoire afin de diminuer les conséquences de l'évolution des fissures de retrait. Pour les autres trafics, la préfissuration est vivement conseillée (SETRA/LCPC, 1998).

1.2.2. Travaux d'entretien

La politique d'entretien prise en compte pour notre solution alternative est basée sur le catalogue des structures neuves (SETRA/LCPC, 1998). Il s'agit de répandre de nouvelles couches de chaussées sur une partie ou toute la surface de l'ancienne chaussée (couche de roulement et parfois l'ensemble de la couche de surface). Le *Tableau 3 - 5* représente les fréquences d'entretien correspondant à chacune des structures étudiées. La colonne temps présente les dates après la construction initiale auxquelles la chaussée est entretenue ; les autres colonnes servent à présenter les techniques appliquées. Chaque technique désignée par « ***x***% ***M y*** cm » consiste à répandre sur ***x***% de la surface de l'ancienne chaussée une nouvelle couche en matériaux ***M*** d'épaisseur ***y*** cm.

Avant de répandre la nouvelle couche d'enrobé, on procède au fraisage de l'ancienne chaussée. La surface de l'ancienne chaussée entretenue est fraisée sur l'épaisseur de la nouvelle couche répandue.

Tableau 3 - 5. Politique d'entretien des chaussées (SETRA/LCPC, 1998)

Temps	**GLp/SL3**	**BAC/BC2**	**GB3/GB3**
5 ans			
8 ans	60%BB 4cm + 40%BB 8cm	100% BBTM 2,5cm	
9 ans			60%BB 4cm + 40%BB 8cm
10 ans			
12 ans		50% BBTM 2,5cm	
13 ans			
15 ans		50% BBTM 2,5cm	
16ans	60%BB 4cm + 40%BB 8cm		
17 ans			60%BB4cm + 40%BB8cm
18 ans			
19 ans		50% BBTM 2,5cm	
20 ans			
24ans	60%BB 4cm + 40%BB 8cm		
25 ans		100% BBTM 2,5cm	60%BB4cm + 40%BB8cm
30 ans	45%BB 4cm + 30%BB 8cm	100% BAC 20 cm	37%BB4cm + 25%BB8cm

1.2.3. Transport des matériaux et matériels

L'ensemble des séquences de travaux détaillés ci-dessus nécessite à la fois le transport des matériaux, des matériels et engins de chantier et le transport des personnels. Il s'agit donc de comptabiliser et d'organiser le transport des matériaux, des mélanges et des matériels lors de la construction et de l'entretien pendant toute la durée de service de la route. La logistique de transport est prévue d'après les distances de transport qui conditionnent le mode de transport à retenir. En se basant sur le type de marchandises et le mode de transport, les matériels de transport sont donc choisis. Les distances de transport lors de la construction et d'entretien du cas type étudié sont présentées dans le *Tableau 3 - 6*. Ces distances sont issues d'une valeur moyenne proposée suite aux travaux de différents auteurs cités au chapitre 2. Les colonnes rajoutées dans ce travail sont grisées.

Tableau 3 - 6. Détails sur les distances de transport.

Marchandises	**Origines**	**Destinations**	**Distance (km)**	**Moyens utilisés**
Laitier vitrifié de haut fourneau	Plate forme d'élaboration	Chantier	50	Semi-remorque
Chaux	Four à chaux	Chantier	173	Semi-remorque
Granulat	Carrière	Centrales	38	Semi-remorque
Granulat	Carrière	Chantier	59	Semi-remorque
Ciment	Cimenterie	Centrale du BC	152	Semi-remorque
Ciment	Cimenterie	Chantier	173	Semi-remorque
Bitume	Raffinerie	Centrale du BB	333	Semi-remorque
Bitume	Raffinerie	Chantier	354	Semi-remorque
Acier	Aciérie	Chantier	500	Semi-remorque
Matériaux de chaussée	Centrale	Chantier	21	Semi-remorque
Engins	Centre de stockage	Chantier	20	Semi-remorque
Déchets	Chantier	Centre de stockage	18	Semi-remorque

1.3. Définition du système environnemental du MRE alternatif : chantier, procédés et transports

1.3.1. Présentation des procédés

Le système utilisé pour l'extension de l'outil existant a été défini à partir des principaux flux de matière. La partie grisée du système, schématiquement représenté dans la *Figure 3 - 4* a été implémentée dans le système existant. Dans le cas du module routier, l'objet étudié est la route, et le procédé permettant de produire directement la route est le chantier, qu'il soit de construction initiale ou d'entretien. La liste des matériaux utilisés dans ce cas a permis de déterminer les procédés à prendre en compte à ce niveau. On détermine également la liste des matériaux à utiliser pour remonter au niveau du prélèvement direct de matière dans l'environnement. Les masses des matériaux, données d'entrée du modèle MRE, entrant dans la composition de l'objet étudié sont déterminées par la géométrie et la structure du tronçon élémentaire et permettent de définir les phases de transport entre les procédés.

D'autre part, si les flux d'énergie nécessaires au fonctionnement des procédés et des engins sont inclus dans le système, les procédés de production d'énergie ne le sont pas. Il en est de même pour les déchets dont les flux sont inclus mais pas les procédés de traitement ultérieurs. Hormis la carrière, qui dans le cas du laitier est soit un stockage (fraîche production), soit un crassier, les procédés d'extraction des matières premières ne sont pas inclus dans le système. Certains flux de matériaux ainsi que leurs procédés de production ont aussi été négligés du fait du manque de disponibilité des données environnementales, il s'agit des additifs ajoutés au ciment et au bitume. Ces différentes parties du système devraient être incluses pour

effectuer des comparaisons plus rigoureuses. En effet, les flux correspondant aux procédés de production de matériaux à faibles masses sont supposés n'avoir que peu d'influence sur l'ensemble du système, mais cette hypothèse n'est pas toujours vraie et mériterait d'être vérifiée. Cependant, cela nécessite des recherches d'information qui peuvent s'avérer très longues et qui sortent du cadre de ce travail de thèse.

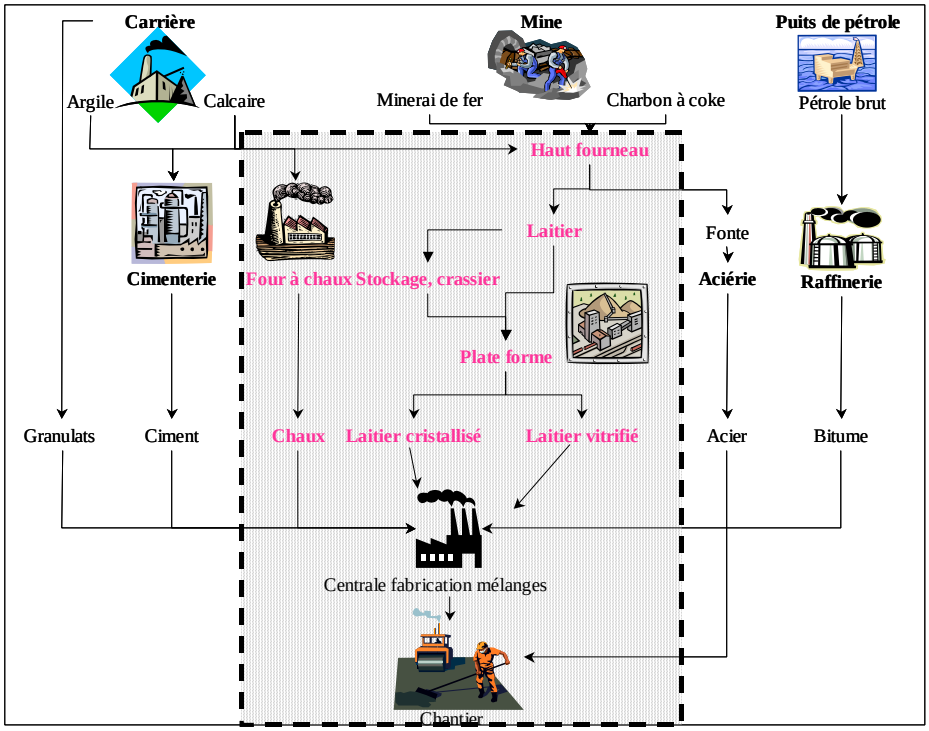


Figure 3 - 4. Système environnemental considéré

L'utilisation de ce système nécessite d'affecter des distances de transport entre chaque procédé qui sont identifiés à des valeurs moyennes dans le MRE par défaut pour chaque cas type (*Tableau 3 – 6*) et qui sont à adapter à chaque cas réel d'ouvrage.

1.3.2. Présentation de l'arbre des procédés pour les trois structures type de chaussées

Le schéma présenté dans la *Figure 3 - 5* indique l'ensemble des processus à prendre en considération pour réaliser l'ICV.

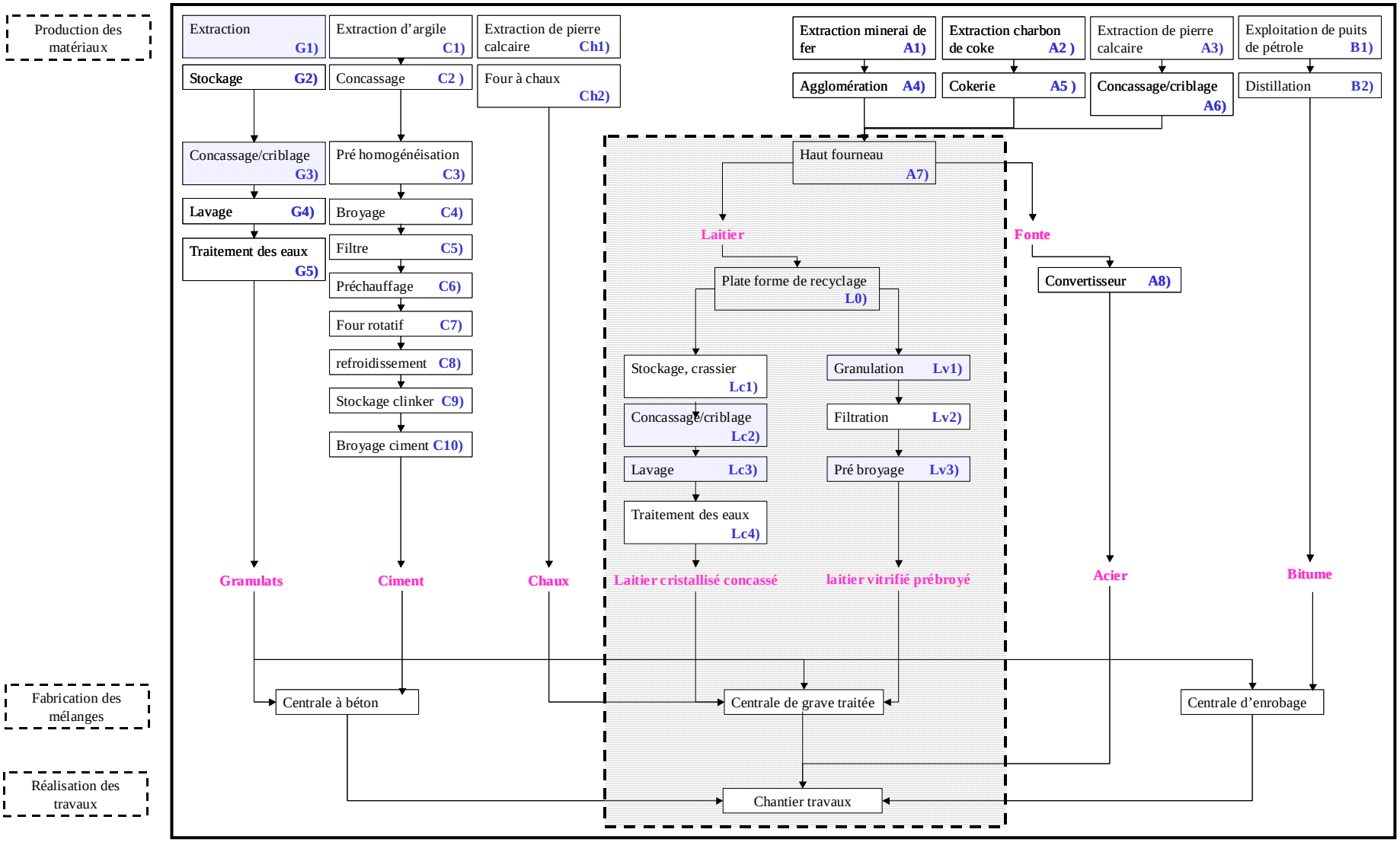


Figure 3 - 5. Arbre des procédés regroupant les trois structures pour le MRE interurbain.

2. EVALUATION DES FLUX ENVIRONNEMENTAUX

2.1. Flux entrants

2.1.1. Consommation des ressources et déchets

Les masses totales des mélanges et des matériaux lors de la construction initiale et de l'entretien des chaussées étudiées ont été calculées et sont représentées dans le *Tableau 3 - 7*. L'acier sert d'armature à la dalle de béton (structure BAC). La consommation en granulats correspond à la quantité totale et ne fait pas de distinction entre les classes granulaires. Du laitier vitrifié est employé comme liant pour les graves laitiers (GL/SL). En technique routière, le laitier vitrifié est caractérisé par sa réactivité. La chaux est un activant de prise du laitier. Les teneurs en liant activé des graves-laitiers et sables laitiers sont définies par les normes relatives aux assises de chaussées traitées NF P 98-113, NF P 98-116 : entre 8 et 15% pour la grave laitier et entre 10 et 20% pour le sable laitier. Le dosage en activant est généralement compris entre 0,8 et 1,2%. Aucune présence de laitiers cristallisés n'est prévue dans les structures aux laitiers du catalogue (SETRA/LCPC, 1998) sur lequel nous nous sommes basées.

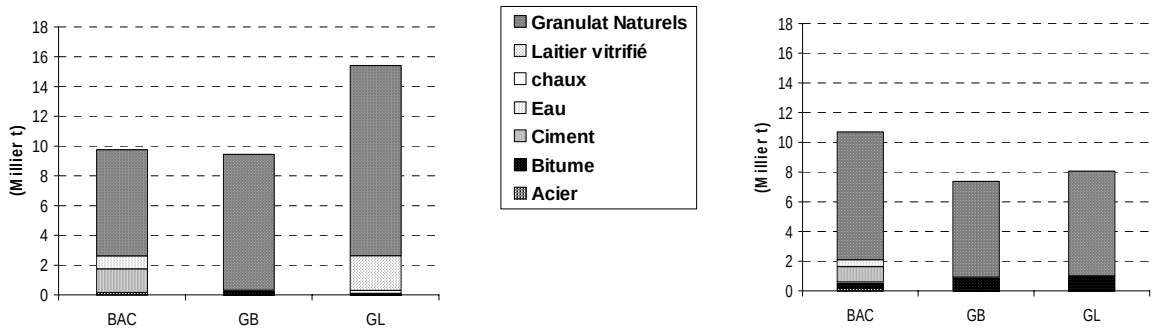
Tableau 3 - 7. Quantité de matériaux utilisés lors de construction et entretien des chaussées (ramenée à un kilomètre et deux sens de circulation)

		Mélanges			**Matières premières**						
Phases	**Cas**	**Grave Laitier (t)**	**Béton Bitumineux (t)**	**Béton de Ciment (t)**	**Acier (t)**	**Ciment (t)**	**Bitume (t)**	**Granulats (t)**	**Chaux (t)**	**Laitiers vitrifiés (t)**	**Eau (l)**
Construction initiale	**GL**	18335,96	4435,26	-	-	-	243,84	25553,2	185,15	2334,8	1100,16
	BAC	-	442,22	12434	163,15	1603	23,24	14250,16	-	-	859
	GB	-	13846,58	-	-	-	651,7	18224,68	-	-	-
Entretien (30 ans)	**GL**	-	7439,78	-	-	-	1021,65	7039,57	-	-	-
	BAC	-	2921,74	7349,5	171,73	1040	429,01	8597,54	-	-	464
	GB	-	6821,46	-	-	-	922,34	6456	-	-	-
Total	**GL**	18335,96	11875,04				1265,49	32592,77	185,15	2334,8	1100,16
	BAC		3363,96	8700	334,88	2643	452,25	22847,7	-	-	1323
	GB		20668,04				1574,04	24680,68	-	-	-

La structure BB consomme plus de béton bitumineux que les deux autres chaussées, car elle ne possède que des couches utilisant ce type de matériau. On constate une consommation de béton de ciment, d'acier et de ciment pour la structure BAC au cours des phases d'entretien, ceci s'explique par le fait qu'on ait repris le corps de chaussé à 30 ans par une couche de Béton Armé Continu.

La *Figure 3 - 6* présente pour chaque structure et chaque procédé les consommations de masse de matières premières. L'utilisation de matériaux recyclés n'implique pas, d'après ces résultats, obligatoirement une économie de matériaux naturels pour obtenir une performance équivalente. La structure GL consommerait une quantité de granulats de 32592 t pendant 30 ans contre 24680 t pour la structure BB et 22847 t pour la structure BAC (d'après le *Tableau 3 - 7*).

Les données d'inventaire de consommation d'eau ne sont pas disponibles, car liées à la formulation des graves laitiers (GL/SL) et du béton de ciment (BAC). C'est pourquoi, la consommation d'eau n'est présentée que pour ces cas. Les données de consommation d'eau des engins ne sont pas disponibles (compacteurs, fraiseuses…), sans un travail de synthèse important, ce qui explique une consommation nulle pour le cas GB, et qui cause une probable sous-estimation dans les autres cas.



a)Masse totale de matériaux utilisés lors de la construction initiale

b) Masse totale de matériaux utilisés lors de l'entretien pendant 30 ans

Figure 3 - 6. Masse totale de matériaux utilisés en phase de construction initiale et d'entretien (ramenée à 1 km et à deux sens de circulation)

La consommation des granulats et des liants naturels ou recyclés qui sont utilisés dans les trois types de chaussées est détaillée respectivement sur la *Figure 3 - 7* et *Figure 3 - 8*. Les deux structures BAC et GB se valent en terme de consommation de granulats (15722 pour le BAC, 15569 pour BB), la structure GL consommerait plus de granulats (1,26 – 1,27 fois pour BB), ceci est dû aux épaisseurs plus importantes des couches constitutives. La consommation totale de liants (bitume, chaux et laitier vitrifié) de la structure GL est aussi plus importante que celle des deux autres cas d'étude (1,22 fois pour BAC, 2,4 fois pour BB).

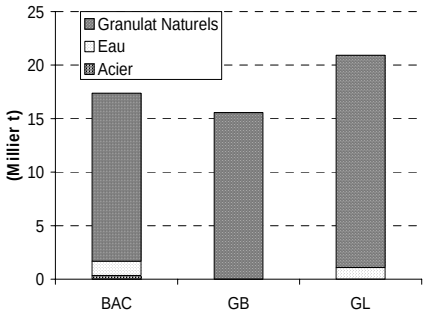


Figure 3 - 7. Masse totale de granulats pendant 30 ans (ramenée à 1 km et à deux sens de circulation)

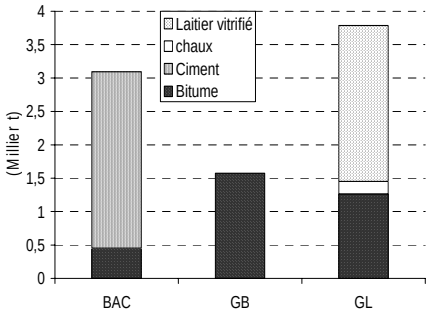


Figure 3 - 8.Masse totale de liants pendant 30 ans (ramenée à 1 km et à deux sens de circulation)

2.1.2. Consommation d'énergie

La consommation d'énergie cumulée après 30 ans est présentée pour un kilomètre et deux sens de circulation (*Figure 3 - 9*). Une quantité d'énergie allant de 11598 GJ (cas BB) à 23501 GJ (cas BAC) est utilisée pour la construction et l'entretien des chaussées pendant 30 ans. La consommation énergétique de la structure alternative est comparable au cas BB. La structure GL demande une quantité de 11807 GJ. La contribution des différents procédés à la consommation d'énergie totale (après 30 ans) est également représentée dans la figure. Pour le BAC, l'aciérie et la cimenterie contribuent le plus à la consommation d'énergie.

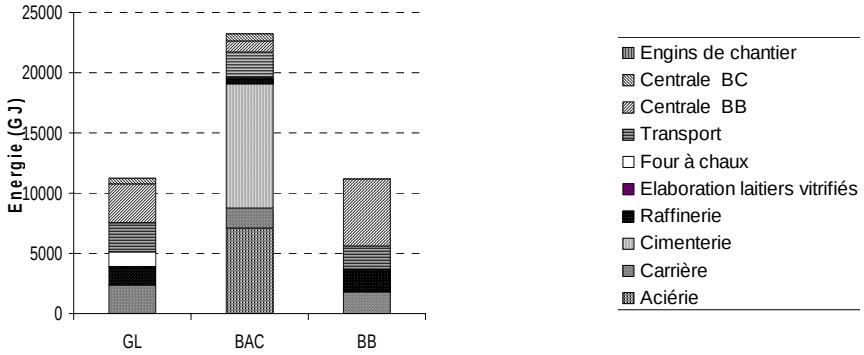


Figure 3 - 9. Energie consommée (ramenée à 1 km et à deux sens de circulation pendant 30 ans)

2.2. Flux sortants

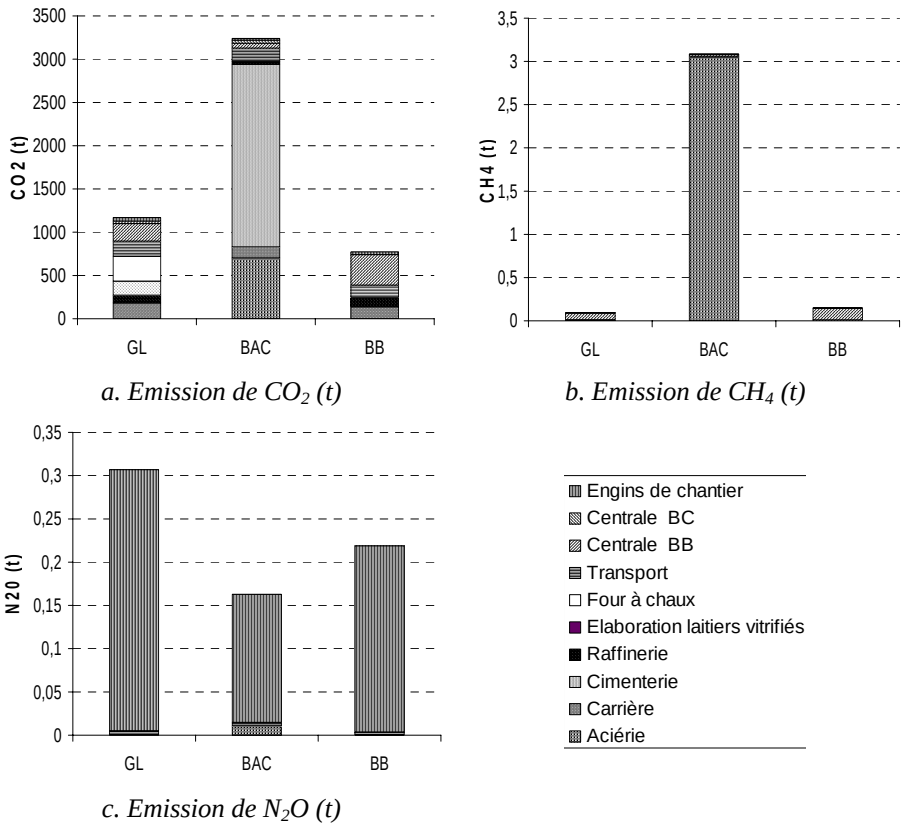
Les flux sortants des systèmes se composent :
- d'émissions atmosphériques : dont la nature chimique est précisée (CO, CO_2, CH_4, NOx, N_2O, SO_2,), et de familles chimiques (COV, HC),
- d'émissions dans l'eau : dont la nature chimique est précisée (phénol) et d'indicateurs d'état des effluents (COD, huiles$_{aq}$, N-Tot$_{aq}$).

Les résultats sont présentés par compartiment de rejet (air ou eau).
Dans le compartiment air, on analyse les résultats en regroupant d'une part les gaz à effet de serre (CO_2, CH_4, N_2O), et d'autre part les gaz à effets toxiques (CO, NOx, SO_2). Les deux familles chimiques COV et HC n'étant pas des familles indépendantes, sont présentées ensembles. Les émissions de particules solides sont présentées en dernier. Dans le compartiment eau, on analyse les rejets en phénol, puis les résultats d'indicateurs d'état des effluents.

2.2.1. Emissions dans le compartiment air

- *Emissions de gaz à effet de serre (CO_2, CH_4 et N_2O)*

Les émissions de CO_2 dues à la construction et l'entretien des chaussées sont présentées dans la *Figure 3 - 10* a. Pour le cas du BAC dont la structure comporte des couches en BC, la cimenterie prend une place prépondérante (62 %).La contribution de l'aciérie est de 23 %. Pour la structure BB, c'est la centrale d'enrobage qui contribue le plus au flux de CO_2 total (60 %). Ensuite, le transport participe à hauteur de 15 %. Les émissions étant calculées directement à partir de la vitesse des véhicules, on retrouve les mêmes tendances que celles observées pour la consommation d'énergie (*Figure 3 - 9*).
Les émissions de CH_4 lors de la construction et l'entretien des chaussées sont présentées sur la *Figure 3 - 10* b. Pour le BAC, elles sont principalement attribuées au procédé aciérie (environ 98 %). Pour la chaussée BB, le procédé centrale BB est prépondérant. Dans ces cas précis, les travaux d'entretien de la chaussée BB qui utilisent une masse importante de BB, la contribution des travaux d'entretien des chaussées à l'émission totale est importante.
Les émissions de N_2O sont présentées en *Figure 3 - 10* c. Pour la chaussée GL, les contributions les plus importantes sont celles des engins de chantier. Idem pour les deux autres cas de structures.



a. Emission de CO_2 (t)

b. Emission de CH_4 (t)

c. Emission de N_2O (t)

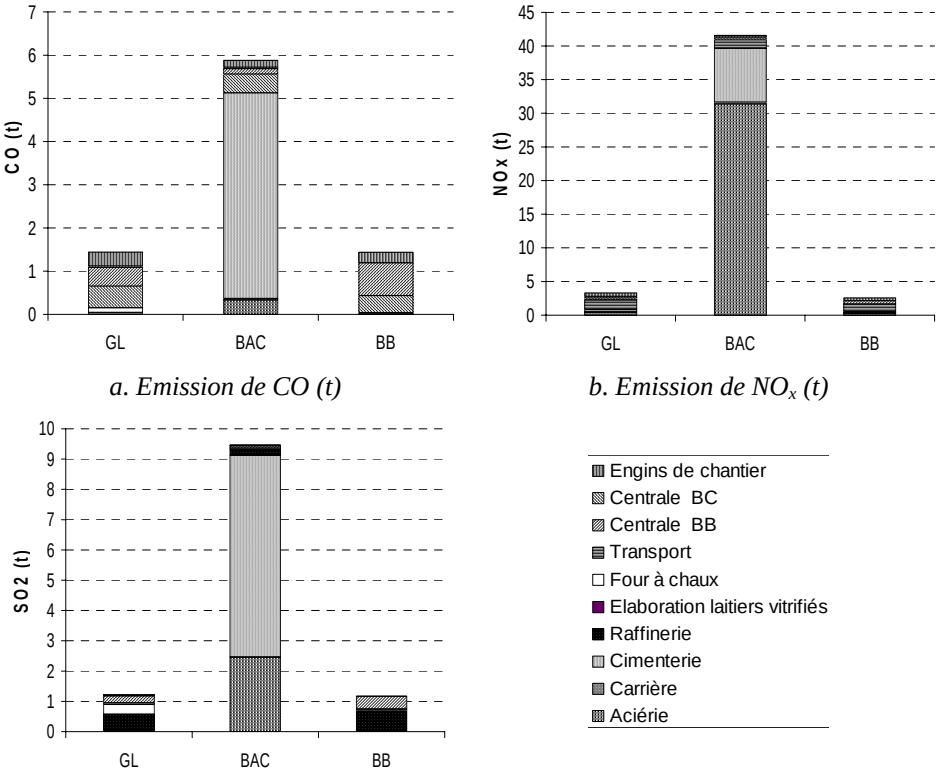
Figure 3 - 10. Emissions des gaz à effet de serre (ramenée à un km et deux sens de circulation, pendant 30 ans)

- *Emissions de gaz toxiques (CO, NOx et SO_2)*

Les émissions de CO dues aux chaussées sont présentées dans la *Figure 3 - 11* a. On constate des tendances similaires au cas du CO_2 (*Figure 3 - 10*), avec une contribution relative plus importante du procédé cimenterie. Les émissions étant calculées directement à partir de la vitesse des véhicules, on retrouve les mêmes tendances que celles observées pour la consommation d'énergie (*Figure 3 - 9*)

Les NOx émis lors des étapes de construction et entretien de chaussées sont présentés dans la *Figure 3 - 11* b. On constate une grande similarité des tendances observées pour les émissions de CO (*Figure 3 - 11* a.), mais avec une contribution légèrement plus visible du procédé carrière. Les émissions étant calculées directement à partir de la vitesse des véhicules, on retrouve les mêmes tendances que celles observées pour la consommation d'énergie (*Figure 3 - 9*).

Pour les émissions de SO_2, les procédés raffinerie, four à chaux et centrale BB sont les plus importants pour la GL et les procédés cimenterie et aciérie sont les plus importants contributeurs pour le BAC. On remarque que le procédé raffinerie est plus important que pour les autres flux, et même prépondérant dans le cas de la chaussée BB.



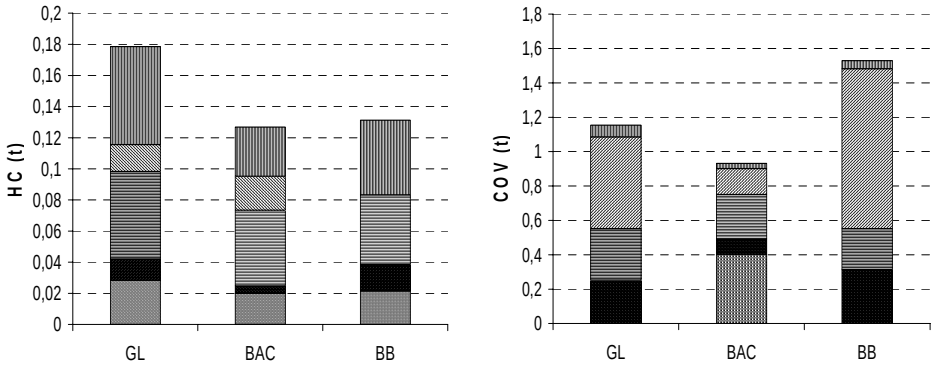
a. Emission de CO (t) *b. Emission de NO_x (t)*

c. Emission de SO_2 (t)

Figure 3 - 11. Emissions de gaz toxique (ramenée à un km et deux sens de circulation, pendant 30 ans)

- *Emissions de familles chimiques organiques (HC et COV)*

Les émissions de COV dues à la construction et l'entretien des chaussées sont présentées sur la *Figure 3 - 12*. Certaines aberrations apparaissent lorsque l'on compare ces résultats avec ceux obtenus pour le méthane (*Figure 3 - 12* b.). Le procédé raffinerie contribue ici de façon significative aux émissions de COV (dont le méthane fait partie), alors que les résultats montrent qu'il ne contribue pas aux émissions de méthane. La possibilité d'émissions de méthane très faibles par rapport aux autres composés organiques mériterait d'être approfondie, la cohérence de ce chiffre reste à vérifier en examinant les procédés de la raffinerie de manière plus approfondie. Les données utilisées pour la raffinerie (Stripple, 2001) et (Blomberg et al., 1999) fournissent des flux en CH_4 mais les valeurs de COV fournies ne sont pas mentionnées comme COVNM. Ainsi la possibilité de double comptage du méthane n'est pas à exclure.



a. Emission de HC(t) *b. Emission de COV (t)*

Figure 3 - 12. Emissions de composés organiques volatiles (ramenée à un km et deux sens de circulation, pendant 30 ans)

- *Emissions de particules solides PM*

Les émissions de particules solides dues à la construction et l'entretien des chaussées sont présentées sur la *Figure 3 - 13*. On constate, pour comparaison, une contribution prépondérante du procédé aciérie pour la structure BAC. A titre indicatif, une masse PM de 0,26 et 0,18 t est respectivement émise pour chacune des structure GL et BB.

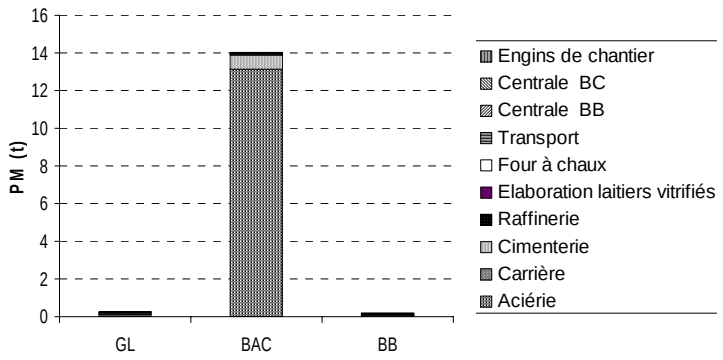


Figure 3 - 13. Emissions de particules solides (ramenée à un km et deux sens de circulation, pendant 30 ans)

2.2.2. Emissions dans le compartiment eau

- *Emissions de phénol*

Les émissions de phénol dues à la construction et l'entretien des chaussées sont présentées dans la *Figure 3 - 14*. On constate des contributions importantes des procédés carrière, raffinerie et centrale BC (ou GTLH). Les variations observées entre les différents cas sont directement liées à la somme des quantités de granulats, BB et de BC utilisées (voir paragraphe de consommation des matériaux *2.1.1.*).

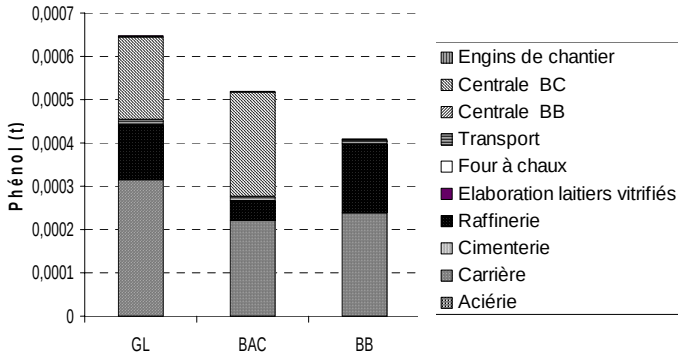


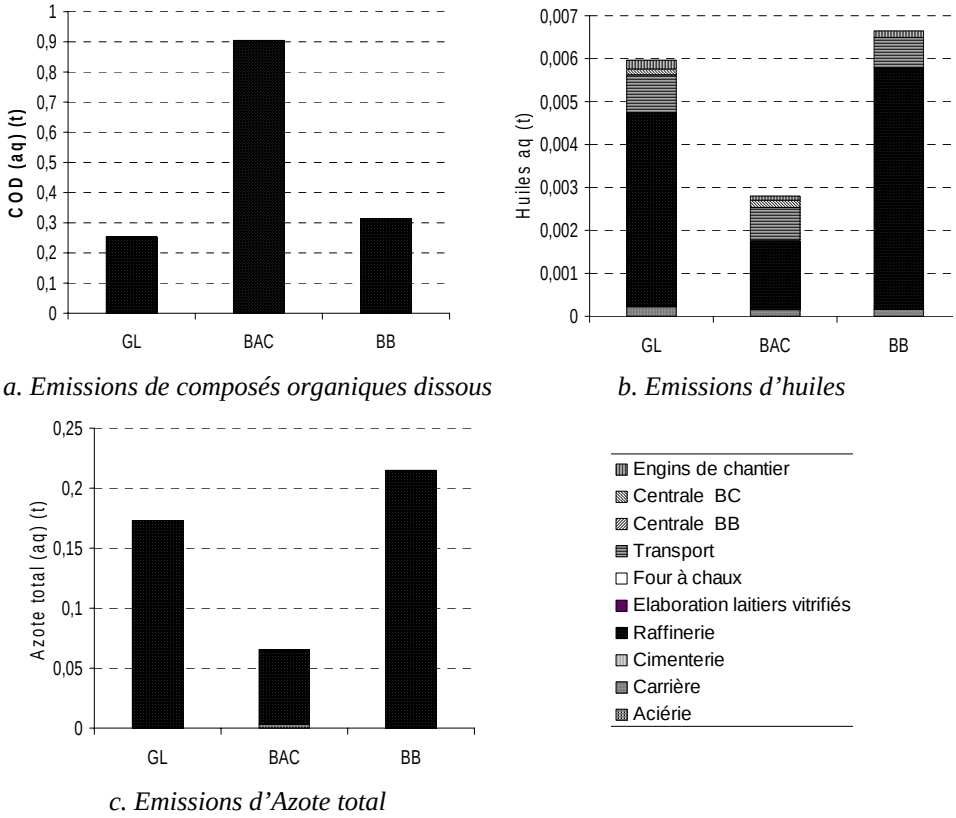
Figure 3 - 14. Emissions de phénol(ramenée à un km et deux sens de circulation, pendant 30 ans)

- *Indicateurs d'état des effluents aqueux : COD (aq), Huiles (aq), N-Tot (aq)*

Le COD présent dans les effluents aqueux émis par la construction et l'entretien des chaussées est présenté dans la *Figure 3 - 15* a. On constate dans tous les cas la contribution majoritaire du procédé raffinerie.

Les huiles sont des composés organiques non miscibles à l'eau, on peut donc supposer qu'il n'existe pas de recoupement avec l'indicateur COD où les composés organiques sont dissous. Les émissions d'huiles sont principalement attribuables au procédé raffinerie qui devient

prépondérant (*Figure 3 - 15* b), et sont donc directement liées à la quantité de bitume utilisée dans les différents cas.
Les données de N-Tot présent dans les eaux (*Figure 3 - 15* c) sont quasi-exclusivement émises par le procédé raffinerie. Elles sont donc directement liées à la quantité de bitume utilisée dans les différents cas.



a. Emissions de composés organiques dissous

b. Emissions d'huiles

c. Emissions d'Azote total

Figure 3 - 15. Indicateurs d'état des effluents aqueux (ramenée à un km et deux sens de circulation, pendant 30 ans)

3. BILAN METHODOLOGIQUE DE L'EXTENSION DU MRE A L'UTILISATION DE MATERIAUX RECYCLES

Une extension de l'outil MRE a été réalisée, en y intégrant un nouveau module permettant d'effectuer des évaluations environnementales en utilisant des laitiers de hauts-fourneaux, comme liant ou comme granulats. Bien que l'exemple traité concerne un seul matériau recyclé, la démarche effectuée reste la même quelque soit le matériau introduit :

- définir les structures appropriées à l'utilisation de ces matériaux, cette étape devant se baser sur l'utilisation de guides ou bien sur un bilan des pratiques ;
- définir si besoin, un scénario de mise en œuvre lorsque l'utilisation du nouveau matériau nécessite un ou des modification(s) de procédés ;
- définir un scénario d'entretien notamment si l'utilisation du nouveau matériau implique des séquences d'entretien différentes des matériaux naturels, cette étape devant également se baser sur l'utilisation de guides ou bien sur un bilan des pratiques ;
- redéfinir les frontières du système, en y intégrant les procédés de production du nouveau matériau introduit ;
- revoir le jeu de données environnementales en y intégrant les données environnementales des procédés ajoutés au système.

PARTIE II : MISE EN PERSPECTIVE DE L'EXTENSION DE L'OUTIL AUX MATERIAUX RECYCLES AVEC LES PRATIQUES DES PROJETS ROUTIERS

La partie I de ce chapitre a permis de décrire la méthodologie suivie pour intégrer des matériaux recyclés à l'outil existant. La partie II de ce chapitre propose de considérer la façon dont l'outil peut être utilisé. Il s'agit d'une part de voir comment les professionnels sont susceptibles de prendre en compte l'environnement dans leurs pratiques, et ainsi d'appréhender leur niveau de sensibilisation aux problèmes environnementaux. D'autre part, il s'agit de réaliser une évaluation environnementale d'un choix de projet routier pris en premier lieu sous l'angle économique, considéré comme l'angle adopté par défaut dans les pratiques.

1. ANALYSE DE LA PRISE EN COMPTE DES PREOCCUPATIONS ENVIRONNEMENTALES LORS DE LA REALISATION DE TRAVAUX ROUTIERS

L'ensemble des préoccupations et critères sont recensés, d'une part à partir du cadre classique régi par la loi MOP et d'autre part de nos entretiens semi-directifs (*Tableau 3 – 8*, *Tableau 3 – 9*, *Tableau 3 – 10*, *Tableau 3 – 11*). Cet ensemble s'inscrit dans une logique d'action ; en rendre compte, c'est rechercher ce qui fonde les choix des acteurs, c'est comprendre quelles rationalités sont à l'œuvre derrière chaque action. Il s'agit de :
- recenser les éléments et délimiter le système dans lequel chaque acteur a la possibilité d'agir ;
- mettre en relief les éléments issus du processus traditionnel de décision. Ceux ci peuvent être confondus, dans certains cas, avec les propos des acteurs rencontrés.
- identifier les liens entres les éléments recueillis (équivalence ou conséquence);
- mettre en évidence le mécanisme personnalisé par acteur.
- enfin décliner les préoccupations et contraintes en critères les reflétant.

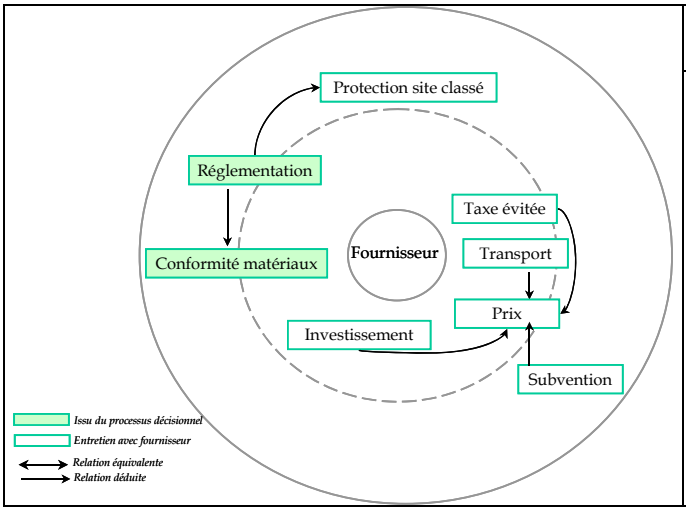
1.1. Présentation synthétique des interviews semi-directives

Nous reprenons dans ce qui suit les éléments recensés dans les interviews semi-directives.

- Critères de producteurs de matériaux de construction

Le *Tableau 3 - 8* présente la sphère du fournisseur des matériaux de construction, leur préoccupation et critères possibles les reflétant.

Tableau 3 - 8. Préoccupations recensées du point de vue des fournisseurs de matériaux de construction

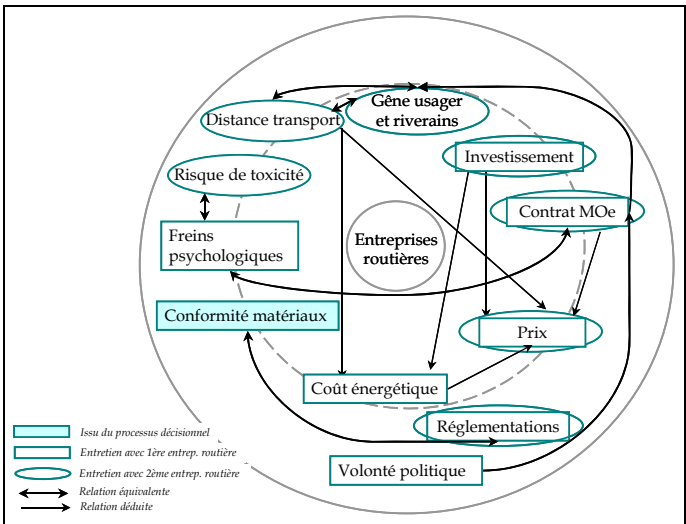


Préoccupations identifiées	***Critères proposés***
Rentabilité économique	- coût d'investissement - coût de production (**€**) - coût du transport (**€**) - taxe évitée de mise en décharge
Technique	Conformité aux normes

- Point de vue des entreprises routières

Le *Tableau 3 - 9* présente la logique de l'entreprise routière exprimée en terme de préoccupations principales et critères associés.

Tableau 3 - 9. Préoccupations recensées du point de vue des entreprises routières

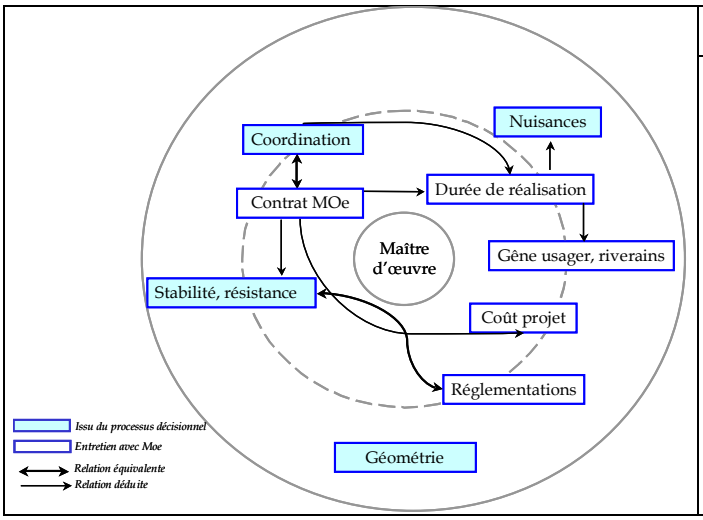


Préoccupations identifiées	***Critères proposés***
Gêne aux usagers Gêne aux riverains	Durée d'exécution des travaux (Jour, mois, année) Durée Bruit Odeurs Poussières Vibrations
Rentabilité énergétique	Energie consommée (MJ)(*procédé et transport*)
Règles hygiène/sécurité	-
Risque sanitaire	Toxicité
Investissement (installation)	Coûts induits
Délais contractuels	Durée travaux (Jour, mois, année)

- Point de vue du maître d'œuvre

Le *Tableau 3 - 10* présente le point de vue du maître d'œuvre.

Tableau 3 - 10. Préoccupations recensées du point de vue du maître d'œuvre

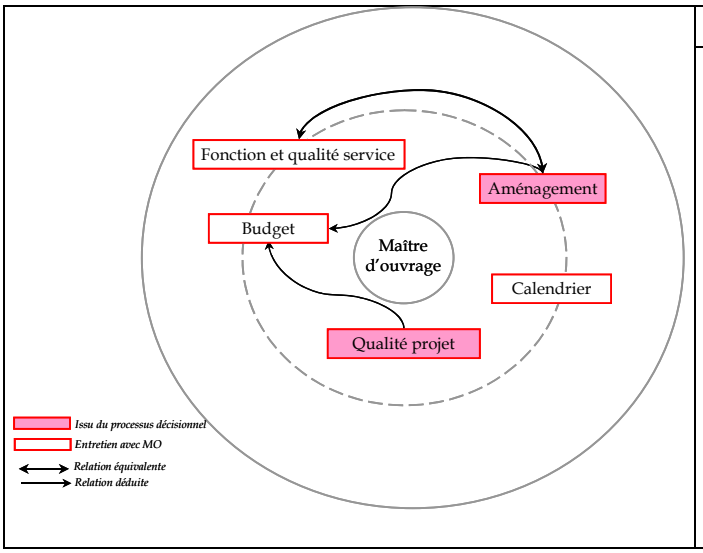


Préoccupations identifiées	*Critères proposés*
Respect des délais	Durée de l'ensemble du projet (h, j, mois)
Respect des budgets	Coût total (€)
Conformité réglementaire	
Gêne aux usagers	
Gêne aux riverains	

- Point de vue du maître d'ouvrage

Le *Tableau 3 - 11* présente le point de vue du maître d'ouvrage.

Tableau 3 - 11. Préoccupations recensées du point de vue du maître d'ouvrage



Préoccupations identifiées	*Critères proposés*
Choix de l'ouvrage et politique d'aménagement : *- choix du mode de transport* *- insertion paysage*	-
Durée d'ensemble	Durée du projet (j, mois, année)
Vie en service de l'ouvrage	Durée de vie (année)
Planification Budgétaire	Coût projet/Budget annuel

1.2. Bilan des interviews semi-directifs et mise en perspective dans le processus décisionnel

Les acteurs interrogés ont fait part de leurs préoccupations générales. Ces préoccupations ont été classées en différents domaines : technique, économique, juridique, sociologique et environnemental. Bien qu'au moins un individu ait été interviewé par type d'acteur, il est important de rappeler que le bilan présenté ici est dépendant des acteurs interrogés. Il ne prétend pas être représentatif de l'ensemble des professions, mais il est une analyse préliminaire, qui est utilisée comme une aide pour avancer dans la progression des outils développés.

L'analyse des préoccupations des différents acteurs montre que celles d'ordre environnemental restent minoritaires en nombre. De fait, les seuls acteurs mentionnant explicitement des préoccupations environnementales sont les entreprises routières. Celles qui

sont mentionnées sont de fait couplées à des préoccupations d'un autre ordre. D'une part, la rentabilité énergétique est clairement couplée avec la rentabilité économique.
D'autre part, les risques sanitaires sont couplés avec la perception des risques par les riverains, avec en arrière plan, une préoccupation d'ordre juridique, de responsabilité en cas de conséquences sanitaires avérées. Ainsi, on analyse que les entreprises routières sont poussées à prendre en compte certaines préoccupations environnementales sans intérêt de rentabilité économique directe, car elles sont au contact direct avec la population et les autorités publiques.
Au sein du processus décisionnel, les entreprises routières sont contractuellement exécutantes des travaux selon les directives de la maîtrise d'œuvre (qu'elles aient pris part ou pas à la rédaction du cahier des charges). Selon les acteurs interrogés, elles ne reçoivent pas de directive directe de prise en compte d'une ou plusieurs préoccupations environnementales.
De même, la maîtrise d'œuvre, si elle n'impose pas de contraintes d'ordre environnementales aux entreprises routières, n'en reçoit pas non plus de la part de la maîtrise d'ouvrage. Ces résultats sont cependant à nuancer et à mettre en relation directe avec la faible représentativité des personnes interrogées. En effet, il apparaît évident que sur certains projets, notamment interurbains, les enjeux environnementaux de protection d'espèces ou de zones classées au niveau européen représentent des contraintes environnementales régies par une réglementation très contraignante.
Enfin, le fournisseur de matériaux est logiquement préoccupé par la validité technique de ses matériaux, ainsi que par la rentabilité économique de son activité. L'élaboration de matériaux recyclés pour l'utilisation dans les routes, n'est donc pas provoquée par un intérêt environnemental. Le fournisseur n'est pas impliqué dans le processus décisionnel, et il n'est pas particulièrement sollicité par les entreprises routières sur des préoccupations environnementales.
A l'issu de ces interviews, deux axes se dégagent :

- d'une part, il apparaît important de mieux cerner les relations entre acteurs, et notamment concernant les contraintes environnementales qu'ils peuvent s'imposer les uns aux autres dans le processus décisionnel. Ceci pourra se faire à l'aide d'une enquête par questionnaire, permettant de toucher un plus grand nombre de personnes.
- d'autre part, concernant l'outil développé, il a été décidé d'utiliser un panel d'indicateurs environnementaux classiques de l'ACV, qui représentent l'ensemble des problèmes environnementaux, même si ceux-ci n'apparaissent pas comme une préoccupation des acteurs. En effet, le nombre de préoccupations exprimées étant faible, leur seule prise en compte conduirait à négliger d'importants problèmes tels que la protection de la biodiversité, ou bien le réchauffement climatique. La signification de l'ensemble de ces indicateurs devra néanmoins être testée sur l'ensemble des acteurs.

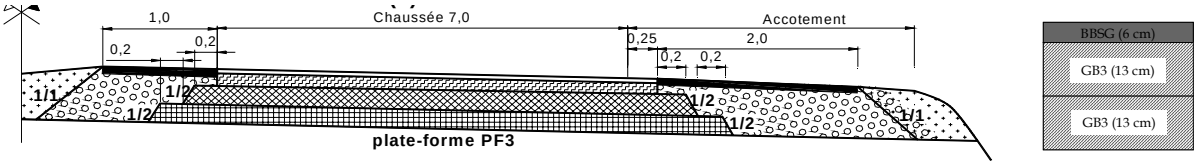
2. ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DE TRAVAUX D'ENTRETIEN ABORDES SOUS L'ANGLE ECONOMIQUE

Suite à la mise en évidence de l'importance des critères économiques des acteurs, quelques simulations ont été réalisées pour l'évaluation environnementale de solutions d'entretien retenues suite à une décision économique. L'ensemble des calculs de cette partie est réalisée avec le jeu de données n°1.

2.1. Scénarii de travaux étudiés et hypothèse de modélisation

La structure étudiée est une structure bitumineuse épaisse type GB3/GB3 avec une couche de roulement en béton bitumineux semi-grenu de classe TC_6^{30} recevant un trafic de 2000

PL/j/sens de circulations *Figure 3 - 16*. Quatre scénarios d'entretien sont à étudier sur une durée de service de 30 ans (*Tableau 3 - 12*). La nouvelle couche à répandre sur l'ancienne chaussée lors de l'entretien est une couche de 6 cm de BBSG pour chaque scénario d'entretien prédéfini.



a) Coupe transversale de la structure bitumineuse

b) Structure de la chaussée

Figure 3 - 16. Structure de la chaussée étudiée

Les différents scénarios d'entretien sont représentés dans le *Tableau 3 - 12*.
La construction de la chaussée étudiée datant de 2004, la stratégie « de base » consiste à attendre 15 ans (en 2019) pour réaliser les travaux de rechargement ; une seule opération est alors prévue au cours des trente ans. Les trois autres stratégies sont :
- Tous les 12 ans (travaux en 2016 et 2028) ;
- Tous les 10 ans (travaux en 2014 et 2024) ;
- Tous les 8 ans (travaux en 2012, 2020 et 2028).

Notons que les stratégies « de base » et « 10 ans » devraient comporter des travaux en 2034, soit la dernière année de la simulation ; ils n'ont pas été pris en compte, car ils n'auraient eu aucune conséquence sur les coûts à l'usager.

Tableau 3 - 12. Scénarios d'entretien à étudier

Date	**Scénario 1 (15 ans)**	**Scénario 2 (12 ans)**	**Scénario 3 (10 ans)**	**Scénario 4 (8 ans)**
	Construction	**Construction**	**Construction**	**Construction**
2012				100 % BBSG (6 cm)
2014			100 % BBSG (6 cm)	
2016		100 % BBSG (6 cm)		
2019	100 % BBSG (6 cm)			
2020				100 % BBSG (6 cm)
2024			100 % BBSG (6 cm)	
2028		100 % BBSG (6 cm)		100 % BBSG (6 cm)

NB: construction non prise en compte dans l'étude

Les scénarii d'entretien étudiés sur le tronçon sont présentés dans le *Tableau 3 - 12*.
La différence « environnementale » entre ces différentes solutions, outre le nombre de rechargements, ne peut venir que de la date à laquelle s'effectuent les travaux et, de ce fait indirectement sur le niveau des émissions considérées à la fois lors de l'extraction des matériaux, de leur élaboration et des travaux d'entretien considérés à la date choisie.

Les 100 km de la section ont été répartis en 20 chantiers unitaires de 5 km chacun, s'échelonnant sur l'ensemble de l'année, soit une durée de 6 jours chacun. Ceci implique que sur un tiers de l'année (de jour comme de nuit, répartis en période creuse comme en heure de pointe) une portion de 5 km (et une seule) soit en chantier.

2.2. Evaluation économique

2.2.1. Coûts directs des travaux d'entretien

Les premiers éléments à prendre en compte dans une optimisation économique sont les coûts directs, observés sur le marché ; ils ne reflètent pas la totalité des coûts subis par la collectivité, mais seulement ceux que l'entreprise répercute sur sa facture. Il est possible cependant d'y incorporer les coûts annexes supportés par le maître d'œuvre, comme la préparation et la gestion du chantier. Comme tous les autres coûts, ils sont ramenés à une année de référence (ici 2005) et sont calculés hors taxes. Le coût du rechargement en enrobés est tiré d'une étude consacrée à la comparaison économique des chaussées en béton et bitumineuses. Ces coûts hors taxes 2000 ont été réévalués aux conditions de 2005 par un coefficient de 1,118, correspondant à l'indice INSEE des prix des travaux publics. Dans la simulation, le coût unitaire augmente de 2 % par an (Brillet et al., 2006).

Tableau 3 - 13. Coût direct des travaux

	Coût HT 2000	Coût HT 2005
Béton bitumineux semi-grenu	41,20 €/t	46,06 €/t
Soit pour 6 cm et 2,40 t/m3	5,93 €/m2	6,63 €/m2
Travaux annexes	19,10 €/m	21,35 €/m
Total avec surlargeur de 10 %	9,25 €/m2	10,34 €/m2

2.2.2. Coûts d'usage dus aux travaux

Nous avons vu que les travaux avaient un coût direct pour le maître d'ouvrage ; mais celui-ci n'est pas le seul à qui les travaux « coûtent », si l'on considère la gêne que subissent les usagers de l'infrastructure, c'est à dire la perte de temps, ainsi que diverses surconsommations par rapport aux conditions normales de fonctionnement.

Le *Tableau 3 - 14* donne les résultats de cette simulation. Pour chacun des scénarios la gêne à l'usager est la même. Les différences de coûts observées sont uniquement liées à l'année à laquelle le chantier d'entretien est réalisée, en raison d'une hypothèse d'augmentation du trafic (donc augmentation des temps d'attente) et à l'actualisation des coûts.

Tableau 3 - 14. Calcul du coût du chantier pour les usagers d'après (Brillet et al., 2006)

Année	Scénarios	Ensemble des coûts subis par les usagers sur la section en un an (M€/100 km)	Même total pour la section entièrement en chantier sur un an (M€/100 km)
2012	4	770	1 000
2014	3	835	1 090
2016	2	908	1 196
2019	1	1 052	1 410
2020	4	1 075	1 465
2024	3	1 295	2 478
2028	2 ou 4	1 578	2 873

2.2.3. Analyse coût-avantage

Le modèle HDM (HDMGlobal, 2007) a été conçu pour réaliser des évaluations « économiques » de projets routiers et de stratégies d'entretien. Par là on entend le calcul d'un « bénéfice actualisé » dans le cadre d'une « analyse coût avantage », prenant en compte la somme des coûts subis par le maître d'ouvrage (construction, entretien et exploitation des routes) et l'usager (coût d'exploitation des véhicules, augmenté éventuellement d'autres coûts comme celui du temps de parcours). Le but était au départ de répondre à la question suivante, posée surtout dans les pays en développement : « comment réduire les coûts de transport par des améliorations –ou un entretien optimal– du réseau routier ? ». L'analyse coût avantage consiste à calculer le « bénéfice actualisé » de la façon suivante :

$$BA = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{V_i - B_i}{(1+a)^{i-1}} \qquad 3 - 1$$

en évaluant année par année (jusqu'à l'année n) le bilan $V_i = A_i - C_i$ des avantages A_i et des coûts C_i pour une variante donnée, que l'on compare à une « solution de référence » dont le bilan est B_i. a est le « taux d'actualisation ».
Une analyse économique « classique », limitée aux coûts directs de réalisation des travaux d'entretien, et à ceux que subit l'usager en temps normal et pendant les chantiers a été réalisée en collaboration avec F. Brillet (Brillet et al., 2006).
Le *Tableau 3 - 15* rassemble les résultats de la partie économique de l'étude (la colonne « avantage pour l'usager » ne tient pas compte de la situation lors des chantiers) (Brillet et al., 2006).

Tableau 3 - 15. Résultats de l'analyse économique (en €/km, actualisés à 4 %, sur 30 ans)

		Coût des travaux			Avantage	Bénéfice actualisé	
	Autoroute	Direct	Indirect	Total	Pour l'usager	Direct	Total
Scénario 1	Option de base	110 275	34 456	144 731	0	0	0
Scénario 2	BB 6cm 12 ans	202 494	118 817	321 311	1 911 154	1 818 935	1 734 574
Scénario 3	BB 6cm 10 ans	221 649	124 653	346 302	2 126 065	2 014 690	1 924 494
Scénario 4	BB 6cm 8 ans	320 143	152 859	473 002	2 416 618	2 206 750	2 088 347

Si l'on compare les bénéfices actualisés, on remarque qu'ils sont tous positifs; la « meilleure » parmi les solutions étudiées correspond à une périodicité de 8 ans pour l'autoroute ; dans ce dernier cas, l'optimum se situe peut-être en deçà de cette limite. Bien sûr, ce résultat ne doit pas être généralisé : une telle analyse appliquée à un réseau devrait être fondée sur l'étude détaillée des différents types de chaussée, de leur comportement réel (calage du modèle), des performances des différentes techniques d'entretien, etc.

Même si elle ne change pas l'ordre des solutions, l'introduction des coûts indirects a une grande influence sur le bilan ; sur l'autoroute, les coûts directs et indirects sont à peu près du même ordre de grandeur, ce qui revient à dire qu'il serait rentable pour la collectivité de payer les travaux deux fois plus cher (par exemple en travaillant de nuit) si cela permettait d'éliminer les conséquences néfastes pour l'usager. Le rapport est de l'ordre du tiers pour la route nationale, et de 4 % pour la route départementale. Mais tout ceci n'est qu'un exemple, fondé sur des configurations de travaux qui ne sont pas nécessairement optimales.
Notons enfin que cette vue « d'en haut » n'est pas forcément partagée par l'usager lui-même, qui pourra juger inacceptables les encombrements dus aux chantiers, alors que les centilitres d'essence économisés sur son parcours quotidien lui seront invisibles…

2.3. Evaluation environnementale à l'aide du MRE

2.3.1. Implémentation d'une loi d'évolution des émissions en fonction du temps

Les pays signataires du protocole de Kyoto ont accepté globalement de réduire de 5,5% leurs émissions de gaz à effet de serre sur la période 2008-2012 par rapport au niveau atteint en 1990. Parmi ces pays, le Japon a un objectif de réduction de 6 % et l'Union européenne de 8%. A la suite de cet engagement, l'Union européenne a estimé nécessaire de procéder à une répartition de la charge de cet objectif entre les quinze États membres. A l'horizon 2008-2012, la France devra donc stabiliser ses émissions de gaz à effet de serre à leur niveau de 1990. Les émissions sont appréciées sur la base du Potentiel de Réchauffement Global (PRG ou GWP) d'un « panier » de six gaz à effet de serre direct constitué du dioxyde de carbone

(CO_2), du méthane (CH_4), du protoxyde d'azote (N_2O), des hydrofluorocarbures (HFC), des perfluorocarbures (PFC) et de l'hexafluorure de soufre (SF_6).
Pour l'ensemble de la période 1990-2003, les estimations produites dans les inventaires réalisés par le CITEPA, suivant les recommandations de la convention des nations unies sur le changement climatique (UNFCC), sont représentées sur la *Figure 3 - 17*. Celle ci couvre les six gaz à effet de serre pour lesquels la France s'est engagée à stabiliser ses émissions sur la période 2008-20012 par rapport aux niveaux de 1990. On note que le total PRG (Potentiel de Réchauffement Global) reste plus ou moins stable au cours de la période 1990 – 2003.

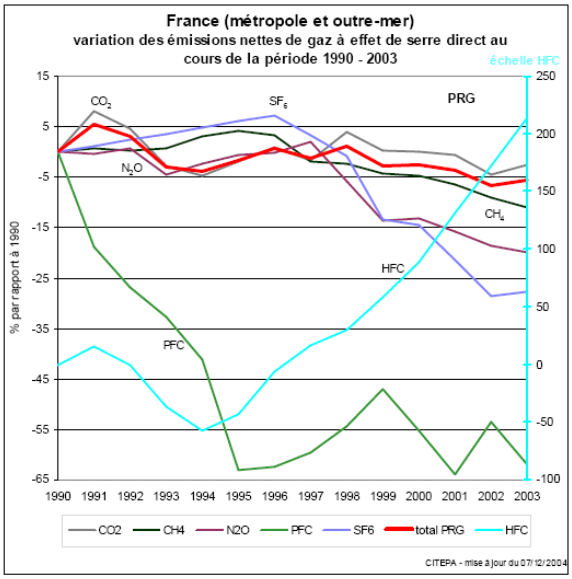


Figure 3 - 17. Variations des émissions nettes (UTCF[1] incluses) de gaz à effet de serre direct au cours de la période 1990-2003 (source CITEPA / CORALIE format CCNUCC – mise à jour décembre 2004)

Une tendance d'évolution des émissions de gaz à effet de serre a été modélisée (Brillet et al., 2006) en réponse des souscriptions du protocole de Kyoto. Elle tient compte des réductions des émissions prévues à raison de 8 % sur la période de prévision 2008-2012. L'indicateur présenté ici est exprimé en pourcentage d'évolution des émissions par rapport à l'année de référence 1990). La plage d'étude ainsi représentée s'étend de 2004 (année de construction) à l'année 2034. Une réduction de 8 % des émissions est appliquée aux différents flux émis des travaux d'entretien. Cette tendance de réduction qui selon Kyoto est prévu pour la période 1990 – 2010 resterait constante de 2010 – 2034.

La loi de régression des émissions GES selon le protocole de Kyoto est sous la forme :

$$e_t = \alpha \exp(-t) + e_0 \qquad 3 - 2$$

Considérer 8 % de réduction des GES pour la période 1990-2010 revient à écrire :

$$e_t = 8 \exp(-t) + 99 \qquad 3 - 3$$

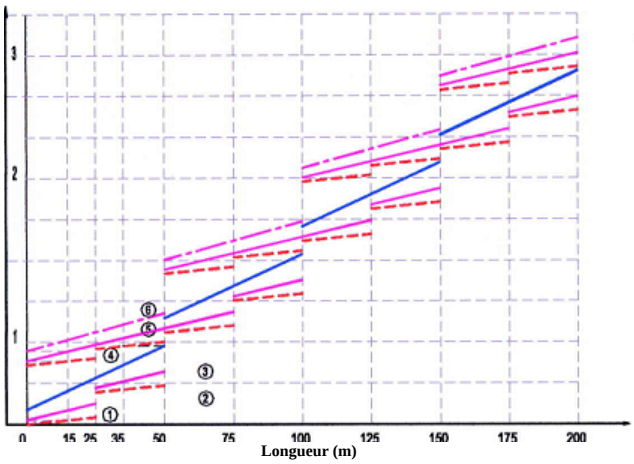
Cette loi de régression a été implémentée dans le modèle. On compare au niveau environnemental une solution sans loi d'évolution des émissions, et une solution avec la loi ci-dessus appliquée au jeu de données n°1.

2.3.2. Résultats obtenus avec le MRE pour les scénarii 1 à 4

Durée des travaux sur un tronçon de 100 km

La durée des travaux correspondant à l'application d'une couche de roulement en BBSG pour un tronçon autoroutier de 200 m de longueur a été estimée par Hoang (2005) à 2,167 h de travaux (*Figure 3 - 18*). Si l'on ramène la durée des travaux à un tronçon autoroutier de 100 km de longueur, celle ci serait de 1083,5 h, équivalent à 136 jours ouvrables (l'équivalent de 6 mois de travaux).

Organisation du chantier d'entretien
Technique : 100% BBSG 6,5 cm + 100% BBTM 2,5 cm
Quantité de voies fermées : 2.



	Travaux	Engin
1	Répandage de la couche d'accrochage	1 épandeuse
2	Répandage de la couche BBSG	1 finisseur
3	Compactage de la couche BBSG	1 compacteur VT2 (CC432)

Figure 3 - 18. Durée des travaux d'entretien

Bilan des consommations

- *Consommation des matériaux*

L'ensemble des matériaux utilisés pour l'entretien des différents scénarii est représenté dans la *Figure 3 - 19*.

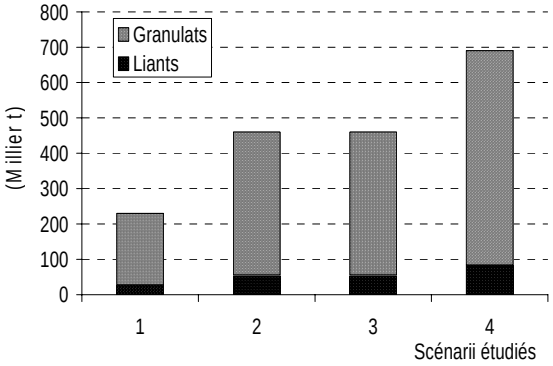


Figure 3 - 19. Consommation des matériaux (ramené à 100 km à deux sens de circulation). Jeu de données n°1

- *Energie consommée lors des travaux d'entretien de la chaussée*

La consommation d'énergie cumulée après 30 ans, ramenée à 100 km et deux sens de circulation, est présentée dans la *Figure 3 - 20* et ce pour les 4 scénarios d'entretien

prédéfinis. Une quantité d'énergie allant de 104 10^3 GJ (scénario 1) à 314 10^3 GJ (scénario 4) est utilisée pour l'entretien de la chaussée pendant 30 ans. Cette quantité d'énergie correspond à la consommation annuelle d'électricité en l'an 2000 de 4345 à 13035 habitants français (Helio-France, 2002).

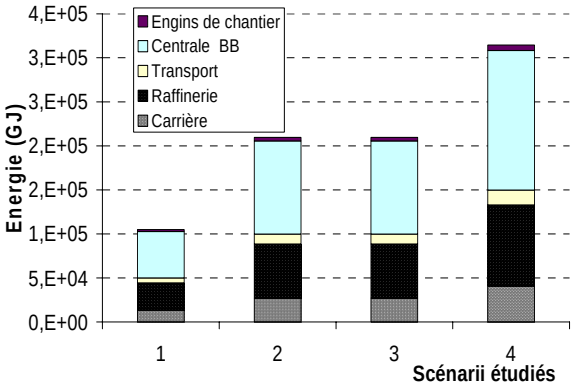


Figure 3 - 20. Energie totale consommée par les engins de chantier associés aux travaux d'entretien (ramenée à 100 km et à deux sens de circulation) (jeu de donnée n° 1)

Bilan des émissions sans application de tendance de décroissance

Le *Tableau 3 - 16* présente un ensemble de flux de polluants évalués avec le MRE sans loi de décroissance des émissions. Ainsi, de façon logique, les flux d'émissions sont trouvés proportionnels au nombre de séquences d'entretien, indépendamment de la date de réalisation.

Tableau 3 - 16. Evaluation des flux environnementaux des différents scénarios d'entretien (ramenée à 100 km et deux sens de circulation) avec le jeu de données n°1.

Type de flux		**unité**	**Scénario 1**	**Scénario 2**	**Scénario 3**	**Scénario 4**
Energie	Pétrole, électricité, gaz naturel	GJ	104842,913	209685,8	209685,8	314529
Emissions dans l'air	SO_2	t	1,18	2,37	2,37	3,55
	NOx	t	0,77	1,54	1,5484942	2,32
	CO_2	t	6748,29	13496,58	13496,58	20244,87
	CO	t	9,769	19,538	19,538	29,307
	hydrocarbures	t	14,94	29,88	29,88	44,83
	poussières	t	1,036	2,07	2,07	3,108
	métaux	t	-	-	-	-
	N_2O	t	15,89	31,79	31,79	47,68
	COV / HC	t	1,33	2,66	2,66	3,992
	CH_4	t	1,3	2,6	2,6	3,9
	HAP	g	-	-	-	-
Emissions dans l'eau	pétrole ou hydrocarbures	t	5,14	10,27	10,274	15,41
	Phénol	t	3,52	7,04	7,04	10,56
	Phosphore	t	-	-	-	-
	composés organiques dissous	t	-	-	-	-
	Azote	t	0,096	0,19	0,192	0,28
	demande chimique en oxygène	t	15,51	31,02	31,025	46,537
	demande biologique en oxygène	t	-	-	-	-
	Solides	t	-	-	-	-
Déchets	Déchets	t	-	-	-	-
Ressources naturelles	Bitume	t	28035,6	56071,18	56071,18	84106,7
	Granulats naturels	t	202037,48	404074,96	404074,96	606112,4

Bilan des émissions avec application d'une tendance de décroissance
Les émissions de CO_2 dues à l'entretien de la chaussée sont présentées dans la *Figure 3 - 21*. avec application de la tendance définie plus haut (3 - 6). L'application d'une tendance de réduction des émissions permet logiquement d'observer des réductions par rapport à l'hypothèse de maintien constant du niveau des émissions. Selon le scénario d'entretien correspondant, cela représente respectivement des réductions de 2600 à 5200 t de CO_2.

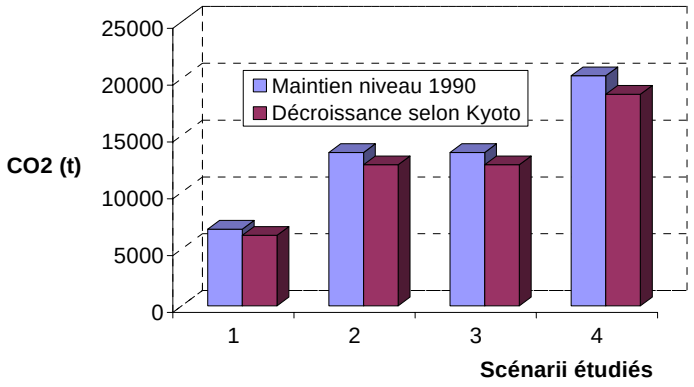


Figure 3 - 21. Emissions de CO2 dues aux travaux d'entretien- tendance de réduction des émissions (ramené à 100 km et à deux sens de circulation) (jeu de donnée n° 1)

Comparatif des bilans émissions avec ou sans loi de décroissance
Un comparatif des deux tendances d'évolution des émissions est représenté sur la *Figure 3 - 22*, et ce pour le premier scénario d'entretien (scénario1). On constate une réduction des émissions de l'ordre de 8 % pour chaque flux. Celle-ci n'apparaît que sur certain (réduction considérable pour les émissions CO, HC, N_2O, COD).

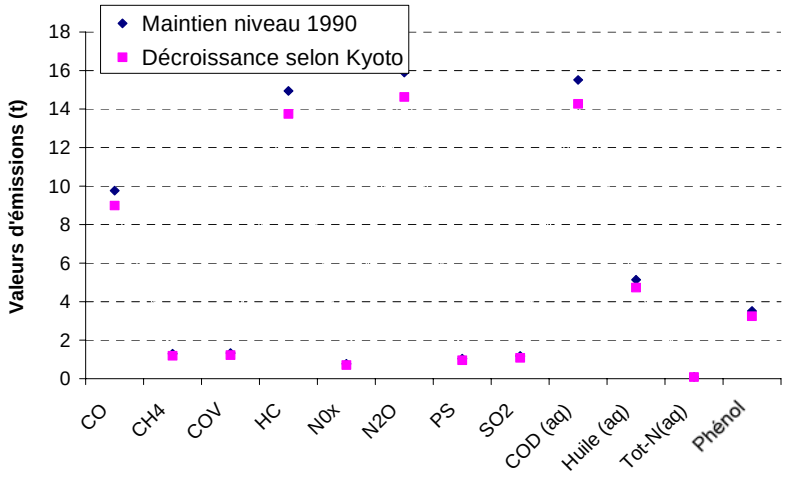


Figure 3 - 22. Evolution des émissions en fonction du temps (ramené à 100 km et à deux sens de circulation)

2.4. Bilan de l'utilisation du MRE sous un angle économique

Le choix d'entretien d'une infrastructure routière a été abordé sous un angle économique. Dans cette optique, le gestionnaire définit des scénarios basés sur des fréquences et des dates d'entretien, d'une même structure. Il a le choix, sur une même durée de service, entre :
- un seul entretien (scénario 1)
- deux entretiens mais décalés dans le temps (scénarios 2 et 3)
- 3 entretiens (scénario 4).

Les résultats de calculs économiques, que ce soit en terme de coûts directs ou de coûts d'usage (intégrant la gêne à l'usager), montrent des différences significatives. Logiquement, ces coûts augmentent avec le nombre de séquences d'entretien, mais les scénarios 2 et 3 qui ont tous deux, deux séquences d'entretien, présentent également des différences significatives. Celles-ci sont liées à la prise en compte, à la fois des phénomènes d'inflation et du taux d'actualisation. Ceci a pour résultat d'obtenir un bénéfice actualisé plus important si les séquences d'entretien sont retardées dans le temps.
Lorsque cette logique est intégrée au MRE, on utilise une hypothèse de décroissance des émissions, en se basant sur un respect strict du protocole de Kyoto. Les différences observées entre les scénarios 2 et 3 ne sont pas significatives.
Ainsi l'utilisation du MRE pour évaluer des solutions d'abord optimisées économiquement, ne permet pas d'obtenir des évaluations environnementales pertinentes, car la sensibilité du modèle économique aux dates n'est pas répercutée sur le modèle environnemental. De fait, les résultats environnementaux du MRE dépendent principalement des changements de procédés (donc de matériaux utilisés) ainsi que des masses de ces matériaux. L'optimisation environnementale nécessite une prise en compte dès l'origine, au niveau du choix des différents scénarios, impliquant notamment différentes structures.

PARTIE III : IMPLEMENTATION D'INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX DANS L'OUTIL

Des parties précédentes, il est apparu que l'intégration de matériaux recyclés au MRE pouvait se faire assez facilement.
Concernant l'accessibilité de l'outil et ses utilisations potentielles par des professionnels de la route, nous avons constaté qu'il n'était pas possible de prendre en compte leurs avis à ce stade. D'une part, les interviews semblent montrer à la fois un faible niveau de préoccupations environnementales parmi les critères décisionnels des différents acteurs, mais également l'absence parmi les préoccupations environnementales exprimées, de la quasi totalité des problèmes environnementaux actuels, y compris ceux d'envergure internationale, tels que le changement climatique. D'autre part, nous avons constaté qu'il n'était pas forcément pertinent d'entrer dans une logique purement économique en y adjoignant ensuite des évaluations environnementales. En effet, la recherche de solutions significativement différentes d'un point de vue environnemental, implique d'intégrer cette préoccupation dès le choix de scénarios, car la sensibilité du modèle MRE ne répond pas à la même logique que la sensibilité des paramètres économiques.
Il apparaît à ce stade plus judicieux de séparer les calculs environnementaux des considérations économiques et d'acteurs, avec l'optique de réintégrer ces deux aspects à un stade ultérieur de la méthode. Ainsi, cette troisième partie est consacrée :

– à l'analyse des données environnementales unitaires implémentées dans le modèle ;
– à la définition et à l'intégration dans le MRE d'indicateurs environnementaux classiques des méthodes ACV, et non spécifiques, ni des acteurs concernés, ni des échelles décisionnelles, ni des contraintes économiques.

1. ACTUALISATION DU CATALOGUE DE DONNEES ENVIRONNEMENTALES MRE AVEC DE NOUVELLES SOURCES DE DONNEES

L'intégration des laitiers de hauts-fourneaux dans l'outil MRE a donné lieu à l'implémentation de nouvelles données environnementales unitaires (jeu de données n° 2). Dans cette partie, on effectue une analyse critique des données environnementales. Tout d'abord, on s'intéresse aux données expérimentales collectées par le LCPC sur les procédés carrière et centrale d'enrobage (jeu de données n° 3). Ensuite, l'ensemble des données déjà utilisées (jeux n° 1, 2 et 3) est regroupé dans un nouveau jeu de données, qui a été complété par de nouvelles recherches bibliographiques. C'est le jeu n° 4, jeu de données définitif de ce travail de thèse. Il est commenté en terme de variabilité dans cette partie, et il sera utilisé dans le chapitre suivant, pour le développement de la méthodologie MVU.

1.1. Analyse de l'incidence d'un jeu de données expérimental pour la carrière et la centrale d'enrobage

Dans ce paragraphe, des calculs complémentaires sont réalisés avec des données dont l'origine est contrôlées (Jullien et al., 2006), (Martaud et al., 2007) (jeu de donnée n° 3) de chacun des procédés respectifs. centrale d'enrobage et carrière de production des granulats pour la fabrication et mise en œuvre d'une couche de béton bitumineux semi grenu (6 cm d'épaisseur) et mises en perspectives des données bibliographiques (jeu de donnée n°1).

Les données du jeu n°3 ont été intégrées au jeu n°1, et cette nouvelle base de données a été appliquée à l'exemple traité dans le paragraphe 2.1 (page 100). On obtient le résultat d'inventaire présenté dans le *Tableau 3 - 17*. Celui-ci va du simple au double en fonction des

données d'entrée. D'autre part, les données mesurées permettent d'avoir des flux d'inventaire plus faibles que ceux utilisant des données bibliographiques.

Tableau 3 - 17. Résultat de l'inventaire (jeux de données 1 et 3)

Type de flux		unité	ICV (N°3)	ICV(N°1)	Rapport ICV(N°3)/ICV(N°1)
Energie	Pétrole, électricité, gaz naturel	GJ	4205,43	5242,14	0,8
Emissions dans l'air	SO_2	t	0,58	0,77	0,75
	NOx	t	0,48	0,79	0,61
	CO_2	t	204,1	337,41	0,6
	CO	t	0,28	0,48	0,58
	hydrocarbures	t	0,03	0,038	0,79
	poussières	t	0,026	0,059	0,45
	métaux	t	-	-	-
	N_2O	**t**	**0,051**	**0,052**	**0,99**
	COV	t	0,31	0,75	0,409
	CH_4	**t**	**0,07**	**0,06**	**1,16**
	HAP	g	-	-	
Emissions dans l'eau	**Pétrole ou hydrocarbures**	**t**	**0,0047**	**0,005**	**0,98**
	phénol	t	0,0001	0,0002	0,59
	phosphore	t		-	
	composés organiques dissous	t		-	
	azote	t	0,17	0,17	1
	demande chimique en oxygène	**t**	**0,25**	**0,25**	**0,99**
	demande biologique en oxygène	t	-	-	-
	solides	t	-	-	-
Déchets	déchets	t	-	-	-
Ressources naturelles	Bitume	t	572,24		-
	Granulats naturels	t	10101,87		-

L'inventaire établi avec les données dont la source est connue représente des valeurs de flux 0,5 à 0,8 plus faible qu'un inventaire dont la source de données n'est pas clairement identifiée. Ceci est valable pour la plupart des flux sauf pour le méthane où l'inventaire obtenu est supérieur à celui de la bibliographie (1,16). Le N_2O, la DCO et les HC restent insensibles aux données d'entrée du modèle. Une répartition énergétique par procédé est représentée dans la *Figure 3 - 23*. Celle-ci dépend entièrement du jeu de données d'entrée.

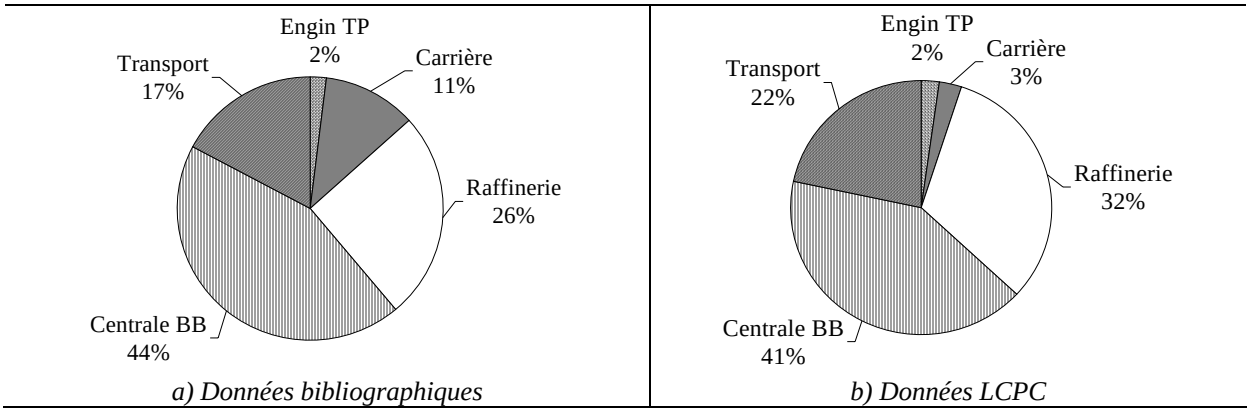


Figure 3 - 23. Répartition de la consommation d'énergie par procédé.

1.2. Analyse de la qualité des données du jeu n° 4

Une analyse statistique des données a été effectuée afin de tester leur qualité et fiabilité. L'ensemble des données implémentées dans le modèle à ce stade, comportant des éléments sur les matériaux neufs et recyclés, est rassemblé en annexe du chapitre 3. Le nombre de flux souvent renseigné dans les différentes références est peu élevé : énergie, CO_2, NOx, PS, parfois certains co-produits pour la production des aciers et laitiers.

Les quatre procédés aciérie, carrière, cimenterie et chaux disposent d'un nombre de données conséquent par rapport au reste des procédés et ce pour les flux les plus couramment renseignés à savoir l'énergie totale consommée, le CO_2, le SO_2, le CO, les NOx et les Particules Solides. Aucune donnée n'a été trouvée pour la centrale de grave traitée aux liants hydrauliques. Dans ce cas, les données de la centrale béton ont été utilisées. Seulement une référence a été trouvée concernant les engins TP et véhicules de transport (transmises par leurs fournisseurs).

Les flux dont le nombre de données environnementales disponibles est inférieur 2 ne peuvent être exploités d'un point de vue statistique. Pour ceux dont le nombre est supérieur ou égal à 2, l'intervalle de confiance à 95 % est représenté dans le *Tableau 3 - 18*.

Tableau 3 - 18. Dispersion des données environnementales

Procédés	Ic 95/Moy ≤ 0,1	0,1 < Ic 95/Moy ≤ 0,5	0,5 < Ic 95/Moy < 1	Ic 95/Moy > 1
Aciérie	*- alliage* *- ferraille* *- laitier d'aciérie* *- papier, carton*	*- Energie totale* *- CO_2* *- produits laminés* *- Paquetage* *- Eau* *- Manganèse* *- laitier de haut fourneau*	*- Carburant* *- Electricité* *- NOx* *- PCB* *- Benzene* *- Bauxite* *- alliages réfractaires* *- poussières* *- Total déchets* *- Total co-produits*	*- DCO* *- verre* *- matériaux non recyclables* *- minerais total* *- Déchet variés non spécifié (boues, poussières, fines)*
Carrière		*- Energie totale* *- CO_2* *- Eau*	*- SO_2*	*- CO* *- NOx* *- HC* *- COV* *- Hydrocarbures* *- PS*
Cimenterie	*CO_2*	*- Energie totale* *- CO* *- NOx* *- SO_2* *- PS*	-	-
Chaux		*- Energie totale* *- CO_2* *- NOx* *- PS*	*- CO* *- SO_2*	-
Laitier vitrifié	-	-	-	*- Energie totale* *- CO_2*
Laitier cristallisé	-	*- Dolomie*	*Zinc*	-
Raffinerie	-	*- Electricité*	*- Energie totale* *- Huile (aq)*	*- CO_2* *- SO_2* *- HC* *- PS* *- Tot-N (aq)* *- DCO*
Centrale béton	-	*- combustible*	*- NOx* *- SO_2*	*- CO2*
Centrale BB		*- Energie totale*	-	*- Electricité* *- CO_2* *- NOx*
Centrale GTLH	-	-	-	-

Les données CO_2, NO_x, SO_2, PS sont caractérisées par un rapport IC/moyenne compris entre 0,1 et 0,5 pour un nombre de données ($N \geq 5$) et supérieur à 1 (pour $2 \leq N < 5$). Les données environnementales laitiers vitrifiés, raffinerie et carrière sont caractérisées par une valeur Ic/moyenne supérieure à 1. On donc peut dire que ces données sont dispersées d'un point de vue statistique. La centrale à béton a un rapport Ic/moyenne compris entre 0,5 et 1. Un plus petit rapport caractérise les procédés cimenterie et four à chaux. Globalement les données recueillies semblent assez dispersées et ce pour l'ensemble des procédés.
Les diverses données unitaires environnementales ont été représentées en fonction du temps sur les figures (*Figure 3 - 24.*, *Figure 3 - 25.* et *Figure 3 - 26*). On constate globalement qu'il n'existe pas forcément de tendance globale des données en fonction du temps.

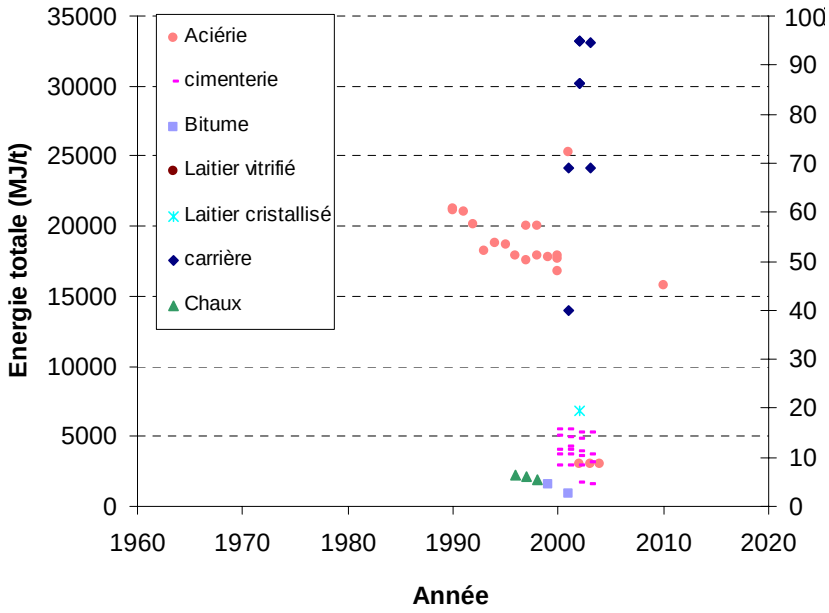


Figure 3 - 24.Dispersion des données consommations énergétiques des procédés en fonction du temps

Pour l'énergie, les procédés four à chaux, raffinerie, et cimenterie ne présentent qu'une faible dispersion des valeurs. Les procédés carrière et aciérie laissent apparaître une forte dispersion des valeurs de flux unitaires. Pour le procédé cimenterie, entre 1993 et 2003, les valeurs d'énergies varient entre 1550 et 9700 MJ/tonne de ciment produite. Entre 1990 et 2010 le procédé aciérie aurait réduit sa consommation énergétique de 25 % (21100 – 15800 MJ/t), mais une forte dispersion est observée pour les valeurs. Aucune corrélation n'a été trouvée significative en fonction du temps.

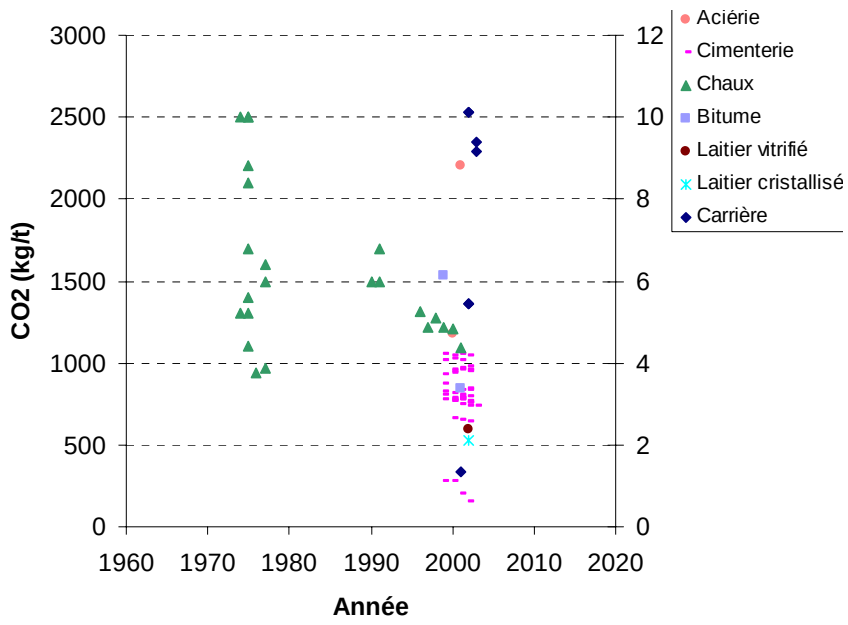


Figure 3 - 25. Dispersion des données CO_2 des procédés en fonction du temps

Pour le CO_2, la majorité des données disponibles pour chacun des procédés se situe autour de l'année 2000. Seul le procédé four à chaux fournit des valeurs plus anciennes. Il est donc difficile d'observer des tendances, y compris pour le procédé four à chaux, dont les valeurs des années 1970-1980 sont très dispersées. Néanmoins, pour ce procédé, à partir de l'année 1990, il semble apparaître une tendance à la baisse.

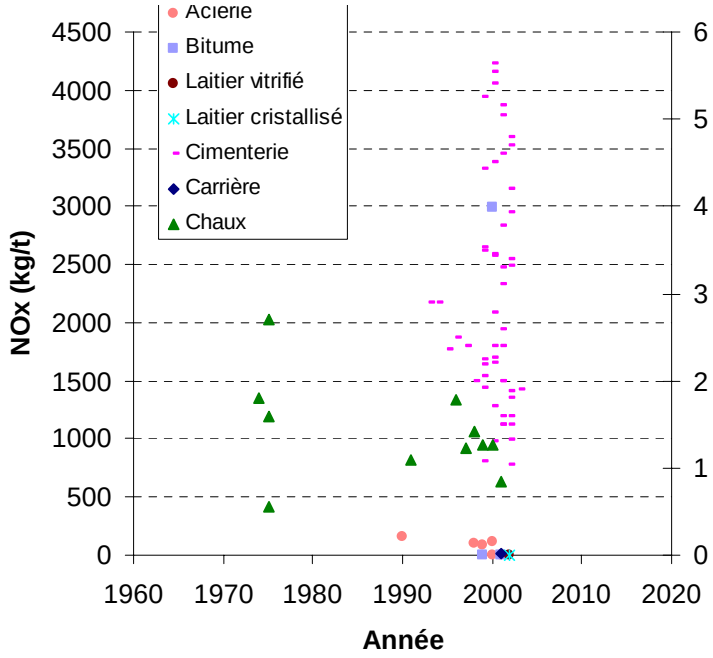


Figure 3 - 26. Dispersion des données NOx des procédés en fonction du temps

De même que pour le CO_2, peu de données antérieures aux années 2000 sont disponibles (quelques unes pour les procédés four à chaux et aciérie).

2. CHOIX DES INDICATEURS D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

2.1. Sélection d'un panel d'indicateurs d'impacts environnementaux

L'évaluation des impacts sur l'environnement selon la démarche ACV, consiste à traduire les flux élémentaires recensés, en impacts sur l'environnement à l'aide d'indicateurs quantitatifs, dans la mesure du possible. Les indicateurs utilisés sont ceux présentés dans le chapitre 2 (bibliographie) de ce mémoire.
On rappelle qu'un impact sur l'environnement peut être positif ou négatif. Cette étape est nécessaire afin de synthétiser les multiples valeurs de flux recensés, en un nombre plus réduit de données, censées représenter les effets sur l'environnement. Elle se réalise en trois phases brièvement exposées ci-dessous.

Phase de classification des impacts : il s'agit de définir une liste pertinente de catégories d'impacts à prendre en compte et d'y affecter les flux recensés lors de l'inventaire selon les règles suivantes :

- tous les flux doivent être affectés à au moins une catégorie d'impacts,
- un flux peut être affecté à plus d'une catégorie d'impact. La quantification de la contribution du flux en question à chaque impact doit se faire en évitant toute redondance.

Phase d'allocation des flux : la contribution d'un flux à une ou plusieurs catégorie d'impact est traduite sous forme d'un coefficient d'allocation.
Phase de caractérisation des impacts : il s'agit de définir l'indicateur d'impact qui permettra de quantifier la contribution spécifique de chaque flux affecté à la catégorie d'impact considérée. Puis, ces contributions sont agrégées pour chaque catégorie d'impact. Le *Tableau 3-19* présente les différentes catégories d'impacts considérés dans cette thèse ainsi que les indicateurs qui leurs sont attribués. A ces catégories spécifiques des méthodes ACV, on a fait correspondre à titre d'indication, des préoccupations environnementales pouvant concerner les projets routiers, et exprimées dans un langage courant. On constate que les méthodologies ACV ne fournissent pas d'indicateurs adaptés pour deux types de préoccupations à priori fortement rencontrées dans les projets routiers : l'insertion de l'infrastructure dans le paysage, ainsi que les nuisances supportées par les riverains.

Tableau 3 - 19. Catégories d'indicateurs d'impacts introduits dans le MRE

Catégorie d'impact	Indicateurs existants	Objectifs										
		Economie des ressources	Augmentation de la valorisation des déchets	Protection de la biodiversité	Insertion dans le paysage	Diminution de la pollution de l'air	Diminution des risques sanitaires	Diminution de la mise en décharge	Diminution des GES	Diminution de la pollution des eaux	Diminution de nuisances	Economie d'énergie
effet de serre	Global Warming Potential (GWP)					x			x			
conso. énergétique	Equivalent énergétique	x										x
eutrophisation	Index d'eutrophisation									x		
acidification	Potentiel d'acidification					x				x		
formation d'ozone troposphérique	Photochemical Ozone Creation Potential (POPC)			x		x	x					
toxicité (home)	Potentiels toxiques					x	x		x			
écotoxicité (être vivants sauf homme)	Potentiels éco-toxiques			x			x		x			

Pour le calcul d'indicateurs les données de contribution de chaque flux à un indicateur d'impact sont données en annexe du chapitre 3.

Certaines valeurs de flux n'ont pas pu être utilisées, tandis que d'autres ne contribuent à aucun impact. Enfin, pour certains flux, leurs contribution à la toxicité ou l'écotoxicité n'est pas incluse dans le modèle utilisé (Huijbregts et al., 2000), probablement car on ne dispose d'aucunes informations environnementales actuellement fiables les concernant. Dans le cas du procédé de raffinage, une quantité totale de métaux est fournie, mais on ne peut pas lui attribuer de coefficients de contribution, puisque la nature et la quantité de chaque élément chimique n'est pas précisée. Pour ce cas, nous avons donc considéré que la masse totale des métaux était équivalente à du Chrome VI, qui est l'hypothèse la plus pessimiste.

2.2. Mode d'allocation des flux environnementaux

L'étape d'allocation des flux permet de répartir les données d'inventaire dans chacune des sept catégories d'impact (chapitre 1). L'annexe du chapitre 3 présente pour chaque cas considéré l'ensemble des flux environnementaux ainsi que leurs coefficients d'allocation à chaque catégorie d'impact.

L'allocation des flux dépend du type de leur contribution aux impacts environnementaux. Celle-ci peut être classée en trois types (Ventura et al., 2004) :
- exclusif : la même entité moléculaire d'un polluant ne peut pas participer à plusieurs impacts différents, simultanément ou successivement ;
- successif : la même entité moléculaire d'un polluant peut participer à un impact puis à un suivant ;

- synergique : plusieurs substances associées peuvent provoquer un impact qu'elles ne provoqueraient pas séparément.

Parmi ces types de contributions possibles, les effets synergiques ne sont généralement pas pris en compte, car, bien que souvent loin d'être négligeables, ils sont encore mal connus et insuffisamment modélisés pour pouvoir être intégrés à la démarche ACV. Les effets synergiques seront donc négligés.

Les différents flux qui peuvent être responsables d'impacts différents selon la bibliographie (SETRA, 2001), (IFEN, 1996). Ils ont été regroupés dans le *Tableau 3 - 20*, dans lequel sont également précisées les différentes *natures* de leurs contributions.

Tableau 3 - 20. Nature des contributions des substances responsables de différents impacts

Catégorie substances	**Effet de serre**	**Acidification**	**Ozone troposphérique**	**Eutrophisation**	**Toxicité**	**Ecotoxicité**
SO_2		Exclusif	Exclusif		Exclusif	
NOx	Exclusif	Exclusif et successif à l'effet de serre	Exclusif et successif à l'effet de serre	Exclusif et successif à l'acidification	Exclusif	Exclusif
HCl, HF		Exclusif			Exclusif	

La plupart des contributions sont de *nature* exclusive (par exemple CO_2, N_2O et CH_4, ne contribuent qu'à la seule catégorie d'impact « effet de serre »), et les flux concernés sont répartis entre les différentes catégories d'impact à l'aide de coefficients dont la somme est égale à 1. Dans le cas où la nature des contributions est successive, la somme des coefficients associés est supérieure à 1. C'est le cas des émissions de NOx gazeux, où l'eutrophisation est successive à l'acidification, car elle est provoquée lorsque les NOx passent dans l'eau. Pour cela, les NOx gazeux doivent d'abord être solubilisés, ce qui provoque préalablement un phénomène d'acidification.

La détermination des coefficients dépend essentiellement des conditions dans lesquelles est émise chaque substance : le lieu d'émission (densité de population, climat…), le compartiment d'émission (eau, air, sol), la phase dans laquelle la substance se trouve lors de l'émission (gaz, liquide, solide)… La démarche suivie consiste donc à examiner ces différentes conditions pour chaque flux par procédé, et à formuler des hypothèses simplificatrices lorsque les informations nécessaires ne sont pas disponibles. De manière générale, nous avons notamment admis que les substances gazeuses émises en hauteur (cheminées) ou en zone dépeuplée, ne présentaient pas d'effets de toxicité. Cette hypothèse est en effet simplificatrice car la toxicité pour l'homme pourrait se produire par transport dans l'atmosphère sur de longues distances, ou par transferts dans d'autres compartiments (eau, sol). La démarche est détaillée ci-dessous pour chaque flux émis par le système et cité dans le tableau.

SO_2 : d'après les données d'inventaire, le SO_2 est émis en majorité par la cimenterie, l'aciérie et la raffinerie et très minoritairement par la carrière, probablement par les gaz d'échappement des engins d'extraction.

- Dans le cas de la cimenterie, de l'aciérie et de la raffinerie, les impacts seront plutôt considérés généraux : acidification et formation d'ozone troposphérique. La part entre les deux catégories d'impact est essentiellement dépendante du climat : la formation d'ozone troposphérique est favorisée par temps chaud, sec et haute pression atmosphérique, tandis que l'acidification est favorisée par temps humide et pluvieux. Pour un climat tempéré, nous avons arbitrairement décidé d'affecter 50% des flux émis par la cimenterie, l'aciérie et la raffinerie à chaque catégorie.

- Dans le cas de la carrière, le gaz émis près du sol par les engins est probablement essentiellement respiré par le personnel, donc la catégorie privilégiée sera la toxicité.

NOx : les NOx sont émis par chaque procédé donc dans des conditions très différentes. On distingue :

- les NOx émis dans la carrière, la plate forme lors du chantier et lors des transports par camions (que l'on suppose en milieu à forte densité de population) qui sont entièrement affectés à la catégorie toxicité,
- les NOx émis par l'aciérie, la cimenterie, la raffinerie, le haut fourneau, le four à chaux et les centrales de fabrication des mélanges qui sont affectés aux autres catégories. Ils contribuent dans un premier temps à l'effet de serre. Ensuite, si l'on fait la même hypothèse concernant le climat que pour les flux en SO_2, on attribue arbitrairement 50% du flux à la catégorie formation d'ozone troposphérique. Les autres 50% sont solubilisés par l'eau de pluie et participent à l'eutrophisation et l'acidification. On suppose que 50% du flux solubilisé lors de l'acidification rejoint des cours d'eaux superficielles et participe à l'eutrophisation. On obtient au final, sur les flux issus de l'ensemble formé par l'aciérie, la cimenterie, la raffinerie, le haut fourneau, le four à chaux et de la centrale : 50% pour la catégorie formation d'ozone troposphérique, 50% pour la catégorie acidification et 25% pour la catégorie eutrophisation.

HCl, HF : ils sont émis par la raffinerie ou l'aciérie, probablement par la cheminée. On néglige alors les impacts de toxicité et 100% du flux est attribué à la catégorie acidification.

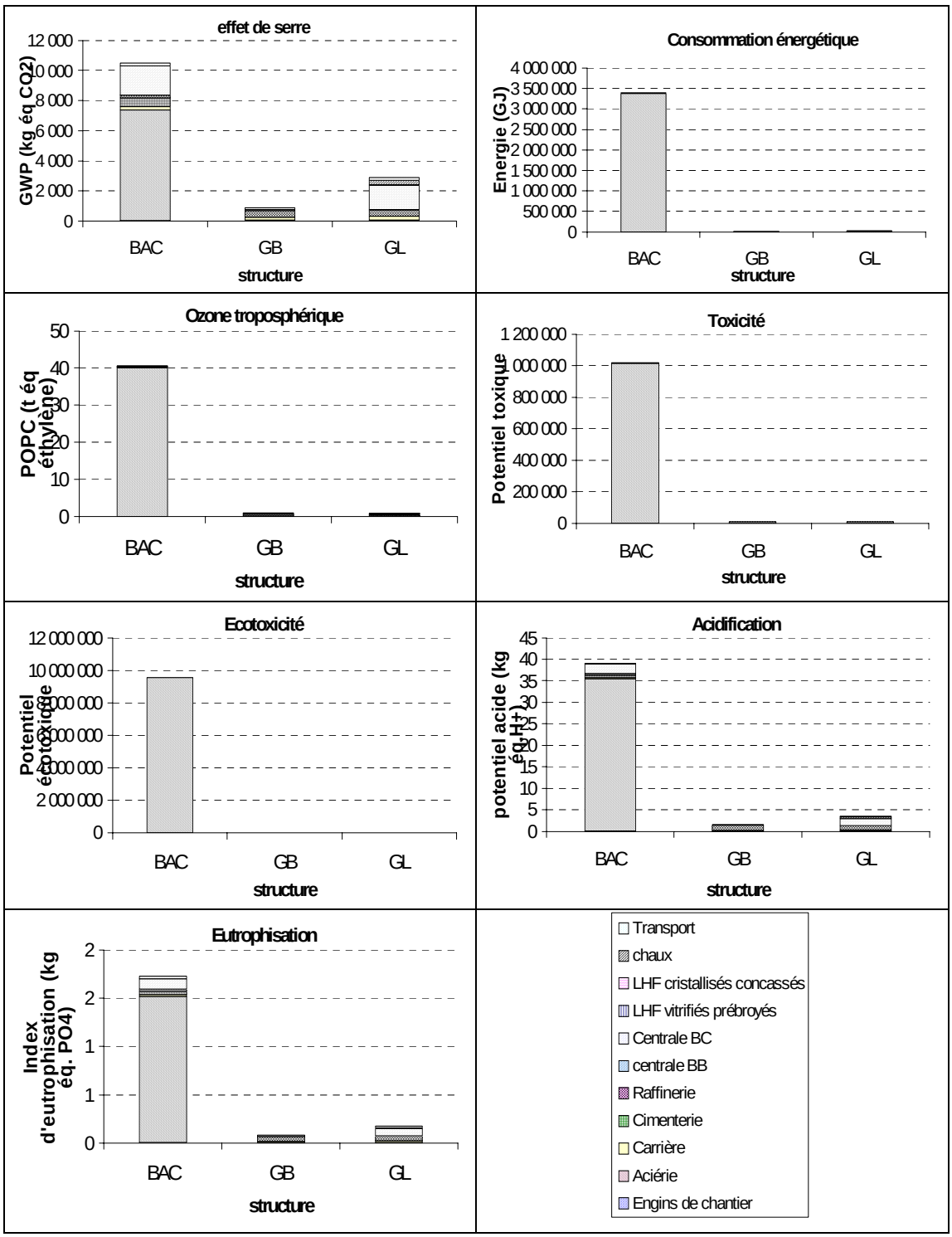
D'autre part, certains composés sont à la fois toxiques et écotoxiques. Le modèle choisi (Huijbregts et al., 2000), considère déjà la répartition entre différents compartiments (eau, air, sol, homme). Il n'est donc pas nécessaire de fixer des coefficients d'allocation : 100% du flux est affecté à chaque catégorie.

Enfin, une question se pose concernant la prise en compte d'une partie des consommations et des émissions du procédé aciérie que l'on affecterait à la production des laitiers. Plusieurs raisonnements sont possibles. Les laitiers peuvent être considérés comme déchets et dans ce cas, aucun flux de l'aciérie ne leur est affecté. Ils peuvent aussi être considérés comme des co-produits, et dans ce cas, une partie des flux peut leur être affectée. Le coefficient d'affectation devrait être calculé à partir des procédés internes à l'aciérie qui aboutissent effectivement à la production des laitiers. Cette information n'étant pas disponible, il a été choisi de calculer des coefficients à partir des masses de laitiers produites par rapport aux masses d'aciers. Ce choix est arbitraire, le coefficient pourrait par exemple être également calculé à partir des valeurs économiques de ces deux produits.

3. RESULTATS D'INDICATEURS D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Les résultats des différents indicateurs de catégories d'impact sont présentés par type de structure et par procédé dans le *Tableau 3 – 21*.

Tableau 3 - 21. Indicateurs d'impacts potentiels - Contribution des procédés (jeu de données n° 4) ramenée à un km et deux sens de circulation
Hypothèse n°1 : 0% des flux de l'aciérie sont attribués aux laitiers



On observe que pour tous les indicateurs calculés (GWP, énergie, POPC, toxicité et acidification), les structures GL et BB donnent des résultats assez proches et inférieurs à BAC. Pour cette structure BAC, le procédé aciérie contribue majoritairement.

PARTIE IV : APPLICATION DU MRE A UN OUVRAGE INTERURBAIN AUTOROUTIER AVEC MATERIAUX CLASSIQUES ET LAITIERS DE HAUTS FOURNEAUX

Dans cette partie, un cas d'application d'une structure utilisant des laitiers de hauts-fourneaux, est décrit. Les résultats présentés sont issus de calculs utilisant le jeu de données n° 4. Ils ont été également calculés avec le jeu de données n° 1, pour comparaison avec la thèse précédente (Hoang, 2005), et sont présentés en annexe du chapitre 3.

1. PRESENTATION DE L'ETUDE DE CAS

L'application du modèle à l'utilisation des laitiers de haut fourneau s'est appuyée sur une étude de cas réel à partir des données obtenues par le laboratoire régional de Nancy. Sur le plan géométrique, la section d'autoroute est caractérisée par une vitesse de référence de 130 km/h. En profil en travers, l'autoroute comporte une plate forme de 27 m, offrant 2 voies de circulation de 7 m. Le trafic retenu pour le dimensionnement est de classe TC_5^{30}. La structure repose sur une plate forme de classe PF2. On ne s'intéresse dans notre cas qu'à la structure de chaussée. Cette dernière du type semi-rigide est constituée d'une couche de fondation et d'une couche de base en grave-laitier 0/20 de 25 cm d'épaisseur chacune, les granulats étant du laitier concassé. La couche de roulement en béton bitumineux offre 8 cm d'épaisseur de granulats 0/14 provenant de la carrière de Raon-l'étape. Les formulations de laitiers correspondant sont données comme suit : 70 % de laitier concassé de haut fourneau, 20 % de laitier granulé et 1% de chaux vive. L'ensemble de ces éléments a servi de réflexion pour développer une nouvelle structure à importer dans le MRE, puisque cette autoroute a une structure de chaussée qui diffère du catalogue. De plus, pour comparer cet ouvrage en matériau alternatif à un référentiel connu, il a semblé utile compte tenu de la faible qualité des données, de considérer d'une part les trois structures MRE avec matériaux classiques et d'autre part la nouvelle structure en grave laitier importée au début de ce chapitre. L'ensemble des structures a été considéré comme rendant le même service donc supportant le même trafic TC_5^{30} sur 30 ans.

1.1. Présentation des ouvrages étudiés

Quatre variantes issues du catalogue (SETRA/LCPC, 1998) ont été prises en compte pour comparaison : deux variantes à base de matériaux naturels et deux à base de laitier. Toutes ces variantes (*Figure 3 - 27*) répondent aux même sollicitations de trafic imposées, c'est à dire celui du cas réel étudié ; les variantes catalogue ont donc été dimensionnées pour permettre une étude comparative de ces solutions.

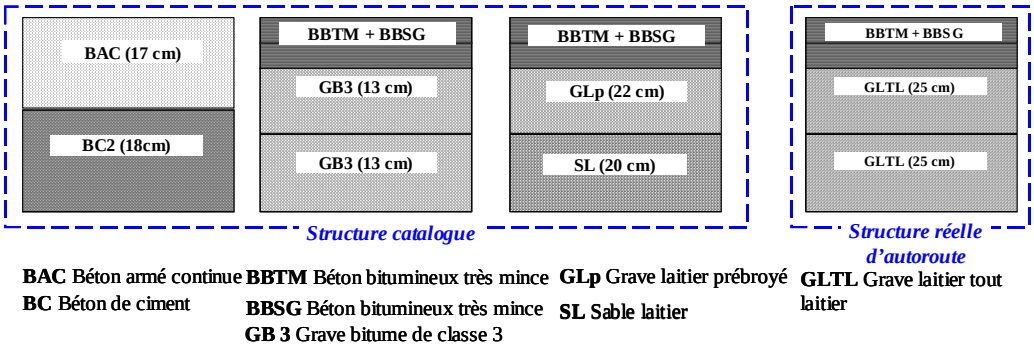


Figure 3 - 27. Structures de chaussées étudiées

La longueur du tronçon étudié est d'un km (deux sens de circulation) dans tous les cas. La *Figure 3 - 28* présente le profil en travers de la section prédéfinie.

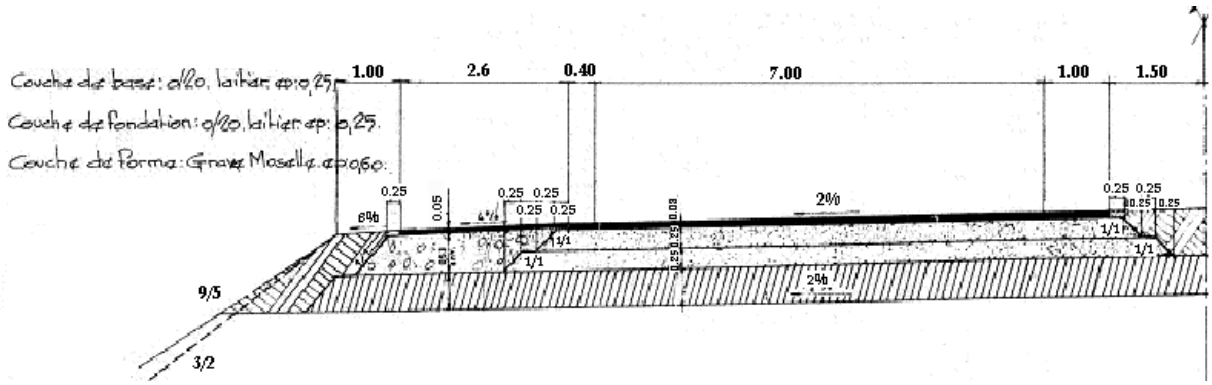


Figure 3 - 28. Profil en travers du tronçon étudié

1.2. Présentation des scénarii d'entretien

La politique d'entretien des structures du catalogue sont celles définies au début de ce chapitre (*Tableau 3 – 5*) ; celle du tronçon réel étudié sont présentées ci-après (*Figure 3 - 29*).

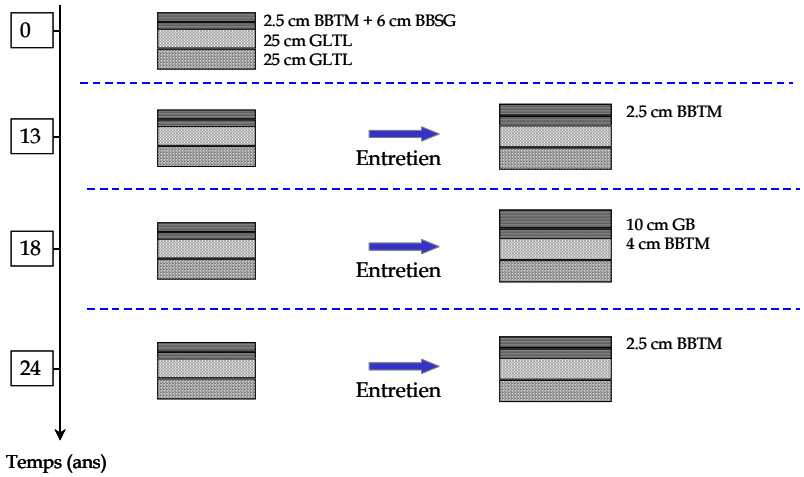


Figure 3 - 29. Scénarios d'entretien

2. PARAMETRES DU MRE

2.1. Transports

Pour les structures du catalogue les distances moyennes de la bibliothèque MRE ont été utilisées (*Tableau 3 - 6*) ; pour la nouvelle structure les données de transport prises en compte sont détaillées ci-après.

Les distances de transport lors de la construction et l'entretien du cas étudié sont présentées dans le *Tableau 3 - 22*. Le laitier granulé provient de Sacilor (Joeuf, Rombas, Hagondange) livrés à Maizières-les-Metz par route. Les installations de concassage Salviam Brun du laitier concassé sont à proximité des hauts fourneaux de Wendel Sidelor à Hagondange, à 15 km au Nord de Metz, elles comprennent quatre fosses de coulées, capables de contenir 100 à 120 tonnes de laitier et dont la production journalière est de 5 à 6000 tonnes suivant les granulométries demandées. Pour ce qui est des engins et de la centrale mobile de graves traitées, on considère qu'ils se trouvent localement à 20 km en moyenne du chantier.

Tableau 3 - 22. Paramètres de transport des matériaux

Matériaux (et matériels)					Trajet		Distances (km)
	Masse (tonnes/ans)						
Types	**0**	**13**	**18**	**24**	**Départ**	**Destination**	**Camions**
Engins	-	-	-	-		Chantier	20
Béton bitumineux	4435,27	1022,61	2658,34	1022,61	Varize (France)		32
Graves traitées	26419,50	-	-	-	-		20
Laitier granulé	5548,10	-	-	-	Joeuf, Romabs et Hagondange		18, 11, et 6,5
Laitier cristallisé	10570,79	-	-	-	Hagondange		6,5
Chaux	264,20	-	-	-	Dugny		72
Granulats	9552,42	965,14	2536,94	965,14	Raon l'Etape	Varize (France)	123
Bitume	243,86	140,18	300,23	140,18	Pas de Calais		465,5

2.2. Simulation des travaux

La centrale Lecat utilisée pour la fabrication des matériaux des couches d'assise est une centrale mobile de 900t/h type 4DDc-MB4C de la société Auxiliaire-Entreprise (Indre et Loire).

Un compacteur à pneu Bross lesté à 32 tonnes pour 7 roues est venu compléter l'atelier existant. Ce matériel est comparable au Richier C791 préconisé sur le chantier avec 32 passes.

L'atelier de mise en œuvre de la couche 4 cm de BB 0/14 est constitué d'un finisseur Voegele super 1700, d'un pneu P5 et d'une bille type VA 15. Pour ce qui est de la micro chape 0/10 FE tapis généralisé, c'est un enrobé très mince (2 - 2,5 cm d'épaisseur) à chaud, à liant modifié fortement dosé (environ 6,8 %). Cet enrobé est une couche de roulement sans apport structurel, correspondant à des travaux neufs, de renforcement ou d'entretien, destinés à des chaussées peu déformables. Le liant est fabriqué sur l'aire d'enrobage par un matériel mobile spécifique. La centrale retenue est une TSM17 Ermont de capacité nominale de 180 t/h de température de chauffe de 180° C.
Le compacteur VT2, Dynapac CC432 moteur équipé Cummins 4BTA3.9 est utilisé pour le compactage des graves traitées. Les données d'émissions nous ont été transmises par le fournisseur. Sa largeur de travail est de 1,68 m et sa vitesse 3 km/h.

Pour les travaux d'entretien de la chaussée (*Figure 3 - 29*), 13 ans après la construction d'origine, la surface ancienne de chaussée est recouverte d'une micro chape de BBTM de 2,5 cm ; 18 ans après 10 cm de GB + 4 cm de BB sont appliqués; 24 ans après, une nouvelle couche de BBTM d'une épaisseur de 2,5 cm est répandue sur l'ancienne chaussée.

3. RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS INTERURBAINE

Les hypothèses d'allocation des flux sont les mêmes que celles présentées dans la partie III. Concernant l'allocation d'une partie des flux du procédé aciérie à la production des laitiers, l'hypothèse n° 2 (20 %) est retenus pour les résultats de flux.

3.1. Flux entrants

Les masses de matériaux utilisés lors de la construction initiale et de l'entretien selon la politique du catalogue (SETRA/LCPC, 1998) des différents cas de chaussée étudiés ont été calculés et sont représentés dans le *Tableau 3 - 25*.

Tableau 3 - 23.Quantité de matériaux utilisés lors de construction et entretien des chaussées (ramenée à un km et un sens de circulation) sur 30 ans.

	Acier (t)	**Ciment (t)**	**Bitume (t)**	**Laitiers vitrifiés (t)**	**Chaux (t)**	**Laitiers concassés (t)**	**Granulats (t)**	**Eau (l)**
BAC	72,99	1331,00	226,12	-	-	-	11573,42	680,12
GB	-	-	787,02	-	-	-	12340,72	-
GL	-	-	632,75	1322,10	105,06	-	8295,81	624,24
Cas réel étudié	-	-	412,23	2774,05	132,10	5285,40	7009,82	792,59

Les consommations en granulats et en liants naturels et recyclés sont détaillées sur la *Figure 3 - 30*et *Figure 3 - 31*.

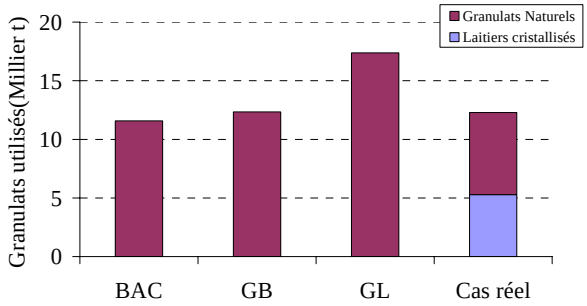


Figure 3 - 30. Masse totale de granulat (en t) pendant 30 ans (ramenée à 1 km et un sens de circulation)

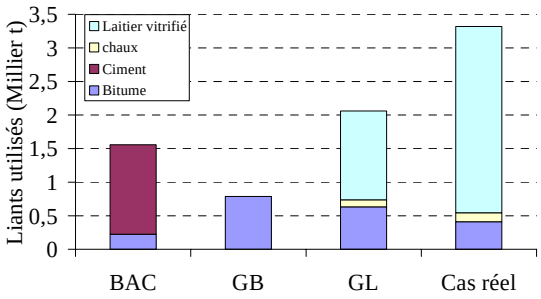


Figure 3 - 31. Masse totale de liant (en t) pendant 30 ans (ramenée à 1 km et un sens de circulation)

On constate une consommation plus importante de granulats naturels par les structures BAC et GB, par rapport aux structures de laitiers. Malgré des épaisseurs de couches supérieures, la structure réelle consomme moins de granulats naturels que les autres structures.
Les structures à base de laitier GL et le cas réel étudié consomment plus de liant au total que les variantes BAC et GB. Cependant, en terme d'économie de ressources naturelles, elles consomment moins de liants issus de matières premières naturelles, avec un avantage pour le cas réel étudié. Par rapport aux calculs obtenus avec le jeu de données n° 1 et 2, on obtient logiquement des résultats identiques, car les dimensionnements ne changent pas.

La consommation d'énergie cumulée après 30 ans est présentée dans la *Figure 3 - 32* pour un kilomètre et un sens de circulation, ainsi que la contribution des différents procédés à la consommation d'énergie totale.

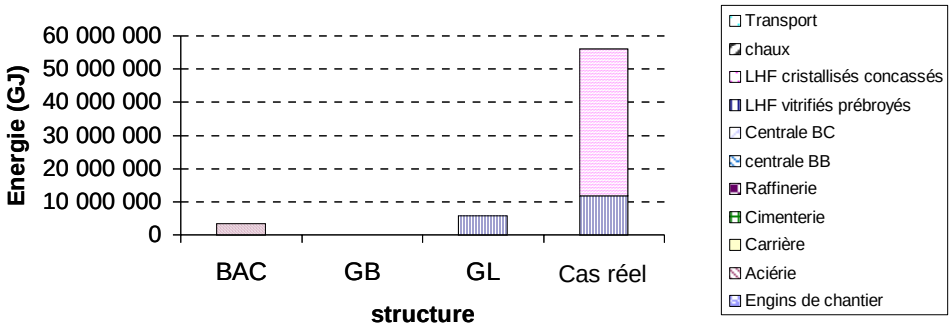


Figure 3 - 32. Energie consommée (ramenée à 1 km et à un sens de circulation pendant 30 ans) Hypothèse 2 : 20% des flux de l'aciérie sont attribués aux laitiers

En terme d'énergie, la structure GB est la moins consommatrice (8 410 GJ), tandis que la structure réelle apparaît la plus consommatrice (56 10^6 GJ), essentiellement du fait de l'énergie consommée par le procédé d'élaboration des laitiers cristallisés pris en compte. La structure GL utilise également des laitiers, mais uniquement sous forme de liants, donc leur proportion massique est moindre par rapport au cas réel (environ 2 000 tonnes pour la structure GL et 10 000 pour le cas réelle selon la *Figure 3 - 30* et la *Figure 3 - 31*).

3.2. Bilan des flux sortants

3.2.1. Emissions dans le compartiment air

- *Emissions de gaz à effet de serre (CO_2, CH_4 et N_2O)*

La *Figure 3 - 33* présente les émissions de gaz à effet de serre dues à la construction et l'entretien des chaussées. On retrouve les mêmes tendances pour les émissions de CO_2 que pour les consommations d'énergie, avec prépondérance du procédé de production des laitiers cristallisés dans le cas réel étudié.

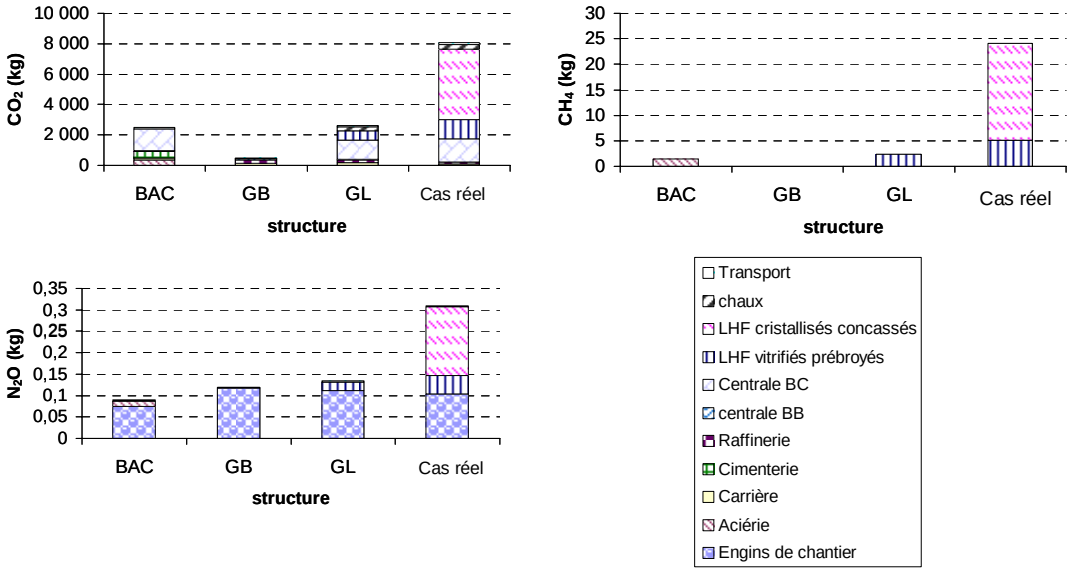


Figure 3 - 33. Emissions de gaz à effet de serre (ramenée à 1 km et à un sens de circulation pendant 30 ans). Hypothèse 2 : 20% des flux de l'aciérie sont attribués aux laitiers.

- *Emissions de gaz toxiques (CO, NOx et SO_2)*

La Figure 3 - 34 présente les émissions de gaz toxiques. La structure du cas réel est la principale émettrice, en raison des émissions importantes du procédé de production de laitiers de haut fourneau (20 % du procédé acierie).

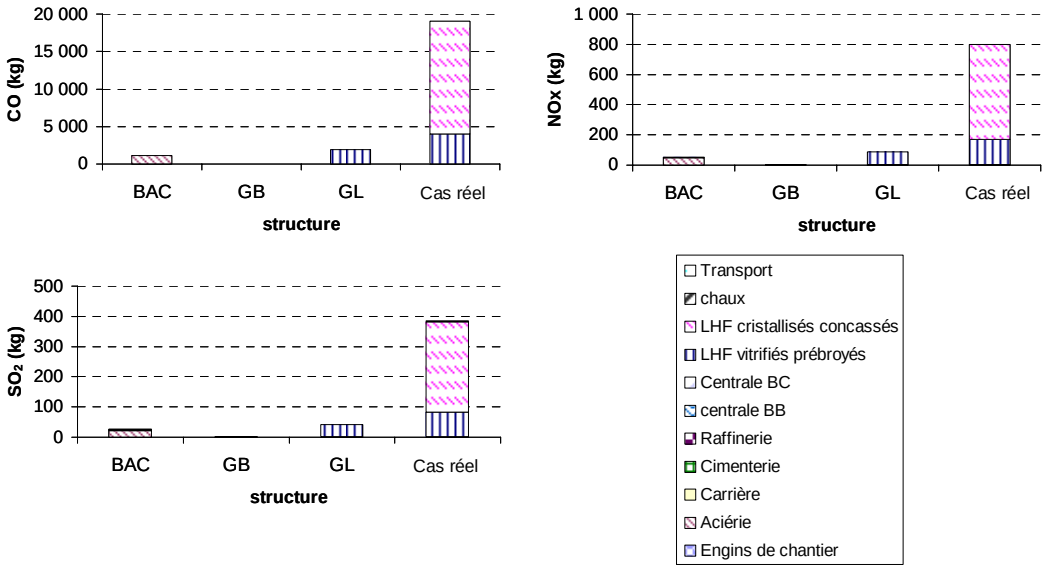


Figure 3 - 34. Emissions de gaz toxiques (ramenée à 1 km et à un sens de circulation pendant 30 ans) - Hypothèse 2 : 20% des flux de l'aciérie sont attribués aux laitiers

- *Emissions de familles chimiques organiques (Hydrocarbures)*

La *Figure 3 - 35* présente les émissions d'hydrocarbures.

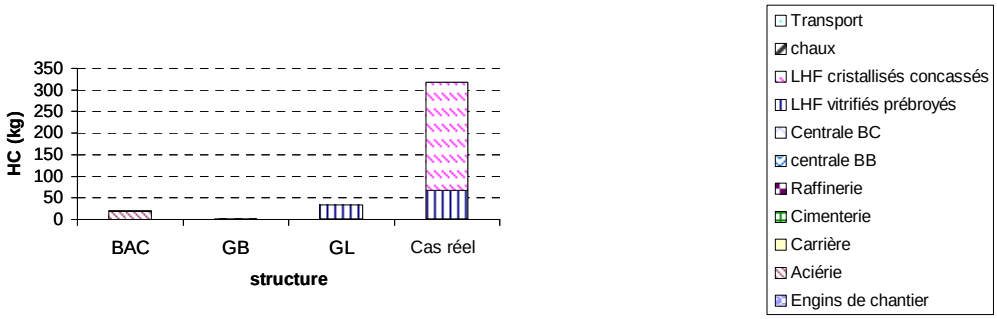


Figure 3 - 35. Emission d'hydrocarbures (ramenée à 1 km et à un sens de circulation pendant 30 ans) - Hypothèse 2 : 20% des flux de l'aciérie sont attribués aux laitiers

Les émissions d'hydrocarbures sont principalement dues au procédé haut fourneau.

- *Emissions de particules solides PS*

La *Figure 3 - 36* présente les émissions en particules solides.

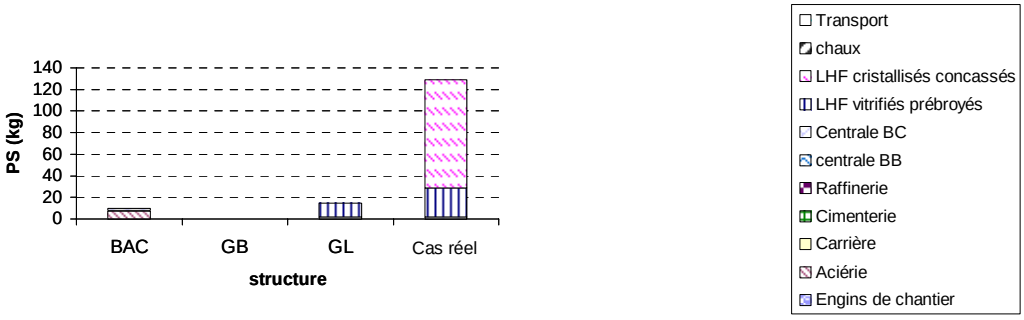


Figure 3 - 36. Emissions de particules solides (ramenée à 1 km et à un sens de circulation pendant 30 ans) - Hypothèse 2 : 20% des flux de l'aciérie sont attribués aux laitiers

Les émissions de particules solides sont principalement dues au procédé aciérie, et on les retrouve majoritairement pour les structures BAC, GL et cas réel.

3.2.2. Emissions dans le compartiment eau

- *Emissions de phénol*

La *Figure 3 - 37* présente les émissions de phénol.

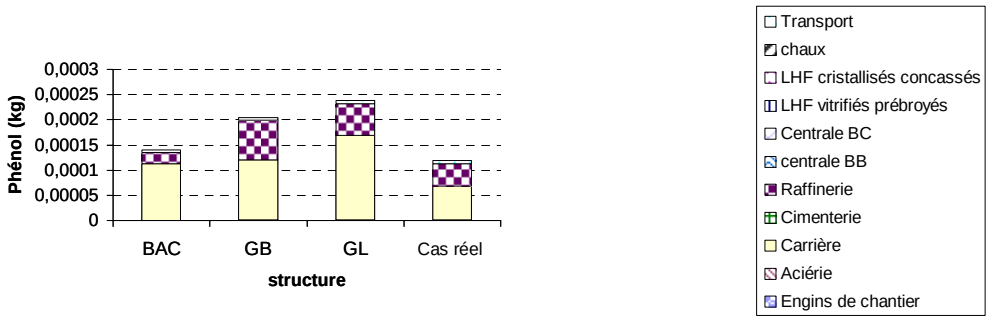


Figure 3 - 37. Emission de phénol (ramenée à 1 km et à un sens de circulation pendant 30 ans) - Hypothèse 2 : 20% des flux de l'aciérie sont attribués aux laitiers

Le phénol est principalement émis par les procédés carrière, raffinerie, et centrale BC. On le retrouve donc de façon quasi équivalente pour toutes les structures.

- *Indicateurs d'état des effluents aqueux : DCO (aq), N-Tot (aq)*

La *Figure 3 - 38* présente les indicateurs d'état des effluents aqueux

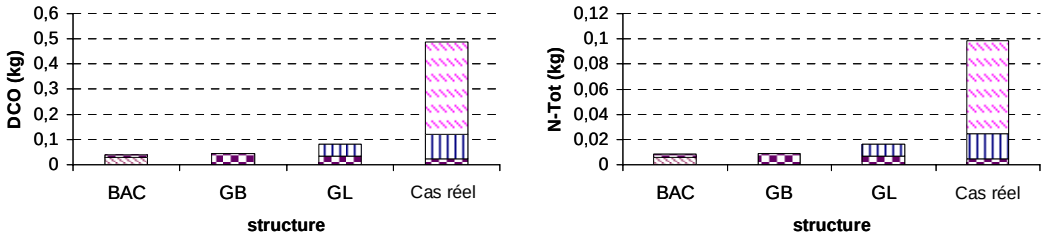


Figure 3 - 38. Indicateurs d'état des effluents aqueux (ramenée à 1 km et à un sens de circulation pendant 30 ans) - Hypothèse 2 : 20% des flux de l'aciérie sont attribués aux laitiers

Le haut fourneau et la raffinerie sont les procédés les plus impliqués dans le rejet d'eaux riches en composés organiques et azotés. La structure BAC est donc la moins émettrice.

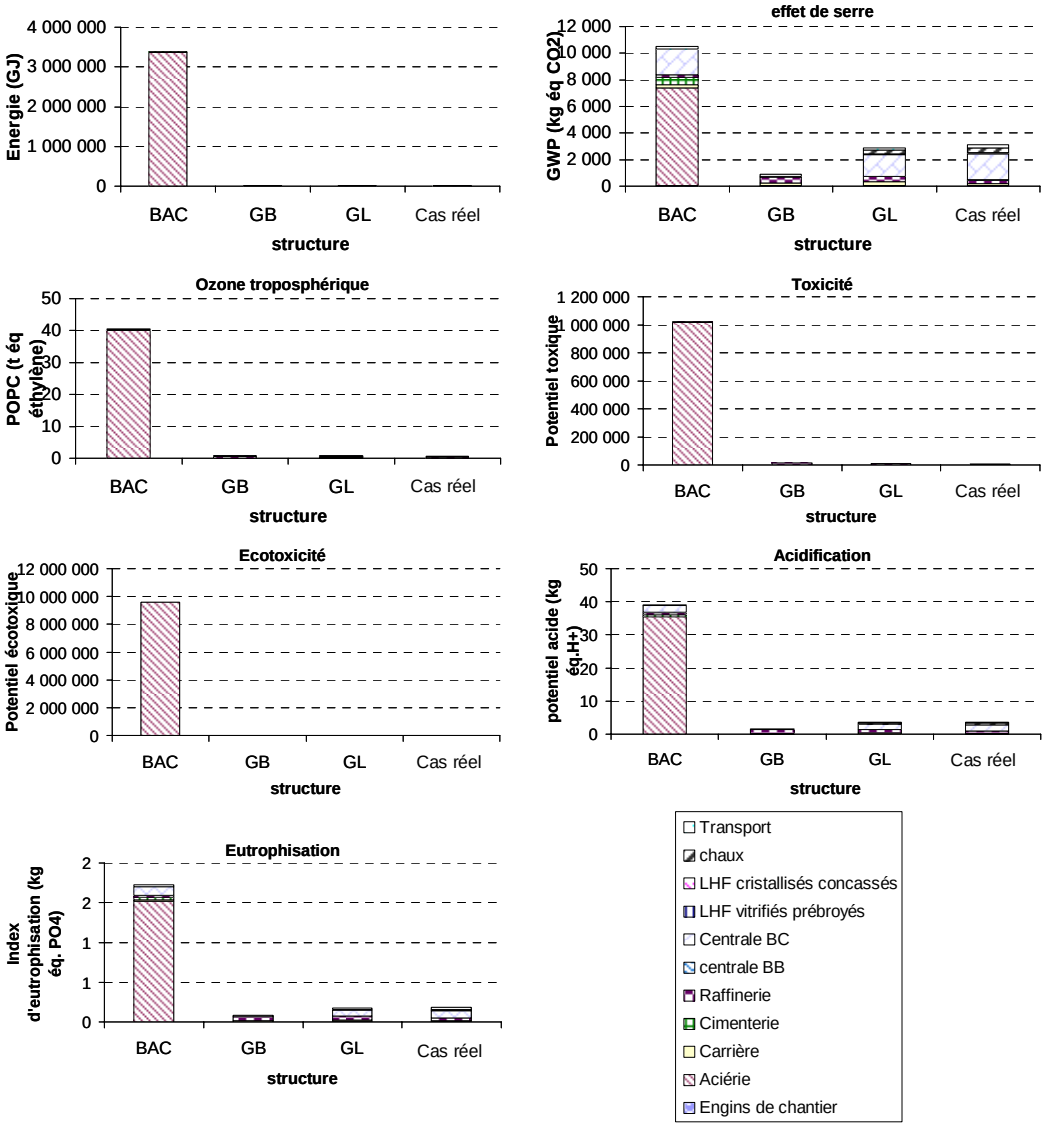
3.3. Résultats d'indicateurs d'impacts

Les résultats d'indicateurs sont présentés avec deux hypothèses concernant les flux attribués à la production des laitiers :

- une première où les laitiers sont considérés comme des déchets, et où aucun flux de l'aciérie ne leur est attribué,
- une seconde où les laitiers sont considérés comme des co-produits, et où les flux de l'aciérie leur sont attribués proportionnellement au ratio massique des laitiers sur l'acier produit.

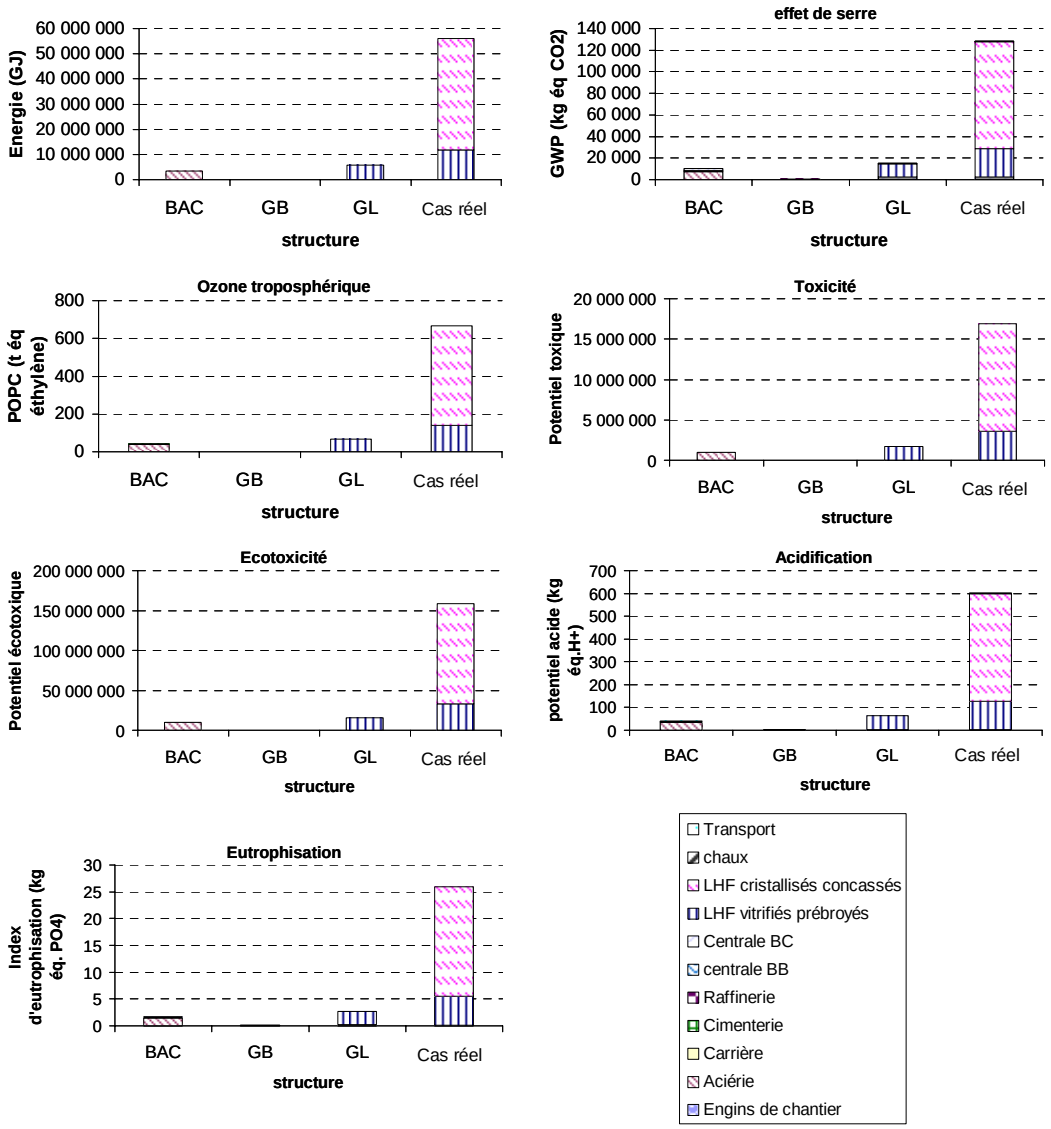
Les résultats des différents indicateurs de catégories d'impact concernant le cas réel sont présentés par sous-système dans les *Tableaux 3 - 24* (sans allocation des flux de l'aciérie à la production des laitiers) et *3 - 25* (avec allocation de 20 % des flux de l'aciérie à la production des laitiers)

Tableau 3 - 24. Indicateurs d'impacts potentiels concernant l'étude de cas réel (ramenée à 1 km et à un sens de circulation pendant 30 ans).
Hypothèse 1 : 0% des flux de l'aciérie sont attribués aux laitiers



On constate pour l'ensemble de ces graphes, que la structure BAC contribue le plus à l'ensemble des indicateurs d'impacts, et que ceci est majoritairement dû au procédé aciérie. Les autres structures donnent des résultats équivalents.

Tableau 3 - 25. Indicateurs d'impacts potentiels concernant l'étude de cas réel (ramenée à 1 km et à un sens de circulation pendant 30 ans).
Hypothèse 2 : 20% des flux de l'aciérie sont attribués aux laitiers



En attribuant 20 % des flux de l'aciérie à la production des laitiers, on constate que les structures contenant du laitier augmentent leurs contributions aux différents impacts et que le cas réel devient le plus impactant sur l'environnement.

CONCLUSION

Ce chapitre a permis d'examiner l'intégration de matériaux alternatifs dans le modèle MRE. La première partie a été consacrée à la méthodologie à adopter afin d'étendre le modèle à ces matériaux. La seconde partie s'est intéressée à la façon dont pouvait être utilisé l'outil par des non spécialistes de l'environnement, dans le but d'améliorer son accessibilité. La troisième partie a permis d'enrichir la base de données environnementale qui est à la base des calculs réalisés par l'outil, ainsi que d'implémenter un panel d'indicateurs classiques de l'ACV. Enfin la dernière partie traite d'un cas réel comparé à des cas théoriques correspondant à une même sollicitation de trafic.

L'implémentation de matériaux alternatifs se fait assez facilement de façon méthodologique. Cependant, la principale difficulté pour l'ajout d'un nouveau matériau réside dans les données disponibles.

D'une part, les données concernant des dimensionnements qui ne sont, par définition, jamais présents dans les catalogues, pour les matériaux alternatifs. A ce titre, les laitiers constituent une exception, car ils sont utilisés depuis de longues années et ont fait l'objet de nombreuses expérimentations. Ceci permet de trouver des structures types, des scénarios d'entretien types issus de bilans des pratiques.

D'autre part, les données environnementales ne sont pas facilement accessibles pour les matériaux alternatifs. Là encore, les laitiers constituent une exception, car ils sont issus des aciéries. Pour ces industries, regroupées en organisation internationale (ISII) les efforts de communication de données environnementales détaillées, et compatibles avec l'ACV datent de plusieurs années.

Ainsi le cas des laitiers est le seul cas de matériau alternatif suffisamment renseigné pour pouvoir faire l'objet d'une étude dans cette thèse.

Cependant, la question de l'allocation des flux de production d'un produit à d'autres co-produits ou déchets (dans notre cas les laitiers), est la question centrale à résoudre. Son influence sur les résultats de l'évaluation est considérable, puisque, par exemple, sous l'hypothèse de 20 % prise dans le chapitre, l'ensemble des flux considérés est multiplié par 10 (comparaison entre solution BAC et 0 % d'affectation aux laitiers d'une part, et solution du cas réel avec 20 % d'affectation d'autre part). Hormis le fait d'avoir une connaissance fine des procédés, le choix du coefficient d'allocation est de fait totalement subjectif :

- considère-t-on des déchets ou des co-produits ?
- doit-on répartir les flux sur une base massique ou autre (de valeur économique par exemple) ?

Ainsi, il apparaît que ce coefficient doit être paramétrable dans l'outil et laissé à la justification de l'utilisateur.

Enfin, une recherche bibliographique considérable, complétée par des résultats expérimentaux du LCPC, a permis d'enrichir la base de données environnementale de l'outil (jeux de données n° 2, 3 et 4), par rapport à la version initiale (Hoang, 2005) qui utilisait le jeu n° 1. Cette démarche a été accompagnée d'une analyse critique, qui montre la forte dispersion des données environnementales. Notamment, l'intégration de nouvelles données concernant le procédé aciérie, a permis d'intégrer au modèle, le procédé de production des laitiers au sein de l'aciérie, dont les consommations et émissions sont loin d'être négligeables. De ce fait, l'exemple traité en partie IV, donne des résultats très différents avec ce nouveau jeu de données, que ce qui aurait été obtenu avec le jeu initial (résultats présentés en annexe du chapitre 3).

Ainsi, un travail sur la qualité des données implémentées dans la base de données environnementale, reste à faire pour obtenir des résultats plus robustes.

CHAPITRE 4.
MODELISATION GLOBALE DE TRONÇONS DE VOIRIE – DEVELOPPEMENT ET APPLICATION DE L'OUTIL MODULE DE VOIRIE URBAINE

INTRODUCTION

Bien que le domaine urbain représente 75 % (en surface) du patrimoine total national et une forte proportion des investissements réalisés en France en matière de construction ou de rénovation de chaussées, les méthodes de dimensionnement ne sont pas rationalisées et peuvent différer fortement d'une commune à l'autre. Les chaussées urbaines se distinguent des chaussées interurbaines par :

- des emprises limitées avec des profils particuliers ;
- des canalisations en sous-sol qui doivent être protégées et imposent des contraintes d'épaisseur ;
- des trottoirs et caniveaux, des sorties de riverains qui imposent des contraintes de profil en long ;
- une circulation souvent intense induisant des efforts dynamiques importants (freinage, manœuvre, trafic canalisé).

Le développement de Modules Voiries Urbaines suit la même démarche que celle de l'O-MRE en se basant sur les outils de dimensionnement de chaussées urbaines. Struct-Urb v. 2.0 est l'outil de dimensionnement urbain de référence. Les hypothèses générales de dimensionnement, sont celles de la méthode française et des normes en vigueur. Pour tenir compte, des conditions particulières de réalisation des chantiers urbains telles que difficultés de compactage, respects des épaisseurs (présence de bordures). La série de calculs est faite avec des valeurs de paramètres mécaniques, réduites de 10 à 20 % proposés dans Struct-Urb.

Ce chapitre s'appuie sur les acquis des chapitres précédents et notamment en ce qui concerne le jeu de données environnementales réactualisées à retenir et le panel d'indicateurs d'impacts environnementaux. La méthodologie module routier a été adaptée au territoire urbain (voirie) en y intégrant ses spécificités, donnant naissance à un logiciel évaluant l'Inventaire de Cycle de Vie puis des impacts potentiels sur l'environnement pour tout type de structures françaises de voirie dimensionnées à l'aide de Struct-Urb v. 2.0. Les spécificités géométriques prises en compte sont : diversité des géométries et matériaux associés, pluralité des trafics, et diversités des phases de service des voiries. La partie I présente les principes retenus pour le développement de ce nouvel outil en conservant les acquis précédents avec le MRE, les spécificités urbaines sont prises en compte. Dans la partie II, les différents cas types implémentés dans la bibliothèque sont présentés avec des résultats associés. Dans la troisième partie, une étude de cas permet d'appliquer le MVU à une configuration réelle.

PARTIE I : DEVELOPPEMENT D'UN MODULE DE VOIRIE URBAIN AVEC MATERIAUX NEUFS

1. PRINCIPES DE DEVELOPPEMENT DU MVU - PRISE EN COMPTE DES SPECIFICITES URBAINES

1.1. Cahier des charges de l'outil O-MVU

Les spécifications du cahier des charges de l'outil développé pour évaluer les ouvrages urbains sont détaillées dans cette partie et schématisées sur la *Figure 4 - 1*. On a considéré des tronçons routiers types de petite longueur, appelés tronçons routiers élémentaires, dans le cadre de la définition des principes et hypothèses de notre modèle. Différentes étapes sont suivies. La première étape consiste à effectuer un choix d'aménagement, c'est à dire à définir une emprise constituée de plusieurs bandes : trottoirs, pistes cyclables, voies de stationnement, voies de circulation et couloirs de bus. Les largeurs de bandes peuvent être définies à cette étape. La seconde étape consiste à identifier le type de structure à mettre en

place par type de bande (souple, pavée, bitumineuse, semi-rigide ou rigide). Ensuite, il s'agit de définir d'une part les matériaux utilisés (procédés, sites de production, mode de transport) et d'autre part la technique de mise en œuvre (engins TP).
La troisième étape consiste à définir le système environnemental. Ceci implique une collecte de données dédiées.
Les flux environnementaux dus aux travaux des engins, aux transports et aux procédés de production sont ensuite calculés dans une quatrième étape. A partir des flux environnementaux, on passe au calcul d'impacts en utilisant le jeu d'indicateurs du chapitre 3.

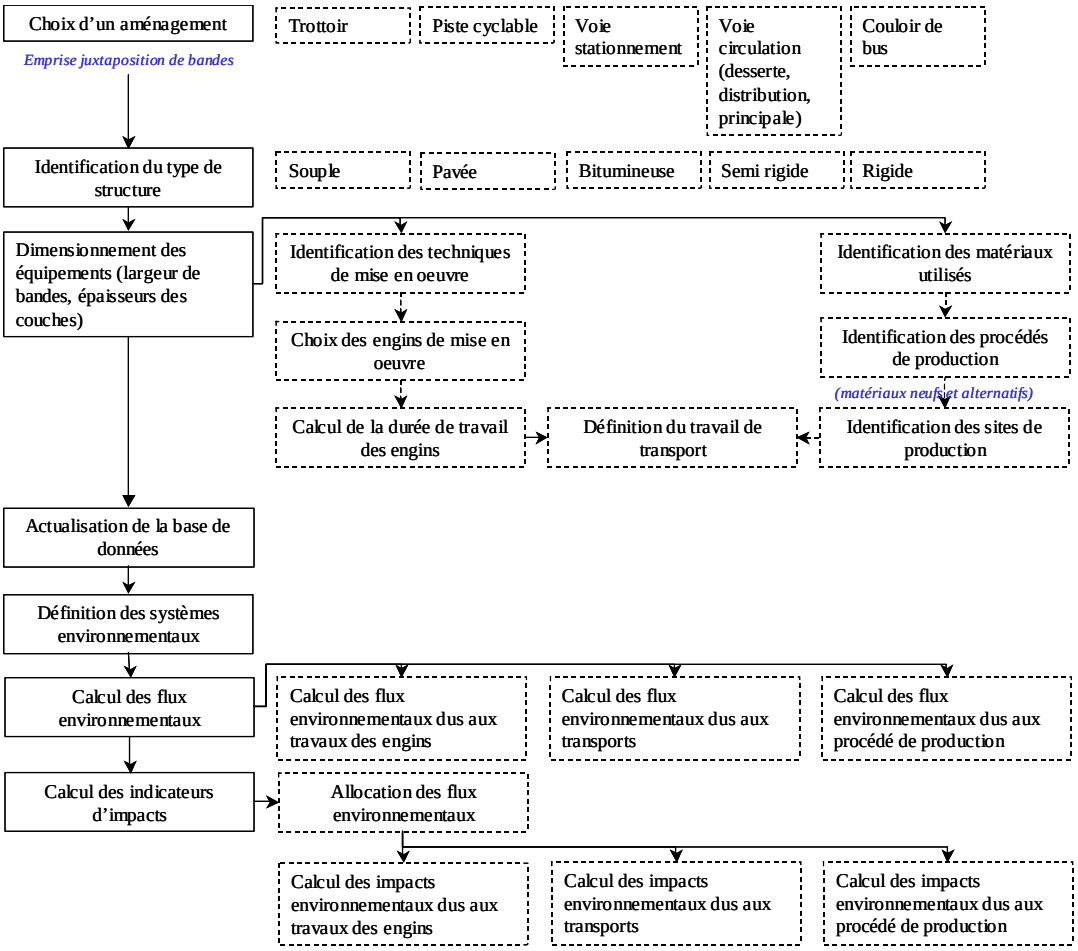


Figure 4 - 1. Schéma général des spécificités du Module de Voirie Urbaine

1.2. Définition de cas type de profil en travers

1.2.1. Découpage longitudinal des voies

Le profil en travers qui compose l'emprise comprend : la chaussée, les trottoirs, les terre-pleins (centraux et latéraux), les voies latérales de desserte, les couloirs de bus, les pistes cyclables, les bandes de stationnement, les plantations, les arbres (*Figure 4 - 2*). Le dimensionnement géométrique doit répondre à une répartition de l'espace par des solutions adaptées à chaque site.

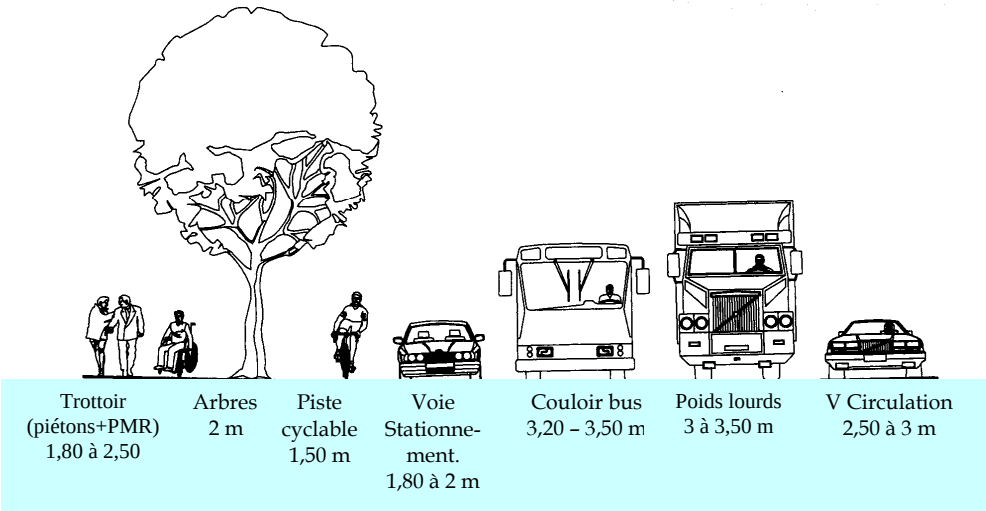


Figure 4 - 2. Les besoins fonctionnels des usagers (Costilles et al., 1999)

Le modèle de chaussée urbaine est donc composé de voies de circulation élémentaires définies à partir d'un trafic et d'un type de voie. La largeur des voies élémentaires et leur nombre sont paramétrables. Mais les calculs sont effectués pour une bande donnée.

1.2.2. Paramétrage de la largeur des voies

Les types de voies urbaines définies par l'ensemble des références dédiées (MELAT/CETUR/AIVF, 1988), (Balay et al., 2004), (Costilles et al., 1999) ont été pris en considération comme suit :

Voies à fort trafic, pour des raisons de quantité de trafic, la largeur des voies de circulation nécessaire est de 3 à 3,50 m, cette valeur peut être considérée comme valeur moyenne à retenir dans le modèle.

Voies de distribution, qui assurent des déplacements internes aux quartiers. Leur largeur peut aller jusqu'à 3 m (valeur moyenne retenue dans le modèle).

Voies de desserte ou **voies résidentielles**, qui permettent l'accès aux habitations et aux diverses activités urbaines à vitesse réduite. Pour une voie à un sens de circulation, empruntée principalement par des voitures, une largeur de 2,80 m suffit ; cette largeur peut être portée à 3,50 m si des véhicules plus larges doivent y passer régulièrement.

S'ajoutent à ces catégories de voie les **couloirs de bus** qui nécessitent une largeur de 3,5 m en moyenne (*Figure 4 - 2*), les **voies de stationnement** (2 m) et les **trottoirs** (2,5 m).

D'autre part, on utilise différentes largeurs selon le type de circulation, comme précisé ci-après :

Si la chaussée est à sens unique :

- et comporte une seule voie, la largeur minimale est de 3,20 m, voire 4,50 m
- et comporte deux voies, la largeur préconisée est de 5,50 m avec deux files de 2,75 m

Si la chaussée est à double sens :

- avec une seule file par sens, elle aura généralement 3 m (empruntée par des PL ou des bus), qui peuvent être réduits à 2,75 m si le taux de PL est faible ;
- et qu'un des sens comporte deux files, la largeur des deux files peut être limitée à 5,50 m.

En zone 30, la largeur des chaussées à double sens peut descendre jusqu'à 4 m.

1.3. Principes d'intégration de structures de chaussées urbaines

Struct-Urb est considéré comme l'outil de dimensionnement urbain de référence, car ses hypothèses générales de dimensionnement, sont celles de la méthode française et des normes en vigueur. Le dimensionnement repose sur le choix :
- d'une *durée de service* qui est fonction de la stratégie d'investissement du Maître d'Ouvrage ;
- d'une *probabilité de rupture*;
- du *trafic* attendu sur la *durée de service* de l'ouvrage ;
- de l'*agressivité du trafic* en milieu urbain ;
- et de la *portance du sol* support.

Struct-Urb propose la vérification de la chaussée au gel, selon la méthode simplifiée (SETRA/LCPC, 1998).

Pour tenir compte des conditions particulières de réalisation des chantiers urbains (difficultés de compactage, respects des épaisseurs, présence de bordures…), Struct-Urb propose une série de calcul avec des valeurs de modules d'Young, de sigma 6 et d'epsilon 6 (contrainte et déformation respectives admissibles conventionnelle de la méthode de dimensionnement) réduites de 10 à 20 %. Les résultats de calcul donnent : une épaisseur de chaussée pour des conditions standard (conformes aux normes) de mise en ouvre (Q1) et une épaisseur pour des conditions difficiles ou dégradées (Q2). Le projeteur peut ainsi choisir entre les deux solutions, étant bien entendu que le marché devra toujours exiger des qualités conformes aux normes.
Sauf exceptions (enduits, structures béton, pavés, dalles), les épaisseurs de chaussées sont calculées avec une hypothèse de couche de surface en enrobés.

1.3.1. Classe de trafic et durée de service

Les trafics MJA mini et maxi (par voie et par sens) ainsi que le risque de calcul correspondant à chaque type d'aménagement et de voie sont indiqués dans le *Tableau 4 - 1*. En l'absence de comptage de la circulation, on estime le nombre de PL à 5% du trafic total, uniquement pour les voies de distribution et les voies principales.

Tableau 4 - 1. Risque de calcul et trafics exprimés en nombre de PL par jour et par sens de circulation.

Type de voies modélisées	Risque (%)	Minimum logiciel	Minimum « normal »	Valeur proposée en l'absence de comptages	Maximum « normal »	Maximum logiciel
Desserte	25	1	1	12	25	30
Distribution	25	20	25	100	150	170
Principale	5	120	150	500	750	1000
Bus	5	1	1		750	1000

La durée de service (ou durée de dimensionnement initiale) est un choix d'ordre stratégique du Maître d'Ouvrage. L'État choisit 30 ans pour son réseau structurant et 20 ans pour son réseau non structurant. En zone urbaine, la durée de service est généralement entre 10 et 30 ans. La valeur par défaut (paramétrable) est 20 ans. L'utilisateur peut choisir entre 5 et 50 ans dans l'outil O-MVU.

1.3.2. Plate forme - support de chaussée

- *Cas d'une chaussée neuve*

Le calcul de la plate-forme ne fait pas partie du modèle, mais la connaissance de sa classe conditionne la structure de chaussée et donc le bilan environnemental associé. La portance désigne la qualité retenue pour la plate-forme de la chaussée : cette classe de plate-forme est

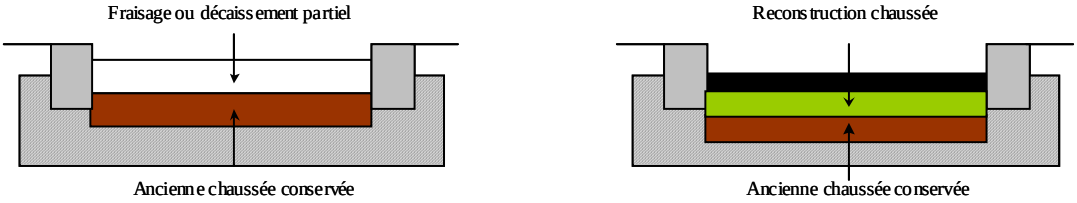
déterminée par la classe de portance de l'arase des terrassements augmentée de la couche de forme si celle-ci est nécessaire. L'amélioration de la portance par une couche de forme appropriée permet de réaliser une réduction de l'épaisseur de la chaussée.

- *Cas de réhabilitation, renforcement*

Une chaussée existante est construite sur un support consolidé par le temps, qui sauf en présence de graves défauts de drainage, présente une portance suffisante, augmentée par l'apport de la partie restante de l'ancienne chaussée. Pour déterminer les épaisseurs d'assise à rapporter après fraisage pour reconstruire cette chaussée, et en l'absence de toute autre information, on retiendra une classe de portance PF1. Si l'on dispose de mesures de déflexion sur chaussée avant travaux, la classe de portance à retenir après fraisage sera déterminée à partir de la déflexion (valeur caractéristique) et de l'épaisseur de chaussée en place. Deux cas peuvent alors se présenter : l'épaisseur à fraiser est inférieure d'au moins 10 cm à l'épaisseur de chaussée en place ou l'épaisseur à fraiser est proche ou supérieure à l'épaisseur de chaussée en place.

Fraisage – Décaissement partiel

Le fraisage consiste (*Figure 4 - 3*) à enlever par l'action d'un tambour rotatif muni de dents une épaisseur régulière des couches supérieures d'une chaussée. Le matériel de fraisage actuel permet de travailler jusqu'à 20 cm de profondeur dans les matériaux liés : béton bitumineux, grave bitume, matériaux traités aux liants hydrauliques, béton de ciment. En revanche, le fraisage ne peut être utilisé dans de bonnes conditions dans des graves non traitées.
- Le décaissement partiel consiste à enlever, par d'autres moyens que le fraisage, une partie de la structure de l'ancienne chaussée en matériaux non liés. On conservera au minimum 10 cm de la structure.

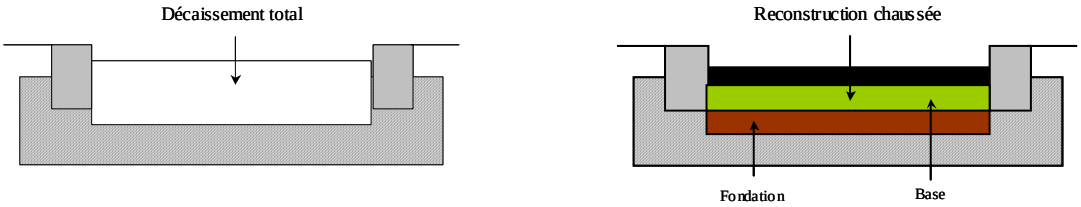


a) Fraisage ou décaissement partiel *b) Reconstruction après fraisage*

Figure 4 - 3. Cas de fraisage ou décaissement partiel

Décaissement total

Le décaissement total (*Figure 4 - 4*) atteint le sol-support ou laisse moins de 10 cm du corps de l'ancienne chaussée.



a) Décaissement total *b) Reconstruction après décaissement total*

Figure 4 - 4. Cas de réhabilitation par décaissement total

1.3.3. Modélisation de la couche de surface

La couche de surface à reconstruire peut être composée d'un enduit superficiel (ES), de dalles, de pavés, d'enrobés bitumineux. Dans ce dernier cas, la couche de surface en enrobés bitumineux peut être réalisée en une ou plusieurs couches (roulement + liaison) en fonction de

l'épaisseur préconisée. Les différentes couches sont liées entre elles et à la couche de base par une ou plusieurs couches d'accrochage adaptées aux matériaux. Les matériaux proposés dans Struct-Urb ont chacun leurs avantages, inconvénients et limites d'emploi. Les matériaux disponibles sont :

- BBSG ;
- BBME : à éviter sur les structures hydrauliques ou non traitées,
- BBDr : réduit les nuisances phoniques ; à éviter dans les zones de cisaillement ou de freinage, difficultés d'entretien par rapport au colmatage en ville,
- BBTM : peut réduire les nuisances phoniques.

Néanmoins, les choix proposés par Struct-Urb sont des solutions de base. De nombreuses variantes peuvent être imaginées, soit en dissociant les fonctions « liaison » et « roulement », soit en opérant des modifications mineures sur l'épaisseur de la couche de base bitumineuse, de manière à retrouver l'équivalence structurelle de la solution préconisée.

Le *Tableau 4 - 2* résume les différentes structures retenues dans le modèle MVU et leur domaine d'utilisation. Les enrobés pour couche de surface présentés dans ce tableau correspondent aux matériaux, cités ci-dessus, disponibles dans la bibliothèque de Struct-Urb.

Tableau 4 - 2. Bibliothèque MVU implémentée à partir de Struct-Urb v 2.0

Type d'aménagement			**Section courante**						
Type de voie	**code**		***Trottoir***	***Piste cyclable***	***Parking, voie de***	***Desserte***	***Distribution***	***Principale***	***Bus***
Trottoir	T1	Enrobé /GNT	x						
Chaussée Souple	S1	Enduit Superficiel / Grave Non Traitée				x			
	S2	Enrobés / Grave Non Traitée		x	x	x	x		
Chaussée Bitumineuse	Bi1	Enrobés / Grave Bitume		x	x	x	x	x	x
	Bi2	Enrobés / Enrobés à Module Élevé					x	x	x
	Bi3	Enrobés / Grave Bitume / Grave Non Traitée					x	x	x
Chaussée Béton	Bé1	Béton de Ciment cat. 5 / Grave Non Traités		x	x	x	x	x	x
	Bé2	Béton de Ciment cat. 5 / Béton de Ciment cat. 3						x	x
Chaussée Semi-rigide	SM1	Enduit / Grave Ciment				x			
	SM2	Enduit / Sable Ciment				x			
	SM3	Enrobés / Grave Ciment					x	x	x
	SM4	Enrobés / Sable Ciment		x	x	x	x		
	SM5	Enrobés / Grave Laitier					x	x	x
	SM6	Enrobés / Grave Ciment / Sable Ciment						x	x
Chaussée Mixte	M1	Enrobés / Grave Bitume / Grave Ciment						x	x
	M2	Enrobés / Grave Bitume / Sable Ciment						x	x
	M3	Enrobés / Grave Bitume / Grave Laitier						x	x
Chaussée Pavée	P1	Pavés / Grave Non Traitée		x	x	x			

Différents types de structures de chaussée ont été pris en compte pour développer le modèle urbain (chaussées souples, pavées ou dallées, bitumineuses, traitées aux liants hydrauliques, à

structure mixte et en béton). Les différents types de solutions envisageables, d'après Struct-Urb v 2.0 (*Tableau 4 - 2*) ont été retenus. La *Figure 4 - 5* illustre la page de l'outil qui a été développé pour l'évaluation environnementale des voiries urbaines à partir des considérations précédentes.

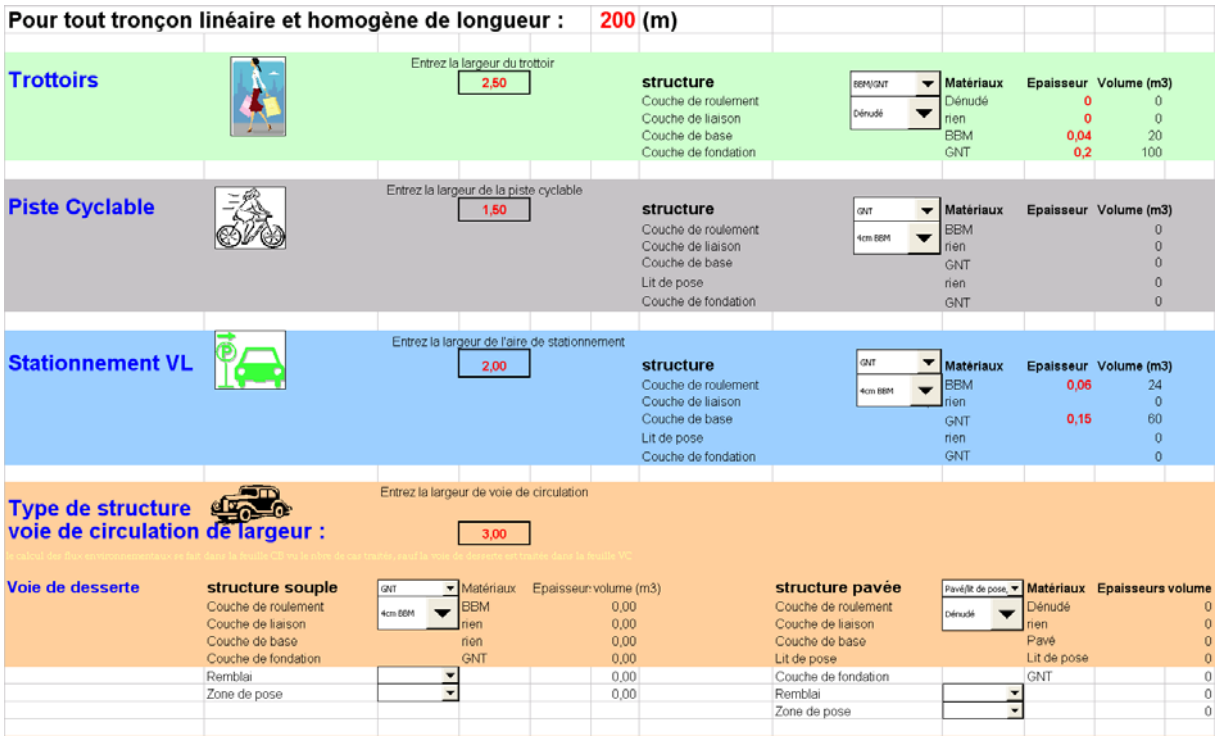


Figure 4 - 5. Outil O-MVU page de sélection de structures à évaluer pour les différentes bandes programmées.

2. MODELISATION DE TRAVAUX URBAINS

2.1. Modèle de mise en œuvre

En regardant les types de structures intégrées au modèle, on considère que pour un même travail, les types d'engins utilisés en interurbain sont les mêmes qu'en urbain. Dans le modèle proposé, l'effort est plus particulièrement porté sur les paramètres utilisés pour déterminer la consommation d'énergie et les émissions polluantes des engins des travaux publics.

- Mise en œuvre de la grave non traitée

La mise en oeuvre de la Grave Non Traitée 0/31,5 pour couche de réglage, fondation de chaussée, trottoir et voie de stationnement, est réalisée conformément aux prescriptions de l'article 16 du fascicule 25 du C.C.T.G. (MELTT/ONR, 1996), qui définit notamment les conditions de répandage, de réglage et de compactage.

Les graves non-traitées (GNT) sont supposées dans le modèle être répandues avec un gravillonneur porté par un semi-remorque ACMAR 900 PC (Commission du Matériel de la FNTP, 2000). La largeur de répandage (de base) de cet engin est de 3,1 m et sa vitesse de répandage est de 5 km/h (NFP 98-739, 1992). La niveleuse Caterpillar 14H est ensuite réutilisée pour régler la surface de la couche répandue. Enfin, le compacteur Dynapac CC 432 de classe VT2 est utilisé pour compacter la GNT. La modalité de compactage est présentée dans le *Tableau 4 - 3*. Les principales équations qui régissent la modélisation des travaux et

desquelles découlent l'ensemble des évaluations environnementales (consommations énergétiques et émissions de polluants) sont rappelées en annexe.

Tableau 4 - 3. Modalité de compactage des GNT (Comité français pour les techniques routières, 1995)

e	V	N/n	Q/L
(m)	(km/h)	(sans unité)	(m^2)
0,3	3	2	46

- Bordures et caniveaux de trottoir

Les éléments de bordures et de caniveaux sont posés sur un lit de béton dosé à 250 kg de ciment par m^3, d'une épaisseur minimum de 0,10 m. Ce lit comporte un épaulement de 0,10 m de largeur de part et d'autre des bordures et caniveaux. Les bordures reçoivent un calage en béton de même nature sur leur face intérieure. Ce calage est continu tout au long de la bordure. Les joints au mortier ont 1 centimètre d'épaisseur. Ils sont garnis au mortier de ciment dosé à 600 kg/m^3 et rejointoyés avec du ciment pur au moyen de truelle et du fer à joint. Aucun engin n'est prévu dans le modèle à cet effet, étant donné que la plupart des tâches sont effectuées manuellement.
L'enduit mono/bicouche sur trottoir : le répandage du liant et des granulats doit être homogène et est effectué manuellement. Le compactage des gravillons est exécuté par cylindrage. Avant prise du liant un léger compactage vibrant peut être effectué sur décision du maître d'œuvre. Pour un enrobé bitumineux mince, le compacteur CC232 est choisi dans le modèle MVU.

- Couche de roulement et assise en enrobés bitumineux

L'ensemble des engins nécessaires à cette tâche sont présentés dans le *Tableau 4 - 4.*

Tableau 4 - 4. Engins utilisés pour la mise en œuvre des couches en BB.

	Type d'engins	**Paramètres utilisés dans le modèle**	
		Catégories de paramètres	**Valeur de paramètres**
	Répandeuse ERMONT PI42	Largeur du travail	4,2 m
		Vitesse du travail	4 km/h
		Véhicule porté (assimilé)	Semi-remorque
		Puissance du moteur	53 kW
	Finisseur Dynapac F16 C, Moteur équipé Deutz BF6M1012	Largeur du travail	8,5 m
		Vitesse du travail	0,27 km/h
		Puissance du moteur	79 kW
	Compacteur VT2, Dynapac CC432, moteur équipé Cummins 4BTA3.9	Largeur du travail	1,68 m
		Vitesse du travail et nombre de passes	
		Puissance du moteur	89 kW
	Compacteur Dynapac CC232, classe VT0, moteur équipé BF4L1011F	Largeur du travail	1,45 m
		Vitesse du travail et nombre de passes	3 km/h
		Puissance du moteur	53 kW

Répandage : pour chaque couche, il faut au préalable répandre une couche d'accrochage en bitume de 0,25 kg/m^2. L'engin utilisé pour ce travail est la répandeuse ERMONT PI42 (*Tableau 4 - 4*). Le béton bitumineux est ensuite répandu par un finisseur (*Tableau 4 - 4*). Le matériel est choisi conformément aux règles (Gallenne et al., 2002) et possède les paramètres suivants. Sa table est de type dameur vibreur (DV), sa vitesse impose un débit de chantier

d'environ 490 t/h. Avec ce débit, le tracteur du finisseur est de type tracteur sur chenilles (T2C) de puissance 75 à 120 kW, le finisseur Dynapac F141C a été choisi car des données d'émissions unitaires nous sont fournies par le constructeur. Sa largeur de travail maximale est de 8,5 m. La vitesse moyenne de répandage est de 270 m/h. Son moteur est de type Deutz BF6M1012 dont la puissance du moteur est de 79 kW (Commission du Matériel de la FNTP, 2000).

Compactage : il faut compacter le béton bitumineux répandu. Les solutions de compactage et les classes de compacteurs utilisés pour compacter ce type de matériaux sont basées sur les règles proposées par (Gallenne et al., 2001). Deux compacteurs VT0 et VT2 ont été choisis car avec ces deux types de compacteurs, on peut effectuer tous les travaux de compactage pour les différentes couches présentées. Pour la classe VT0, le compacteur C232 a été choisi. Pour la classe VT2, le compacteur Dynapac CC432 est utilisé dans le MVU afin de profiter les données environnementales unitaires fournies par le constructeur. Sa largeur de travail est de 1,68 m. Il possède un moteur Cummins 4BTA3.9 de puissance de 89 kW (Commission du Matériel de la FNTP, 2000). Le coefficient de rendement des compacteurs est de 0,6 (LCPC, 2003). L'atelier de compactage de ces deux compacteurs est résumé dans le *Tableau 4 - 5*.

Tableau 4 - 5. Solutions de compactages par les compacteurs CC232 et CC432 (LCPC, 2003).

Matériaux	GB3	BBM	BBSG	BBMa	BBTM
Couches	assise	liaison	liaison	roulement	roulement
Compacteur	CC432 (Classe VT2)	CC232 (Classe VT0)	CC432 (Classe VT2)	CC232 (Classe VT0)	CC232 (Classe VT0)
Vitesse (m/h)	3000	4000	4000	4000	4000
Nombre de passes	25	7	5	7	3

- Assise en béton armé continu

L'emploi de machines à coffrages glissants (matériel de type C de la norme NF P 98-170) est recommandé toutes les fois où la géométrie, la facilité d'accès et l'importance des travaux le permettent. Dans le cas contraire, on pourra utiliser avec beaucoup de précautions un vibro-finisseur ou une règle vibrante avec emploi préalable d'un pervibrateur.

Les couches en BAC ou BC de chaussée en béton possèdent une largeur moyenne de 3 – 3,5 m et une épaisseur de 15 cm à 19 cm. Pour répandre ces couches, la machine à coffrage glissant GOMACO 2800 (*Tableau 4 - 6*) a été choisie dans le modèle. Sa largeur de travail peut atteindre 8 m. Elle possède un moteur de puissance 249,9 kW (Gomaco, 2004). La vitesse de répandage est de 2 km/h (LCPC/SETRA, 1997).

Tableau 4 - 6. Engin utilisé pour la mise en œuvre de la couche en béton de ciment.

Type d'engins		**Paramètres utilisés dans le modèle**	
		Catégories de paramètres	**Valeur de paramètres**
	Machine à coffrage glissant	Largeur du travail	8 m
		Vitesse du travail	2 km/h
		Puissance du moteur	249,9 kW

- Assise en graves traitées aux liants hydrauliques

La technique de mise en œuvre des graves traitées aux liants hydraulique est détaillée dans le chapitre 3 (*Travaux de construction initiale de la solution alternative*).

- Mise en oeuvre des pavés en béton ou en pierre naturelle

Les chaussées à structure pavée sont constituées de pavés en béton ou en pierre naturelle posés sur une couche de sable ou de sable stabilisé au ciment appelé lit de pose. Ces deux couches sont placées sur une fondation généralement constituée d'une couche de matériaux traités au liant hydraulique ou d'une couche de béton, pour les chaussées à trafic élevé. Le lit de pose est nivelé à la règle. La pose des pavés s'effectue à l'avancement, le poseur étant placé sur le travail déjà réalisé. L'épaisseur du lit de pose après compactage des pavés est de 3 cm ± 1 cm. Après la pose des pavés, leur affermissement est effectué avec un outil dont la masse est en rapport avec celle du pavé (marteau de paveur, massette...). Dans la même journée, les joints sont garnis à refus avec le même matériau que celui du lit de pose puis fichés à l'eau. Après l'opération de fichage, les pavés sont battus ou cylindrés jusqu'à obtention de la cote et du profil définitif. Un dressage ou un battage supplémentaire est pratiqué sur les pavés qui s'écartent du profil définitif. Les opérations de fichage, de dressage et de battage étant effectuées manuellement, aucun engin n'a été programmé dans le MVU. Cette phase est donc également négligée dans l'immédiat.

2.2. Modélisation des travaux au cours de la vie en service des ouvrages

Selon la stratégie de dimensionnement, selon l'évolution de l'usage de la voie, les chaussées s'usent plus ou moins vite : dégradations structurelles (affaissements dans les chaussées souples, affaissement au droit des tranchées, dégradations superficielles (pelade de revêtement sur pavés). L'entretien des voies urbaines doit faire l'objet de programme prenant en compte la coordination des travaux d'entretien des VRD qui concernent plus particulièrement les problèmes d'entretien des réseaux souterrains comme gaz, EDF et eau (*Figure 4 - 6*).

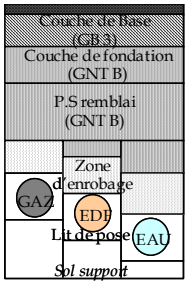


Figure 4 - 6.Coupe transversale de voirie sur réseaux

En ce qui concerne l'entretien structurel de la couche de roulement, dans le cadre du MVU, nous avons considéré le cas d'un fraisage partiel (*Figure 4 - 3*). Avant de répandre une nouvelle couche, l'ancienne chaussée lorsqu'elle est en béton bitumineux est fraisée. La machine Dynapac PL2000S (*Tableau 4 - 7*) a été choisie afin d'utiliser ses données d'émissions fournies par les constructeurs. Sa largeur de travail est de 2,1 m. Elle possède un moteur Cummins QSX15 de puissance 447 kW (Dynapac, 2004) ; la vitesse de fraisage est de 186 m/h. La largeur de la voie lente est de 3,5 m. Pour assurer l'accrochage de la nouvelle couche, il est nécessaire d'effectuer deux passes de balayage. Cette phase est réalisée par une balayeuse Eurovoirie TAZ II C (*Tableau 4 - 7*) dont la largeur de balayage (de base) est de 2,2 m (Commission du Matériel de la FNTP, 2000). La vitesse moyenne de travail est de 10 km/h (Commission du Matériel de la FNTP, 2000).

Tableau 4 - 7. Engins utilisés pour le fraisage des anciennes chaussées.

	Type d'engins	**Paramètres utilisés dans le modèle**	
		Catégories de paramètres	**Valeur de paramètres**
	Fraiseuse Dynapac PL2000S, moteur équipé Cummins QSX15	Largeur du travail	2,1 m
		Vitesse du travail	0,186 km/h
		Puissance du moteur	447 kW
	Balayeuse Eurovoirie TAZ II C, moteur équipé Volvo D12A470	Largeur du travail	2,2 m
		Vitesse du travail	10 km/h
		Puissance du moteur	346 kW

PARTIE II : ETUDE PARAMETRIQUE DE CAS-TYPES

1. DESCRIPTION DES CAS-TYPES TRAITES

L'ensemble des tronçons types modélisés dans cette partie a une longueur de 200 m. Seuls les matériaux conventionnels classiques ont été pris en compte dans un premier temps. Ces cas sont considérés comme des constructions neuves, la démolition de l'existant n'est donc pas intégrée aux calculs.

1.1. Cas de référence de voirie urbaine avec voie principale à fort trafic – matériaux classiques

La configuration classique représentée en *Figure 4 - 7* a été prise comme référence. Par la suite on fait varier bande par bande soit la structure soit les matériaux par rapport à cette configuration de référence pour évaluer l'effet produit au niveau environnemental.

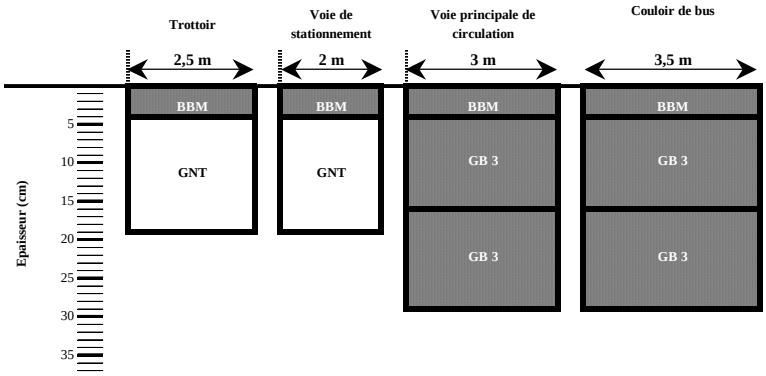


Figure 4 - 7. Configuration d'emprise de référence code ER

1.2. Paramétrage d'une voie principale de circulation

Trois types de structures classiques rencontrées et modélisées sont présentés en *Figure 4 - 8*. Les épaisseurs sont adaptées selon les matériaux. Les éléments retenus pour le dimensionnement sont précisés dans le tableau (*Tableau 4 - 1*) pour une durée de service de 20 ans. Après cette durée, la chaussée subit une rénovation après décaissement partiel, selon les modalités présentées dans la (*Figure 4 - 3*).

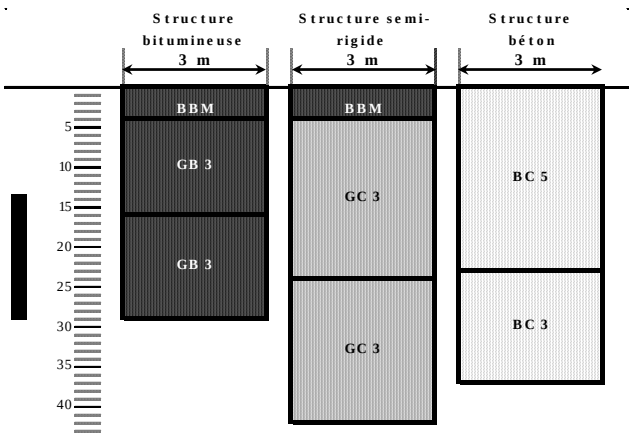


Figure 4 - 8. Configuration de Voie Principale de Circulation code VPC

1.3. Paramétrage d'un couloir de bus

Comme pour les voies de circulation, trois types de structures de couloir de bus sont modélisés et présentés en *Figure 4 - 9*. Les épaisseurs sont adaptées selon les matériaux. Les éléments retenus pour le dimensionnement sont précisés dans le tableau *(Tableau 4 - 1*) pour une durée de service de 20 ans. Après cette durée, la chaussée subit une rénovation après décaissement partiel, selon les modalités présentées dans la (*Figure 4 - 3*).

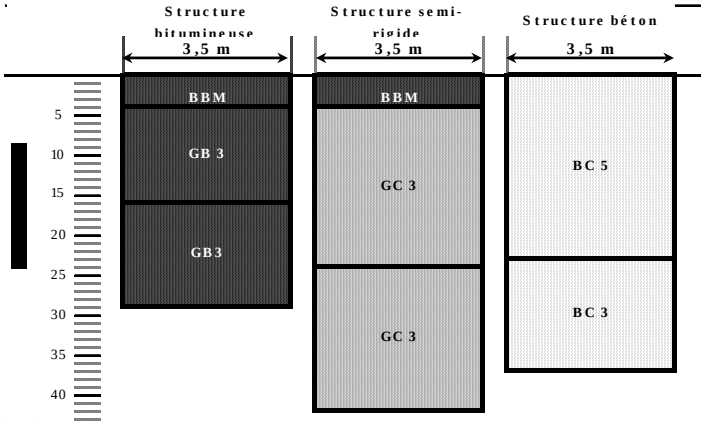


Figure 4 - 9.Configuration de Couloir de Bus code CB

1.4. Paramétrage par fonctionnalité de voie de circulation

Deux autres types de voiries urbaines d'usage courant sont répertoriés et modélisés de par leur fonctionnalité (hormis les couloirs de bus). Ils sont présentés dans la *Figure 4 - 10*. Il s'agit des voies de desserte et de distribution. Après cette durée, la chaussée subit une rénovation après décaissement partiel, selon les modalités présentées dans la (*Figure 4 - 3*).

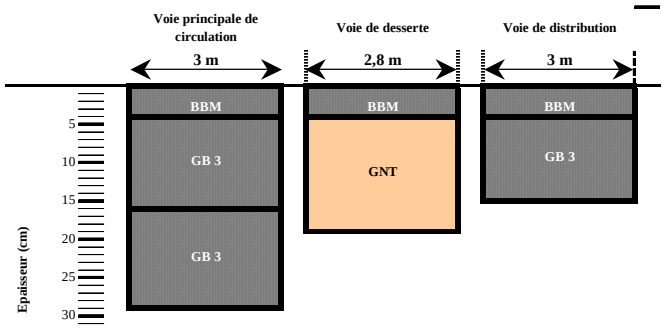


Figure 4 - 10. Configuration de catégorie de voie de circulation d'usage courant code VCUC

1.5. Hypothèses de calcul pour les cas testés avec matériaux classiques

Le système environnemental considéré pour cette étude est représenté dans la *Figure 4 - 11*. Les distances retenues dans le système présenté dans la *Figure 4 - 11* sont les mêmes que celles retenues pour la configuration interurbaine dans le *Tableau 3 – 6*.

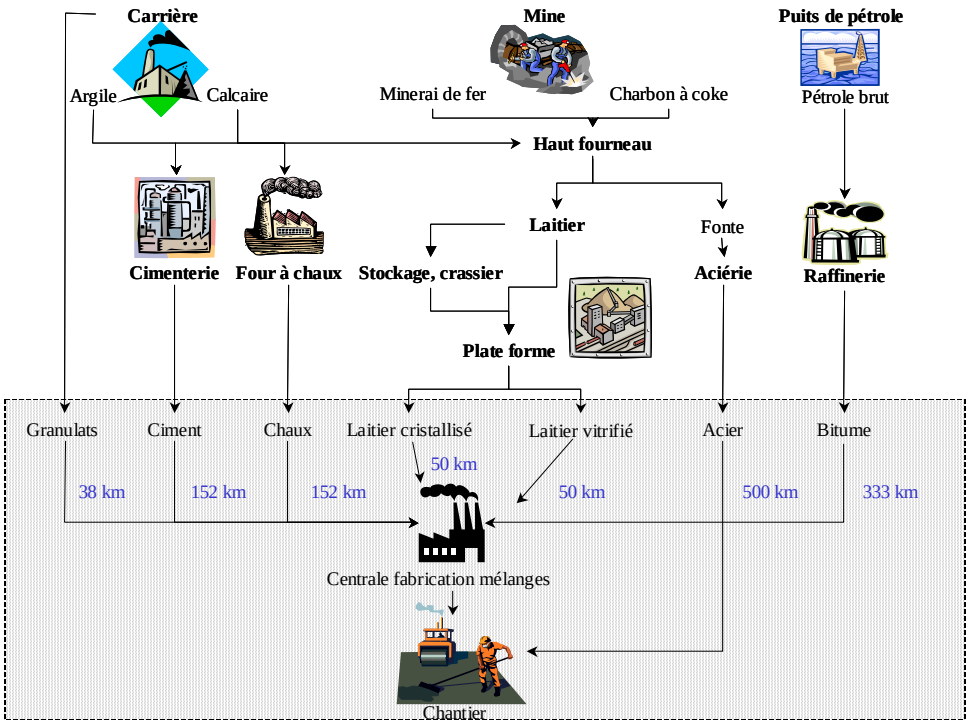


Figure 4 - 11. Système environnemental urbain

Le jeu de données d'entrée du modèle retenu pour la suite de la démarche est le dernier retenu (jeu de données n° 4), après actualisation des données (valeurs moyennes de toutes les valeurs collectées jusqu'ici, données mesurées ou issues de bibliographie avec une liste de flux plus étendu), aucune loi d'évolution des émissions n'a été retenue pour les simulations.

2. RESULTATS D'INDICATEURS D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

A ce stade d'avancement du travail, les résultats d'impacts environnementaux sont présentés pour les différents cas de voiries urbaines. La *Figure 4 - 12* récapitule l'ensemble des cas évalués à partir du MVU.

La *Figure 4 - 13* présente la consommation énergétique relative à chacune des bandes représentées dans la *Figure 4 - 12*. On constate que la construction des deux structures en béton (voie de circulation principale et couloir de bus) consomment plus d'énergie que les autres. Les procédés impliqués sont majoritairement la cimenterie et la centrale de fabrication du béton. Pour les structures semi-rigides (voies de circulation principale et de distribution, et couloir de bus) la contribution du procédé cimenterie reste à environ un tiers du total. Pour les structures n'utilisant que des matériaux bitumineux, les contributions des procédés raffinerie et centrale d'enrobage sont importantes. La part des transports l'est également, et on constate qu'elle est proportionnellement plus importante pour les éléments de structure les plus petits (en volume) : trottoirs, pistes cyclable, et stationnement (voir *Figure 4 - 12*).

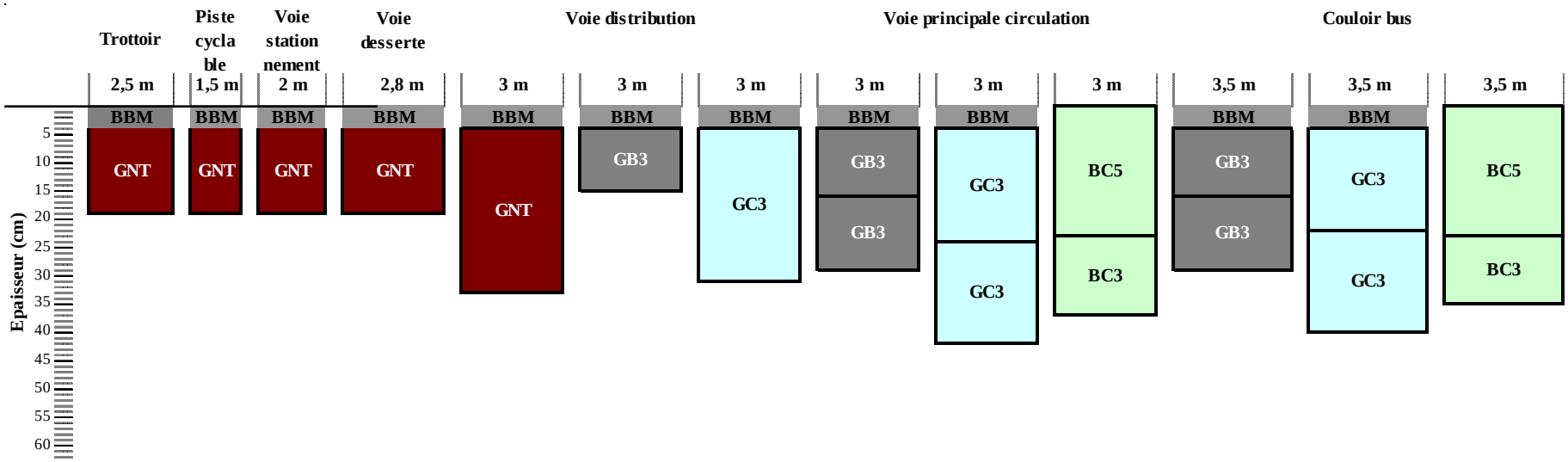


Figure 4 - 12. Différents cas traités dans l'étude

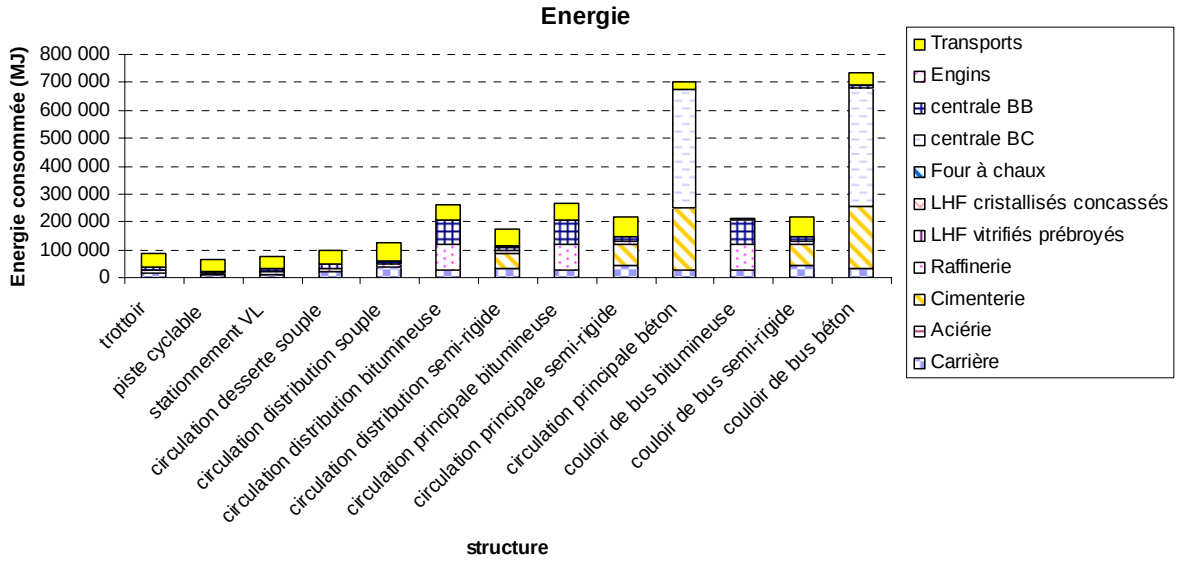


Figure 4 - 13. Consommation énergétique

La *Figure 4 – 14* représente l'indicateur de potentiel de réchauffement climatique (GWP). L'allure générale est la même que pour les consommations d'énergie, avec un total plus important pour les structures bétons, avec une contribution cependant plus importante du procédé cimenterie. Pour les structures bitumineuses, la contribution au réchauffement climatique est majoritairement due au procédé raffinerie et aux transports.

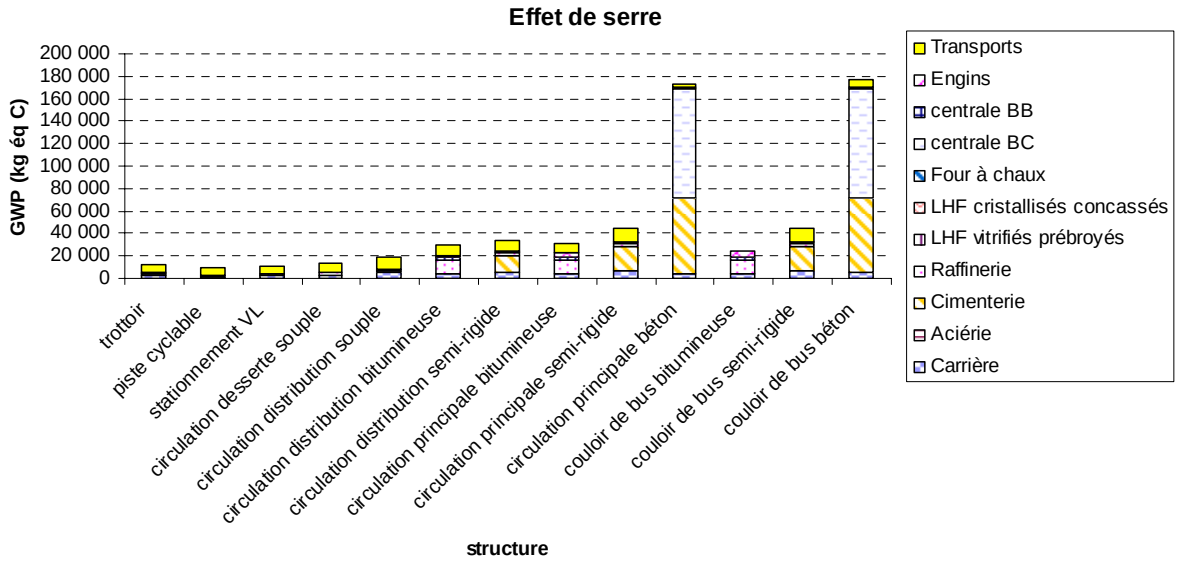


Figure 4 - 14. Effet de serre

La *Figure 4 – 15* représente l'indicateur de formation d'ozone troposphérique (POPC). Cette fois, les structures bitumineuses donnent des résultats plus élevés, avec une contribution importante des procédés raffinerie et centrale d'enrobage. Pour les structures en béton, cimenterie et centrale à béton sont les procédés qui contribuent le plus.

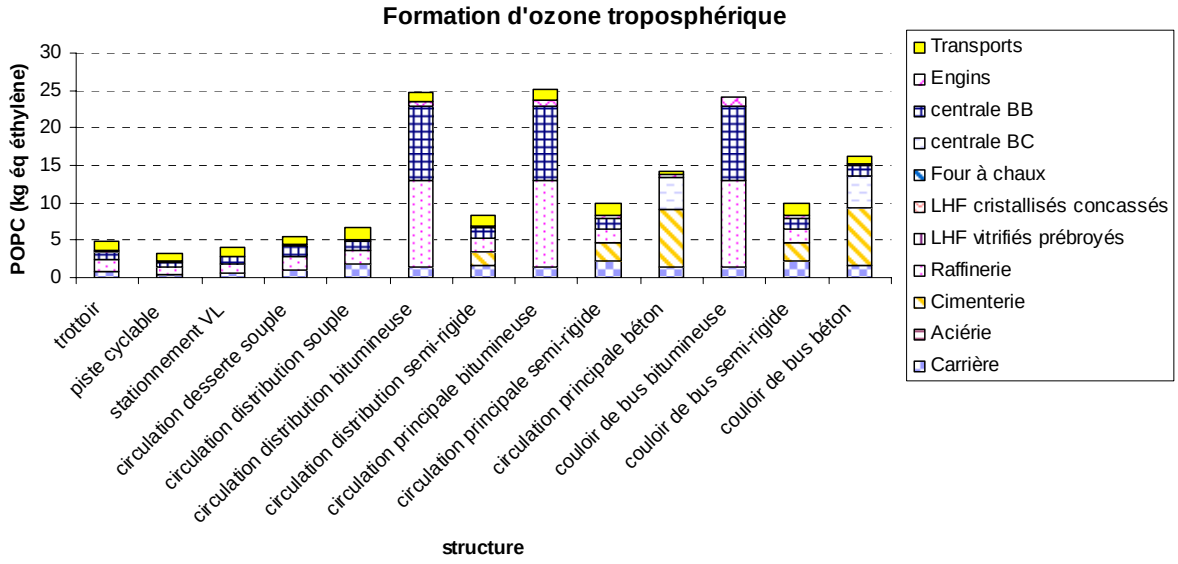


Figure 4 - 15. Formation d'ozone troposphérique

La *Figure 4 – 16* représente l'indicateur de contribution à la toxicité (TP). Seul le procédé raffinerie ressort sur ce graphique.

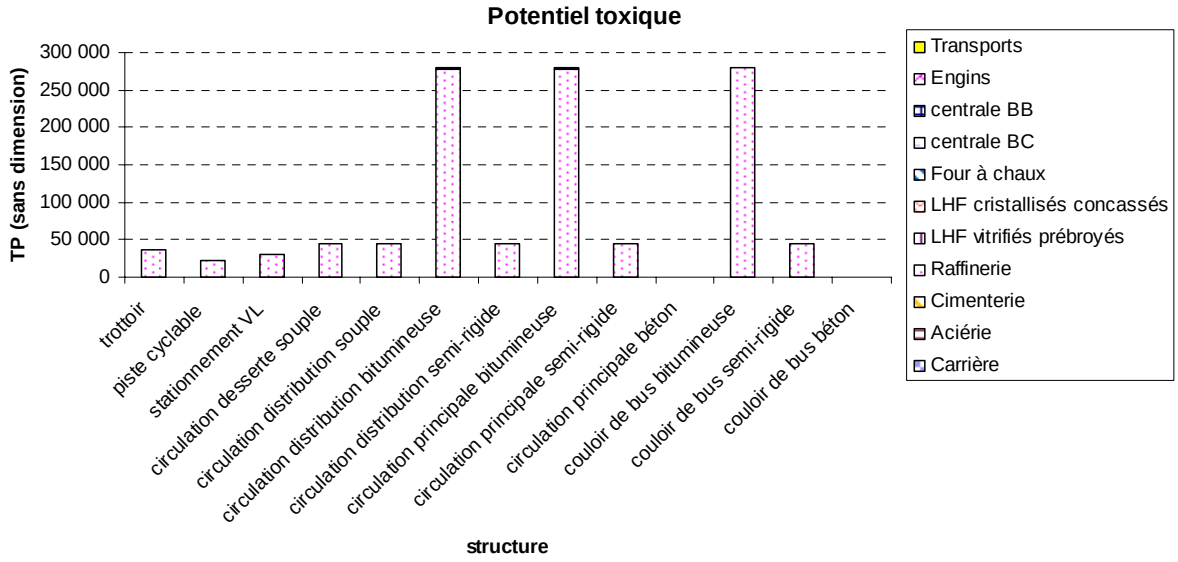


Figure 4 - 16. Potentiel toxique

La *Figure 4 – 17* représente l'indicateur de contribution à l'écotoxicité (EP). Comme pour la toxicité, seul le procédé raffinerie ressort sur ce graphique.

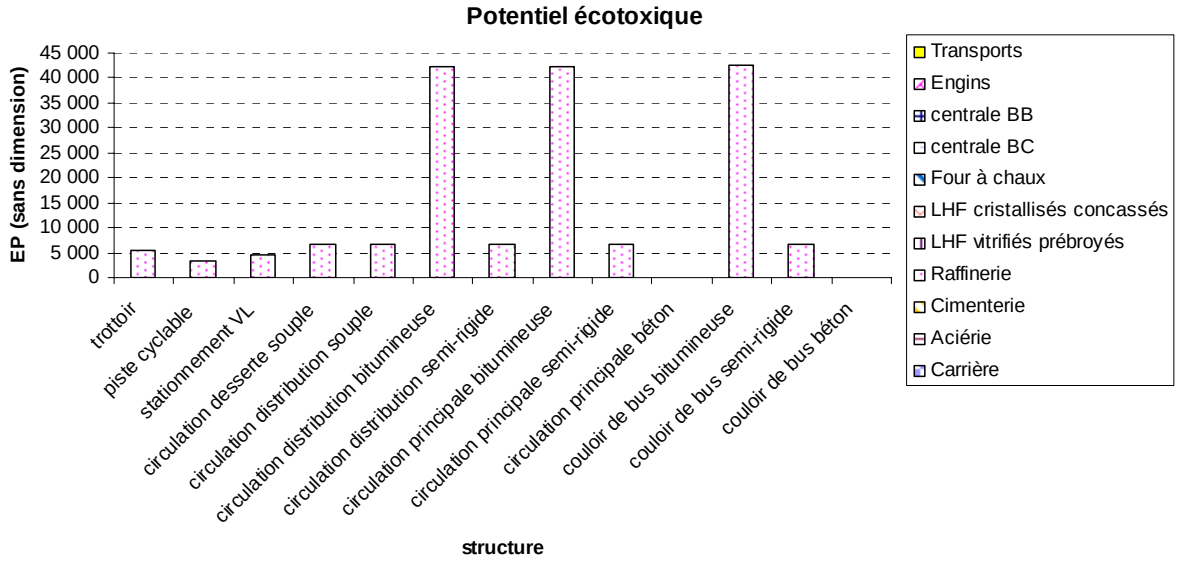


Figure 4 - 17. Potentiel écotoxique

La *Figure 4 – 18* représente l'indicateur d'acidification du milieu (AP). Seul le procédé raffinerie ressort sur ce graphique. La cimenterie et la centrale béton sont les procédés les plus impliqués dans ce phénomène pour les structures béton, tandis que la raffinerie contribue majoritairement pour les structures bitumineuses les plus importantes en volume. Pour les plus petits éléments de structure, le transport joue un rôle majoritaire.

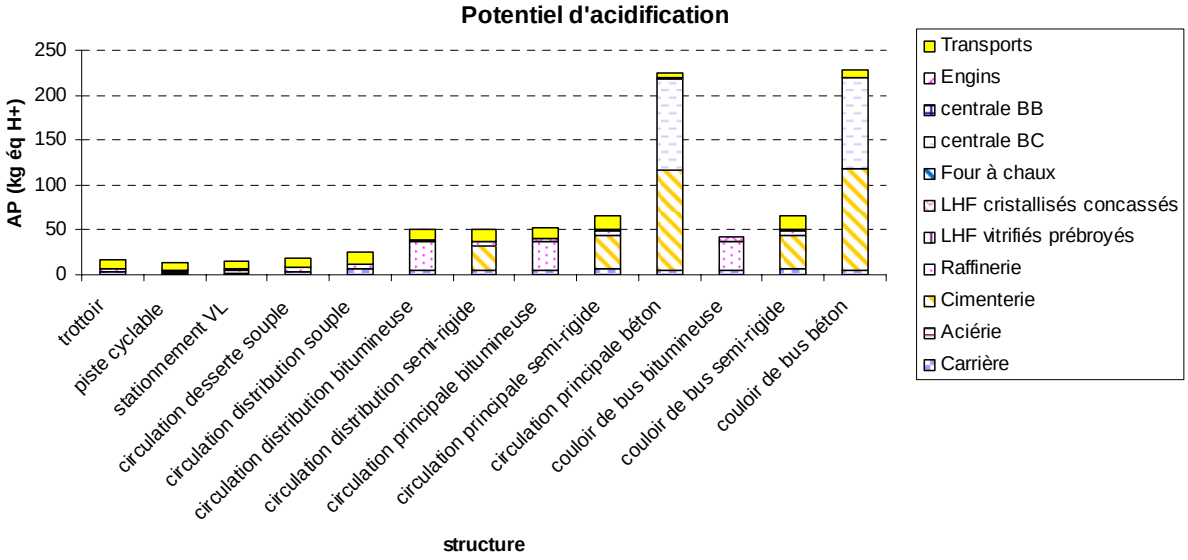


Figure 4 - 18. Potentiel d'acidification

La *Figure 4 – 19* représente l'indicateur d'eutrophisation du milieu (IE). Les contributions des procédés sont similaires à ce que l'on observe pour le potentiel d'acidification. Cependant les transports y jouent un rôle plus important.

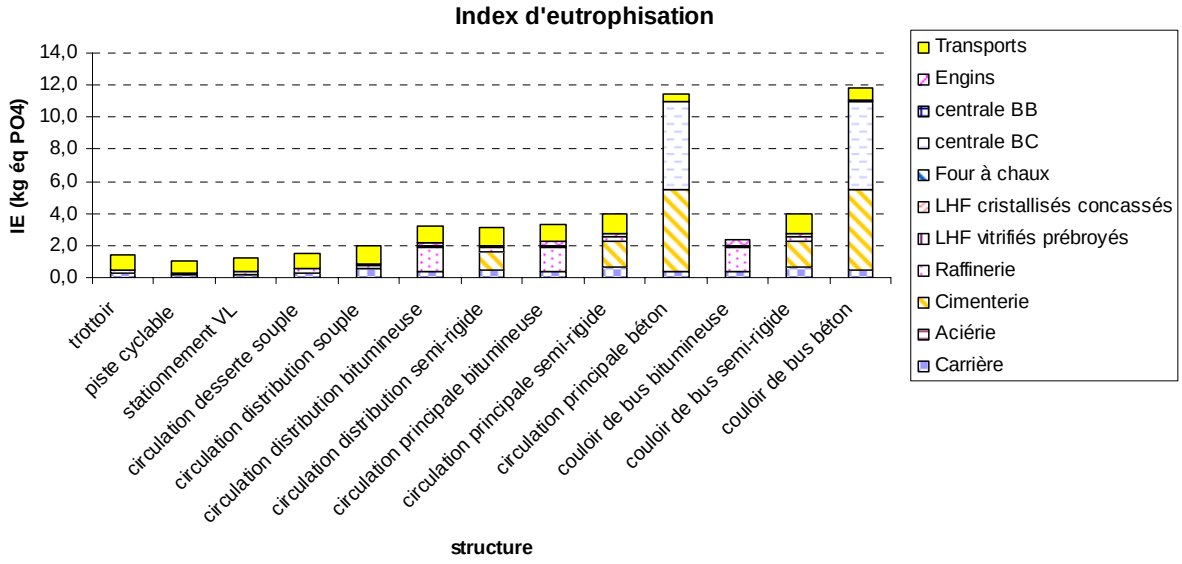


Figure 4 - 19. Potentiel d'eutrophisation

PARTIE III : APPLICATION A UN REAMENAGEMENT URBAIN AVEC LAITIERS DE HAUTS FOURNEAUX

Cette partie a pour objectif de tester la modularité de l'outil MVU développé sur un cas réel de chantier de rénovation urbaine. Ce travail a été fait en collaboration avec la mairie et la communauté urbaine de Dunkerque qui ont fourni un ensemble de documents relatifs à ce chantier. Pour certaines phases du chantier, il fallait recourir à l'élaboration de scénarios, car l'information n'était plus disponible ou utilisable.

1. PRESENTATION DE L'ETUDE DE CAS

1.1. Choix d'un territoire et d'un type de voirie

Premier port maritime français de la Mer du Nord, première plate-forme énergétique d'Europe, Dunkerque est au cœur d'une agglomération de plus de 200 000 habitants. En 2002, la mairie lance un projet de rénovation du quai des Hollandais qui s'intègre dans un plan plus global de rénovation du centre ville débuté en 1997. Les matériaux utilisés sont des laitiers de haut-fourneaux pour partie. Ainsi, outre le fait que ce chantier en particulier permet d'effectuer une application de l'outil MVU à un chantier urbain, ces travaux se situent à proximité d'une station de contrôle de la qualité de l'air, ce qui peut permettre de commenter ces simulations en comparant les niveaux de pollution calculés par le MVU à ceux mesurés.
Cette étude de cas nous permet ainsi à partir d'une configuration réaliste de tester les fonctionnalités de l'outil MVU. La *Figure 4 - 20* présente la localisation des travaux.

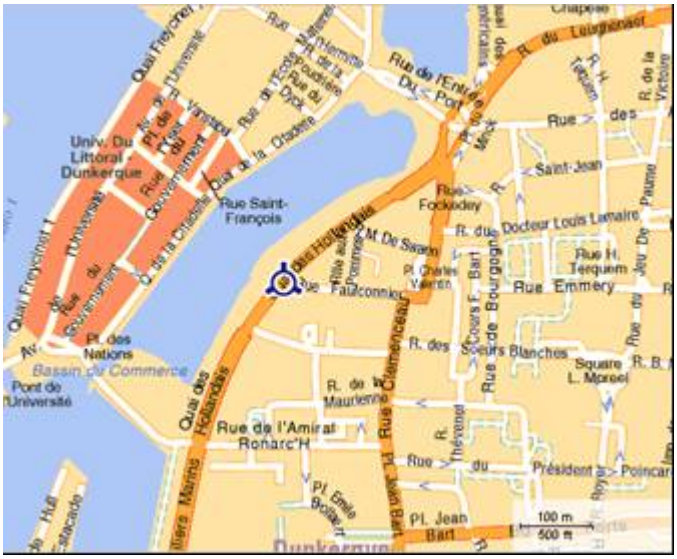


Figure 4 - 20. Localisation des travaux

Enfin, au-delà de l'adaptation nécessaire du MVU aux travaux de reconstruction, cette étude de cas va permettre d'ajouter une phase de déconstruction à l'évaluation globale, et ainsi de comparer l'importance respective de chaque phase. Ainsi pour mettre en évidence la modularité de l'outil MVU, les adaptations faites de l'outil tel que développé et présenté en début de ce chapitre sont commentées à chaque étape.

1.2. Cahier des charges de l'aménagement étudié

La mairie de Dunkerque a envoyé régulièrement les comptes-rendus de réunion d'avancement au LCPC en 2002. On dispose donc de l'état d'avancement du chantier semaine par semaine

(travaux effectués, parfois engins utilisés). Nous nous sommes basés essentiellement sur le Cahier des Clauses Techniques Particulières et le devis estimatif établis par le maître d'œuvre pour l'étude technique des travaux. Le MVU est utilisé pour effectuer une évaluation du réaménagement du quai sous réserve d'identifier les paramètres d'entrée tels que le site d'approvisionnement, le mode de transport, la formulation des mélanges, le procédé de fabrication et la technique de mise en œuvre. Le chantier s'étend sur toute la longueur du quai soit 350 m de longueur. Le trafic retenu pour les voies de circulation est de classe T1, ce qui correspond à un trafic compris entre 300 et 750 PL/j. L'épaisseur des couches d'assise correspondant est représentée dans la *Figure 4 - 22*.
Les états existant et projeté de l'emprise sont présentés dans la *Figure 4 - 21*. L'état existant a été relevé des documents transmis par le service techniques de la ville et l'état projeté a été simplifié à partir de l'état actuel de l'emprise. Les voies de circulations sont passées de deux fois deux voies à deux fois une voie, le reste de l'emprise est prévue pour des trottoirs et voies de stationnement, une piste cyclable est prévue au droit du centre de la marine. Par rapport au cas type proposé en *Figure 4 - 21*, il n'existe pas de couloirs de bus.

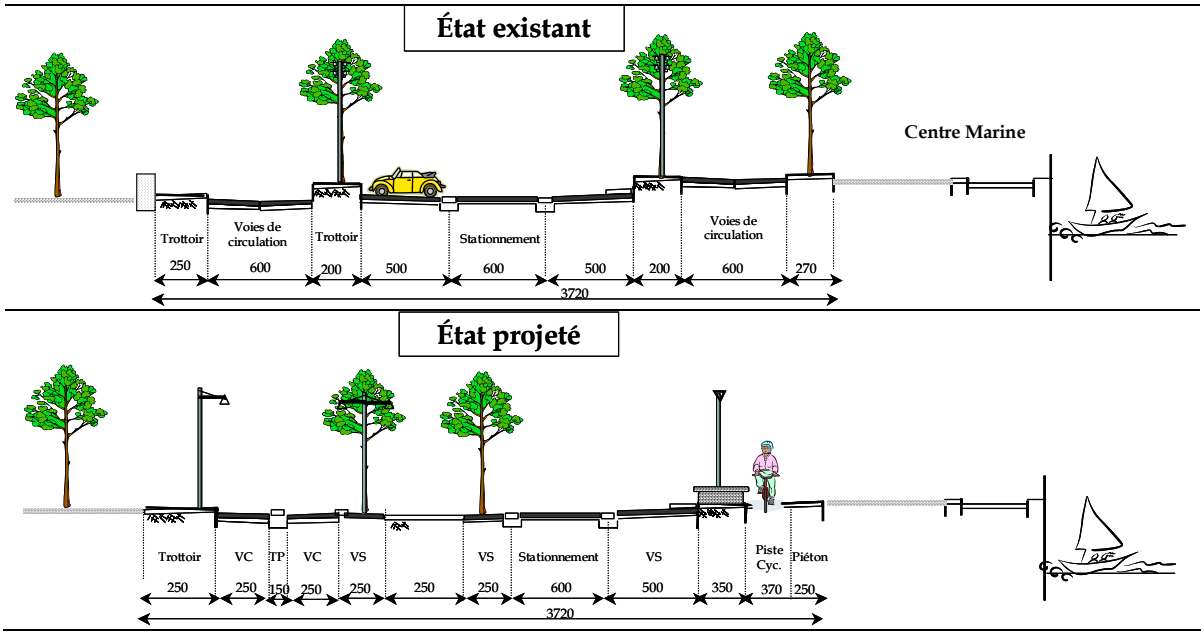


Figure 4 - 21. Coupe transversale de l'emprise (états existant et projeté)

1.3. Dimensionnement des équipements

La *Figure 4 - 22* présente les épaisseurs retenues pour chaque bande d'emprise. Les trottoirs et voies de stationnement sont revêtus d'une couche d'enrobé de 4 cm d'épaisseur, celle-ci repose sur une couche de graves laitiers tout laitiers (GLTL) de 15 cm de profondeur. Il s'agit d'un matériau différent de celui proposé dans la bibliothèque standard du MVU (*Tableau 4 - 2*). Les nouvelles voies de circulation se présentent en une couche d'enrobé posée sur une assise en grave laitier tout laitier (deux couches de 25 cm d'épaisseur). Les différentes bandes sont constituées des mêmes matériaux, on retrouve de la grave laitier tout laitier dans les couches d'assise (base et fondation des différentes voies), et de l'enrobé pour les revêtements. Les terre-pleins centraux sont négligés dans cette étude.

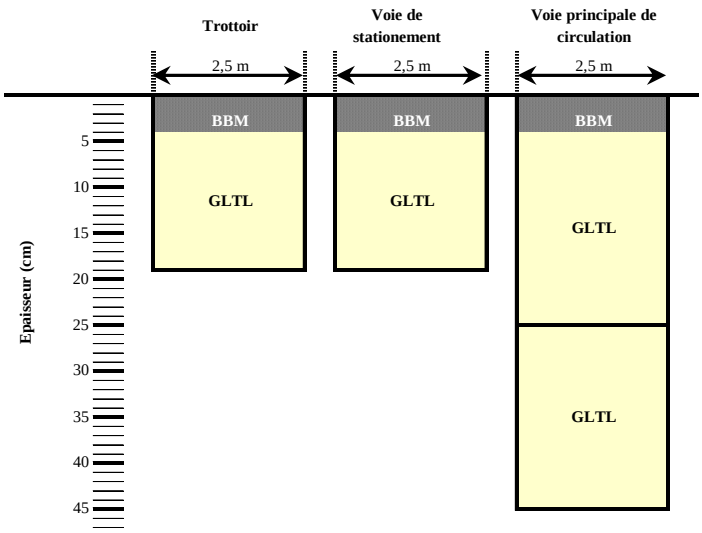


Figure 4 - 22. Epaisseurs des bandes d'emprise étudiée

2. PARAMETRES DU MVU

Nous reprenons dans ce qui suit les éléments recueillis dans le Cahier des Clauses Techniques Particulières établi par le maître d'œuvre avant appel d'offre et quelques photos ayant été prises lors des travaux (*Figure 4 - 23*). Le Démontage des chaussées et accessoires est effectué à la main et à la pelle mécanique. Ce type de chantier n'est pas intégré dans la modèle MVU. Ainsi les résultats présentés n'incluront pas cette étape. L'épaisseur doit être suffisante pour permettre la construction éventuelle de la nouvelle chaussée (60 cm environ). Les éléments en provenance des ouvrages démontés sont décrottés puis triés en deux catégories : les éléments à réutiliser sont stockés à proximité sur le lieu de réemploi. Les éléments non réutilisables sont éliminés en décharge (au moyen d'un semi remorque).

Figure 4 - 23. Photos du chantier quai des Hollandais (Dunkerque).

2.1. Transports

Des camions sont utilisés pour le transport des granulats jusqu'à la centrale d'enrobage, les approvisionnements en bitume, filler, sable et le transport des bétons bitumineux. Le *Tableau 4 - 8* présente les quantités de matériaux utilisées ainsi que les distances d'approvisionnement du chantier. Les graves laitiers tout laitier sont fournies prêt à l'emploi depuis la plate forme jusqu'au chantier, les distances plate-forme centrale sont donc négligées.

Tableau 4 - 8. Détails transport

Matériaux	**Masse (tonnes)**	**Trajet**		
Types		**Départ**	**Destination**	**Distances par camions (km)**
Engins	-			
Béton bitumineux	1 245		Centrale-Chantier	0,5
Graves traitées	6 949	Florange	Centrale-Chantier	410
Laitier granulé	1 458	Florange	Plate-forme-Centrale	-
Laitier cristallisé	5 420	Florange	Plate-forme-Centrale	-
Chaux	70	Dugny	Four à chaux-Centrale	91
Granulats	1 183	Ferques	Carrière-Chantier	64
Bitume	66	Donges	Carrière-Chantier	684
Bordure en granit	-	Bretagne	Carrière-Chantier	572

2.2. Simulation des travaux

Le *Tableau 4 - 9* présente l'organisation du chantier reconstitué à partir des procès verbaux tenus pendant la réalisation du chantier.

Tableau 4 - 9. Organisation du chantier du quai des hollandais (Dunkerque)

		Septembre				Octobre				Novembre				Décembre			
		36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
1	Dépose de bordure et caniveaux																
2	Démolition de trottoirs																
3	Démolition de chaussées																
4	Pose de bordure et caniveaux																
5	Mise en œuvre de trottoirs																
6	Mise en œuvre des chaussées																
7	Mise en œuvre de couches de roulement																

Le *Tableau 4 - 10* présente le rendement journalier des travaux de déconstruction des ouvrages existants.

Tableau 4 - 10. Opérations de déconstruction des anciennes chaussées et trottoirs et besoins humains et matériels relatifs

Travaux	**Unité**	**Quantité**	**Moyens humains**	**Moyens matériels**	**Rendement journalier**
Démontage de chaussée	m^2	16500	1 manœuvre, 1 chauffeur/pelle, 1 chauffeur/camion	1 pelle mécanique à chenille (12t), 5 camions (6x4)	1000 m^2/j, 1 camion : 5 tr/j , 1h30/tr
Démontage de trottoir	m^2	1000	Idem	Idem	500 m2/j
Dépose de bordures en basaltine	ml	900	Avec récup : 1 Sans récup : 2 manœuvres	pelle	150 ml/j 400 ml/j
Dépose de bordures en béton	ml	700	Chauffeur	pelle	500 ml/j
Dépose de caniveaux en béton	ml	120	Chauffeur	pelle	150-500
Dépose de glissière de sécurité	F	1	2 ouvriers 1 chauffeur/pelle 1 chauffeur/camion	Dévissage manuel Pelle Semi-remorque	1/2 j
Terrassement en déblais (~30cm)	m^2	17500		Pelle	300 m^3/j
Evacuation des déblais à la décharge	m^3	4000		5 Semi-remorque	5 j (terrassement, y compris évacuation)

Le *Tableau 4 - 14* ci-après présente le rendement journalier des travaux de reconstruction de l'emprise à partir des hypothèses obtenues pour les moyens humains et matériels mis en œuvre ainsi que les quantités de travaux à effectuer.

Tableau 4 - 11. Opérations de reconstruction des nouvelles structures de chaussées et trottoirs et besoins humains et matériels relatifs

Travaux	Unité	Quantité	Moyens humains	Moyens matériels	Rendement journalier
Préparation de forme	m^2	12500	-	-	-
Fourniture d'une toile anti-contaminante			-	-	-
Mise en œuvre d'une toile anti-contaminante	m^2	8500	2 personnes	-	-
Fourniture de sable de remblai				1 camion (4tr) : 6 semi-remorque	-
Mise en œuvre de sable de remblai	m^3	1500		Niveleuse, cylindre à bille	350 m^3/j
Fourniture de laitiers	t	9200			-
Mise en œuvre de laitiers en voirie	t	7200		Niveleuse, 1 compacteur mixte (pneu-bille)	-
Mise en œuvre de laitiers en trottoirs	t	2000		Pelle à pneus (15 t), cylindre auto porté d'1 m de large (6 passes)	-
Exécution d'une couche de cure après la 1ère passe	m^2	7800		1 camion (gravillons) 1Epandeuse, gravillonner porté	-

2.3. Système environnemental

La *Figure 4 - 24* présente le système environnemental pris en compte pour l'évaluation des travaux de réaménagement. Les données environnementales entrées dans le modèle pour l'évaluation des travaux sont celles du jeu de données n° 4.

Comme pour le MRE, deux hypothèses de contribution des flux de l'aciérie (0% pour l'hypothèse n°1 et 20% pour l'hypothèse n°2) à la production des laitiers ont été utilisés, et sont comparés.

Une démarche simplificatrice par rapport au MRE concernant l'allocation des flux contribuant à plusieurs impacts, a été adoptée. Les coefficients d'allocation aux impacts toxicité et écotoxicité pour les NOx, SO_2, HCl et HF, n'ont pas été calculés au prorata des masses émises par les procédés carrières, engins et transports. Cela aurait conduit à calculer des coefficients différents pour chaque élément d'infrastructure et chaque cas de dimensionnement. Un coefficient unique pour l'ensemble des cas, et fixé à 0,05 (en fonction des valeurs de calculs observées dans le MRE) a été utilisé.

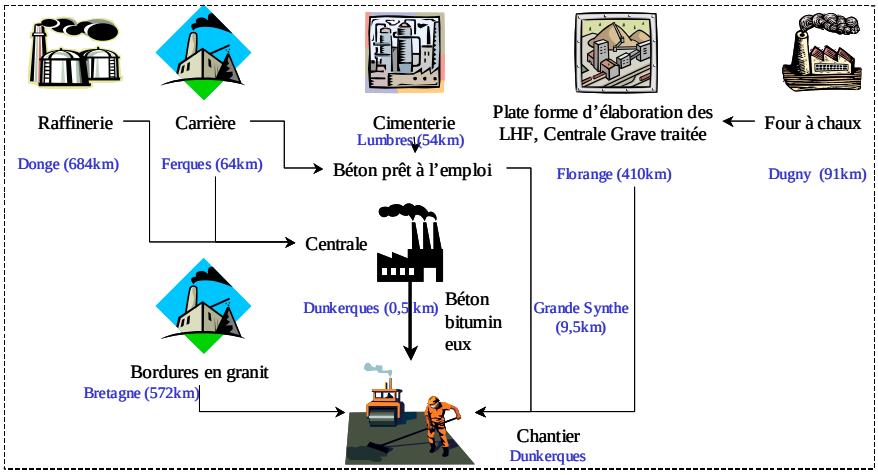
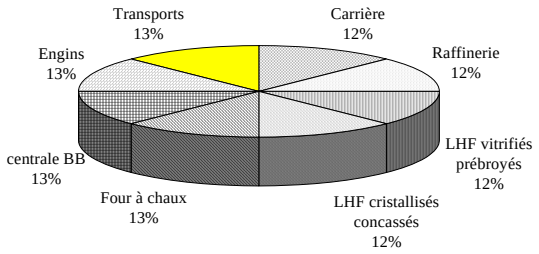
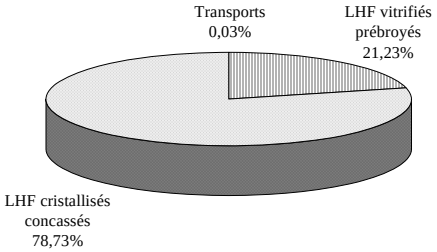
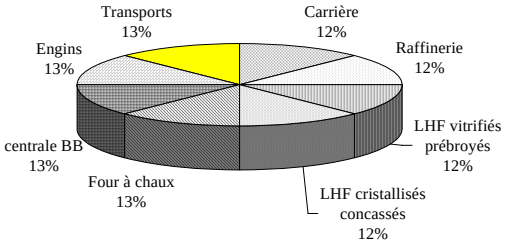
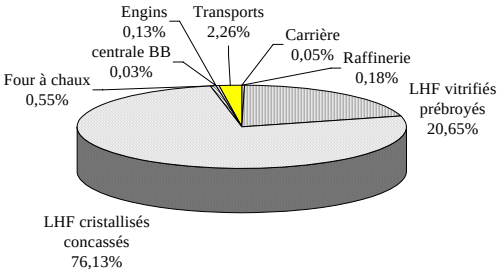
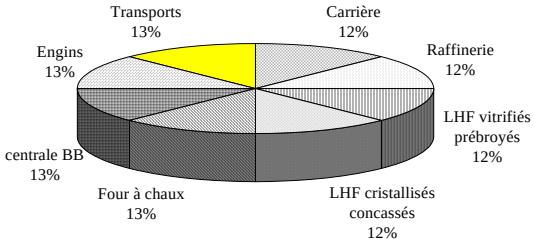
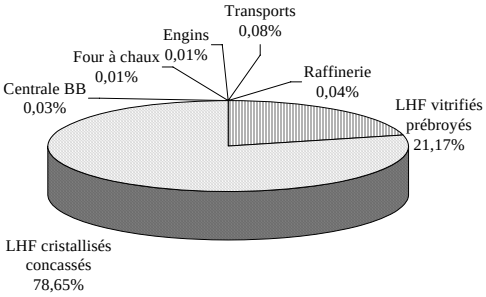
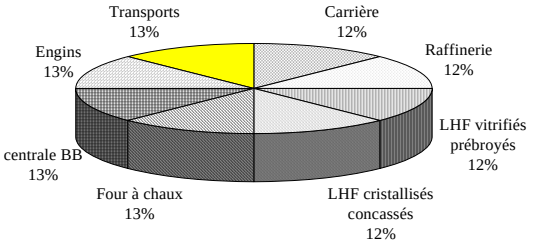
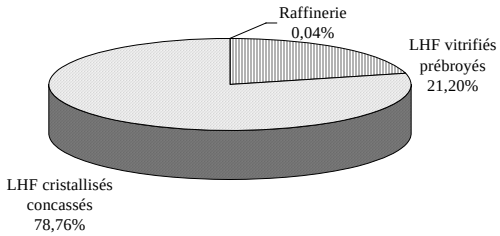


Figure 4 - 24. Système environnemental étudié pour le cas de Dunkerque

3. RESULTATS DE L'ETUDE DE CAS URBAINE

Les résultats de quelques indicateurs d'impact concernant le cas étudié sont présentés par procédé dans le *Tableau 4 - 12* en prenant en compte les deux hypothèses présentées au chapitre précédent : allocation des flux de l'aciérie à la production des laitiers à hauteur de 0% pour l'hypothèse n°1, et 20% pour l'hypothèse n°2.

Tableau 4 - 12. Indicateurs d'impacts potentiels concernant l'étude de cas

Hypothèse 1 : 0% des flux de l'aciérie sont attribués aux laitiers	*Hypothèse 2 : 20% des flux de l'aciérie sont attribués aux laitiers*
Energie  	**Energie** 
Effet de serre  	**Effet de serre** 
Formation d'ozone troposphérique  	**Formation d'ozone troposphérique** 
Potentiel toxique  	**Potentiel toxique** 

Pour les indicateurs non présentés, les résultats sont similaires. Dans le cas de l'hypothèse n°1, on constate une contribution quasi équivalente (entre 12% et 13%) de chacun des procédés aux indicateurs d'impacts présentés. Pour l'hypothèse n°2, la production des laitiers (cristallisés ou prébroyés) contribue à plus de 95% des indicateurs d'impacts.

Comme dans le chapitre précédent, on constate que cette hypothèse s'avère écrasante sur les résultats, dans le choix des paramètres environnementaux initiaux.

4. COMPARAISON AVEC DES NIVEAUX DE POLLUTION DANS L'AGGLOMERATION

Les paramètres mesurés par Opal'Air (station de mesure 502 localisée à Dunkerque centre ville) pendant la période des travaux sont : les particules solides PM_{10}, SO_2, NOx, O_3, CO et HCT. Lacour (Lacour *et al.*, 2006) évalue les émissions dues aux travaux de ce chantier et estime des émissions de CO et NOx équivalent à 50 – 60 véh/h, une émission SO_2 équivalente à 175 – 200 véh/h et PM_{10} équivalent à 35 véh/h. il nous faut considérer les émissions d'un véhicule léger pour estimer les valeurs émises dues au chantier.
Les données d'émissions d'un véhicule léger prises en compte sont les seuils réglementés par le Règlement (CE) n° 715/2007 du Parlement européen et du Conseil, relatif à la réception des véhicules à moteur au regard des émissions des véhicules particuliers et utilitaires légers (Euro 5 et Euro 6). Celui-ci établit les normes d'émissions limites admissibles pour des voitures particulières et des véhicules utilitaires légers. En 2004, sur 2013709 immatriculations neuves en France, 69,15 % des véhicules vendus sont des diesel, 30,65 % des essence (http://www.senat.fr/rap/r05-125/r05-1253.html)
On s'est donc basé sur ces valeurs seuil pour l'estimation des émissions dues au chantier de réaménagement. Les présentes directives fixent des valeurs limites différentes pour les émissions des voitures à essence et celles à moteur diesel : de monoxyde de carbone (500-1000 mg/km); d'hydrocarbures imbrûlés (100-230 mg/km); d'oxydes d'azote (60-180 mg/km); et, spécifiquement pour les moteurs diesels, de particules solides (5 mg/km). Nous prenons la moyenne des deux valeurs seuils, en considérant une vitesse de 70 km/h en milieu urbain, donc on obtient des flux en g/h.
D'autre part, le MVU fournissant des totaux de flux différents pour chaque élément de structure, ceux-ci ont été moyennés et rapportés à l'heure pour évaluer les émissions horaires moyennes des engins (en supposant que les trottoirs, stationnements et voie de circulation ont été effectués successivement et non simultanément).

Figure 4 - 25. Photo et localisation de la station de mesure

Tableau 4 - 13. Données de consommation-émission prises en compte pour un véhicule léger (Avec une vitesse de 70 km/h en urbain)

	CO	**NOx**	**PM**
	g/h	g/h	g/h
Seuils réglementaires	52,5	8,4	0,35

Estimation d'après les relevés OPALAIR due au chantier	2 887	462	12
Evaluation MVU des travaux	15 590	24 910	2 001
OPAL'AIR / MVU (%)	18,20	1,85	0,60

Les données de mesures OPALAIR sont beaucoup moins importantes pour l'ensemble des flux par rapport aux évaluations du MVU (*Tableau 4 - 13*). Les ordres de grandeurs sont très différents.
Il faut rappeler que les valeurs MVU sont des valeurs des constructeurs données à partir de tests normalisés sur des moteurs neufs. Par contre, les mesures prises au cours du chantier découlent d'émissions de moteurs ne fonctionnant pas forcément aux mêmes régimes que lors des tests, ce qui peut expliquer des différences, notamment pour le CO. D'autre part, la limite de vitesse de 70 km/h sur cette section n'est pas forcément représentatives des vitesses réelles (embouteillages, feux…). Enfin, les valeurs trouvées par Lacour *et al.*, (2006) découlent de calculs basés sur une sélection des données en fonction de la direction du vent afin de ne voir que les émissions provenant du chantier.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, le MVU a été développé à partir de l'outil MRE existant, qui ne traitait que les cas d'autoroutes interurbaines.
Pour cela, les spécificités de la construction en milieu urbain ont été prises en compte. Par rapport à l'interurbain, le profil en travers revêt une grande importance dans les choix des configurations spatiales, car ce sont souvent les constructions existantes (bordures, habitations…) qui imposent la largeur totale de la voirie. D'autre part, bien que les épaisseurs des différentes couches doivent répondre aux lois de la mécanique, la complexité du milieu urbain impose parfois une épaisseur maximale, là encore en raison des seuils d'habitation et de l'écoulement des eaux pluviales. Ainsi l'outil développé, bien que basé sur les principes de dimensionnement classiques (Struct-Urb) est entièrement paramétrable et n'impose pas de solutions prédéfinies. Le caractère modulaire des modules routiers est conservé. L'utilisateur a libre choix de concevoir une emprise qui serait adaptée au cas par cas. Il permet une évaluation technique et environnementale de différentes variantes d'usage classique urbain. Ceci permet de quantifier la masse des matériaux utilisés, la quantité d'énergie nécessaire ainsi que la masse de l'ensemble des émissions de polluants due à la réalisation des chantiers urbains. Des indicateurs d'impacts environnementaux classiques de la méthodologie ACV sont également implémentés, tels que le GWP pour l'effet de serre, le POPC pour la formation d'ozone troposphérique, des potentiels de toxicité et d'écotoxicité…
L'outil a été appliqué à une étude de cas, dans le cadre d'un chantier de rénovation urbaine. Sa modularité a permis de s'adapter parfaitement aux contraintes spécifiques de l'exemple traité. Les résultats obtenus concernant la simulation des émissions de polluants atmosphériques ont été comparés à des résultats issus de mesures réelles effectuées sur ce même chantier. La comparaison montre que les ordres de grandeurs sont loin d'être concordants. Ceci confirme l'analyse critique effectuée dans le chapitre 3, sur la qualité des données environnementales unitaires implémentées dans le modèle, et qui sont à la base des calculs.

Enfin, la façon de considérer les matériaux alternatifs (co-produits ou déchets) impliquant au sens de l'ACV d'attribuer ou non des flux de l'aciérie à hauts-fourneaux à leur production, conduit à des résultats totalement différents. Le choix de cette hypothèse donc est primordial et mérite une réflexion approfondie sur la manière de considérer les matériaux recyclés dans l'approche développée.

Ainsi il est important de souligner qu'un tel outil ne donne qu'une représentation approximative de la réalité, et qu'il faut se fier aux tendances plutôt qu'aux valeurs. Son utilisation est adaptée une démarche plus comparative qu'absolue : à la comparaison *a priori* de solutions, plutôt qu'à une évaluation environnementale *a posteriori* d'un chantier routier.

Au-delà des résultats d'indicateurs proprement dits, la question se pose de savoir comment les utilisateurs potentiels, non-spécialistes de l'environnement, sont susceptibles d'appréhender l'outil. C'est l'objet du chapitre suivant.

DISCUSSION GENERALE
SUR L'UTILISATION DES OUTILS

1. APPORTS ET LIMITATIONS DES MODELES DEVELOPPES

1.1. Rappel des fonctionnalités des modèles et des principes de la démarche proposée

Le travail de thèse consistait à l'élaboration d'un outil d'évaluation intégrée appliqué aux infrastructures routières. L'outil développé dans le cadre d'un travail de thèse précédent (Hoang, 2005), intégrait au début des scénarios de construction/maintenance comprenant l'extraction, l'élaboration, le stockage des ressources naturelles utilisées pour des chaussées de type autoroutes interurbaines. L'objectif de ce travail de thèse était d'une part d'étendre l'approche globale à des matériaux recyclés, et d'autre part d'étendre la localisation de l'infrastructure en milieu urbain. L'utilisation du modèle routier devait permettre d'apporter un éclairage au maître d'ouvrage et intervenir dès le stade de conception de projets routiers quant aux choix et évaluation de variantes techniques. Le développement d'un tel outil devait permettre effectivement de projeter dans le temps les actions entreprises ainsi que leurs conséquences, de tenir compte des territoires, au sein desquels les activités s'insèrent où sont liées, et enfin de pouvoir évaluer les conséquences économiques et sociales en balance (ou pas) avec les conséquences environnementales de l'activité ; les décisions ainsi prises pouvant être guidées par ces principes.

En se basant sur différents matériaux alternatifs aujourd'hui répertoriés sur le site de l'Observatoire Français du Recyclage en Infrastructures Routières (consulté dès 2005) et des connaissances en ligne, nous avons cherché à retenir au moins un matériau bien connu pour fonder l'approche envisagée. En se basant également sur les outils de dimensionnement existants (interurbains et urbains) et sur la base des données environnementales recueillies, on s'est donc intéressé aux laitiers de haut fourneau. Des applications de cas de terrain (à base de laitiers) ont servi de modèles pour différents usages et montrer les fonctionnalités des outils qui visent à proposer des approches au cas par cas à partir de cas types de tronçons routiers de chaussées.

Basé sur la méthodologie d'analyse de cycle de vie, les outils modules routier permettent une évaluation des travaux routiers sur une durée de service choisie. Au-delà des flux d'inventaires de cycle de vie, les outils ainsi développés, permettent à l'issue de ce travail d'évaluer les indicateurs d'impacts environnementaux. Une base de données aussi riche que possible et spécifique aux procédés a été mise en place afin d'obtenir des résultats qui ouvrent la réflexion sur la substitution de ressources (remplacement de matériaux naturels par des matériaux alternatifs). Des entretiens semi directifs et questionnaires d'enquête ont été établis afin de pouvoir intégrer les critères propres à chaque acteur dans la perspective d'une approche multicritère. Il subsiste un décalage aujourd'hui entre les indicateurs environnementaux, la sensibilité des acteurs et le modèle dont les limitations sont présentés ci-après.

1.2. Géométrie des chaussées

Les modèles développés permettent l'évaluation d'inventaire de cycle de vie et d'un panel d'indicateurs d'impacts environnementaux appliqués à différentes structures de chaussées. Ils se limitent à l'évaluation des seules structures cataloguées dans les guides conventionnels de dimensionnement de structures routières ; soit (SETRA/LCPC, 1998) pour le modèle interurbain et Struct-Urb pour l'urbain.
En construction neuve, plusieurs types de structures sont identifiées en milieu urbain : souples, pavées, bitumineuse, semi-rigides et rigides. Parmi ces structures, les structures

pavées ne peuvent être évaluées par l'outil étant donné que la plupart des tâches sont effectuées manuellement. Les structures rigides se limitent au seul emploi de bétons non armés (catalogues Struct-Urb), les structures BAC peuvent éventuellement être évaluées dans un développement ultérieur en introduisant la quantité d'acier prévue dans le BAC.
Dans le cas de la réhabilitation, seuls les effets de la déconstruction par fraisage (cas général recensé) sont modélisés.
L'emploi des laitiers de haut fourneau est limité dans l'étude aux seules couches de base et de fondation des structures catalogues étudiées, cela pourrait s'étendre à l'ensemble des couches de l'infrastructure depuis le terrassement jusqu'à la couche de roulement (cf chapitre 2).
Enfin, contrairement à l'outil élaboré sur les infrastructures interurbaines (MRE), le MVU ne prend pas en compte la durée de vie de l'infrastructure. En effet, alors qu'en interurbain, l'entretien d'une route peut être aisément planifié sur un linéaire donné, en milieu urbain, les opérations d'entretien se font sur la base de l'état du réseau et conjointement avec d'autres opérations telles que l'assainissement ou le passage de câbles… L'approche entretien du réseau de voirie n'est pas développé dans le MVU et pourra être l'objet d'un développement ultérieur.

1.3. Evaluation environnementale

Les systèmes environnementaux utilisés pour la modélisation sont définis à partir des principaux flux matières. Si les flux d'énergie nécessaires au fonctionnement des procédés et des engins sont inclus, les procédés de production d'énergie ne le sont pas. Les flux de matières premières naturelles extraites pour la production des matériaux ne sont pas toujours renseignés, leur prise en compte est à ce stade négligée.
Le calcul des indicateurs d'impact s'effectue après des hypothèses d'affectation des flux environnementaux à des catégories d'impacts. Concernant les flux, l'accent est mis notamment sur l'analyse de la qualité des données à l'entrée du modèle, au préalable de la mise en place dans l'outil d'un jeu d'indicateurs. Pour ce faire, un travail d'homogénéisation des données environnementales obtenues a été établi. Par exemple, le terme d'hydrocarbures couvre l'ensemble des composés organiques volatils (COV, COT, HC), les particules solides toutes particules tous diamètres confondus (PS, poussières). Les hydrocarbures (aq) couvrent l'ensemble des composés organiques non miscibles à l'eau, le N-Tot et la P-Tot l'ensemble des matières azotées ou phosphoreuses. Enfin, les seuls hydrocarbures aromatiques polycycliques pris en compte sont ceux les plus renseignés B(a)P et Dib(ah)A.

Certaines valeurs de flux n'ont pas pu être utilisées, tandis que d'autres ne contribuent à aucun impact. Pour certains flux, leurs contribution à la toxicité ou l'écotoxicité n'est pas incluse dans le modèle utilisé (Huijbregts et al., 2000), probablement car on ne dispose d'aucunes informations environnementales actuellement fiables les concernant. Dans le cas du procédé de raffinage, une quantité totale de métaux est fournie, mais on ne peut pas lui attribuer de coefficients de contribution, puisque la nature et la quantité de chaque élément chimique n'est pas précisée. Pour ce cas, nous avons donc considéré que la masse totale des métaux était équivalente à du Chrome VI, qui est l'hypothèse la plus pessimiste.

De ce fait l'ensemble des hypothèses posées, ainsi que la très grande hétérogénéité des données environnementales conduit à des évaluations qui ne peuvent être validées et dont les résultats sont à considérer avec précaution dans un domaine sensible.

1.4. Approche multicritère

Les outils développés dans ce travail de thèse fournissent un jeu d'indicateurs environnementaux à disposition des utilisateurs. Le panel des indicateurs utilisés est issu des

méthodes classiques d'Analyse de Cycle de Vie et constitue un ensemble de données spécialisées. Or, la présentation de ces indicateurs tels quels à l'utilisateur, sont susceptibles de nuire à l'accessibilité de l'outil aux non-spécialistes. La démarche de choix sur la base de multicritères n'est possible que si l'ensemble des critères est bien compris par l'utilisateur non spécialiste. A cette fin, et dans le but d'améliorer ultérieurement l'accessibilité générale de l'outil développé, une enquête auprès des différents acteurs susceptibles de l'utiliser (professionnels du monde routier), a été réalisée. L'objet de cette enquête est d'identifier la sensibilité des différents acteurs aux problèmes environnementaux, ainsi que les contraintes auxquelles ils sont soumis par les relations contractuelles ou procédurières qu'ils ont avec les autres acteurs dans le processus décisionnel.

2. ETUDE DE LA PERCEPTION DES PREOCCUPATIONS ENVIRONNEMENTALES DANS LES RELATIONS ENTRE ACTEURS

2.1. Réalisation de questionnaires à destination des acteurs routiers sur le recyclage de matériaux dans la route

C'est à partir des aspects environnementaux, particulièrement absents des préoccupations recensées (lors de l'analyse du processus décisionnel ainsi que des entretiens semi directifs) que nous avons élaboré des questionnaires d'enquête détaillés. Les questionnaires avaient pour objet de déterminer la perception et la prise en compte des pratiques du recyclage dans la route. On a voulu tester à ce stade du travail la sensibilité des acteurs concernés face aux critères environnementaux suivants : i) économies des ressources naturelles non renouvelables, ii) augmentation de la valorisation des déchets (tri sélectif) ; iii) protection de la biodiversité, iv) insertion de l'infrastructure dans le paysage ; v) diminution de la pollution de l'air, vi) diminution des risques sanitaires, vii) diminution de la mise en décharge des déchets, viii) diminution des émissions de gaz à effets de serre ; ix) diminution de la pollution des eaux ; x) diminution de nuisances : sonores, vibratoires, poussières ; enfin xi) économie d'énergie. Les mêmes critères sont délibérément retenus pour tout l'ensemble des catégories d'acteur. Sept questionnaires distincts ont été construits pour différentes catégories d'acteurs : maître d'ouvrage, service technique de la maîtrise d'œuvre Conseil Général, Communauté de commune et privée, entreprise routière, terrassier enfin fournisseur de matériaux de construction.

Les questionnaires ont été lus et commentés (sur le fond et la forme) pour évaluer l'exhaustivité des éléments étudiés, la clarté des questions et la capacité de chacun à répondre. Huit membres internes au laboratoire ayant des compétences très diverses (géotechnique, acoustique, environnement, mécanique, …) ont été sollicités à cette fin.
Les échanges et les réactions des participants étaient très animés et ont été très utiles pour le processus d'élaboration de l'enquête. Les questionnaires ont été ensuite modifiés. L'organigramme du processus d'élaboration d'enquête visant à la collecte de données grâce aux contributions des différents acteurs est représenté en *Figure 5 - 1*.

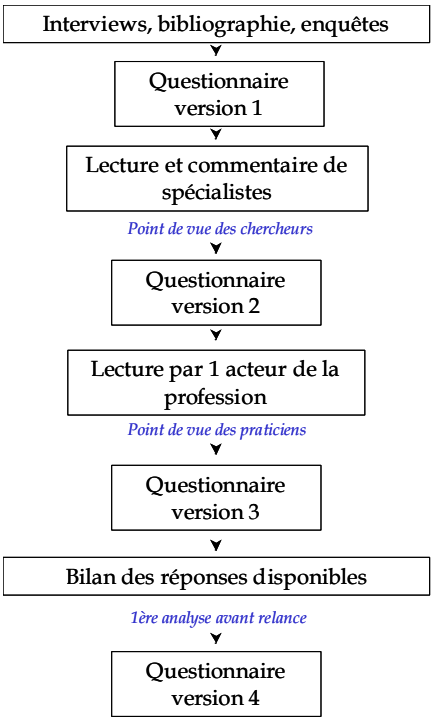


Figure 5 - 1. Processus d'élaboration des questionnaires

L'envoi des questionnaires (par courrier électronique ou postal) était très attendu des personnes contactées lors de réunion de travail, journées techniques. Mais il y a eu peu de retour : sur 194 questionnaires envoyés, seulement 35 réponses (18 % environ). La participation des enquêtés compte 1 à 6 réponses par questionnaire envoyé. Le taux de participation présenté en *Figure 5 - 2* est plus important pour des entreprises routières (26 %) et fournisseurs (20%) et plus faible pour des maîtres d'ouvrages et maîtres d'œuvre (11 à 17%).

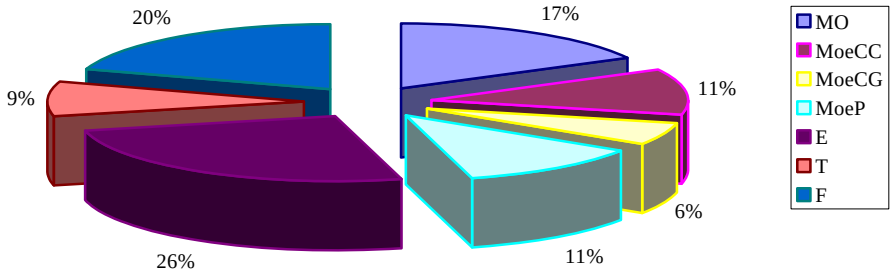


Figure 5 - 2. Répartition des taux de réponses.

2.2. Analyse des réponses aux questions

On a d'abord cherché à analyser si les réponses aux questions étaient complètes ou pas.

2.2.1. Evaluation du mode de réponse au questionnaire

La lettre d'envoi du questionnaire a été regardée comme pouvant restreindre le champ de réponse. Il est vrai que l'intitulé de la thèse concerne le recyclage des co-produits dans la chaussée (et non pas de tout déchet dans la route). Mais, le questionnaire se voulait plus général et englobait aussi bien les ressources naturelles qui servent de référentiel dans ce travail. Après un dépouillement rapide des questionnaires reçus, on a noté que les questions restant sans réponses ne correspondent pas vraiment aux rubriques qui ont fait l'objet de remarques faites par les lecteurs praticiens lors de l'élaboration du questionnaire.

Parmi certaines des questions restées sans réponse (annexe 5) on peut comprendre que le lecteur ne se sent pas obligé de répondre (questions d'ordre socioprofessionnel telles qu'expériences ultérieures et formation initiale). D'autres questions sans réponse, nécessitaient peut-être des recherches à faire par le lecteur (date de création de l'entreprise). Enfin, le lecteur peut juger que l'information n'est pas importante à fournir.
L'intérêt environnemental porté aux réglementations en vigueur n'est pas ressenti par certains individus, ou bien ceux-ci ne comprennent pas le sens de certaines questions (protection de la biodiversité, insertion dans le paysage, diminution des risques sanitaires...etc).
D'autre part, le taux de participation dans chaque catégorie d'acteurs a été examiné (*Figure 5 - 3*). On constate une très forte mobilisation de la part des services technique de la maîtrise d'œuvre communale (un taux de 40% de participation) et des entreprises routières (31%). Le taux le plus faible de participation est celui des services techniques des conseils généraux (environ 4%). Néanmoins, le nombre de réponses par catégorie d'acteur nous a paru suffisant pour permettre le dépouillement de chaque réponse précisément.

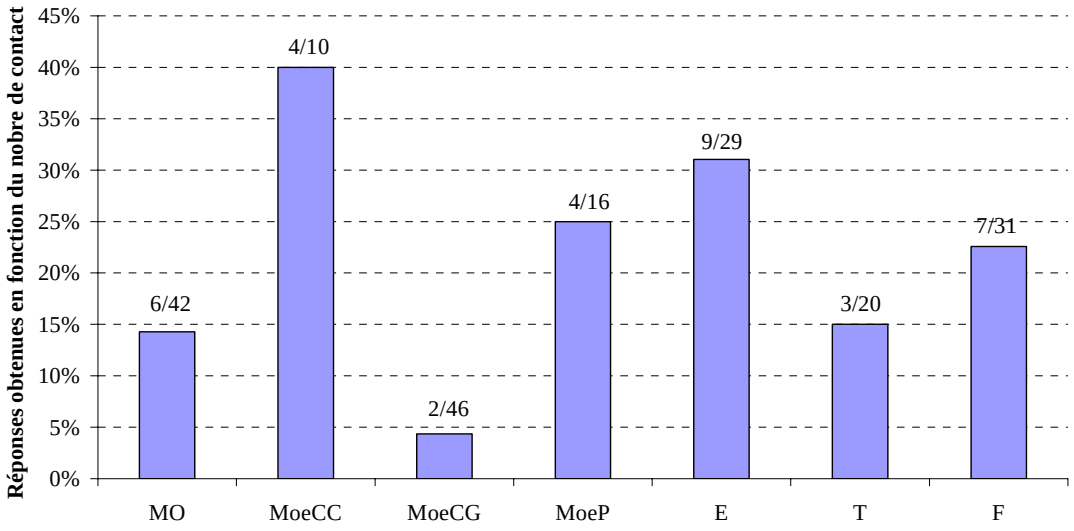


Figure 5 - 3. Taux de participation par catégorie d'acteur.

2.2.2. Evaluation du contenu des réponses

L'ensemble des réponses recueillies a été saisi dans un fichier Excel sous forme de feuilles thématiques (profil socioprofessionnel, profil environnemental, et socio-économique). Un code a été attribué à chaque réponse. Les données brutes chiffrées sont retranscrites, et celles faisant objet d'évaluation sont notées de 1 à n (0 marque l'origine du radar, 1 est le critère le plus important et n le critère le moins important). L'analyse des réponses a pour objectif de mettre en avant les interactions entre acteurs : interaction entre le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre à travers les éléments contractuels de la procédure, interaction entre le maître d'ouvrage et l'entreprise enfin l'interaction entre l'entreprise et le fournisseur des matériaux.

Confrontation des points de vue Maître d'Ouvrage-Maître d'oeuvre à la procédure - Critères de jugement des offres

Différents profils sont obtenus en fonction de la catégorie socioprofessionnelle de l'acteur considéré (*Figure 5 - 4*). Le maître d'ouvrage classe ses critères de choix de variantes dans l'ordre suivant : 1) valeur technique de l'offre, 2) budget de réalisation et 3) valeur environnementale de l'offre. Le même classement est proposé par le maître d'œuvre du service technique du Conseil Général.

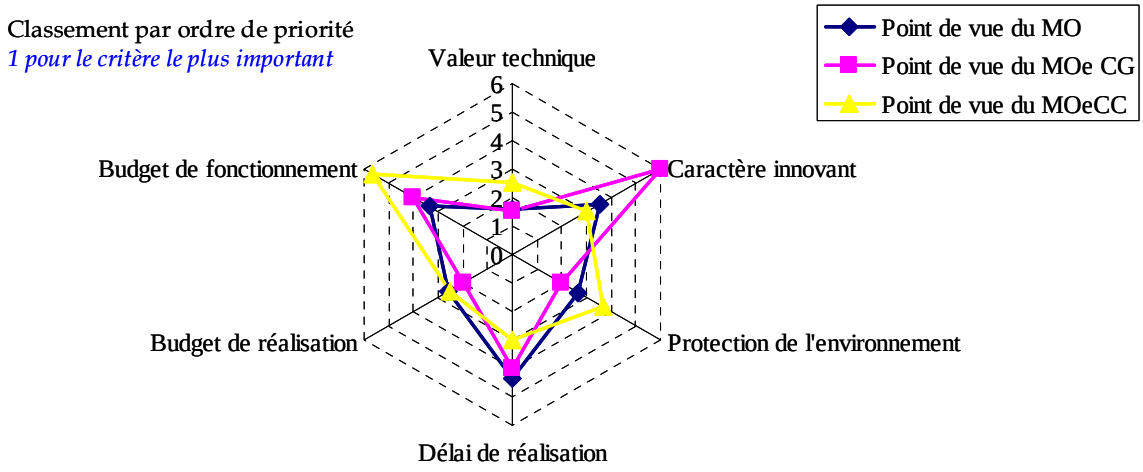


Figure 5 - 4. Critères de jugement des offres - point de vue du maître d'ouvrage et maître d'œuvre publics

Le maître d'œuvre service technique communal considère hormis la valeur technique de l'offre et le budget de réalisation, le caractère innovant et le délai de réalisation, ce qu'on ne retrouve pas pour le maître d'œuvre conseil général et le maître d'ouvrage.

Confrontation du point de vue des acteurs aux critères environnementaux

- Point de vue du maître d'ouvrage

Dans la *Figure 5 - 5*, on considère un critère d'autant plus important qu'il est proche du centre du radar. Lorsque l'on obtient une forme circulaire, cela signifie que l'acteur attribue le même niveau d'importance à l'ensemble des critères, sans en marquer certains comme prioritaires par rapport à d'autres. Le maître d'ouvrage s'exprime au titre de ses partenaires (élus, maître d'oeuvre, entreprise ou riverains) vis – à – vis des préoccupations environnementales fréquemment perçues.

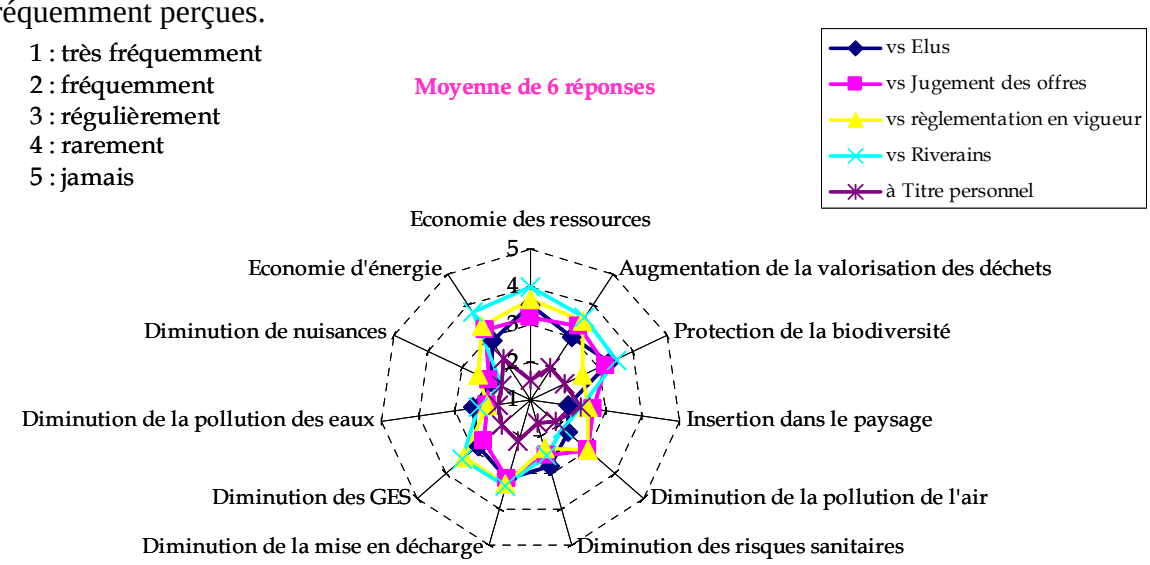


Figure 5 - 5. Point de vue du maître d'ouvrage vis-à-vis de ses partenaires.

On constate avant toute chose que l'écart entre les différents profils d'acteurs n'est pas important. Certaines préoccupations semblent plus fortes que d'autres selon l'acteur considéré. Parmi les considérations environnementales proposées dans le questionnaire, l'insertion dans le paysage, la diminution des nuisances, la pollution des eaux et de l'air semblent faire partie intégrante des préoccupations des élus. Aucune préoccupation n'a été

recensée pour l'économie d'énergie, la valorisation des déchets et la diminution de leur mise en décharge et ce pour l'ensemble des partenaires.

- Point de vue du maître d'œuvre

Différents profils de maître d'œuvre sont obtenus en fonction de la catégorie socioprofessionnelle considérée (Conseil Général, Communauté de communes ou privé).
La *Figure 5 - 6* présente le point de vue des maîtres d'œuvre toutes catégories confondues.

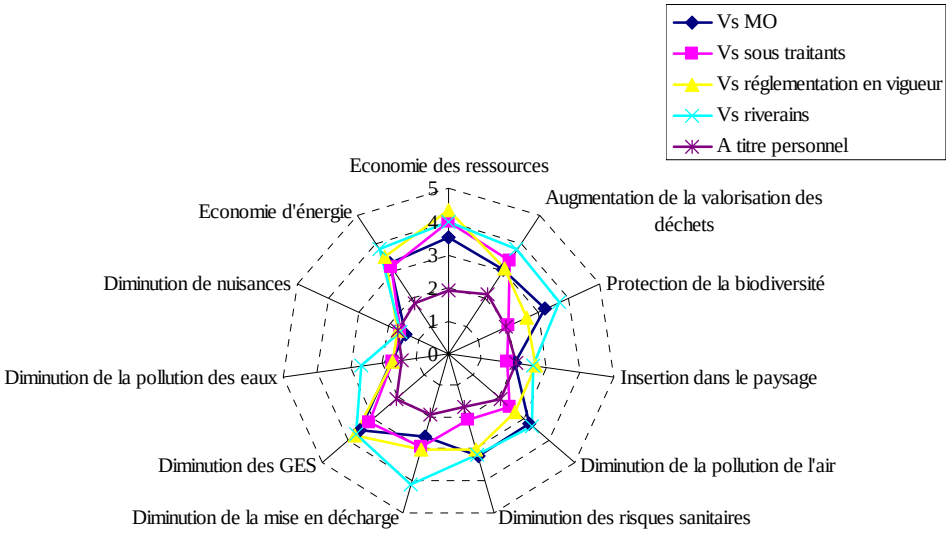


Figure 5 - 6. Point de vue du maître d'œuvre toute catégories socioprofessionnelles confondues.

Pour le maître d'œuvre, le maître d'ouvrage et l'ensemble des partenaires (entreprises routières notamment), ainsi que les riverains trouvent plus judicieux de diminuer les nuisances, la pollution des eaux et de mieux insérer l'ouvrage dans le paysage.

La *Figure 5 - 7* présente le point de vue des maîtres d'œuvre Conseil Généraux.

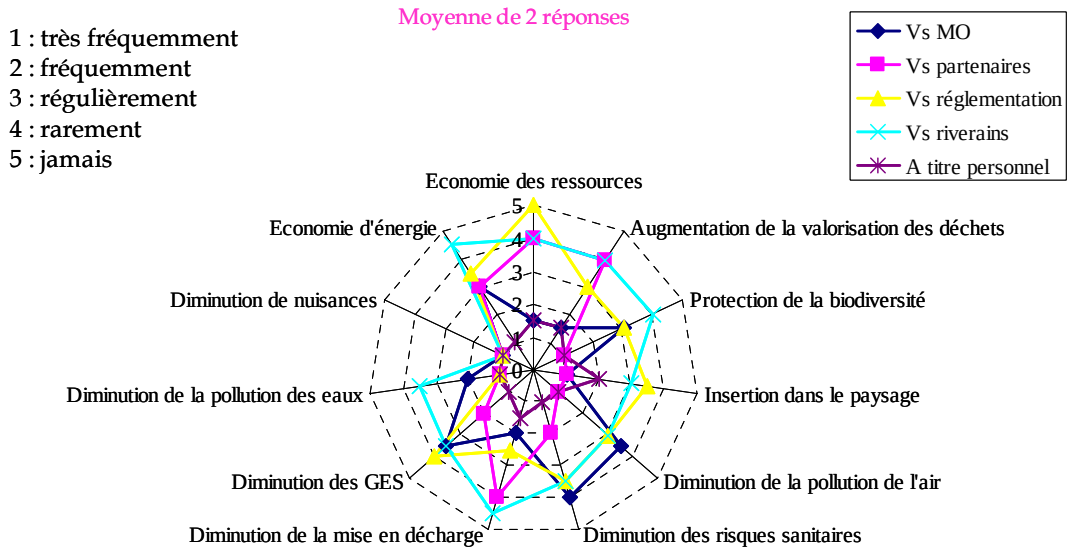


Figure 5 - 7. Point de vue des services techniques de la maîtrise d'œuvre du conseil général

On constate une préoccupation plus répandue vis – à – vis de la protection de la biodiversité, l'insertion dans le paysage, la protection des eaux et la limitation des nuisances.

La *Figure 5 - 8* présente le point de vue des maîtres d'œuvres des services communaux.

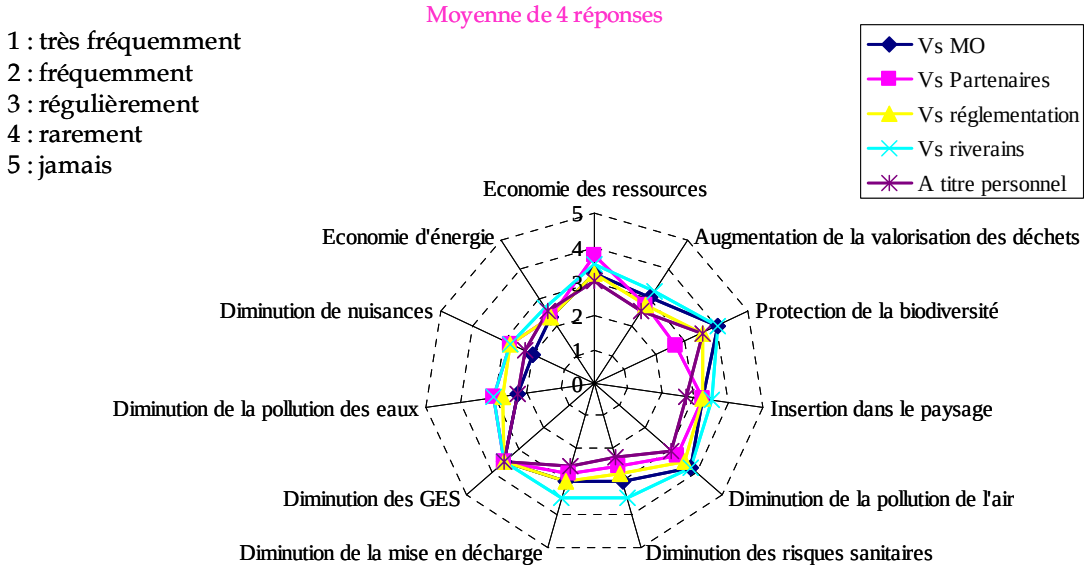


Figure 5 - 8. Point de vue des services techniques de la maîtrise d'œuvre des communautés de communes

On constate une représentation circulaire pour l'ensemble des profils, ce qui signifie que les préoccupations d'ordre environnemental semblent être relevées de façon équivalente par l'ensemble des partenaires.

La *Figure 5 - 9* présente le point de vue des maîtres d'œuvres privés.

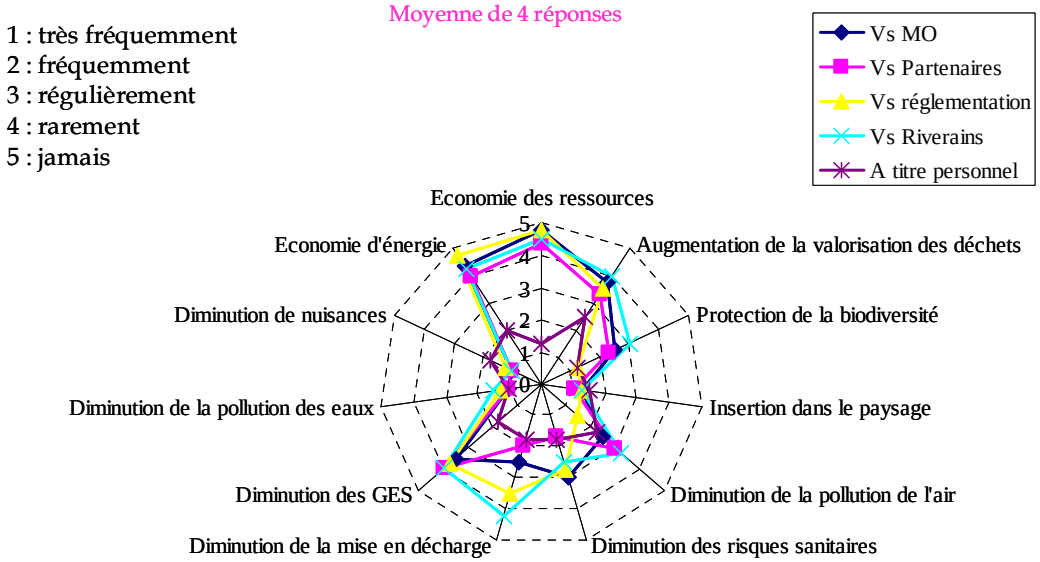


Figure 5 - 9. Point de vue des services techniques de la maîtrise d'œuvre privée.

Les profils sont totalement différents des profils obtenus jusqu'ici. L'accent est mis sur la diminution des nuisances et de la pollution des eaux, ainsi que sur l'insertion paysagère. Par contre, on constate la même tendance concernant l'économie d'énergie et de ressource ainsi que la valorisation des déchets que celle obtenue avec le maître d'œuvre des conseils généraux.

La *Figure 5 - 10* présente le point de vue des entreprises routières vis–à–vis des préoccupations environnementales de leurs partenaires.

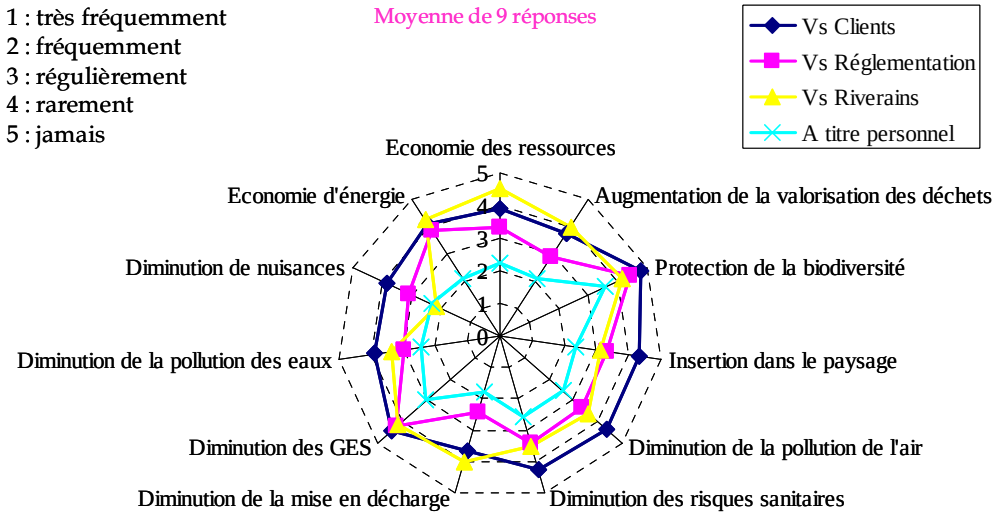


Figure 5 - 10. Point de vue des entreprises routières

Les critères environnementaux proposés dans les questionnaires semblent rarement faire partie intégrante des préoccupations des clients (maître d'ouvrage notamment). La valorisation des déchets est un des critères fréquemment pris en compte au titre des réglementations en vigueur, au-delà de la prise en compte de la pollution de l'air, des eaux et de la diminution des risques sanitaires, de la diminution des nuisances et de l'insertion de l'infrastructure dans le paysage. Quant aux riverains, ils se préoccupent essentiellement des nuisances, selon les dires des entreprises routières.

La *Figure 5 - 11* présente l'interface maîtrise d'ouvrage – entreprises routières vis – à – vis des préoccupations environnementales qui leur sont proposées.

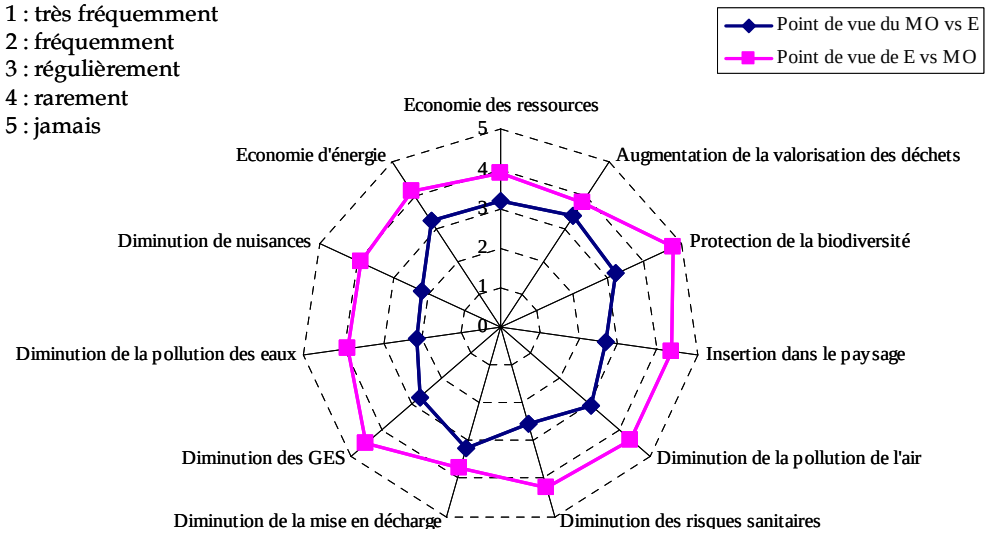


Figure 5 - 11. Point de vue du MO vis- à vis de l'entreprise et vis versa.

Les entreprises routières semblent plus sensibles aux aspects environnementaux du point de vue du maître d'ouvrage que ne le semble le maître d'ouvrage du point de vue de l'entreprise.

La *Figure 5 - 12* présente le point de vue des terrassiers.

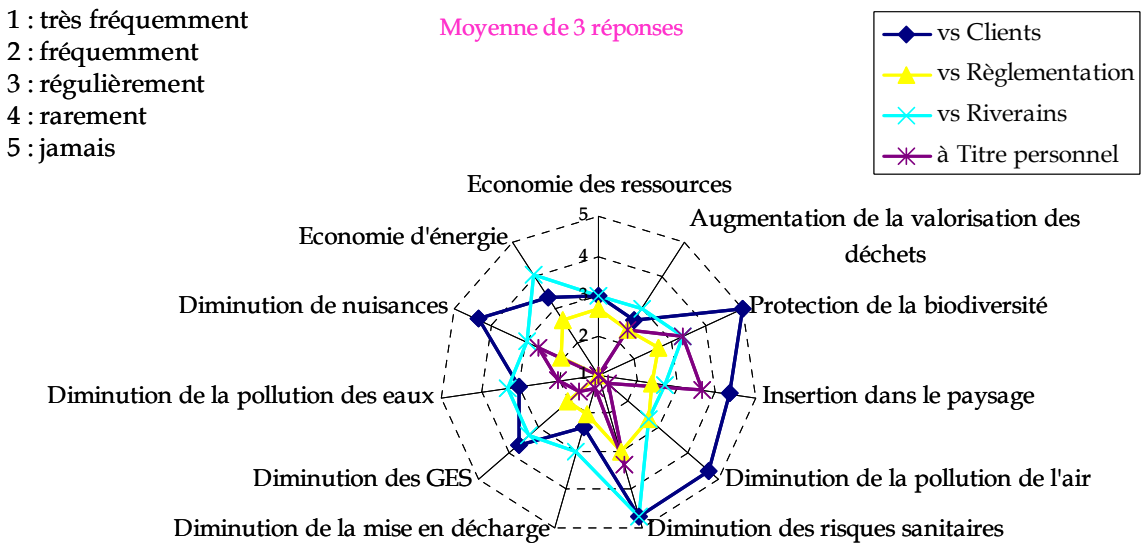


Figure 5 - 12. Point de vue des terrassiers

Le point commun entre les différents partenaires est l'économie de ressource et la valorisation des déchets. La demande (par les clients notamment) semble ne pas prendre en compte du reste des critères environnementaux.

La *Figure 5 - 13* présente le point de vue des fournisseurs de matériaux.

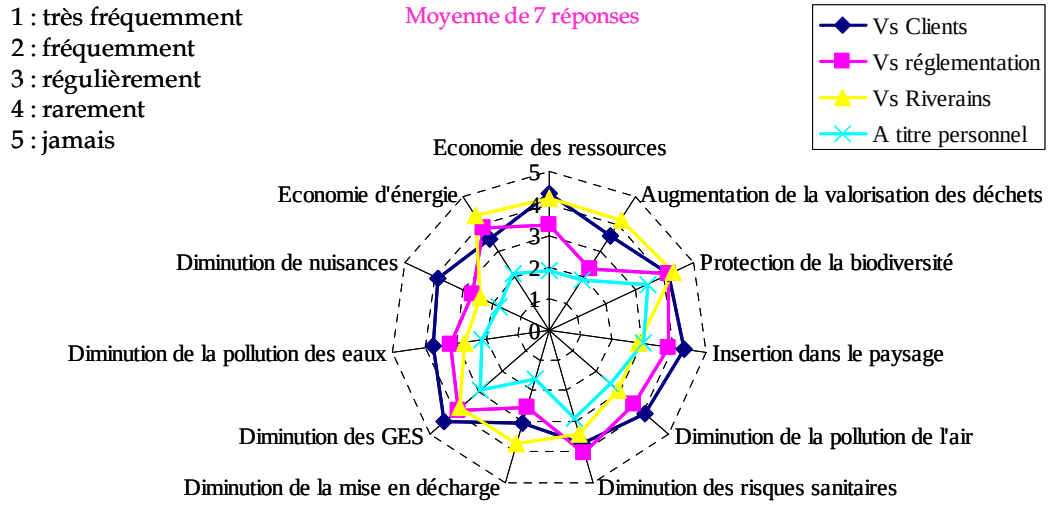


Figure 5 - 13. Point de vue des fournisseurs de matériaux de construction

Les clients (entreprises routières) semblent ne s'intéresser que rarement aux aspects environnementaux proposés dans les questionnaires. Le fournisseur est plus sensible à l'économie de ressource et énergie, aux nuisances et pollution des eaux, ces critères sont fréquemment répandus. Les aspects d'insertion dans le paysage, pollution de l'air, et risques sanitaires sont moins fréquents.

CONCLUSION GENERALE

L'utilisation de matériaux alternatifs dans les infrastructures routières évolue de plus en plus vers un emploi répertorié dans les voiries urbaines du fait de la proximité des gisements. Cette situation provoque une modification dans la profession du fait des nouvelles techniques qui en découlent d'où la nécessité d'intégrer des ressources alternatives aux outils d'évaluation globale et de développer un outil spécifique pour l'urbain.

Le travail de thèse consistait dans ce cadre à élaborer un outil d'aide à la réflexion, basé sur l'évaluation globale de modules routiers (approches spécifiques à l'équipe LCPC dans laquelle j'ai été intégrée) associée à une approche multicritère. L'outil a pour vocation de permettre au maître d'ouvrage d'avoir des éléments sur l'évaluation globale : des procédés de traitement qui sont mis en œuvre pour transformer le déchet initial en granulat ou liant, de transport et de mise en œuvre des matériaux ainsi que des impacts environnementaux liés à leur utilisation selon le territoire considéré. Il s'agit in fine de rechercher avec ce type d'outil des axes d'amélioration des pratiques d'études et des pratiques routières en s'inscrivant le plus objectivement possible dans une perspective de développement durable.

L'implémentation de nouveaux matériaux se fait assez facilement de façon méthodologique. La principale difficulté réside dans les données disponibles : les propriétés mécaniques de dimensionnement ne sont, par définition, jamais présentes dans les catalogues, pour les matériaux alternatifs. A ce titre, les laitiers constituent une exception, car ils sont utilisés depuis plusieurs dizaines d'années et ont fait l'objet de nombreuses expérimentations. Ceci permet de trouver des structures types avec des scénarii d'entretien préétablis issus de bilans des pratiques. Les données environnementales ne sont également pas facilement accessibles. Là encore, les laitiers constituent une exception, car ils sont issus des aciéries. Pour ces industries, regroupées en organisation internationale (ISII) les efforts de communication de données environnementales détaillées, et compatibles avec l'ACV datent de plusieurs années. Ainsi le cas des laitiers était le seul cas de matériau alternatif suffisamment renseigné pour faire l'objet d'une étude dans cette thèse.

Dans le cadre de cette étude, l'analyse proposée du rôle de chacun des acteurs en vue de prendre une décision s'est effectuée à travers un ensemble de critères relatifs au contexte réel, qui permettent d'apprécier diverses alternatives. Ces critères ont été mis en exergue au début du travail, ce qui a conduit à montrer que très peu d'entre eux concernent l'environnement et qu'ils sont majoritairement d'ordre économique. Concernant l'usage de l'outil et ses utilisations potentielles par ces acteurs, nous avons constaté qu'il n'était pas possible de prendre en compte leurs avis dès le début, il a donc été pris à la fin, après le développement des outils interurbains et urbaines et utilisation d'indicateurs environnementaux issus des travaux sur les ACV.

Le choix d'entretien d'une infrastructure routière a été d'abord abordé sous un angle économique. Dans cette optique, le gestionnaire définit des scénarios basés sur des fréquences et des dates d'entretien, d'une même structure. L'utilisation du MRE pour l'évaluation environnementale de solutions financièrement optimisée, n'a pas permis d'obtenir des évaluations environnementales pertinentes, car la sensibilité du modèle économique à terme n'est pas répercutée sur le modèle environnemental. De fait, les résultats environnementaux du MRE dépendent principalement des changements de procédés (donc de matériaux utilisés) ainsi que des masses de ces matériaux. L'optimisation environnementale nécessite ainsi une prise en compte dès l'origine, au niveau du choix des différents scénarios, impliquant notamment différentes structures de chaussées.

Pour le passage des évaluations de flux environnementaux à des évaluations avec indicateurs d'impacts environnementaux, le problème d'affectation des flux de production d'un produit à d'autres co-produits ou déchets (dans notre cas les laitiers), est la question centrale à résoudre. Son influence sur les résultats de l'évaluation est considérable, ce qu'ont montré plusieurs hypothèses et résultats. Le fait de considérer le laitier comme un déchet ou un co-produit donne des résultats totalement inversés comparés à des solutions classiques et indique que dans ce domaine de nombreuses réflexions sont encore nécessaires. Enfin, l'étude de l'incertitude sur les données et de la sensibilité du modèle à ces données a montré une grande dispersion des résultats d'analyse d'inventaire du cycle de vie. Cette dispersion est causée par plusieurs paramètres mais notamment par l'incertitude sur les données unitaires.

N'ayant pas la possibilité d'améliorer ces données dans le cadre de cette thèse, les résultats proposés ne doivent pas être considérés comme des résultats génériques mais comme des valeurs indicatives de cas de référence, nécessitant d'être affinées.

Les modèles ainsi développés au cours de ce travail, offrent la possibilité d'application à des cas réels en interurbain comme en urbain de par la modularité des outils. De ce fait, des développements ultérieurs concernant d'autres matériaux alternatifs peuvent être envisagés.

REFERENCES

Publication et rapports

Aggregate industries, 2002. *Sustainability Report 2002.* Rapport annuel publié par Aggregate Industries, 35 p.

Aggregate industries, 2003. *Sustainability Report 2003.* Rapport annuel publié par Aggregate Industries, 35 p.

Altenstedt J., Pleijel K., 2000. An *alternative approach to Photochemical Ozone Creation Potentials Applied under European Conditions.* Journal of Air and Waste Management Association, Vol. 50, pp. 1023-1036.

Balay J. M., Berga P., Bonvalot F., Bonnet G., 2004. *Dimensionnement des structures des chaussées urbaines*. Méthodologie de conception d'un catalogue adapté au contexte local. In CERTU, 58 p.

Badische Stahlwerke GmbH (BSW), 2005. *Environmental declaration 2005*. 51 p.

Birgisdottir H., 2005. *Life cycle assessment model for road construction and use of residues from waste incineration*. Ph.D. thesis. Institute of environment and resources. Technical university of Denmark. 45 p.

Bloch B. M., 2005 a. *Marchés publics de travaux. Procédures de passation. Contenu.* Les techniques de l'ingénieur. C71 1 – 16.

Bloch B. M., 2005 b. *Marchés publics de travaux. Exécution. Contentieux et responsabilités.* Les techniques de l'ingénieur. C72 1 – 20.

Blomberg, T., Boussad, N., Coronado, J., De Jonghe, T., Ekström, L.G., Herment, R., Holtken, G., Lecouls, H., Muller, A., Thomas, M. and Watkins, S., 1999. *Partial life cycle inventory or "eco-profile" for paving grade bitumen.* In : European Bitumen Association (In.), Brussels, Belgium. Eurobitume report 99/007, 16p.

Brillet F., Jullien A., Sayagh S., 2006. *Assessment of consumptions and emissions during pavement lifetime.* Proceedings of Int. conference TRA, 12-15 june, Gotteborg, 2006, 6 p.

Brodhag C., Breuil F., Gondran N., Ossama F., 2004. *Dictionnaire du développement durable*. In AFNOR – 283 p.

Burteaux M., 1993. *Laitiers de haut fourneau*. Les techniques de l'Ingénieur – traité matériaux métalliques. M 7 425 1 – 10.

Canadian Steel Producers Association, 1999. *Progress Report on the Environment*, 25 p.

Canadian Steel Producers Association, 2000. *Progress Report on the Environment*, 8 p.

Canadian Steel Producers Association, 2001. *Progress Report on the Environment*, 8 p.

CERTU/SETRA, 1998. *Projets routiers urbains. Les études d'environnement dans les projets routiers. Guide méthodologique*. 191 p.

CFTR, 2003. *Retraitement en place à froid des anciennes chaussées. Guide technique*. In SETRA, 96 p.

CFTR (a), 2004. *Retraitement des chaussées et recyclage des matériaux bitumineux de chaussées. Guide technique*. In SETRA, 32 p.

CFTR (b), 2004. *Thermorecyclage*. *Guide technique*. In SETRA, 31 p.

Chappat M. et Bilal J., 2003. *La route écologique du futur. Consommation d'énergie & émission de gaz à effet de serre*. Rapport de COLAS, 40 p.

Château L., 2007. *Environmental acceptability of beneficial use of waste as construction material – state of knowledge, current practices and future developments in Europe and in France*. Journal of hazardous materials B139 (2007) 556 – 562.

Commission du Matériel de la FNTP, 2000. *Répertoire des principaux matériels de génie civil*. Catalogue proposé par la Fédération nationale des travaux publiques, pp. 157-237.

Comité français pour les techniques routières, 1995. *Certificats d'aptitude technique des matériels routiers. C.A.T.M. Compacteurs.*

Corté J. F., Goux M. T., Antoine J. P., Babilotte C., De Boissoudy A., Caroff G., Delorme J. L., Desmoulin D., Garnier J. F., Goacolou H., Kobisch R., Marchand J. P., Meunier Y., Michaut J. P., Odéon H., Renault D., Rénié E., Siffert M., 1994. *Conception et dimensionnement des structures de chaussée. Guide technique.* In SETRA/LCPC.

Costilles M., Josso L.M., Oury J.R., Abignoli C., 1999. *Le dimensionnement géométrique*. Fascicule n° 3 du guide pratique de la voirie urbaine. Revue Générale des Routes et des Aérodromes. 15 p.

Domas J., Château L., Pepin G., 2003. The French innovative methodology for determining the acceptability of waste in public works. Fifth International Conference on the environmental and technical implications of construction with alternative materials. Proceedings of the international conference WASCON 03, San Sebastian, Spain, 4 – 6 june 2003.

Dynapac, 2004. http://www.dynapac.com/index_main.asp. Consulté en 2004.

Eikelboom R.T., Ruwiel E., Goumans J.J.J.M., 2001. The building materials decree: an example of a Dutch regulation based on the potential impact of materials on the environment. Waste management 21 (3) : 295-302.

EPA, 2000. *Framework for Responsible Environmental Decision-Making (FRED): Using Life Cycle Assessment to Evaluate Preferability of Products.* EPA report n° 600/R-00/095.

Finnveden G., 1994. *Methods for describing and characterising resource depletion in the context of LCA.* Stockholm, Suède. Rapport IVL n°B1141. 37p.

François D., 2005. *Methodology for assessing alternative materials for road construction. SAMARIS*, document number : SAM_03_DE16 v 02.

François D., Jullien A., Kerzrého J.P., Vernus E., Legret M., Balay J.M., Château L., 2005. *Retour d'expérience sur le comportement mécanique et environnemental d'ouvrages et de plots routiers instrumentés*. Rapport final CAREX, convention ADEME 0372C0006, le 23 novembre 2005, 440 pages.

Freitas N., Lepert P., Renault D, 1998. *L'entretien des routes: Aide à la gestion de l'entretien des réseaux routiers avec la gamme GiRR*, Revue Générale des Routes et Aérodrommes n°765. pp.24-26.

Gallenne M. L., Goyon V., Bauer J., Ganga Y., Morel G., Renault D., Valeux J. C., Van Grevenynghe P., 2001. *Compactages des enrobés hydrocarbonés à chaud.* Guide technique. LCPC Paris, 77 p.

Gallenne M. L., Bauer J., Cougouil G., Duros J. C., Jule D., Valeux J. C., Guieysse B., 2002. *L'emploi des finisseurs*. Rapport d'étude de LCPC. 72 p.

Girardot R., 1994. *Economie des ressources naturelles*. Route, innovation, environnement. Journées techniques de la route, colloque professionnel 6 et 7 avril 1994. paris, 2 p.

Glavind M., Haugaard M., . Survey of environmental aspects of the Danish concrete industry. DTI Concrete Centre.13 p.

Goedkoop M., 1996. *The Eco-indicator 95 : Methodology report*.

Gomaco, 2004. *New Generation GHP-2800. Slipform Paver Specifications.* Disponible sur: http://www.gomaco.com/Resources/newgenghp2800specs.html, consulté : 10/2004.

Gomes L.F.A.M., Lima M.M.P.M., 1991. *TODIM : basic and application to multicriteria ranking of projects with environmental impacts*. Foundations of computing and decision sciences 16, pp. 113-127.

Groupe Ciment St-Laurent, 2003. *Une question de respect. Rapport sur le développement durable*, Report of Groupe Ciment St-Laurent, 30 p.

Hartlén J., Fällman A.M., Back P.E, Jones C., 1999. Principles for risk assessment of secondary materials in civil engineering work : AFN, Naturvardsverket. AFR-report 250.

HDMGlobal, 2007. The Highway Development and Management System - HDM-4; Site http://www.hdmglobal.com

HELIO-France, 2002. *Contribution de l'énergie à l'éco-développement en France*. Rapports 2002 pour l'Observatoire de Viabilité Energétique, Paris, 2002, pp.1-3.

Hoang T., 2005. *Tronçons autoroutiers : une méthodologie de modélisation environnementale et économique pour différents scénarios de construction et d'entretien*. Thèse du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, école doctorale MTGC – Ecole Centrale Nantes. 206 p.

Huijbregts et al., 2000. *Priority assessment of toxic substances in life cycle assessment Part I : Calculation of toxicity potentials for 181 substances with the nested multimedia fate exposure and effects model* USES-LCA, Chemosphere Vol. 41, pp 541-573, 2000.

Huppes G., 1991. *Allocating impacts of multiple economic processes in LCA*. Proceedings of SETACEurope workshop on Environmental Life Cycle Assessment of products. CML, Leiden, 2-3 dec 1991.Bruxelles, Belgique : SETAC-Europe, 1991, p.57-70.

IFEN, 1996. *L'air. L'environnement en Languedoc-Roussillon*. Pp 47 – 52.

Imtiaz A., 1993. *Use of Waste Materials in Highway Construction*. Federal Highway Administration, Report No. FHWA/IN/JHRP-91/3, Washington, DC. 112 p.

Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie, 2001. *Glossaire pour le développement durable*. 88 p.

International Iron and Steel Institute, 2002. *World steel life cycle inventory*. Methodology report 1999/2000. Committee on environmental affairs Brussels, October 2002. 90 p.

Jeanneaux P. et Kirat T., 2005. *Observer les conflits d'usage : que nous apprend le contentieux judiciaire et administratif sur le développement des régions ?* Symposium international Territoire et enjeux du développement régional. Lyon 9 – 11 mars 2005, 17 p.

Jiménez-Gonzalez C, Overcash, 2000. *Life cycle inventory of refinery products : review and comparison of commercially available databases*. Environ. Sci. Technol. 2000, 34, 4789-4796, 8 p.

Joerin F., 1998. *Décider sur le territoire: proposition d'une approche par utilisation de SIG et de méthodes d'analyse multicritère*. Thèse de doctorat n° 1755. Département de Génie Rural, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1998.

Jullien A., François D., 2006. *Soil indicators for road environmental effects assessment.* Resources, conservation and recycling, Vol 48, pp101-124, 2006.

Jullien A., Monéron P., Ventura A., Legret M., Demare D., de la Roche C., Schemid M., Lachet C., Gaillard D., Oudin J., Jacques J.-P., Odie L., Meriel B., Boittin R., Cabannes H., Jumontier P., Seytre S., Lacoste K., Wendling L., Bernard M., 2006. Analyse de Cycle de Vie appliquée à un chantier d'entretien routier sur la RN 76 - Evaluation technique et environnementale d'une couche de liaison d'enrobé bitumineux pour différents taux de recyclage, In LCPC. Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 232 p.

Khalifa K., 2000. *Méthode d'évaluation des impacts.* Techniques de l'Ingénieur, traité Environnement, G 5 615.

Lac C., Fourcy P., 2001. *Intérêt, enjeux et bilans des installations de maturation et élaboration des mâchefers*. Colloque MIOM 2001, actes, Orléans, 16-18 octobre 2001, BRGM.

Lacour S., Ventura A., Rangod N., Jullien A., Anquez A., 2006. *How to estimate roadworks emissions factors from traffic and air quality monitoring measurements - A methodological approach*. 2nde Conference of Environnement & Transports incl. 15th Colloque on Transports and Air Pollution, Reims, France, 12-14 juin 2006, 8 p.

Lafarge, 2004. *Our environmental commitment Performance & objectives.* Rapport publié par Lafarge Cement, disponible sur : http://www.cement.bluecircle.co.uk/env_per.htm#, Consulté :03/2004.

Laurent G., 2004. *Evaluation économique comparée entre les chaussées en béton et classiques sur le réseau national, concédé ou non,* Etudes et recherches de recherche de LCPC, 83 p.

Lepert P., 1996. *Outil d'aide à la programmation de l'entretien. GiRR: Premières applications en site pilote*. Revue Générale des Routes et Aérodrommes n°744.

Lepert P., Goux M.T., 1994. Evaluation du réseau français de routes nationales basé sur le relevé de dégradations de surface. *4ième Congrès International de la Route,* Rabbat, 1994.

LCPC, 1974. *Assises traitées aux liants hydrauliques en assises de chaussées. Nouvelles méthodes d'étude en laboratoire des propriétés mécaniques des matériaux d'assises traitées aux liants hydrauliques*. Journées d'information.

LCPC/SETRA, 1997. *Chaussée en béton. Guide technique*. LCPC-SETRA, 110 p. et annexes

Lidelöw S., Lagerkvist A., 2004. *Environmental assessment of secondary construction materials*. Literature review. Technical reprot 2004:21. Lulea° universtiy of technology, ISSN 1402-1528.

Lundström K., 1998. *Influence des chaussées en béton et asphalte sur le milieu*. 8th International Symposium on Concrete Road, 13-16, Lisbon-Portugal. Theme V: Safety and Environment, 195 – 202.

Marchet J. C. et Siskos J., 1979. *Aide à la décision en matière d'environnement : application au choix de tracé autoroutier*. Université Paris-Dauphine, Cahier du LAMSADE n°23. 43 p.

Martaud T., Jullien A., Deneele D., Proust C., Lédée V., 2007. *Ressource en granulats : une démarche pour la prise en compte d'indicateurs de développement durable*. AFGC, 21 et 22 mars 2007. Paris, 9 p.

Martin C , Legret M , Raimbault G., 2004. *Developing a Multi-Criteria Analysis for Storm-Water Management Decision Aid in Urban Areas.* Third World Wide Workshop for Young Environmental Scientists, Vitry-sur-Seine, France.

Maystre L. Y., Pictet J., Simos J., 1994. *Méthodes multicritères ELECTRE, description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*. Presses polytechniques et universitaires romandes 323 p.

Ministère de l'équipement, du logement, de l'aménagement du territoire et des transports (MELAT), Centre d'études des transports urbains (CETUR), Association des ingénieurs des villes de France (AIVF), 1988. *Voirie urbaine : Guide général de la voirie urbaine : conception, aménagement, exploitation*. In MELAT 197 p.

Ministère de l'Equipement, du Logement, des Transports et du Tourisme (MELTT) et l'Observatoire National de la Route (ONR), 1996. *Dictionnaire de l'entretien routier, volumes 1- 2- 3*, 210 p.

Mladineo N., Lozic I., Stosic P., Mlinaric D., Radica T., 1992. *An evaluation of multicriteria analysis for DSS in public policy decision.* European journal of operational research 61, pp. 219-229.

MRI, 1994. *Emision factor documentation for AP-42, section 11 15. Lime Manufacturing., Final Report*. EPA contract 68-D2-0159. Work assignment No. I-01. MRI (Midwest Research Institute) projct No, 4601-01, 63 p. and appendix.

Mroueh U. M., Mäkela E. and Wahlström M., 2000. By-products in earth construction. Assessment of acceptability. VTT chemical technology. 52 p.

Mroueh U. M., Eskola P., Laine-Ylijoki, 2001. *Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth constructions*. Waste Management 21 271-277.

Mroueh U. M. and Wahlström M., 2002. *By-products and recycled materials in earth construction in Finland – an assessment of applicability*. Resources, conservation and recycling 35 117 – 129.

Nippon Steel (2002) Environmental Annual Report, 41p.

Nordkalk, 1998. *Environment report.* Rapport de Nordkalk, 8 p., disponible sur le site: http://www.nordkalk.com/servlet/collectionServlet ? page_id=92&view=0&expand_tree=101, consulté le 23 dec. 2004.

Nouvion S., Jullien A., Bruncher P., 2005. *Modélisation environnementale de l'élaboration de granulats de laitiers de la Société lorraine d'agrégats (Slag).* Revue Générale des Routes, N°840, juin 2005, 86-91.

Observatoire français du recyclage en infrastructures routières (OFRIR) : http://ofrir.lcpc.fr consulté en 2005.

OCDE, 1977. *Utilisation des déchets et sous-produits en technique routière,* 174 p.

OCDE, 1997. *Stratégies de recyclage dans les travaux routiers,* 145 p.

Park K., Hwang Y., Seo S., Seo H., 2003. *Quantitative assessment of environmental impacts on life cycle of highways*. Journal of construction engineering and management January/February 2003. pp 25 – 31.

Pereira A., Blanc I et Coste J. F., 1997. *La consommation énergétique globale des infrastructures autoroutières. Contribution à l'analyse de cycle de vie*. BLPC 210 Réf 4137. 95-104.

Peuportier B., 2003. *Analyse de vie d'un kilomètre de route et comparaison de six variants.*, Rapport de Centre d'Energétique de l'Ecole de Mines de Paris pour CIM béton, 48 p.

Peyronne C., Caroff G., 1984. *Dimensionnement des chaussées.* Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pages 157-170.

Pontarollo G., Smith T., 2001. *A life-Cycle Analysis Of the Environmental Impacts of Asphalt and Concrete Road.* Paris 2001 IRF World Road Congress.

Postlethwaite D., 1994. *Allocation in LCA, fundamental issues*. Proceedings of the European workshop on allocation in LCA. Leiden, Pays-Bas, fev 1994, Huppes G. & Schneider F.(Eds), Leiden : CML, Bruxelles : SETAC, 1994, p.13-14.

Prandi E., 1965. *Traitement au laitier granulé des matériaux routiers*. BL des LRPC. Pp 73-119.

Renault D., Menault F., Leroux S., 1995. Méthodes d'évaluation et de suivi et simulation de politiques d'entretien des chaussées sur le réseau routier national français, *20ième Congrès Mondial de la Route*, Montréal, 1995 .

Roth L., Eklund M., 2003. Environmental evaluation of reuse of by-products as road construction materials in Sweden. Waste management 23 (2) : 107-116.

Rouwette R.R.J.H., Schuurmans A., 2001. *LCA concrete motoway pavement.* Final report for critical review IN 01/18, Belgique, 43 p.

Roy B., 1985. *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Collection Gestion, Série « production et techniques quantitatives appliquées à la gestion ». Economica, Paris, 1985.

Roy B., Bouyssou D., 1993. *Aide multicritère à la décision : Méthodes et cas*. Edition Economica, 695 p.

Schärlig A., 1985. *Décider sur plusieurs critères, panorama de l'aide à la décision multicritère*, Presses polytechniques universitaires romandes, Lausanne, 1985, 304 p.

Schneider F., Chevalier J., Navarro A. 1998. *Analyse de cycle de vie, problème d'affectation,* Edition Techniques de l'Ingénieur, 16 p.

SCOPE (Scientific Committee On Problems of the Environment), 1997. *Sustainability indicators. Report of the project on indicators of sustainable dévelopment.* Edited by Bedrich Moldan and Suzanne Billharz, 262 p.

SETRA, 2000. *Note d'information I.Q.R.N. Images qualité du réseau routier national*, 8 p.

SETRA/LCPC, 1982. *Guide pratique du compactage des assises de chaussées traitées aux liants hydrauliques ou non traitées*, 31 p.

SETRA/LCPC, 1998. *Réseau routier national. Catalogue des structures types de chaussées neuves.* Guide technique SETRA/LCPC.

SETRA/LCPC, 2000. *Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme*. (GTR) Guide Technique D 9233, juillet 2000, 2 ème édition, 99 p.

SETRA/LCPC, 2000. Aide à la gestion de l'entretien des réseaux routiers. Volet chaussées, 66 p.

SETRA, 2001. SETRA, METL, CERTU, ADEME, Annexe technique à la note méthodologique sur les études d'environnement dans les projets routiers « volet air », juin 2001.

Siskos J., Assimakopoulos N., 1989. *Multicriteria highway planning : a case study*. Mathematical and computer modelling 12, pp. 1401-1410.

Stripple H., 2000. *Life cycle inventory of asphalt pavements*. Rapport IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd., Gothenburg, 70 p. et annexe.

Stripple H., 2001**.** *Life cycle assessment of road. A pilot study for inventory analysis.*, Rapport IVL Swedish Environmental Research Institute, 96 p.

Struct-Urb version 2.0. *Aide au Dimensionnement des Structures de Chaussées Urbaines*. CERTU, Date de Publication 09/02/2006.

Stubbles J., 2000. *Energy use in the U.S. steel industry : an historical perspective and future opportunities.* Report of U.S Department of Energy-Office of Industrial Technologies Washington DC, 58 p.

Taiheiyo Cement Corporation, 2003. *Annual Environmental Report*, 18 p.

Thibault M., 1965. *Situation actuelle de la production, du traitement et du transport des laitiers utilisés en construction routière*. BL des LRPC. Pp 31-51.

Tille M., 2000. *Choix de variantes d'infrastructures routières : méthodes multicritères*, thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 388 p.

Tukker, A., Kleijn R., 1996. *Tentative LCA-normalisation data for Sweden*, TNO/CML, report 96/49, Apeldoorn, the Netherlands (300 p.). Critical Review by L-G. Lindfors, prof. R.U. Ayres and prof. W. Klöpffer.

Vares S., Häkkinen T., . *Environmental burdens of concrete and concrete products*. Technical Research centre of Finland, VTT Building Technology, 15 p.

UNPG, 2004. L*e marché des granulats en 2004*. 2 p.

Ventura A., Mazri C., Monéron P., Guidoux Y., Schemid M., 2004**.** *Comparaison environnementale de couches de liaison de chaussée recyclées à différents taux par la méthode d'analyse de cycle de vie.*, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 250-251, ref. 4527, p. 93-113.

Vernier K., 1998. Fonctions de survie et méthode des M-estimateurs : application au module *STRATÈGE* du système français de gestion des chaussées *GiRR*. Agora Jules Dupuit - Publication AJD-56. Centre de recherche sur les transports- Publication CRT-98-58 Novembre 1998. Révisée le 26 janvier 1999 et le 27 août 2002.

Von Bahr B., Hanssen O.J., Vold M., Pott G., Stoltenberg-Hansson E., Steen B., 2003. *Experiences of environmental performance evaluation in the cement industry. Data quality of environmental performance indicators as a limiting factor for Benchmarking and Rating*. Journal of Cleaner Production 11, 2003, 713-725. 13 p.

Textes et Normes

Arrêté du 16 juillet 1991 *relatif à l'élimination des sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse*. J.O. du 2 octobre 1991.

Cahier des clauses administratives générales *applicables aux marchés publics de prestations intellectuelles.* J.O. 1991.

Circulaire DPPR/SEI/BPSIED n° 94-IV-1 du 9 mai 1994 *relative à l'élimination des mâchefers d'incinération des résidus urbains.*

Code de la construction et de l'habitation. Consulté en septembre 2006 sur www.legifrance.gouv.fr

Code de l'Environnement. J.O. 2004.

Code des Marchés publics. J.O. 2004.

Code de l'Urbanisme. Consulté en septembre 2006 sur www.legifrance.gouv.fr

Décret n° 77- 1133 du 21 septembre 1977 pris pour l'application de la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement. J.O. du 8 octobre 1977.

Directive du Conseil n° 75/442/CEE du 15 juillet 1975 *relative aux déchets.* JOCE n° L 194 du 25 juillet 1975.

Directive du Conseil n° 85/337/CEE du 27 juin 1985 *concernant l'évaluation des incidences de certains projets publics et privés sur l'environnement.* JOCE n° L 175 du 5 juillet 1985.

Directive n° 96/82/CE du Conseil du 9 décembre 1996 *concernant la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses* dites SEVESO

Loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 *relative aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement.*

Loi n° 82-1153 du 30 décembre 1982. *Loi d'Orientation sur les Transports Intérieurs.* LOTI

Loi n° 83-630 du 12 juillet 1983. *Loi Bouchardeau relative à la démocratisation des enquêtes publiques et à la protection de l'environnement.*

Loi n° 85-704 du 12 juillet 1985. *Loi MOP relative à la Maîtrise d'Ouvrage Publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée.*

Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992. *Loi sur l'eau.*

Loi n° 92-646 du 13 juillet 1992, *relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement*.

Loi n° 2000-1208 du 13 décembre 2000 *relative à la Solidarité* et au *Renouvellement Urbain.* SRU.

Loi n° 2002-276 du 27 février 2002. Article L110-1 *relatif à la démocratie de proximité.*

Missions Interministérielle pour la Qualité des Constructions Publiques (MIQCP) 1994. mise à jour 30 juin 2000. *Guide à l'intention des maîtres d'ouvrage publics pour la négociation des rémunérations de maîtrise d'œuvre*. *Loi MOP éditions des journaux officiels*. 132 p.

MIQCP, 1998. *Infrastructure de transport : la maîtrise d'œuvre* - 60 p.

MIQCP, 2005. *Mission d'assistance à décideur et maître d'ouvrage. Terminologie et repères de pratiques* – 40 p.

MIQCP, 2006. *Guide des maîtres d'ouvrages publics* - 100 p.

Ordonnance n° 2004-489 du 3 juin 2004 portant transposition de la directive 2001/42/CE du Parlement européen et du Conseil du 27 juin 2001 *relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement.* J.O. 2004.

AFNOR NF P 98-106, 1991. *Assises de chaussées, Laitiers de haut-fourneau vitrifiés (granulés ou bouletés), Définitions, caractéristiques et spécifications* , 8 p. Annulé en février 2005 et remplacé par NF EN P 98-887-2.

AFNOR NF P 98-115, 1992. *Assises de chaussées - Exécution des corps de chaussées - Constituants - Composition des mélanges et formulation - Exécution et contrôle, 89 p. Remplacé partiellement par NF P 98-105.*

AFNOR NF P 98-150, 1992. *Enrobés hydrocarbonés. Exécution des corps de chaussées, couches de liaison et couches de roulement. Constituants - Composition des mélanges - Exécution et contrôles*. 154 p.

AFNOR NF P 98-170, 1992. *Chaussée en béton de ciment. Exécution et contrôle,*

AFNOR NF P 98-739, 1992. *Matériel de construction et d'entretien des routes - Machines pour l'épandage des gravillons - Banc et méthode d'essai à poste fixe de la mesure du dosage et de la régularité du voile de gravillons*. 16 p.

AFNOR NF P 98 – 113, 1999. *Assises de chaussées, Sables traités aux liants hydrauliques et pouzzolaniques, Définition, Composition, Classification*, 9 p. Annulé en mars 1999. et remplacé par NF P 98-113.

AFNOR NF P 98 – 116, 2000. *Assises de chaussées, Graves traitées aux liants hydrauliquess, Définition, Composition, Classification*, 19 p. Annulé en février 2005 et remplacé par NF EN P98-887-1, NF EN P98-887-2, NF EN P98-887-3, NF EN P98-887-5.

AFNOR NF P 98-335, 2007. *Chaussées urbaines. Mise en œuvre des pavés et dalles en béton, des pavés en terre cuite et des pavés et dalles en pierre naturelle,* 62 p.

AFNOR NF EN 12457-2, 2002. *Caractérisation des déchets, Lixiviation – Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues*, 35 p. Remplace la norme XP X 31-210 de 1998, annulé le 20/12/02.

AFNOR NF EN ISO 14040, 1997. *Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre*, 33 p.

AFNOR XP P 18 540, 1997. *Granulats – Définitions, conformité, spécifications*, 36 p. Annulé en juin 2005 et remplacer par NF EN P18-242, NF EN P18-601, NF EN P18-602, XP P18-545.

AFNOR XP ENV 12920, 2006. *Méthodologie pour la détermination du comportement à la lixiviation d'un déchet dans des conditions spécifiées*. 11 p.

AFNOR XP X 31-210, 1998. *Déchets. Essais de lixiviation*, 16 p. Annulé en décembre 2002 par NF EN X30-402-1, NF EN X30-402-2, NF EN X30-402-3, NF EN X30-402-4.

AFNOR XP P 98-135, 2001. *Enrobés hydrocarbonés. Caractérisation des agrégats d'enrobés pour recyclage à chaud en centrale*. 10 p.

AFNOR NF EN 13 242, 2003. *Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction de chaussées*. 43 p.

AFNOR ISO 14044, 2006. *Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework. Norme* ISO 14 044.

ANNEXES

ANNEXE DU CHAPITRE 2

Cette annexe fait référence à un certain nombre de normes qui sont citées pour mémoire et dont la liste n'est pas fournie dans les références.

1. DEFINITIONS UTILES A LA LECTURE DU CHAPITRE 2

Acteur
«Entité active et autonome qui connaît un certain nombre d'autres acteurs et qui suit un comportement propre défini par un ensemble de procédure» (Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie, 2001).

« Un individu ou un groupe d'individus est un acteur d'un processus de décision si, par son système de valeurs, que ce soit au premier degré du fait des intentions de cet individu ou groupe d'individus ou au second degré par la manière dont il fait intervenir ceux d'autres individus, il influence directement ou indirectement la décision. De plus, pour qu'un groupe d'individus (corps constitué ou collectivité) soit identifié comme un seul et même acteur, il faut que, relativement au processus, les systèmes de valeurs, systèmes informationnels et réseaux relationnels des divers membres du groupe n'aient pas à être différenciés» (Roy, 1985)

Cible environnementale
Exigence de la performance détaillée, quantifiée si cela est possible, pouvant s'appliquer à l'ensemble ou à une partie de l'organisme, qui résulte des objectifs environnementaux et qui doit être fixée et réalisée pour atteindre ces objectifs.

Collectivité locale/territoriale
Circonscription administrative ayant la personnalité morale de droit public et l'autonomie financière, elle s'administre librement par un conseil élu (depuis l'avènement des lois de décentralisation). Il s'agit des communes, des départements, des régions (depuis 1986) et des collectivités territoriales (corse, mayotte, st pierre et miquelon)

Coproduit
L'un quelconque de deux produits ou plus issus du même procédé élémentaire (NF P 01-010). Toute substance ou matière, générée au cours d'une étape industrielle et valorisée, est considérée comme étant un co-produit (ISO 14041)

Coûts externes
Du point de vue de l'environnement, coûts que des parties externes à l'entité doivent tôt ou tard engager par suite des impacts des activités, produits et services de celle ci sur l'environnement; un coût environnemental externé correspond à la valeur monétaire attribuée à la diminution d'un avantage ou à un préjudice subi par la société à cause d'une détérioration de la qualité de l'environnement qui n'a pas été prise en considération dans une opération de marché. (En général, les coûts externés vont au-delà des coûts rattachés aux questions environnementales.)

Coûts sociaux
La somme du total des coûts internes et externes

Critère
Caractère, principe qui permet de distinguer une chose d'une autre, d'émettre un jugement, une estimation (Le Petit Larousse).

Eléments en fonction desquels une décision doit être prise (Agora 21, 2001)

Un critère vise à résumer à l'aide d'une fonction les évaluations d'une action sur diverses dimensions pouvant se rattacher à un même axe de signification. (Roy et Bouyssou, 1993)

Expression qualitative ou quantitative de points de vue, objectifs, aptitudes ou contraintes relatives au contexte réel, permettant de juger des personnes, des objets ou des événements. Pour qu'une telle expression puisse devenir un critère, elle doit être utile pour le problème considéré et fiable. Un critère est doté d'une structure de préférence ; à chaque critère est associée une échelle, en valeurs ordinales ou cardinales

Emission
Le rejet direct ou indirect, à partir de sources ponctuelles ou diffuses de substances, de vibrations, de chaleur ou de bruit d'une installation dans l'air, l'eau ou le sol;
Dans le contexte de la Convention sur les Changements Climatiques : « On entend par émissions la libération de gaz à effet de serre ou de précurseurs de tels gaz dans l'atmosphère au-dessus d'une zone et au cours d'une période donnée ». (Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, http://www.agora21.org/cccc/index.html)

Enquête publique
Enquête qui a pour objet d'informer le public et de recueillir ses appréciations, suggestions et contre-propositions, postérieurement à l'étude d'impact lorsque celle-ci est requise, afin de permettre à l'autorité compétente de disposer de tous éléments nécessaires à son information. (Loi n° 83-630 du 12 juillet 1983 relative à la démocratisation des enquêtes publiques et à la protection de l'environnement, J.O. du 13 juillet 1983)

Entretien
méthode de recueil des informations par l'échange avec une ou plusieurs personnes, structuré de façon plus ou moins directive selon les thèmes, accompagné de relance visant à nourrir, à susciter, à motiver l'expression

Etude d'impact sur l'environnement (EIE)
L'étude d'impact sur l'environnement est un processus systématique d'identification, de prévision, d'évaluation et de réduction des effets physiques, écologiques, esthétiques, sociaux et culturels d'un grand projet pouvant affecter sensiblement l'environnement. Elle s'effectue avant toute prise de décision ou d'engagement important.

Evaluation des impacts sur l'environnement
Procédure qui permet d'examiner les conséquences, tant bénéfiques que néfastes, qu'un projet ou programme de développement envisagé aura sur l'environnement et de s'assurer que ces conséquences sont dûment prises en compte dans la conception du projet ou programme.

Interactif(ve)
Se dit de phénomènes qui réagissent les uns sur les autres

Participation du public
La participation du public est l'association en tant que partie prenante du public à un processus. On peut distinguer huit principaux procédés d'association du public, classés du moins participatif au plus participatif. Les trois premiers utilisés seuls ne conduisent pas à une véritable participation du public
· Information : action de donner (unilatéralement) des renseignements
· Consultation : action de solliciter un avis
· Concertation : action d'échanger des avis (préétablis) et de rechercher un compromis
· Dialogue : action d'échanger mutuellement et équitablement des points de vue et propositions
· Implication : action de s'engager dans un processus ou d'y engager sa responsabilité
Les trois derniers génèrent un véritable processus intégré de participation,

· Participation : action de s'associer activement à un processus,
· Appropriation : action de faire sien et de s'emparer en tant que partie prenante,
· Adhésion : action de s'allier et de partager totalement les objectifs.

Préférence déclarée
Technique d'évaluation où l'on obtient des estimations monétaires à partir des déclarations hypothétiques que font les individus au sujet de leurs préférences. On fait le plus souvent appel à un questionnaire (méthode de l'évaluation contingente, par exemple)

Risque
Combinaison de la probabilité et de la gravité d'une lésion ou d'une atteinte à la santé pouvant survenir dans une situation dangereuse (norme EN 292-1). Le risque est la quantification, le plus souvent en termes probabilistes, de réalisation d'un effet indésirable lié à une substance intrinsèquement dangereuse en fonction de l'exposition à cette substance.

Scénario
hypothèse d'évolution d'un système, à la lumière de données ou prévisions économiques, technologiques, sociales, environnementales, pouvant affecter son avenir.

Système
(du grec systêma: ensemble) Dans le langage courant, mot pouvant signifier: a) un ensemble de composants matériels, b) un ensemble de concepts ou d'idées, c) un ensemble de méthodes ou de procédés. Dans le contexte systémique, un système peut être défini de la façon la plus générale comme un tout organisé de composants en interaction. (Agora21, 2001). Déterminé à partir de la fonction étudiée, c'est l'ensemble des opérations se rapportant selon les cas à un produit, un service ou une activité et aux frontières desquelles sont recensés les flux apparaissant dans l'inventaire (ISO 14040, 1996).

Systémique ou analyse systémique
Principe basé sur la logique de système qui peut s'apparenter à une science en tant que telle, mais aussi à une méthode, un langage, un état d'esprit, voir même à une philosophie. L'approche systémique décrit cette démarche qui permet de dépasser les limites de la méthodologie cartésienne classique pour aborder les sujets complexes qui lui étaient réfractaires grâce à une vision holistique.

Variante
Les offres des candidats doivent répondre exactement aux exigences de la consultation. Toutefois, il est admis que les candidats aux marchés publics puissent présenter des variantes. Il s'agit, pour eux, de proposer des solutions techniquement plus performantes ou financièrement plus intéressantes que celles des cahiers des charges. Une condition est posée : les variantes ne peuvent qu'accompagner une offre de base.

2. LES MATERIAUX ROUTIERS

2.1. Les granulats

Depuis le 1er juin 2004, les normes européennes granulats sont les seules normes granulats dont la référence dans les marchés publics est obligatoire. A partir de cette même date, le marquage CE des granulats entrant dans le champ de ces normes européennes devient aussi obligatoire. Trois normes européennes d'août 2003 intéressent plus particulièrement le domaine des granulats pour chaussées : NF EN 13242 (granulats pour graves traitées aux liants hydrauliques et graves non traitées), NF EN 13043 (granulats pour enrobés bitumineux et enduits superficiels), NF EN 12620 (granulats pour béton de ciment, y compris les chaussées en béton). Elles définissent des catégories européennes de granulats, déterminées à

partir d'essais européens normalisés. Plusieurs nouveautés modifient sensiblement les habitudes, mais s'avèrent sans incidence technique notable sur les matériaux routiers.
Pour les marchés publics, la référence aux normes européennes granulats est obligatoire. Elle peut être faite, soit directement en retenant les catégories européennes les mieux adaptées à a demande de granulats, soit indirectement en utilisant les codes appropriés de la norme française XP P 18-545.

2.2. Liants hydrauliques et pouzzolaniques

Les liants disponibles sont très divers allant des produits industriels tels que les ciments, liants obtenus à partir de sous-produits industriels comme les laitiers de haut-fourneau et les cendres volantes de houille ou de lignite, matériaux naturels tels que les pouzzolanes aux mélanges préparés à partir de plusieurs des matériaux ci-dessus.

Les usages en technique routière de la plupart de ces matériaux sont codifiés par des normes. On distingue ainsi : 1) les liants formant, par réaction directe avec l'eau, des composés hydratés stables tel les ciments normalisés (NF P 15-301), les cendres hydrauliques, cendres sulfocalciques résidu de combustion de certains lignites (NF P 98-112), les liants spéciaux à usage routier qui sont des produits d'entreprise, non normalisés, dont l'utilisation doit respecter les définitions et compositions données par la norme Grave-liant spécial routier (NF P 98-122). Ils font l'objet d'un avis technique ou d'une procédure d'agrément équivalente. 2) les liants ayant des propriétés hydrauliques qui ne se manifestent qu'en présence d'un activant de prise : laitiers de haut fourneau vitrifiés, granulés ou bouletés (NF P 98-106) le plus souvent prébroyé. 3) les liants ayant des propriétés pouzzolaniques formant par combinaison avec la chaux des composés hydratés stables en présence d'eau tels les cendres volantes silico-alumineuses (NF P98-110), les pouzzolanes (NF P 98-103). Pour le réseau routier national, elles sont données dans les directives et recommandations relatives aux matériaux traités aux liants hydrauliques.

2.3. Liants hydrocarbonés

Les liants hydrocarbonés sont définis et classés par la norme T65-000 qui distingue :
- les bitumes purs (T 65-001),
- les bitumes fluidifiés (T 65-002) issus d'un mélange avec un diluant d'origine pétrolière,
- les bitumes fluxés (T 65-003) additionnés d'une huile d'origine houillère ou pétrolière,
- les bitumes composés (T65-004) formés d'au moins 50% de bitume additionné de goudron ou de brai de houille,
- les émulsions de bitume (NF T 65-011)
- les bitumes modifiés comportant des ajouts de substances le plus souvent macromoléculaires ayant un effet direct sur le liant, par opposition aux fines minérales et additifs d'adhésivité.
- les bitumes spéciaux qui sont des bitumes purs sans additif.

Pour les couches de roulement et de liaison en béton bitumineux et les couches d'assise en grave-bitume, des bitumes purs ou modifiés sont employés. Les classes de bitume pur les plus fréquemment retenues sont 35/50 et 50/70 pour les couches d'assise et les couches de surface. L'emploi de bitumes de grade différent, durs, 10/20, 20/30 ou au contraire plus mou, 70/100, est à considérer dans les contextes particuliers (trafic, température et zone à risque d'orniérage élevés, ou trafic modéré et climat plutôt froid)

2.4. Autres constituants

Eau d'apport : pour les graves non traitées ou traitées aux liants hydrauliques et pour le béton doit être conforme à la norme NF P 98-100.

Chaux : la chaux aérienne calcique pour usage routier est spécifiée et classée dans la norme NF P 98-101.

Autres activants de prise de la grave laitier :la norme NF P 98-107 définit et classe les types d'activation des laitiers vitrifiés de haut fourneau et fixe les caractéristiques générales auxquelles doivent satisfaire les activants.

Retardateur de prise : ces produits sont décrits dans la norme NF P 98-115

Fines d'apport pour enrobés hydrocarbonés : l'addition de fines lors de la fabrication d'enrobés est nécessaire lorsque la teneur en fines naturelles des granulats est insuffisante. Ces fines d'apport sont le plus souvent constituées de calcaire broyé, parfois de chaux grasse, de cendres volantes ou de ciment. Leurs spécifications sont données dans les normes produits des enrobés hydrocarbonés.

3. CARACTERISATION DES DEGRADATIONS DES MATERIAUX

Les descripteurs de l'état des chaussées sont directement rattachés au mode de relevé des dégradations et au procédé de mesure de l'état de surface. Les études et enquêtes réalisées par le réseau technique montrent que les principaux descripteurs de l'état structurel d'une chaussée sont fonction de leur structure (*Tableau 1*).

Tableau 1. Descripteurs d'état structurel de chaussée

Déformations	(D)	Toutes structures
Fissures longitudinales et le faïençage	(F)	
Répartitions	(R)	
Fissuration transversale	(FT)	Structure GH

Pour ce qui concerne l'aspect spécifiquement surface, les descripteurs sont indépendants du type de structure (*Tableau 2*).

Tableau 2. Descripteurs d'état de surface de chaussée

Déformations		(D)
Ressuage	Dégradations de revêtement	(DR)
Glaçage		
Arrachements		
Niveau d'adhérence		(ADH)

Les déformations sont des descripteurs de l'état structurel et de la surface de la chaussée.

3.1. Modalités pratiques et quantification des relevés de dégradation

Le recueil des descripteurs est réalisé suivant la méthode d'essai des LPC en mode M3 assortie de spécifications particulières pour cette application d'évaluation du RRN à l'aide de l'appareil DESY 2000. Les informations des relevés recueillis sur la quasi-totalité du réseau ont été prétraitées au pas de 200 m (section unitaire de base) et introduites dans les banques de données VISAGE de chaque CETE.

3.2. Correspondance descripteurs d'état / travaux conventionnels de réhabilitation du patrimoine

A partir des niveaux d'extension et de gravité des descripteurs fissuration et déformation, des tableaux de travaux conventionnels à l'obtention de l'état de référence pour chaque type de structure et classe de trafic sont établis. Le *Tableau 3* visualise les principes énoncés ci-dessus.

Tableau 3.Description des dégradations

			DEFORMATIONS			
FISSURES	NGF	NET = NEF + NER	NEANT	NED ≤ 10%	NED > 10%	
				NGD = s et g	NGD = s	NGD = g
	s	≤ 10%				
		10% < NET ≤ 50%		Fiss. thermique	Fluage	
		> 50%				
	g	≤ 10%				
		10% < NET ≤ 50%		Fatigue		Pb de support
		> 50%				

avec
NGF : Niveau gravité fissuration, NEF : Niveau extension fissuration , NGD : Niveau gravité déformation, NED : Niveau extension déformation, NER : Niveau extension réparation, NET : Niveau extension (fissuration + réparation)

Les travaux conventionnels sont exprimés à l'aide des techniques classiques de chaussées béton bitumineux (BB), grave bitume (GB), enduit superficiel (ES), fraisage (FRAI),travaux localisés de réparation des fissures transversales dégradées (TL), afin d'établir des coûts homogènes avant l'établissement de la notation.

4. ENTRETIEN ROUTIER

En vue d'établir un bilan global de la politique routière, le gestionnaire attend de disposer à tout moment d'une image de l'état et des performances de son réseau (aussi bien à l'échelle d'un tronçon spécifique que pour un linéaire voir un réseau particulier).

Premier niveau : visualisation et évaluation

Le gestionnaire peut représenter et synthétiser la connaissance dont il dispose, en particulier :

- *visualisation* de l'état d'un tronçon particulier ou d'un ensemble de tronçons sélectionnés selon des critères *ad hoc* (population), vis-à-vis de tel ou tel ensemble d'indicateurs ;
- comparaisons entre tronçons ou populations, pour cerner par exemple des populations « à risque »
- *sélection* des tronçons ne respectant pas certains niveaux de performance ;
- *hiérarchisation* des tronçons selon un ou des indicateurs sélectionnés, en vue d'établir des priorités d'actions (en phase d'inspection ou de travaux)

Deuxième niveau : simulation des évolutions

Le gestionnaire peut décider de simuler les évolutions probables des indicateurs qu'il sélectionne, pour un tronçon ou une population qu'il choisit et une échéance qu'il impose. La précision diminue progressivement au fur et à mesure que l'échéance s'éloigne, et dépend de la qualité de l'information initiale et de la qualité des modèles d'évolution. Ainsi, le gestionnaire peut, par exemple, estimer les besoins en réhabilitation à court terme (3-5 ans) et estimer des besoins plus lointains pour, dans un souci d'anticipation, lisser les dépenses prévisibles.

Troisième niveau : comparaison de stratégies

A tout moment le gestionnaire peut décider de comparer les effets (sur les tronçons ou populations qu'il sélectionne), à l'échéance qu'il se donne, de différents choix stratégiques dans ses procédures d'inspection/maintenance/réhabilitation. Cette simulation repose sur l'utilisation de modèles dont dispose le simulateur. Un certain nombre de stratégies est disponible et défini par défaut, le gestionnaire pouvant en ajuster les paramètres, voire en programmer d'autres. Il peut ainsi :

- évaluer les effets d'une modification de réhabilitation sur tel ou tel indicateur de performance ;
- définir des priorités différentes et en mesurer les conséquences sur les indicateurs qu'il sélectionne ;
- quantifier l'intérêt d'une programmation plus fournie, que ce soit pour alimenter le programme de réhabilitation ou pour améliorer la connaissance du patrimoine.

5. ANALYSE MULITCRITERES

Plusieurs termes sont récurrents dans le domaine de l'aide multicritère à la décision. Certaines définitions spécifiques à la méthode d'aide multicritère à la décision ont été présentées plus en avant dans le rapport, d'autres sont approfondies ci-après.

Relations de sur classement : Une variante v_i surclasse une variante v_k, noté $v_i\boldsymbol{S}v_k$, si elle est au moins aussi bonne que v_k relativement à une majorité de critères, sans être trop nettement plus mauvaise que v_k relativement aux autres critères (Schärlig, 1985). Il est donc nécessaire de vérifier critère après critère l'ensemble des paires ordonnées, ou couples, de variantes possibles. Les méthodes d'agrégation partielle vérifient le degré de crédibilité de cette hypothèse de surclassement $v_i\boldsymbol{S}v_k$ en se basant sur une notion de concordance *(y a-t-il suffisamment d'arguments pour admettre cette hypothèse ?*) et une notion de discordance (y *a-t-il une raison importante pour refuser cette hypothèse ?*).

Relations entre les variantes : Dans le cadre des méthodes d'aide multicritère à la décision comparant deux variantes v_i et v_k (méthodes d'agrégation partielle), on analyse les relations entre les variantes pour un critère ou globalement pour l'ensemble des critères.

En procédant à une comparaison entre deux variantes vi et v_k sur un critère c_j, il existe trois situations relatives qui sont déterminées à partir de la différence entre les performances des variantes : $g_j(v_i) - g_j(v_k)$, qui est notée $\delta_j(v_i, v_k)$.

- $\delta_j(v_i, v_k) > 0$ la variante v_i est préférée à la variante v_k pour le critère c_j, ce que l'on note $v_i\boldsymbol{P}v_k$
- $\delta_j(v_i, v_k) = 0$ la variante v_i est équivalente à la variante v_k pour le critère c_j, ce que l'on note $v_i\boldsymbol{I}v_k$
- $\delta_j(v_i, v_k) < 0$ la variante v_k est préférée à la variante vi pour le critère c_j, ce que l'on note $v_k\boldsymbol{P}v_i$.

Pour un critère c_j donné, on détermine deux indices qualifiant les relations entre les variantes v_i et v_k.

- un *indice de concordance*, qui qualifie le degré de crédibilité de la relation « v_i *surclasse* v_k ». Cet indice est désigné par le terme $c_j(v_i, v_k)$
- un *indice de discordance*, qui indique pour les critères où $v_i\boldsymbol{P}v_k$ n'est pas vérifié, si le non respect de l'hypothèse de surclassement $v_i\boldsymbol{S}v_k$ n'est pas trop important. Cet indice est désigné par le terme $d_j(v_i, v_k)$.

En procédant à une comparaison globale sur l'ensemble C des critères, on cherche à vérifier la concordance de l'hypothèse de surclassement « v_i *surclasse* v_k», notée $v_i\boldsymbol{S}v_k$.

Quatre situations relatives sont alors possibles :

- $v_i\boldsymbol{S}v_k$ la variante v_i surclasse la variante v_k : il y a suffisamment de critères vérifiant l'hypothèse de surclassement $v_i\boldsymbol{S}v_k$
- $v_i\boldsymbol{I}v_k$ la variante v_i et la variante vk sont indifférentes : on ne peut pas les départager car il y a autant d'arguments en faveur de $v_i\boldsymbol{S}v_k$ que d'arguments en faveur de $v_k\boldsymbol{S}v_i$
- $v_k\boldsymbol{S}v_i$ la variante v_k surclasse la variante v_i : il y a suffisamment de critères vérifiant l'hypothèse de surclassement $v_k\boldsymbol{S}v_i$
- $v_i\boldsymbol{R}v_k$ la variante v_i et la variante vk sont incomparables : les deux hypothèses de surclassement $v_i\boldsymbol{S}v_k$ et $v_k\boldsymbol{S}v_i$ ne sont pas vérifiées

Toutes ces relations sont intransitives : $v_i\boldsymbol{S}v_k$ et $v_k\boldsymbol{S}v_i$ sont parfaitement compatibles.

Les relations globales, c'est à dire analysées sur l'ensemble des critères, entre les deux variantes v_i et v_k sont qualifiées par deux indices synthétiques :
• un *indice de concordance globale*, déterminé à partir des indices de concordance $cj(v_i, v_k)$ de chaque critère. Il est désigné par le terme *Cik* et il qualifie le degré de crédibilité de la relation de surclassement $v_i\boldsymbol{S}v_k$
• un *indice de discordance globale*, désigné par le terme D_{ik}. Il est déterminé d'après les indices de discordance $dj(v_i, v_k)$ et il qualifie le non-respect de l'hypothèse de surclassement $v_i\boldsymbol{S}v_k$.
Ces deux indices peuvent être comparés à un système politique où pour qu'un objet soit accepté, il faut d'une part obtenir la majorité des votants (indice de concordance globale) et d'autre part que la minorité qui s'y oppose ne soit pas gravement contrariée (indice de discordance globale).

Poids : Un poids P_j qualifie l'importance relative d'un critère c_j donné vis à vis des autres critères. Il s'agit d'un paramètre intercritère. Différentes manières peuvent être envisagées pour fixer ces poids. Cette opération est appelée pondération des critères et est généralement réalisée par le décideur.

Critères francs et critères flous : Les méthodes d'agrégation partielle comparent les variantes deux à deux pour chaque critère. Cette comparaison sur un critère c_j donné se base sur la différence entre les performances de deux variantes $\delta_j(v_i, v_k)$. Ceci permet de vérifier les relations de préférence ($v_i\boldsymbol{P}v_k$ et $v_k\boldsymbol{P}v_i$) et d'indifférence ($v_i\boldsymbol{I}v_k$) entre les deux variantes pour un critère c_j donné.

Il existe deux possibilités de critères possédant des caractéristiques de seuils différents : les *critères francs* et les *critères flous*, désignés aussi par le terme de pseudocritères. (Maystre, Pictet et al., 1994).

Avec les *critères francs*, dans le cas d'une comparaison de deux variantes sur un critère c_j donné, il existe trois situations relatives entre les variantes, présentées avec les valeurs des indices de concordance spécifiques $c_j\ (v_i, v_k)$ et $c_j\ (v_k, v_i)$:

- $\delta_j\ (v_i, v_k) > 0$ $\quad v_i\boldsymbol{P}v_k \quad c_j\ (v_i, v_k) = 1 \quad c_j\ (v_k, v_i) = 0$
- $\delta_j\ (ai, v_k) = 0$ $\quad v_i\boldsymbol{I}v_k \quad c_j\ (v_i, v_k) = 0$ ou 1
- $\delta_j\ (v_i, v_k) < 0$ $\quad v_k\boldsymbol{P}v_i \quad c_j\ (v_i, v_k) = 0 \quad c_j\ (v_k, v_i) = 1$

On est ici dans le cas d'une préférence ou d'une indifférence stricte, la moindre différence entre deux variantes étant significative.

Un seuil de veto $\boldsymbol{Sv_j}$ spécifique à un critère c_j donné peut être défini. Il signifie que si pour un seul critère c_j donné, il existe un $\delta_j\ (v_i, v_k) < 0$ tel que $\delta_j\ (v_i, v_k) + Sv_j \leq 0$, alors l'hypothèse

$v_i \boldsymbol{S} v_k$ n'est pas vérifiée quelles que soient les comparaisons réalisées sur les autres critères. Ce seuil de veto est une donnée volontariste marquant la limite au-delà de laquelle le non-respect de l'hypothèse de surclassement est trop important. Ce seuil de veto constitue ainsi une limite à la compensation entre les critères. Les valeurs des indices de discordance sont fixées par rapport à ce seuil de veto et prennent les valeurs suivantes :

• $\delta_j (v_i, v_k) \geq Sv_j$	$d_j (v_i, v_k) = 0$	$d_j (v_k, v_i) = 1$
• $-Sv_j < \delta_j (v_i, v_k) < Sv_j$	$d_j (v_i, v_k) = 0$	$d_j (v_k, v_i) = 0$
• $\delta_j (v_i, v_k) \leq -Sv_j$	$d_j (v_i, v_k) = 1$	$d_j (v_k, v_i) = 0$

Les **critères flous**, consistent en une transition progressive entre l'indifférence et la préférence. Deux seuils supplémentaires, liés à un critère c_j donné, sont introduits :
• seuil d'indifférence $\boldsymbol{Si_j}$: il s'agit de la plus petite différence qui est significative. En dessous de ce seuil, il est impossible de départager les deux variantes. On est alors en dessous de la sensibilité de l'analyse
• seuil de préférence $\boldsymbol{Sp_j}$: il s'agit du seuil à partir duquel la différence entre les deux variantes est perceptible et fait préférer l'une à l'autre.

Par définition, on a : $\boldsymbol{Sv_j} \geq \boldsymbol{Sp_j} \geq \boldsymbol{Si_j}$

Il est à remarquer que le cas où $Sp_j = Si_j$ est tout à fait envisageable. Il s'agit là d'un simple décalage des deux courbes de la figure précédente vers l'extérieur du graphique.

Auparavant les valeurs de l'indice de concordance spécifique $c_j (v_i, v_k)$ prenaient les deux valeurs numériques 0 ou 1. Elles ont maintenant des valeurs continues entre 0 et 1 si $\delta_j (v_i, v_k)$ est compris entre Si_j et Sp_j. Ceci signifie que la réponse à l'hypothèse de surclassement est plus ou moins respectée (préférence floue). On parle dans ce cas de **préférence faible** notée $v_i \boldsymbol{Q} v_k$. La relation $v_i \boldsymbol{P} v_k$ est alors désignée par le terme de **préférence stricte**.
Il existe alors cinq situations relatives entre les variantes, présentées avec les valeurs des indices de concordance spécifiques $c_j(v_i, v_k)$ et $c_j(v_k, v_i)$:

• $\delta_j (v_i, v_k) \geq Sp_j$	$v_i \boldsymbol{P} v_k$	$c_j (v_i, v_k) = 1$	$c_j (v_k, v_i) = 0$
• $Sp_j \geq \delta_j (v_i, v_k) \geq Si_j$	$v_i \boldsymbol{Q} v_k$	$c_j (v_i, v_k) = 1$	$c_j (v_k, v_i) = 0$ à 1
• $Si_j \geq \delta_j (v_i, v_k) \geq - Si_j$	$v_i \boldsymbol{I} v_k$	$c_j (v_i, v_k) = 1$	$c_j (v_k, v_i) = 1$
• $- Si_j \geq \delta_j (v_i, v_k) \geq - Sp_j$	$v_k \boldsymbol{Q} v_i$	$c_j (v_i, v_k) = 1$ à 0	$c_j (v_k, v_i) = 1$
• $- Sp_j \geq \delta_j (v_i, v_k)$	$v_k \boldsymbol{P} v_i$	$c_j (v_i, v_k) = 0$	$c_j (v_k, v_i) = 1$

La discordance floue est aussi présente dans le cadre des critères flous, les valeurs des indices de discordance $dj(vi, vk)$ et $dj(vk, vi)$ prenant les valeurs suivantes :

• $\delta_j (v_i, v_k) \geq Sv_j$	$d_j (v_i, v_k) = 0$	$d_j (v_k, v_i) = 1$
• $Sv_j \geq \delta_j (v_i, v_k) \geq Si_j$	$d_j (v_i, v_k) = 0$	$d_j (v_k, v_i) = 1$ à 0
• $Si_j \geq \delta_j (v_i, v_k) \geq - Si_j$	$dj(v_i, v_k) = 0$	$dj(v_k, v_i) = 0$
• $- Si_j \geq \delta_j (v_i, v_k) \geq - Sv_j$	$dj(v_i, v_k) = 0$ à 1	$dj(v_k, v_i) = 0$
• $- Sv_j \geq \delta_j (v_i, v_k)$	$dj(v_i, v_k) = 1$	$dj(v_k, v_i) = 0$

Il est à préciser aussi que les seuils d'indifférence, de préférence et de veto définis pour un critère c_j donné ne sont pas forcément déterminés par une valeur fixe comme présenté auparavant. Ils peuvent avoir, avec certaines méthodes d'aide multicritère à la décision, des valeurs qui dépendent de la performance de la variante. On a alors dans ce cas des seuils déterminés par des formules de ce type :

$S_j = \alpha j \,.\, g_j(v_i) + \beta_j$

S_i $g_j(v_i) > g_j(v_k)$, on a un seuil inverse

S_i $g_j(v_i) < g_j(v_k)$, on a un seuil direct

Les explications relatives aux différents seuils ont été réalisées avec un cas de critères cherchant à maximiser la performance. Dans le cas de la minimisation, les valeurs $\delta j(v_i, v_k)$ sont à considérer comme étant simplement inversées, mais la démarche de comparaison entre les variantes et la définition des seuils restent identiques.

ANNEXE DU CHAPITRE 3

1. JEU DE DONNEES N°1

Le *Tableau 1* représente l'ensemble des références initiales (Hoang, 2005) sources de données environnementales implémentées dans le MRE.

Tableau 1. Première base de données environnementales implémentée dans le MRE selon (Hoang, 2005) *(Jeu n°1)*

Flux		Aciérie		Raffinerie*		Four à chaux		Cimenterie		Carrière		Centrale d'enrobé		Centrale BC	
		Réf.	V_m	Réf.	V_m	Réf.	V_m	Réf.	V_m	Réf.	V_m	Réf.	Vm	Réf.	Vm
Energie	(MJ/t)	[Stripple H., 2001], [Canadian Steel Producers Association, 1999], [Canadian Steel Producers Association, 2001], [Sandberg H. et al., 2001], [John Stubbles, 2000]	**21164,94**	[Striple H., 2001] , [Eurobitume, 1999]	**1191,40**	[Nordkalk, 1998], [Nordkalk, 2001]	**6610,00**	[Lafarge Cement, 2004], [Groupe Ciment St Laurent, 2003], [Taiheiyo Cement Coporation, 2003], [Stripple H., 2001]	**3906,50**	[Stripple H., 2001], [Aggregate industries, 2002]	**39,904**	[Stripple H., 2001], [Moneron P. et al., 2002]	**269,53**	[Stripple H., 2001]	**70,20**
CO_2	(kg/t)	[Stripple H., 2001], [Sandberg H. et al., 2001]	**2095,00**	[Striple H., 2001] , [Eurobitume, 1999	**69,30**	[Midwest Research Institute (MRI)., 1994], [Nordkalk, 1998], [Nordkalk, 2001]	**1549,13**	[Lafarge Cement, 2004], [Groupe Ciment St Laurent, 2003], [Taiheiyo Cement Coporation, 2003], [Stripple H., 2001]	**799,47**	[Stripple H., 2001], [Aggregate industries, 2002]	**5,826**	[Stripple H., 2001], [Moneron P. et al., 2002] , [RTI, 2004]	**17,09**	[Stripple H., 2001]	**3,85**
CH_4	(kg/t)	[Stripple H., 2001]	**9,10**	[Stripple H., 2001] [Eurobitume, 1999]	**-**	-	**-**	-	**-**	[Stripple H., 2001]	**0,001E-03**	[RTI, 2004]	**0,0065**	[Stripple H., 2001]	**0,002E-03**
N_2O	(kg/t)	[Stripple H., 2001]	**0,030**	-	**-**	-	**-**	-	**-**	[Stripple H., 2001]	**0,027E-03**	-	**-**	[Stripple H., 2001]	**0,08E-03**
CO	(kg/t)	[Stripple H., 2001]	**1,00**	[Eurobitume, 1999]	**0,965E-03**	[Midwest Research Institute (MRI)., 1994]	**0,572**	[Lafarge Cement, 2004]	**1,802**	[Stripple H., 2001]	**1,450E-03**	[Stripple H., 2001], [RTI, 2004]	**0,036**	[Stripple H., 2001]	**0,004**
NOx	(kg/t)	[Stripple H., 2001], [Canadian Steel Producers Association, 1999], [Canadian Steel Producers Association, 2001]	**1,334**	[Eurobitume, 1999]	**0,154**	[Midwest Research Institute (MRI)., 1994], [Nordkalk, 1998], [Nordkalk, 2001]	**1,414**	[Lafarge Cement, 2004], [Groupe Ciment St Laurent, 2003], [Stripple H., 2001]	**3,014**	[Stripple H., 2001]	**12,10E-03**	[Stripple H., 2001], [Moneron P. et al., 2002] , [RTI, 2004]	**0,023**	[Stripple H., 2001]	**0,0348**
SO_2	(kg/t)	[Stripple H., 2001]	**3,166**	[Striple H., 2001] , [Eurobitume, 1999]	**0,441**	[Midwest Research Institute (MRI)., 1994], [Nordkalk, 1998], [Nordkalk, 2001], [Nordkalk, 2001]	**1,699**	[Lafarge Cement, 2004], [Groupe Ciment St Laurent, 2003], [Stripple H., 2001]	**2,515**	[Stripple H., 2001]	**0,646E-03**	[Stripple H., 2001], [RTI, 2004]	**0,019**	[Stripple H., 2001]	**0,00185**
HC	(kg/t)	-	**-**	[Striple H., 2001] , [Eurobitume, 1999]	**0,010**	-	**-**	-	**-**	[Stripple H., 2001]	**0,873E-03**	-	**-**	[Stripple H., 2001]	**0,0025**
COV	(kg/t)	[Stripple H., 2001	**1,20**	[Striple H., 2001]	**0,200**	-	**-**	-	**-**	[Stripple H., 2001]	**0,000**	[Moneron P. et al., 2002] , [RTI, 2004]	**0,045**	-	**-**
PM	(kg/t)	[Stripple H., 2001]	**24,033**	[Striple H., 2001]	**8,009E-03**	[Midwest Research Institute (MRI)., 1994], [Nordkalk, 1998], [Nordkalk, 2001]	**0,320**	[Lafarge Cement, 2004]	**0,286**	[Stripple H., 2001]	**0,484E-03**	[Stripple H., 2001]	**0,0028**	[Stripple H., 2001]	**0,00139**
Phénol	(kg/t)	-	**-**	[Eurobitume, 1999]	**0,10E-03**	-	**-**	-	**-**	[Stripple H., 2001]	**0,010E-03**	-	**-**	[Stripple H., 2001]	**0,03E-03**
DCO (aq)	(kg/t)	[Stripple H., 2001]	**0,010**	[Striple H., 2001] , [Eurobitume, 1999]	**0,199**	-	**-**	-	**-**	[Stripple H., 2001]	**0,020E-03**	-	**-**	[Stripple H., 2001]	**0,06E-03**
Huiles (aq)	(kg/t)	-	**-**	[Striple H., 2001] , [Eurobitume, 1999]	**3,57E-03**	-	**-**	-	**-**	[Stripple H., 2001]	**0,007E-03**	-	**-**	[Stripple H., 2001]	**0,02E-03**
Tot-N(aq)	(kg/t)	[Stripple H., 2001]	**0,010**	[Striple H., 2001] , [Eurobitume, 1999]	**0,136**	-	**-**	-	**-**	[Stripple H., 2001]	**0,003E-03**	-	**-**	[Stripple H., 2001]	**0,01E-03**

* y compris le stockage.

2. JEU DE DONNEES N°2

Les *Tableaux 2, 3 et 4* représentent les sources de données du jeu n° 2.

Tableau 2. Production de laitier granulé (Burteaux, 1993)

Usines	**Mode de granulation**	**Nature de l'eau**	**Pression de l'eau en kg/cm2**	**Volume d'eau de granulation en m3**
A	Chenal	Eau préfiltrée de la «Chiers»	**1 maximum**	-
B				Pas de granulation
C	Chenal	Eau de la «Chiers» recyclée	**1,5**	8 à 10 m3
D	Chenal	Eau de «Chiers» recyclée	**2**	16
E	Fosse	Eau brut de la «Moselle»	**0**	-
F				Pas de granulation
G	Chenal	Eau de la «Chiers» recyclée	**2,8**	2 à 3
H				Pas de granulation
I	Chenal	Eau brute de l'«Orne» recyclée	**3**	15
J	Chenal	Eau brute de la «Vacherie» recyclée	**3**	10
K	Pot	Eau brute de l'«Orne» préfiltrée		-
L				Pas de granulation
M	Chenal	Eau de la «Moselle»	**2,5**	10
N	Pot de chenal	Eau brute de la «Moselle» préfiltrée	**1,5**	10
O				Pas de granulation
P	Fosse et chenal	Eau de l'«Orne»	**2 à 8**	10

Tableau 3. Prébroyage de laitier vitrifié de hauts-fourneaux (Commission des communautés européennes, 1980)

Appareil	**Puissance installée**	**Débit maximum réalisé**	**Usure des marteaux ou barres**	**Usure du blindage (ou rampe de broyage)**	**Consommation électrique**	**Produit moyen obtenu**
Concasseur Aulmann à percussion	**220 kw**	**80 - 100 t/h**	**100 g/t**	Estimé à environ 30 g/t	**1.6 kwh/t**	0/2 mm à environ 9% < 80µ
Broyeur à barres	**76 kw**	**15 t/h**	**230 g/t**	Estimé à 70 g/t	**4.6 kw h/t**	

Tableau 4.Bilan de consommation et émissions pour la production d'une tonne de laitiers cristallisés de hauts-fourneaux (Nouvion et al., 2004)

		unité	**Productions**	
			0/4 – 4/6 – 6/10 mm	**0/4 – 4/6 – 6/10 – 10/14 – 14/20 mm**
Energie consommée	Pétrole	MJ/t	**14,03**	**9,36**
	Electricité de l'usine	MJ/t	**11,20**	**4,86**
	Electricité 0/4	MJ/t	**14,34**	**7,32**
	Electricité 4/6	MJ/t	**13,58**	**6,48**
	Electricité 6/10	MJ/t	**12,06**	**4,92**
	Electricité 10/14	MJ/t	**-**	**3,82**
	Electricité 14/20	MJ/t	**-**	**3,45**
	Electricité 0/31,5	MJ/t	**1,62**	**1,08**
	Electricité du lavage	MJ/t	**10,49**	**6,99**
Emissions dans l'air	Nox	g/t	**9,53**	**6,35**
	CO_2	g/t	**1028,45**	**685,64**
	CO	g/t	**8,74**	**5,82**
	Hydrocarbures	g/t	**1,59**	**1,06**
	Poussières	g/t	**0,32**	**0,21**
Déchets solides	Pièces d'usures	Kg/t	**1,163**	**0,776**
	Huile	l/t	**0,012**	**0,008**
Ressources naturelles	Eau	l/t	**0,012**	**0,008**
	Ferrailles	t ferrailles/t	**0,021**	**0,014**

3. JEU DE DONNEES N° 3

Le *Tableau 5* représente les données environnementales du jeu n° 3 confrontées à celle du jeu n° 1 afin de comparer les inventaires bibliographiques aux données expérimentales.

Tableau 5. Comparaison des jeux de données LCPC (n°3) et de (Hoang, 2005) (n°1).

Flux		**Carrière**		**Centrale BB**	
		N°3	**N°1**	**N°3**	**N°1**
Energie	(MJ/t)	**20,32**	**39,904**	**201,85**	**269,53**
CO_2	(kg/t)	**1,032**	**5,826**	**7,14**	**17,09**
CH_4	(g/t)		**0,001**	**7,08**	**6,57**
N_2O	(g/t)		**0,027**	**-**	**0,00**
CO	(g/t)	**0,018**	**1,450**	**15,8**	**36,76**
NOx	(g/t)	**0,054**	**12,100**	**2,73**	**23,15**
SO_2	(g/t)	**0,002**	**0,646**	**-**	**19,43**
HC	(g/t)	**0,004**	**0,873**	**-**	**0,00**
COV	(g/t)	**0,007**	**0,000**	**16,7 g eq C/t**	**45,00**
PM	(g/t)	**0,003**	**0,484**	**-**	**2,85**
Phénol	(g/t)	**-**	**0,010**		**0,00**
COD (aq)	(g/t)	**-**	**0,020**		**0,00**
Huiles (aq)	(g/t)	**-**	**0,007**		**0,00**
Tot-N(aq)	(g/t)	**-**	**0,003**		**0,00**

4. JEU DE DONNEES N°4

Les *Tableaux 6 à 16* présentent les sources de données actualisées, ainsi que leurs valeurs unitaires.

Tableau 6. Consommations unitaires de ressources matières des procédés de fabrication des matériaux et mélanges

Flux		Aciérie				Carrière				Cimenterie				Four à chaux				Raffinerie				Laitier cristallisé de haut fourneau				Laitier vitrifié de haut fourneau				Centrale BC, GTLH	Centrale BB
		Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax		
Eau	t/t	(International Iron and steel institute, 2002), (BSW, 2005)	**3196,92**	**6,12**	**12769,06**	(Aggregate industries, 2002) (Aggregate industries, 2003)	**243**	**37**	**401**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(International Iron and steel institute 2002)	**4,73**	**4,73**	**4,73**	(International Iron and steel institute 2002)	**4,74**	**4,74**	**4,74**	-	-
Bauxite	t/t		**0,005**																												
Chrome	t/t		**3E-04**																												
ilmenite	t/t		**3E-04**																												
Manganese	t/t		**0,012**																												
Dolomie	t/t	(International Iron and steel institute, 2002)	**0,02**	**0,02**	**0,02**																	(International Iron and steel institute 2002)	**0,006**	**0,006**	**0,006**		**0,006**	**0,006**	**0,006**		
Zinc	t/t	(International Iron and steel institute, 2002)	**0,01**	**0,01**	**0,01**																	(International Iron and steel institute 2002)	**0,004**	**0,004**	**0,004**		**0,004**	**0,004**	**0,004**		
Fer	t/t	(International Iron and steel institute, 2002)	**333,64**	**0,01**	**1000**																	(International Iron and steel institute 2002)	**0,38**	**0,38**	**0,38**		**0,38**	**0,38**	**0,38**		
Alliage	t/t	(BSW, 2005)	**14,73**	**14,23**	**15,09**																										
Acier recyclé	t/t	(International Iron and steel institute, 2002)	**845,10**	**0,59**	**1132,11**																										
Pierre à chaux	t/t	(International Iron and steel institute, 2002)	**55,28**	**0,15**	**170**																		**0,05**	**0,05**	**0,05**	(International Iron and steel institute 2002)	**0,05**	**0,05**	**0,05**		

Tableau 7. Consommations unitaires d'énergie des procédés de fabrication des matériaux et mélanges.

Flux		Aciérie				Carrière				Cimenterie				Four à chaux				Raffinerie				Laitiers Cristallisés				Laitiers Vitrifiés				Centrale BC, GTLH				Centrale BB			
		Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax
Energie	MJ/t	(Stripple, 2001), (Canadian Steel Producers Association, 1999), (Canadian Steel Producers Association, 2001), (Sandberg et al., 2001), (John Stubbles, 2000), (BSW, 2005), (International Iron and steel institute, 2002), (Vares, Häkkinen, ? VTT)	**$6,9\ 10^6$**	**$1,13\ 10^3$**	**$21,25\ 10^6$**	(Stripple, 2001), (Aggregate industries, 2002), (Aggregate industries, 2003), (Vares, Häkkinen, ?), (Glavind, Haugaard, ?), (Martaud et al., 2007)	**69**	**27,32**	**95,04**	(Stripple, 2001), (Lafarge Cement, 2004), (Groupe Ciment St Laurent, 2003), (Taiheiyo Cement Coporation, 2003), (Vares, Häkkinen, ?), (Glavind, Haugaard, ?)	**4381**	**1550**	**9700**	(Nordkalk, 1998), (Nordkalk, 2001)	**2314**	**5,33**	**9239,9**	(Striple, 2001), (Eurobitume, 1999), (Jiménez et al., 2000)	**4910**	**4900**	**4920**	(International Iron and steel institute 2002), (Nouvion et al., 2004)	**6819**	**6819**	**6819**	(Thibault, 1965), (Burteaux, 1993), (LCPC, 1974), (International Iron and steel institute 2002), (Vares, Häkkinen, ?)	**4039,6**	**1300**	**6779,2**	(Stripple, 2001)	**1908,67**	**70,19**	**70,19**	(Stripple , 2001), (Moneron et al., 2002)	**269,5**	**218,2**	**320,9**

Tableau 8. Emissions de Gaz à effet de serre des procédés de production des matériaux et mélanges

		Aciérie				Carrière				Cimenterie				Four à chaux				Raffinerie				Laitiers Cristallisés				Laitiers Vitrifiés				Centrale BC				Centrale BB			
		Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax
CO2	kg/t	(Stripple, 2001), (Sandberg et al., 2001) (International Iron and steel institute, 2002) (Vares, Häkkinen, ? VTT)	**1280**	**120**	**2200**	(Stripple, 2001), (Aggregate industries, 2002), (Aggregate industries, 2003) (Martaud et al., 2007)	**6,51**	**1,3 10^{-5}**	**10,12**	(Lafarge Cement, 2004), (Groupe Ciment St Laurent, 2003), (Taiheiyo Cement Coporation, 2003), (Stripple H., 2001) (Vares, Häkkinen, ?)	**796,9**	**150**	**1056**	(Midwest Research Institute (MRI)., 1994), (Nordkalk, 1998), (Nordkalk, 2001)	**1569**	**940**	**2500**	(Striple, 2001), (Eurobitume, 1999)	**423,8**	**37**	**810,6**	(International Iron and steel institute 2002) (Nouvion et al., 2004)	**523,9**	**523,9**	**523,9**	(International Iron and steel institute 2002)	**309,62**	**26**	**593,24**	(Stripple, 2001), (Vares, Häkkinen, ?)	**1,12**	**0,19**	**3,85**	(Stripple, 2001), (Monéron P.,et al., 2002)	**14,15**	**5,79**	**22,5**
CH4	kg/t	(Stripple, 2001), (International Iron and steel institute, 2002), (Vares, Häkkinen, ? VTT)	**3,43**	**0,13**	**9,1**	(Stripple, 2001)	**8,5 10^{-7}**	**8,5 10^{-7}**	**8,5 10^{-7}**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(International Iron and steel institute 2002)	**0,26**	**0,26**	**0,26**	(International Iron and steel institute 2002)	**0,26**	**0,26**	**0,26**	(Stripple, 2001)	**2E-06**	**2E-06**	**2E-06**	-	-	-	-
N2O	kg/t	(Stripple, 2001) (International Iron and steel institute, 2002) (BSW, 2005)	**0,05**	**0,03**	**0,08**	(Stripple, 2001)	**2,7E-07**	**2,7E-07**	**2,7E-07**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(International Iron and steel institute 2002)	**0,028**	**0,028**	**0,028**	(International Iron and steel institute 2002)	**0,027**	**0,027**	**0,027**	(Stripple, 2001)	**8E-05**	**8E-05**	**8E-05**	-	-	-	-

Tableau 9. Emissions de gaz toxiques des procédés de production des matériaux et mélanges

		Aciérie				Carrière				Cimenterie				Four à chaux				Raffinerie				Laitiers Cristallisés				Laitiers Vitrifiés				Centrale BC				Centrale BB			
		Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax
CO	kg/t	(Stripple, 2001), (BSW, 2005), (International Iron and steel institute, 2002)	**2002**	**0**	**7200**	(Stripple, 2001), (Martaud et al., 2007)	**0,01**	**0,001**	**0,019**	(Lafarge Cement, 2004),	**1,80**	**0,03**	**5,05**	(Midwest Research Institute, 1994)	**0,57**	**0,06**	**1,4**	(Eurobitume, 1999)	**6E-05**	**6E-05**	**6E-05**	(International Iron and steel institute 2002), (Nouvion et al., 2004)	**6,71**	**6,71**	**6,71**	(International Iron and steel institute 2002)	**6,70**	**6,70**	**6,70**	(Stripple, 2001)	**0,004**	**0,004**	**0,004**	(Stripple, 2001), (RTI, 2004)	**0,004**	**0,004**	**0,004**
NOx	kg/t	(Stripple, 2001), (Canadian Steel Producers Association, 1999), (Canadian Steel Producers Association, 2001) (International Iron and steel institute, 2002) (Vares, Häkkinen, ? VTT)	**102**	**0,55**	**300**	(Stripple, 2001), (Martaud et al., 2007)	**0,033**	**0,012**	**0,054**	(Lafarge Cement, 2004), (Groupe Ciment St Laurent, 2003), (Stripple, 2001) (Von Bahr et al., 2003)	**2,94**	**1,04**	**5,64**	(Midwest Research Institute (MRI), 1994), (Nordkalk, 1998), (Nordkalk, 2001)	**1,42**	**0,56**	**2,7**	(Eurobitume, 1999) (Jiménez et al., 2000)	**0,137**	**0,137**	**0,137**	(International Iron and steel institute 2002), (Nouvion et al., 2004)	**0,829**	**0,829**	**0,829**		**0,822**	**0,822**	**0,822**	(Stripple, 2001)	**0,66**	**0,0348**	**0,98**	(Stripple, 2001), (Moneron et al., 2002), (RTI, 2004)	**0,025**	**0,004**	**0,046**
SO2	kg/t	(Stripple, 2001) (International Iron and steel institute, 2002) (BSW, 2005) (Vares, Häkkinen, ? VTT)	**32,12**	**0,14**	**144**	(Stripple, 2001), (Martaud et al., 2007)	**0,00**	**0,0006**	**0,002**	(Lafarge Cement, 2004), (Groupe Ciment St Laurent, 2003), (Stripple, 2001) (Von Bahr et al., 2003)	**2,23**	**0,23**	**7,83**	(Midwest Research Institute (MRI)., 1994), (Nordkalk, 1998), (Nordkalk, 2001), (Nordkalk, 2001)	**1,70**	**0,08**	**5,9**	(Striple, 2001), (Eurobitume, 1999)	**0,38**	**0,105**	**0,656**	(International Iron and steel institute 2002)	**0,816**	**0,816**	**0,816**		**0,816**	**0,816**	**0,816**	(Stripple, 2001)	**0,108**	**0,0018**	**0,16**	(Stripple, 2001), (RTI, 2004)	**0,014**	**0,014**	**0,014**

Tableau 10. Emissions d'hydrocarbures et de particules solides des procédés de production des matériaux et mélanges

		Aciérie				Carrière				Cimenterie				Four à chaux				Raffinerie				Laitiers Cristallisés				Laitiers Vitrifiés				Centrale BC				Centrale BB			
		Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax
HC	kg/t	(Stripple, 2001) (International Iron and steel institute, 2002) (BSW, 2005) (Vares, Häkkinen, ? VTT)	**32,05**	**0,12**	**120**	(Stripple, 2001), (Martaud et al., 2007)	**0,00**	**0,0008**	**0,011**	-	-	-	-	-	-	-	-	(Striple, 2001) , (Eurobitume, 1999)	**0,008**	**0,002**	**0,013**	(International Iron and steel institute 2002) (Nouvion et al., 2004)	**0,001**	**0,001**	**0,001**	(International Iron and steel institute 2002)	**0,029**	**0,029**	**0,029**	(Stripple, 2001)	**0,003**	**0,003**	**0,003**	(Moneron et al., 2002)	**0,058**	**0,058**	**0,058**
PM	kg/t	(Stripple, 2001) (International Iron and steel institute, 2002) (BSW, 2005) (Vares, Häkkinen, ? VTT)	**15,04**	**0,02**	**48**	(Stripple, 2001), (Martaud et al., 2007)	**0,002**	**5E-04**	**0,003**	(Lafarge Cement, 2004) (Von Bahr et al., 2003)	**0,29**	**0,03**	**1**	(Midwest Research Institute (MRI)., 1994), (Nordkalk, 1998), (Nordkalk, 2001)	**0,322**	**0,04**	**0,9**	(Striple, 2001)	**0,021**	**0,008**	**0,033**	(International Iron and steel institute 2002) (Nouvion et al., 2004)	**0,55**	**0,55**	**0,55**	(International Iron and steel institute 2002)	**0,55**	**0,55**	**0,55**	(Stripple, 2001)	**0,0014**	**0,0014**	**0,0014**	(Stripple, 2001)	**0,003**	**0,003**	**0,003**

Tableau 11. Emissions de métaux lourds des procédés de production des matériaux et mélanges

		Aciérie				Carrière				Cimenterie				Four à chaux				Raffinerie (*)				Laitiers Cristallisés				Laitiers Vitrifiés				Centrale BC				Centrale BB			
		Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax
Cd	kg/t	(International Iron and steel institute, 2002) (BSW, 2005)	**0,01**	**0,00**	**0,05**																	(International Iron and steel institute 2002)	**2E-05**	**2E-05**	**2E-05**	(International Iron and steel institute 2002)	**2E-05**	**2E-05**	**2E-05**								
Co	kg/t	(BSW, 2005)	**0,08**	**0,00**	**0,24**																																
Cr	kg/t	(International Iron and steel institute, 2002) (BSW, 2005)	**0,47**	**0,00**	**1,80**																	(International Iron and steel institute 2002)	**8E-04**	**8E-04**	**8E-04**	(International Iron and steel institute 2002)	**8E-04**	**8E-04**	**8E-04**								
Cu	kg/t	(BSW, 2005)	**0,61**	**0,00**	**1,80**																																
Hg	kg/t	(BSW, 2005)	**0,38**	**0,00**	**1,20**																	(International Iron and steel institute 2002)	**2E-05**	**2E-05**	**2E-05**	(International Iron and steel institute 2002)	**2E-05**	**2E-05**	**2E-05**								
Mn	kg/t	(BSW, 2005)	**0,62**	**0,02**	**1,80**																																
Ni	kg/t	(BSW, 2005)	**0,08**	**0,00**	**0,24**																																
Pb	kg/t	(International Iron and steel institute, 2002) (BSW, 2005)	**0,63**	**0,00**	**2,40**																	(International Iron and steel institute 2002)	**9E-04**	**9E-04**	**9E-04**	(International Iron and steel institute 2002)	**9E-04**	**9E-04**	**9E-04**								
Se	kg/t	(BSW, 2005)	**0,08**	**0,00**	**0,24**																																
Sn	kg/t	(BSW, 2005)	**0,60**	**0,00**	**1,80**																																
Ti	kg/t	(BSW, 2005)	**0,01**	**0,00**	**0,02**																																
V	kg/t	(BSW, 2005)	**0,6**	**0,00**	**1,80**																																
Zn	kg/t	(International Iron and steel institute, 2002)	**0,01**	**0,01**	**0,01**																	(International Iron and steel institute 2002)	**0,001**	**0,001**	**0,001**	(International Iron and steel institute 2002)	**0,001**	**0,001**	**0,001**								
Métaux tot.	kg/t	Vares, Häkkinen (VTT)	**0,02**	**0,02**	**0,02**																													(Eurobitume, 1999)	**0,003**	**0,003**	**0,003**

Tableau 12. Emissions de métaux lourds des procédés de production des matériaux et mélanges

		Aciérie				Carrière				Cimenterie				Four à chaux				Raffinerie				Laitiers Cristallisés				Laitiers Vitrifiés				Centrale BC				Centrale BB			
		Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax
Acides	kg/t	(International Iron and steel institute, 2002) (BSW, 2005)	**5,30**	**0,081**	**12,79**													(Eurobitume, 1999)	**9E-04**	**9E-04**	**9E-04**	(International Iron and steel institute 2002)	**0,037**	**0,037**	**0,037**	(International Iron and steel institute 2002)	**0,037**	**0,037**	**0,037**								
PCDD/F	kg TE/t	(International Iron and steel institute, 2002), (BSW, 2005)	**0,26**	**0,00**	**0,55**																	(International Iron and steel institute 2002)	**5E-09**	**5E-09**	**5E-09**	(International Iron and steel institute 2002)	**5E-09**	**5E-09**	**5E-09**								
PCB	kg/t	(BSW, 2005)	**0,01**	**0,01**	**0,01**																																
HAP	kg/t	(BSW, 2005)	**0,028**	**0,00**	**0,056**																																
As	kg/t	(BSW, 2005)	**0,08**	**0,00**	**0,24**																																
Benzene	kg/t	(BSW, 2005)	**6,59**	**2,07**	**12,00**																																

Tableau 13. Emissions dans l'eau des procédés de production des matériaux et mélanges

		Aciérie				Carrière				Cimenterie				Four à chaux				Raffinerie				Laitiers Cristallisés				Laitiers Vitrifiés				Centrale BC				Centrale BB			
		Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax
Acides (aq)	kg/t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sels minéraux	kg/t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cd (aq)	kg/t	(International Iron and steel institute, 2002)	**4E-05**	**4E-05**	**4E-05**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(International Iron and steel institute 2002)	**2E-05**	**2E-05**	**2E-05**	(International Iron and steel institute 2002)	**2E-05**	**2E-05**	**2E-05**	-	-	-	-	-	-	-	-
Cr (aq)	kg/t	(International Iron and steel institute, 2002)	**0,002**	**0,002**	**0,002**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(International Iron and steel institute 2002)	**3E-05**	**3E-05**	**3E-05**	(International Iron and steel institute 2002)	**3E-05**	**3E-05**	**3E-05**	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe (aq)	kg/t	(International Iron and steel institute, 2002)	**0,05**	**0,05**	**0,05**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(International Iron and steel institute 2002)	**0,01**	**0,01**	**0,01**	(International Iron and steel institute 2002)	**0,01**	**0,01**	**0,01**	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni (aq)	kg/t	(International Iron and steel institute, 2002)	**1E-04**	**1E-04**	**1E-04**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(International Iron and steel institute 2002)	**5E-05**	**5E-05**	**5E-05**	(International Iron and steel institute 2002)	**5E-05**	**5E-05**	**5E-05**	-	-	-	-	-	-	-	-
Pb (aq)	kg/t	(International Iron and steel institute, 2002)	**2E-04**	**2E-04**	**2E-04**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(International Iron and steel institute 2002)	**3E-05**	**3E-05**	**3E-05**	(International Iron and steel institute 2002)	**3E-05**	**3E-05**	**3E-05**	-	-	-	-	-	-	-	-
Zn (aq)	kg/t	(International Iron and steel institute, 2002)	**0,001**	**0,001**	**0,001**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(International Iron and steel institute 2002)	**6E-04**	**6E-04**	**6E-04**	(International Iron and steel institute 2002)	**6E-04**	**6E-04**	**6E-04**	-	-	-	-	-	-	-	-
COD (aq)	kg/t	(Stripple, 01)	**0,01**	**0,01**	**0,01**	(Stripple, 2001)	**2E-05**	**2E-05**	**2E-05**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(International Iron and steel institute 2002)	**0,07**	**0,07**	**0,07**	(International Iron and steel institute 2002)	**0,07**	**0,07**	**0,07**	-	-	-	-	-	-	-	-
COND (aq)	kg/t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Phénol	kg/t	-	-	-	-	(Stripple, 2001)	**1E-05**	**1E-05**	**1E-05**	-	-	-	-	-	-	-	-	(Eurobitume, 1999)	**1E-04**	**1E-04**	**1E-04**	-	-	-	-	-	-	-	-	(Stripple, 2001)	**3E-05**	**3E-05**	**3E-05**	-	-	-	-
Tot N(aq)	kg/t	(Stripple, 2001)	**0,01**	**0,01**	**0,01**	(Stripple, 2001)	**3E-06**	**3E-06**	**3E-06**	-	-	-	-	-	-	-	-	(Stripple, 2001), (Eurobitume, 1999)	**0,137**	**0,01**	**0,263**	(International Iron and steel institute 2002)	**0,005**	**0,005**	**0,005**	(International Iron and steel institute 2002)	**0,005**	**0,005**	**0,005**	(Stripple, 2001)	**9E-06**	**9E-06**	**9E-06**	-	-	-	-
Ammoniac	kg/t	(International Iron and steel institute, 2002)	**0,05**	**0,05**	**0,05**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(International Iron and steel institute 2002)	**0,02**	**0,02**	**0,02**	(International Iron and steel institute 2002)	**0,02**	**0,02**	**0,02**	-	-	-	-	-	-	-	-
P-Tot (aq)	kg/t		**0,003**	**0,003**	**0,003**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(International Iron and steel institute 2002)	7^{E}-04	7^{E}-04	7^{E}-04	(International Iron and steel institute 2002)	7^{E}-04	7^{E}-04	7^{E}-04	-	-	-	-	-	-	-	-
DCO	kg/t	(Stripple, 2001), (International Iron and steel institute, 2002)	**0,09**	**0,01**	**0,18**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(Stripple, 2001), (Eurobitume, 1999)	**0,199**	**0,054**	**0,344**	-	-	-	-	-	-	-	-	(Stripple, 2001)	**5,84E-05**	**5,84E-05**	**5,84E-05**	-	-	-	-
DBO	kg/t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PES	kg/t	(International Iron and steel institute, 2002)	**0,38**	**0,38**	**0,38**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(International Iron and steel institute 2002)	**0,12**	**0,12**	**0,12**	(International Iron and steel institute 2002)	**0,12**	**0,12**	**0,12**	-	-	-	-	-	-	-	-
Huile (aq)	kg/t	-	-	-	-	(Stripple, 2001)	**7E-06**	**7E-06**	**7E-06**	-	-	-	-	-	-	-	-	(Stripple, 2001), (Eurobitume, 1999)	**0,004**	**0,002**	**0,005**	(Nouvion et al., 2004)				-	-	-	-	(Stripple, 2001)	**1,95E-05**	**1,95E-05**	**1,95E-05**	-	-	-	-
Solides	kg/t	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 14. Production de co-produits des procédés de production des matériaux et mélanges

		Aciérie				**Carrière**				**Cimenterie**				**Four à chaux**				**Raffinerie**				**Laitiers Cristallisés**				**Laitiers Vitrifiés**				**Centrale BC**				**Centrale BB**			
		Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax	Références	Vm	Vmin	Vmax
co-produits	kg/t	(International Iron and steel institute, 2002), (BSW, 2005)	**4,E-01**	**0,408**	**0,43**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(International Iron and steel institute 2002)	**0,086**	**0,086**	**0,086**	(International Iron and steel institute 2002)	**0,086**	**0,086**	**0,086**	-	-	-	-	-	-	-	-
Déchets	kg/t	(International Iron and steel institute, 2002), (BSW, 2005)	**291**	**159,9**	**677,2**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	(International Iron and steel institute 2002)	**0,35**	**0,35**	**0,35**	(International Iron and steel institute 2002)	**0,35**	**0,35**	**0,35**	-	-	-	-	-	-	-	-

5. DIMENSIONNEMENT DE L'ATELIER DE COMPACTAGE

L'atelier de compactage est présenté *en Figure 1*. Le recouvrement entre deux bandes adjacentes doit être au moins de 15 à 20 cm (LCPC, 2003). Le nombre maximal de bandes compactées par un même matériel peut raisonnablement être fixé à trois (LCPC, 2003).

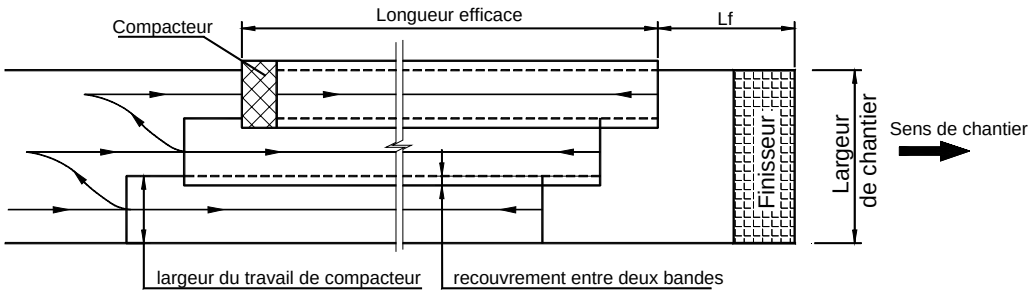


Figure 1. Schéma d'un atelier de compactage (LCPC, 2003) cité dans (Hoang, 2005).

Identification du nombre de passes en tout point de la surface compactée : Le rapport de la vitesse de translation moyenne du finisseur V_f et du compacteur V_m détermine le nombre total de passes que peut réaliser le compacteur selon le profil en travers n_t (LCPC, 2003) :

$$n_t = \frac{V_m}{V_f} \pm 1$$

V_m, la vitesse de translation moyenne du compacteur est différente de sa vitesse de travail V. V_m prend en compte le temps nécessaire aux inversions de sens de marche et aux manœuvres : V_m = 0,8 à 0,9 V selon le schéma de balayage, la dextérité du conducteur et les dispositifs d'aide à la conduite. Le nombre de passes n effectué en tout point de la surface à compacter dépend de n_t et du nombre de bandes, mais aussi du mode de décalage utilisé. Les valeurs préconisées de la valeur n et de la vitesse de translation V sont données dans (LCPC, 2003) pour différents types de compacteurs et de matériaux enrobés.

Identification de la longueur de la passe : La longueur maximale efficace de la passe L_p est déterminée par la durée maximale de compactage D_c, la vitesse d'avancement du finisseur et la distance minimale entre le compacteur et le finisseur L_f (LCPC, 2003) :

$$L_p \leq D_c.V_f - L_f$$

D_c est donnée dans (LCPC, 2003).

Détermination de la durée de travail : la durée du travail de compacteur Δt vaut :

$$\Delta t = \frac{l_c.n.n_b}{V.1000.k} \ (h)$$

Avec, n_b la quantité de bandes, V_m la vitesse d'avancement du compacteur (km/h), k le coefficient de rendement qui est souvent de 0,6 (LCPC, 2003), l_c la longueur du chantier (m).

6. COEFFICIENTS D'ALLOCATIONS DES FLUX ENVIRONNEMENTAUX A DES CATEGORIES D'IMPACTS

Le *Tableau 15* présente les coefficients d'allocation des flux aux indicateurs d'impacts

Tableau 15. Coefficients de contribution des flux aux indicateurs d'impacts (Goedkoop, 1996), (Altenstedt et Pleijel, 2000), (EPA, 2000), (Huijbregts et al., 2000), (Khalifa, 2000),

	catégorie d'impact	effet de serre	formation d'ozone troposphérique	toxicité	éco-toxicité						acidification			eutrophisation
	indicateur	PRG	POPC	homme	eau douce	eau de mer	sédiments eau douce	sédiments marins	sols émergés	TOTAL écotox	APi	masse molaire (g/mol)	nbre H+	index d'eutrophisation
	unité	kg éq CO2	kg éq éthylène	sans dimension							Kg éq. H^+			kg éq PO4
Emissions dans l'air	CO		0,027											
	CO2	1												
	CH4	21												
	NOx	150	0,028	1,2							0,695652	46	1	0,13
	N2O	320												
	SO2		0,048	0,31							1	64	2	
	NH3													
	HC(COV)		0,42											
	PS			0,096										
	Ni(CO)4													
	AlO													
	Tot Métaux			3400000	7,7	21000	20	21000	3000	45028				
	As			350000	50	230000	130	230000	1600	461780				
	Cd			150000	0,029	1100000	740	1100000	81	2E+06				
	Co			17000	640	5400000	1100	3500000	110	9E+06				
	Cr			3400000	7,7	21000	20	21000	3000	45028				
	Cu			4300	220	890000	560	880000	7	2E+06				
	Hg			6000	320	1200000	810	1200000	28000	2E+06				
	Mn													
	Ni			34000	630	3800000	1600	3700000	120	8E+06				
	Pb			470	2,4	7000	6,2	7200	16	14225				
	Se			48000	550	21000000	640	9000000	53	3E+07				
	Sn			1,7	2,5	7500	1,3	1500	14	9017,8				
	Tl			4,30E+05	1,60E+03	2,60E+07	3,90E+03	2,40E+07	3,40E+02	5E+07				
	V			6200	1700	12000000	4100	11000000	670	2E+07				
	Zn			100	18	67000	46	68000	12	135076				
	Tot acides										1			
	HF			0							1,6			
	HCl			0,5							1,876712	36,5	1	
	H2S			0,22										
	PCDD/F			0						0				
	PCB			0						0				
	HAP			570000	170	4300	560	14000	1	19031				
	B(a)P				88	1400	250	4100	0,24	5838,2				
	Dib(AH)A			570000	170	4300	560	14000	1	19031				
	Benzene			1900	0,000084	0,0028	0,000064	0,0013	0,000016	0,0043				
Emissions dans l'eau	Acides										1			
	sels minéraux													
	sulfate													
	chlore													
	TotMétaux			20,4	28	36400	71	37500	2,23E-18	73999				
	Cd			123	1500	2020000	3900	2120000	1,24E-19	4E+06				
	Cr			20,4	28	36400	71	37500	2,23E-18	73999				
	Fe													
	Ni			1080	3200	8000000	8300	7900000	3,6E-18	2E+07				
	Pb			91	9,6	12100	25	13100	5,08E-21	25235				
	Zn			3,78	92	124000	240	124000	2,15E-20	248332				
	COD													
	COND													
	phénol			0,049	0,024	0,056	88	0,038	2,5E-06	88,118				
	Ntot													0,33
	ammoniac													
	phosphore													1
	DCO													0,022
	DBO													
	PES													

Les *Tableaux 16, 17, 18 et 19* présentent les différents modes d'allocation des flux pour les cas de structures étudiés (BAC, GB, GL et A4)

Tableau 16. Coefficients d'allocation des flux aux indicateurs d'impacts environnementaux pour le cas du BAC

	effet de serre	**formation d'ozone troposphérique**	**toxicité**	**éco-toxicité**	**acidification**	**eutrophisation**	**consommation énergétique**	**épuisement des réserves naturelles**
							1	
CO		**1**	**1**					
CO2	**1**							
CH4	**1**							
NOx	**0,9763128**	**0,48816**	**0,024**		**0,488156**	**0,244**		
N2O	**1**							
SO2		**0,49902**	**0,002**		**0,499017**			
NH3								
HC		**1**						
PS			**1**	**1**				
Ni(CO)4								
AlO								
totMétaux			**1**	**1**				
As			**1**	**1**				
Cd			**1**	**1**				
Co			**1**	**1**				
Cr			**1**	**1**				
Cu			**1**	**1**				
Hg			**1**	**1**				
Mn								
Ni			**1**	**1**				
Pb			**1**	**1**				
Se			**1**	**1**				
Sn			**1**	**1**				
Tl			**1**	**1**				
V			**1**	**1**				
Zn			**1**	**1**				
acides					**1**			
HF			**0**		**1**			
HCl			**1**	**0**	**1**			
H2S			**1**					
PCDD/F								
PCB								
HAP			**1**	**1**				
B(a)P				**1**				
Dib(ah)A			**1**	**1**				
Benzene			**1**	**1**				
Acides					**1**			
sels minéraux								
sulphate				**1**				
chlore				**1**				
métaux			**1**	**1**				
Cd			**1**	**1**				
Cr			**1**	**1**				
Fe								
Ni			**1**	**1**				
Pb			**1**	**1**				
Zn			**1**	**1**				
COD								
COND								
phénol			**1**	**1**				
azote						**1**		
ammoniac								
phosphore						**1**		
DCO						**1**		
DBO								

Tableau 17. Coefficients d'allocation des flux aux indicateurs d'impacts environnementaux pour le cas du GB

	effet de serre	formation d'ozone troposphérique	toxicité	éco-toxicité	acidification	eutrophisation	consommation énergétique	épuisement des réserves naturelles
							1	
CO		**1**	**1**					
CO2	**1**							
CH4	**1**							
NOx	**0,618039541**	**0,309**	**0,382**		**0,30902**	**0,155**		
N2O	**1**							
SO2		**0,481**	**0,037**		**0,481342**			
NH3								
HC		**1**						
PS			**1**	**1**				
Ni(CO)4								
AlO								
TotMétaux			**1**	**1**				
As			**1**	**1**				
Cd			**1**	**1**				
Co			**1**	**1**				
Cr			**1**	**1**				
Cu			**1**	**1**				
Hg			**1**	**1**				
Mn								
Ni			**1**	**1**				
Pb			**1**	**1**				
Se			**1**	**1**				
Sn			**1**	**1**				
Ti			**1**	**1**				
V			**1**	**1**				
Zn			**1**	**1**				
acides					**1**			
HF			**0**		**1**			
HCl			**1**	**0**	**1**			
H2S			**1**					
PCDD/F								
PCB								
HAP			**1**	**1**				
B(a)P				**1**				
Dib(ah)A			**1**	**1**				
Benzene			**1**	**1**				
Acides					**1**			
sels minéraux								
sulphate				**1**				
chlore				**1**				
tot métaux			**1**	**1**				
Cd			**1**	**1**				
Cr			**1**	**1**				
Fe								
Ni			**1**	**1**				

Pb			1	1				
Zn			1	1				
COD								
COND								
phénol			1	1				
azote						1		
ammoniac								
phosphore						1		
DCO						1		
DBO								
PES								

Tableau 18. Coefficients d'allocation des flux aux indicateurs d'impacts environnementaux pour le cas du GL

	effet de serre	formation d'ozone troposphérique	toxicité	éco-toxicité	acidification	eutrophisation	consommation énergétique	épuisement des réserves naturelles
							1	
CO		1	1					
CO2	1							
CH4	1							
NOx	0,73425	0,367	0,266		0,36712	0,184		
N2O	1							
SO2		0,489	0,022		0,489			
NH3								
HC		1						
PS			1	1				
Ni(CO)4								
AlO								
TotMétaux			1	1				
As			1	1				
Cd			1	1				
Co			1	1				
Cr			1	1				
Cu			1	1				
Hg			1	1				
Mn								
Ni			1	1				
Pb			1	1				
Se			1	1				
Sn			1	1				
Ti			1	1				
V			1	1				
Zn			1	1				
acides					1			
HF			0		1			
HCl			1	0	1			
H2S			1					
PCDD/F								
PCB								
HAP			1	1				
B(a)P				1				
Dib(ah)A			1	1				
Benzene			1	1				
Acides					1			
sels minéraux								
sulphate				1				
chlore				1				
tot métaux			1	1				
Cd			1	1				
Cr			1	1				
Fe								
Ni			1	1				
Pb			1	1				
Zn			1	1				
COD								
COND								
phénol			1	1				
azote						1		
ammoniac								
phosphore						1		
DCO						1		
DBO								
PES								
pétrole, hydrocarbures, huiles				1				
solides								
Déchets								
Produits chimiques dangereux								
eau								1
minerais								1

Tableau 19. Coefficients d'allocation des flux aux indicateurs d'impacts environnementaux pour le cas réel (A4)

	effet de serre	formation d'ozone troposphérique	toxicité	éco-toxicité	acidification	eutrophisation	consommation énergétique	épuisement des réserves naturelles
							1	
CO		1	1					
CO2	1							
CH4	1							
NOx	0,79213	0,396	0,208		0,396	0,198		
N2O	1							
SO2		0,492	0,016		0,492			
NH3								
HC		1						
PS			1	1				
Ni(CO)4								
AlO								
TotMétaux			1	1				
As			1	1				
Cd			1	1				
Co			1	1				
Cr			1	1				
Cu			1	1				
Hg			1	1				
Mn								
Ni			1	1				
Pb			1	1				
Se			1	1				
Sn			1	1				
Ti			1	1				
V			1	1				
Zn			1	1				
acides					1			
HF			0		1			
HCl			1	0	1			
H2S			1					
PCDD/F								
PCB								
HAP			1	1				
B(a)P				1				
Dib(ah)A			1	1				
Benzene			1	1				
Acides					1			
sels minéraux								
sulphate				1				
chlore				1				
tot métaux			1	1				
Cd			1	1				
Cr			1	1				
Fe								
Ni			1	1				
Pb			1	1				
Zn			1	1				
COD								
COND								
phénol			1	1				
azote						1		
ammoniac								
phosphore						1		
DCO						1		
DBO								
PES								
pétrole, hydrocarbures, huiles				1				
solides								
Déchets								
Produits chimiques dangereux								
eau								1
minerais								1

7. RESULTATS DE FLUX ENVIRONNEMENTAUX OBTENUS A PARTIR DU MRE INITIAL IMPLEMENTE A L'UTILISATION DE LAITIERS DE HAUT FOURNEAU (JEU DE DONNEES N° 1 ET 2)

La consommation d'énergie cumulée après 30 ans est présentée pour un kilomètre et deux sens de circulation ainsi que la contribution des différents procédés à la consommation d'énergie totale.

<u>Consommation énergétique</u>

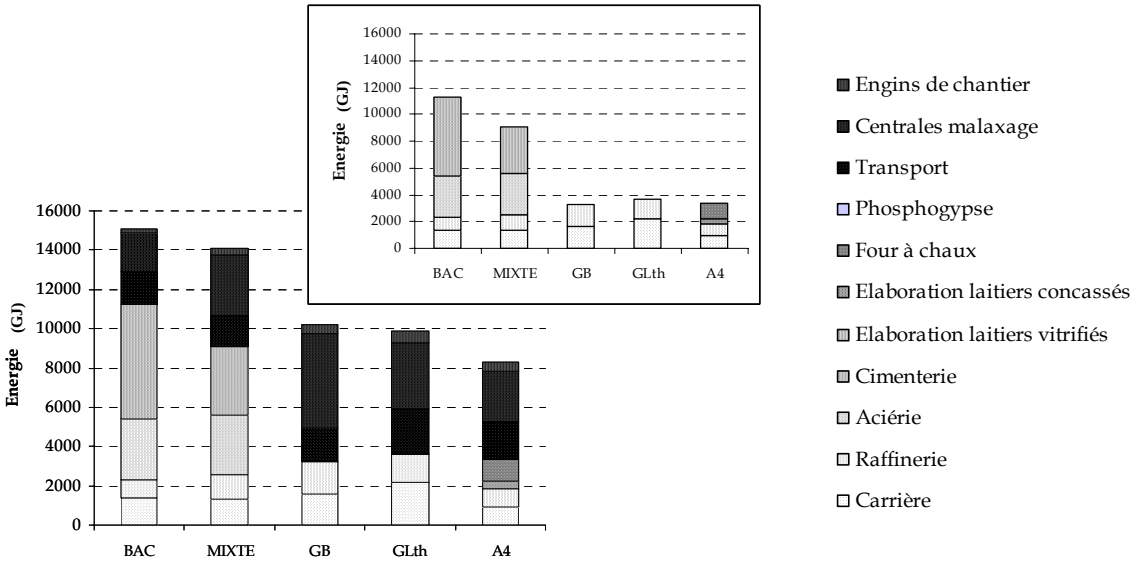


Figure 1. Energie consommée (ramenée à 1 km et à deux sens de circulation pendant 30 ans)

FLUX SORTANTS

Emissions dans le compartiment air

- *Emissions de gaz à effet de serre (CO2, CH_4 et N_2O)*

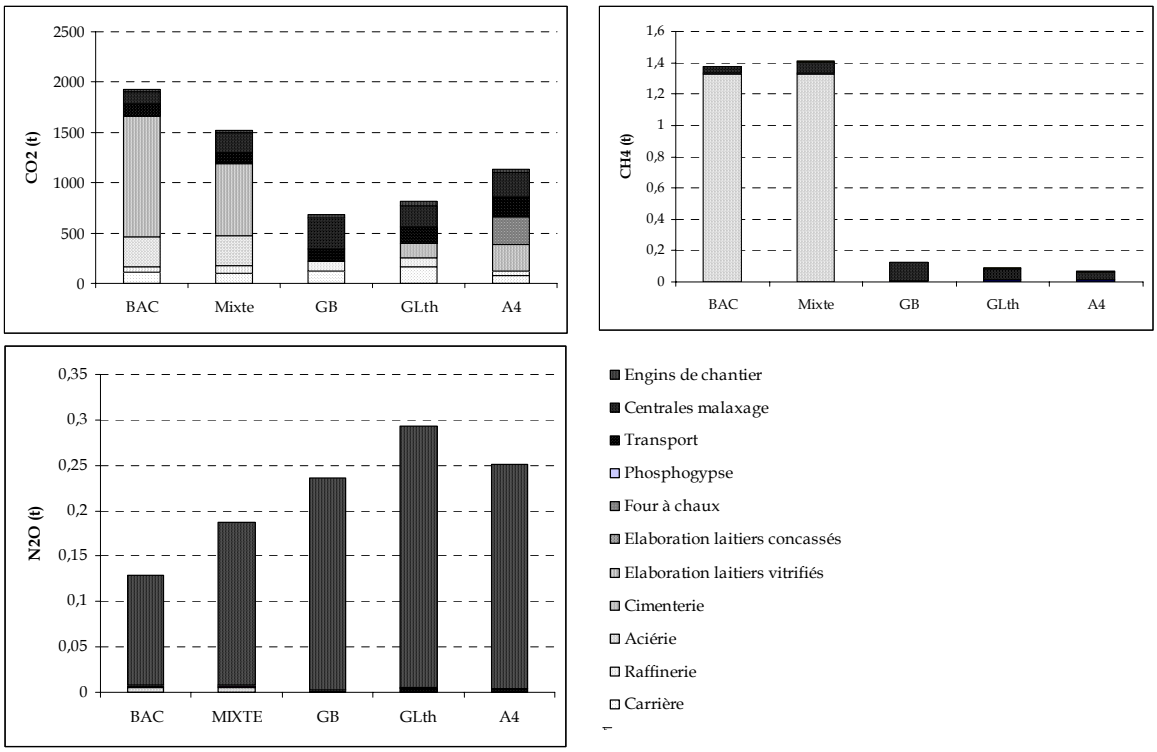


Figure 2. Emissions de gaz à effet de serre (ramenée à 1 km et à deux sens de circulation pendant 30 ans)

- *Emissions de gaz toxiques (CO, NOx et SO_2)*

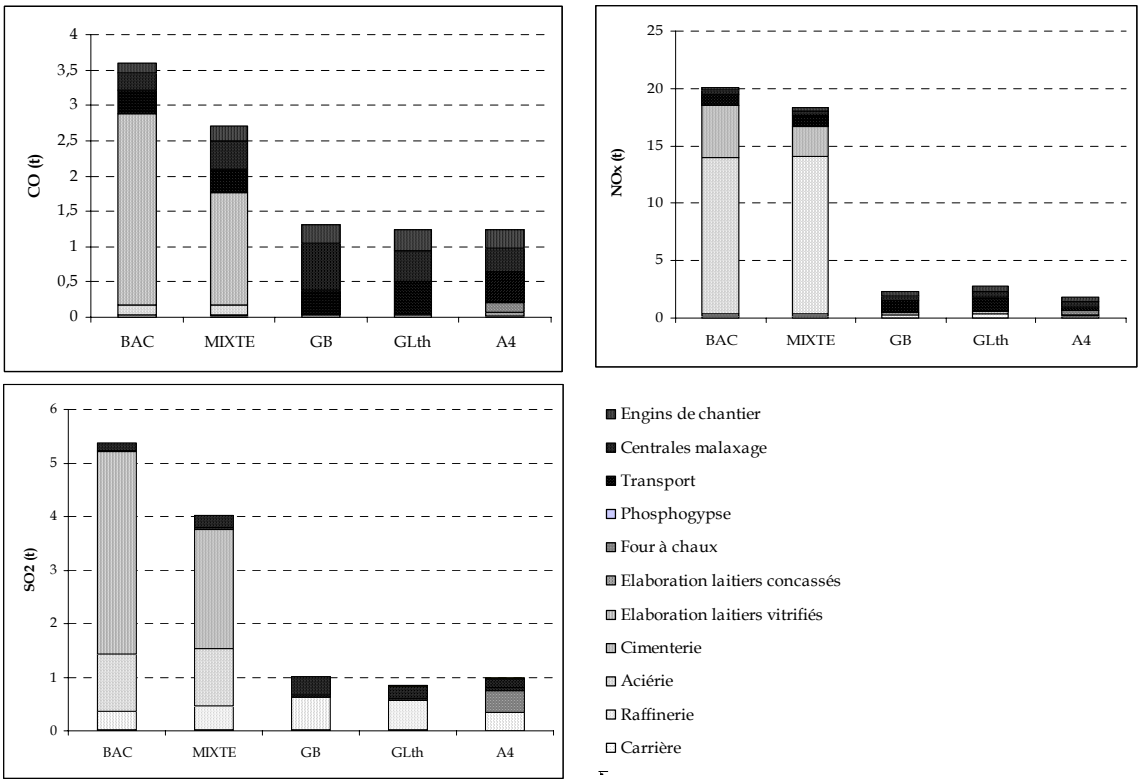


Figure 3. Emissions de gaz toxiques (ramenée à 1 km et à deux sens de circulation pendant 30 ans)

- *Emissions de familles chimiques organiques (HC et COV)*

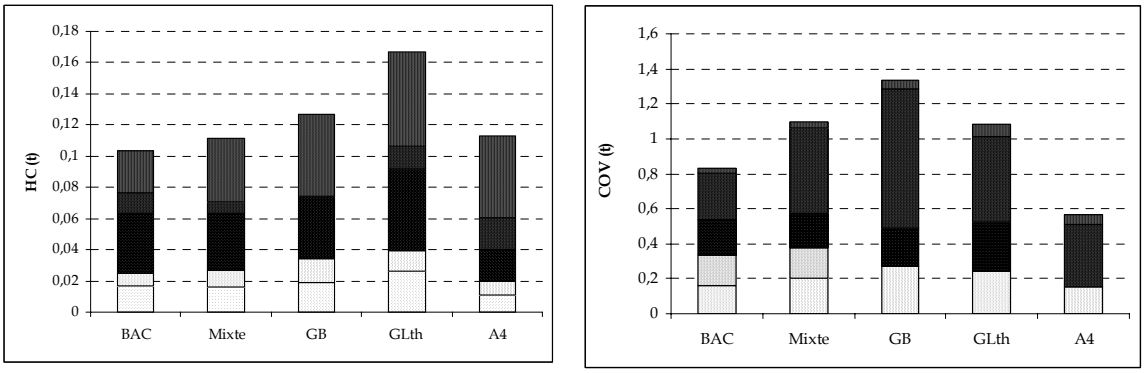


Figure 3. Emissions d'hydrocarbures(ramenée à 1 km et à deux sens de circulation pendant 30 ans)

- *Emissions de particules solides PM*

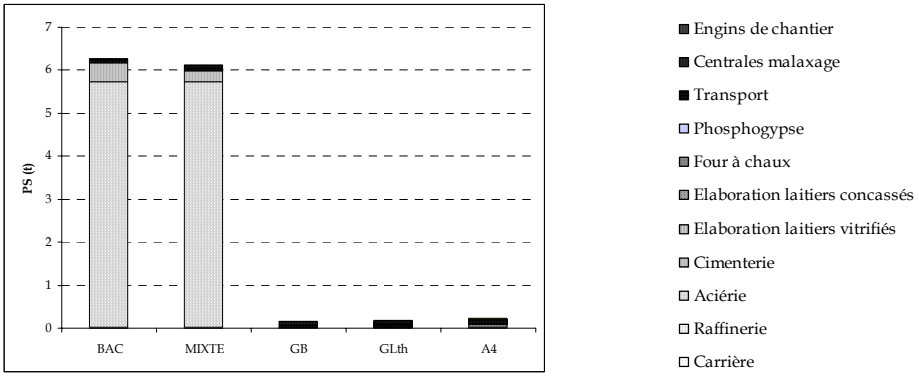


Figure 4. Emissions de particules solides (ramenée à 1 km et à deux sens de circulation pendant 30 ans)

Emissions dans le compartiment eau

- *Emissions de phénol*

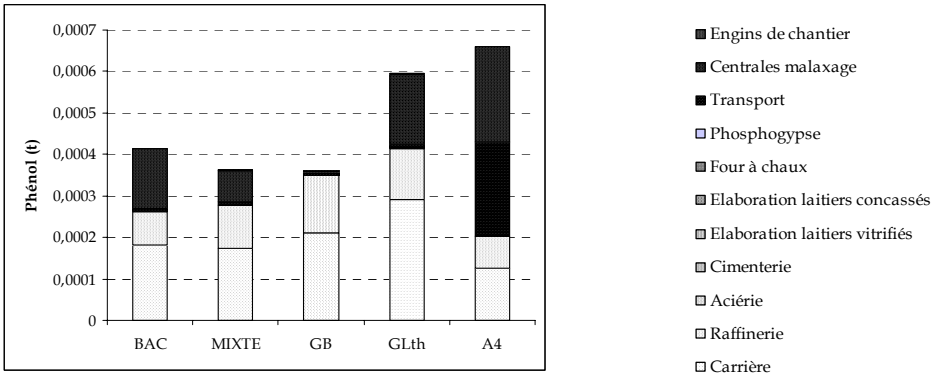
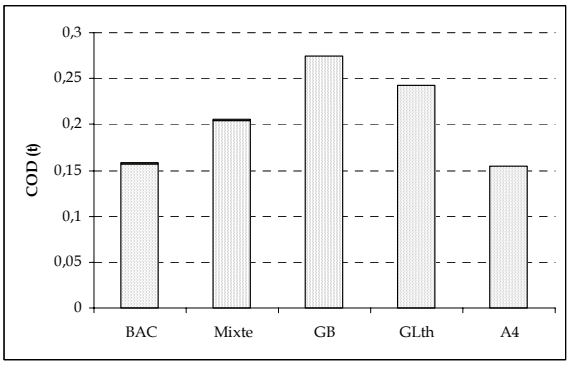
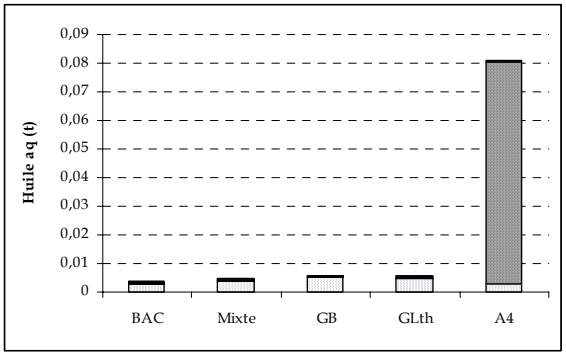


Figure 5. Emissions de phénol (ramenée à 1 km et à deux sens de circulation pendant 30 ans)

- *Indicateurs d'état des effluents aqueux : COD (aq), Huiles (aq), N-Tot (aq)*





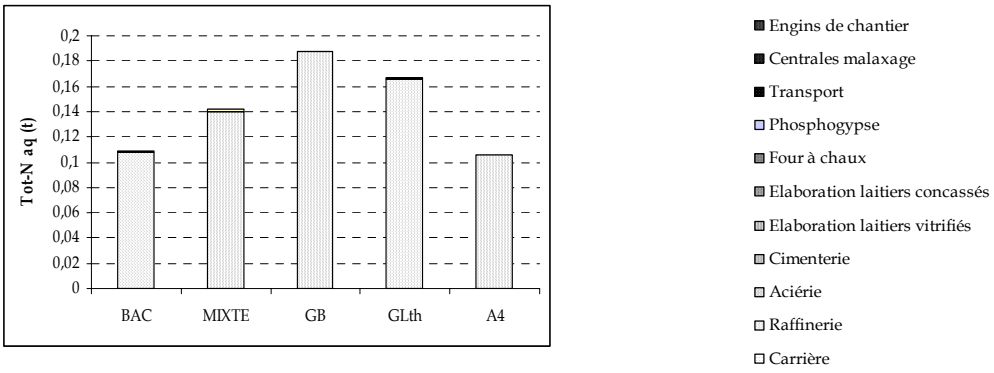


Figure 6. Indicateurs d'état des effluents aqueux (ramenée à 1 km et à deux sens de circulation pendant 30 ans)

ANNEXES DU CHAPITRE 5

1. EXEMPLE DE QUESTIONNAIRE ELABORE

Un exemplaire de questionnaire destiné au maître d'ouvrage est présenté ci-après.

Questionnaire à me renvoyer par mail ou courrier postal avant le :
15 novembre 2006
Avec tous mes remerciements pour votre collaboration !

NOM : _____
ORGANISME : _____
DATE : _____
ADRESSE :_____

Profil socio-économique

1. Etes-vous maître d'ouvrage :

☐ Etat

☐ Région

2. Quel est le budget annuel de votre établissement ?
Année : _____ Budget investissement: _____ €
Année : _____ Budget fonctionnement: _____ €

3. Quel est le budget annuel d'investissement de votre établissement, alloué aux routes (voiries) ?
Année : _____ Budget investissement: _____ €
Année : _____ Budget fonctionnement: _____ €

4. Pouvez-vous indiquer l'ordre de priorité que vous donner habituellement aux critères du code des marchés publics (1 pour le critère le plus important)

_____ valeur technique de l'offre
_____ caractère innovant de l'offre
_____ performances de l'offre en matière de protection de l'environnement
_____ délai d'exécution des travaux
_____ budget de réalisation
_____ budget d'entretien

5. Cochez par importance les critères de choix de votre maître d'œuvre ?

	Sans importance	*Peu important*	*Important*	*Très important*
Proximité				
Délais				
Adéquation entre le montant de la rémunération et le niveau des prestations demandées				
Cohérence entre les enjeux du projet et les compétences de la Moe				
Référence et moyens des équipes de Moe				
Autre, préciser : _____				
Autre, préciser : _____				

Identification des aspects environnementaux

6. Parmi les considérations environnementales suivantes, lesquelles vous semblent faire partie intégrante des **préoccupations des élus*** **?**

* : dans votre jugement des offres, au titre des réglementations en vigueur, dans les préoccupations des riverains, à titre personnel

Aspects environnementaux	*Jamais*	*Rarement*	*Régulièrement*	*Fréquemment*	*Très fréquemment*	*Ne connaît pas*
économies des ressources naturelles non renouvelables						
augmentation de la valorisation des déchets (tri sélectif)						
protection de la biodiversité						
insertion dans le paysage						
diminution de la pollution de l'air						
diminution des risques sanitaires						
diminution de la mise en décharge des déchets						
diminution des émissions de gaz à effets de serre						
diminution de la pollution des eaux						
diminution de nuisances : sonores, vibratoires, poussières						
économie d'énergie						
*autres (à préciser) :*_____						

7. En cas de surcoût lié à une variante dite « environnementale », quel est ou serait le dépassement budgétaire acceptable ?
surcoût d'investissement _____%
surcoût de fonctionnement _____%

8. Dans les réponses actuelles attendues de vos appels d'offre, êtes-vous satisfait des informations environnementales ?

☐ *oui* ☐ *non*

☐*pourquoi ?* _____

9. Afin de juger de la pertinence des informations environnementales reçues, notez les éléments suivant :

	Très satisfaisant	Satisfaisant	Moyen	Insuffisant	Inexistant
Précision de l'information					
Description des réponses données aux exigences réglementaires					
Description des réponses données aux exigences environnementales de l'appel d'offres					
Lisibilité des sources de données					
Description des méthodes d'études utilisées					
Autre, préciser : _____					
Autre, préciser : _____					

Profil socioprofessionnel

10. Dans quelle tranche d'âge vous situez-vous ? (Pas d'obligation de répondre à cette question)
☐ moins de 25 ans ☐ 25 à 45 ans ☐ 46 à 60 ans
☐ plus de 60 ans

11. Quelle est votre responsabilité actuelle au sein de la collectivité ?
_____

12. Depuis quand exercez-vous votre responsabilité au sein de la collectivité ?
☐ moins de 2 ans ☐ entre 2 et 5 ans
☐ entre 5 et 10 ans ☐ plus de 10 ans

13. Avez vous occupé d'autres fonctions précédemment (votre expérience antérieure au sein de la collectivité ou ailleurs) ?
☐ Assistant à maîtrise d'ouvrage
☐ Maître d'œuvre
☐ Assistant à maîtrise d'œuvre

☐ autres, précisez : _____

14. Quelle est votre formation initiale ?

2. RESULTATS DETAILLES DE L'EXPLOITATION DES REPONSES AUX QUESTIONNAIRES

La *Figure 1* présente le classement des critères de jugement des offres selon le point de vue du maître d'ouvrage et maître d'œuvre toutes catégories confondues.

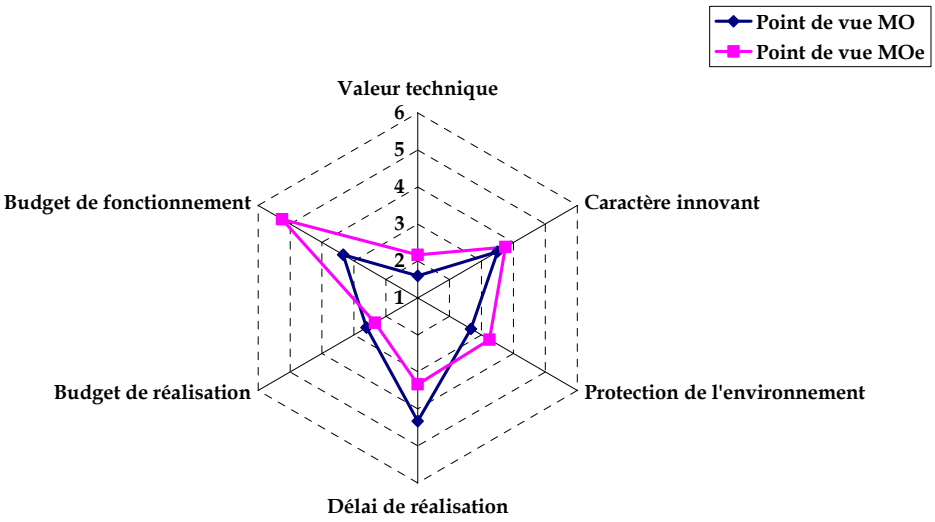


Figure 1. Critères de choix des variantes pour Jugement des offres

<u>Satisfaction des informations environnementales reçues lors des appels d'offre</u>

La *Figure 2* présente la représentation de la satisfaction des maître d'ouvrage et maître d'œuvre vis – à – vis des informations environnementales reçues lors des réponses à des appels d'offre. Le même profil se dégage des maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre. Le niveau de prise en compte de l'environnement par les entreprises routières est très hétérogènes note l'un des maîtres d'ouvrage (MO1) et tient souvent à la sensibilité du directeur des travaux par rapport au chef de chantier de l'entreprise. Ni les maîtres d'œuvre, ni les entreprises ne se sentent vraiment impliqués répond MO2. Pas encore de grandes implications des entreprises, note le MO3. Les maîtres d'ouvrages MO4 et MO5 affirment n'en font pas un critère d'appel d'offre. La pertinence des informations environnementales reçues semble plus satisfaisante pour les services techniques de la maîtrise d'œuvre (conseil général, communauté de commune, et privée que pour le maître d'ouvrage. Ce dernier est moins sensible aux détails techniques.

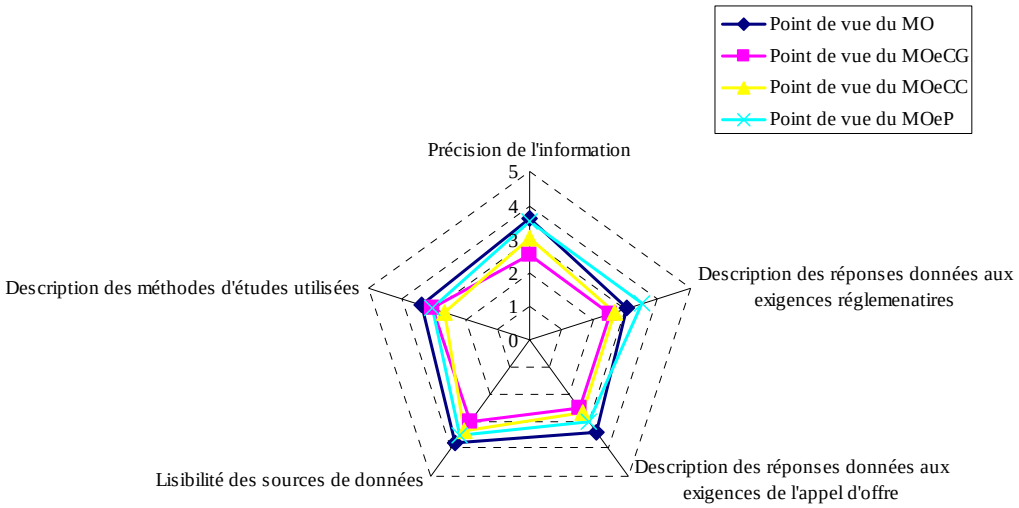


Figure 2. Informations environnementales reçues lors des réponses aux appels d'offre

La *Figure 3* présente les contraintes rencontrées par les entreprises contractantes.

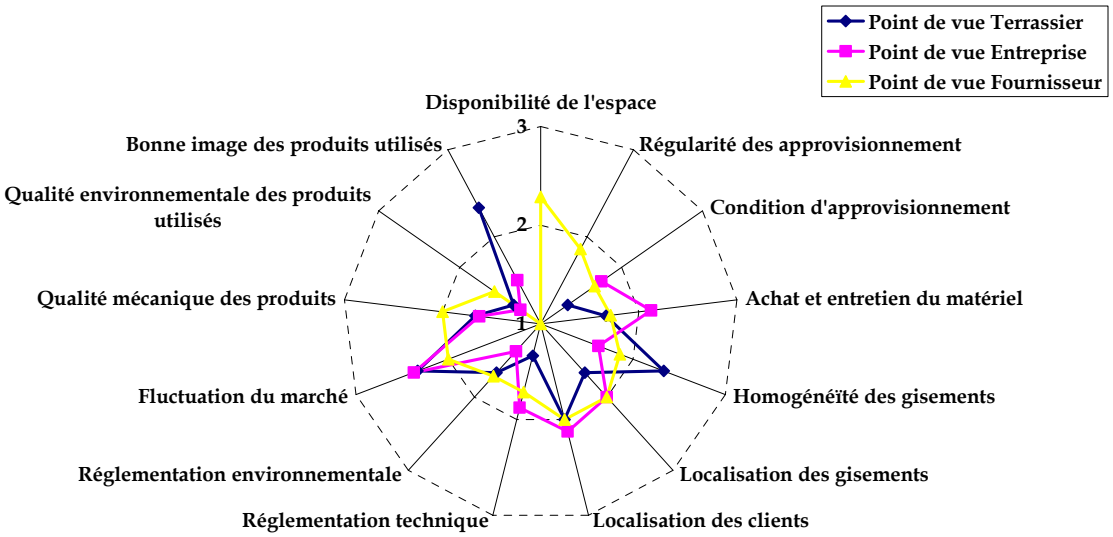


Figure 3. Contraintes rencontrées par les entrepreneurs, terrassiers et fournisseurs de matériaux.

Les tableaux suivants présentent un classement des préoccupations environnementales proposées dans les questionnaires par chacun des acteurs représentés et ce vis à vis de leurs partenaires.

- *Point de vue du maître d'ouvrage*

Le *Tableau 1* présente l'ensemble des critères environnementaux proposés dans le questionnaire et leurs classements vis – vis de chacun des acteurs considéré.

Tableau 1. Point de vue du maître d'ouvrage

	Vs élus	Vs Jugement des offres	Vs réglementation	Vs riverain	A titre perso.
Economie des ressources	9	5	7	10	**1**
Augmentation de la valorisation des déchets	6	6	6	8	4
Protection de la biodiversité	8	5	**3**	7	4
Insertion dans le paysage	**1**	**3**	**3**	**3**	6
Diminution de la pollution de l'air	**3**	4	4	**2**	**3**
Diminution des risques sanitaires	5	**2**	**2**	5	**2**
Diminution de la mise en décharge	7	5	5	6	5
Diminution des GES	5	**3**	5	6	4
Diminution de la pollution des eaux	4	**1**	**1**	4	**3**
Diminution de nuisances	**2**	**1**	**3**	**1**	**3**
Economie d'énergie	5	5	5	9	6

- *Point de vue du maître d'œuvre*

Le *Tableau 2* présente par ordre de priorité le classement des critères environnementaux selon le point de vue du maître d'œuvre.

Tableau 2. Point de vue des services techniques de la maîtrise d'œuvre

	vs MO	vs Partenaires	vs réglementation	vs riverains	vs titre perso
Economie des ressources	8	11	8	8	4
Augmentation de la valorisation des déchets	5	10	5	7	6
Protection de la biodiversité	6	4	**2**	6	4
Insertion dans le paysage	**3**	**3**	**3**	**2**	5
Diminution de la pollution de l'air	6	6	**3**	5	5
Diminution des risques sanitaires	6	5	4	4	**2**
Diminution de la mise en décharge	4	7	4	9	4
Diminution des GES	8	9	7	6	5
Diminution de la pollution des eaux	**2**	**2**	**1**	**3**	**1**
Diminution de nuisances	**1**	**1**	**1**	**1**	**2**
Economie d'énergie	7	8	6	7	**3**

- *Point de vue des entreprises routières*

Le *Tableau 3* présente le point de vue des entreprises vis – à – vis des préoccupations environnementales de leurs partenaires.

Tableau 3.Point de vue des entreprises routières

	vs Clients	vs Réglementation	Vs Riverains	A titre perso
Economie des ressources	**3**	5	9	**3**
Augmentation de la valorisation des déchets	**2**	**2**	6	**2**
Protection de la biodiversité	8	9	7	8
Insertion dans le paysage	6	5	**2**	4
Diminution de la pollution de l'air	6	5	5	6
Diminution des risques sanitaires	5	6	4	6
Diminution de la mise en décharge	**1**	**1**	6	**1**
Diminution des GES	7	8	7	7
Diminution de la pollution des eaux	**3**	**3**	**3**	5

Diminution de nuisances	**3**	4	**1**	4
Economie d'énergie	4	7	8	**2**

- *Point de vue des terrassiers*

Le *Tableau 4* présente le point de vue des terrassiers vis – à – vis des préoccupations environnementales de leurs partenaires.

Tableau 4. Point de vue des terrassiers

	Vs Clients	Vs Réglementation	Vs Riverains	Atitre perso
Economie des ressources	**3**	4	**2**	**1**
Augmentation de la valorisation des déchets	**2**	**3**	**2**	5
Protection de la biodiversité	8	4	**3**	7
Insertion dans le paysage	6	**3**	**1**	8
Diminution de la pollution de l'air	7	4	**1**	**2**
Diminution des risques sanitaires	7	5	5	7
Diminution de la mise en décharge	**1**	**2**	**2**	**2**
Diminution des GES	5	**2**	**3**	**3**
Diminution de la pollution des eaux	**3**	**1**	**3**	4
Diminution de nuisances	6	**2**	**2**	6
Economie d'énergie	4	4	4	**1**

- *Point de vue des fournisseurs des matériaux*

Le Tableau 5 présente le point de vue des fournisseurs vis – à – vis de leurs partenaires. Un score est attribué à chaque critères selon un ordre de classement propre à chaque acteur considéré selon le point de vue du fournisseur.

Vs clients : diminution de la mise en décharge, puis économie d'énergie enfin augmentation de la mise en décharge.
Vs réglementation : augmentation de la valorisation des déchets, diminution de la mise en décharge puis des nuisances
Vs riverains : diminution des nuisances, diminution de la mise en décharge enfin diminution de la pollution de l'air et l'insertion dans le paysage.
A titre personnel : Diminution de la mise en décharge, Diminution de nuisances enfin Augmentation de la valorisation des déchets et Economie des ressources

Tableau 5. Point de vue des fournisseurs des matériaux

	Vs Clients	Vs Réglementation	Vs Riverain	Atitre personnel
Economie des ressources	8	5	6	**3**
Augmentation de la valorisation des déchets	**3**	**1**	6	**3**
Protection de la biodiversité	7	8	7	8
Insertion dans le paysage	8	7	**3**	7
Diminution de la pollution de l'air	4	6	**3**	5
Diminution des risques sanitaires	5	4	4	6
Diminution de la mise en décharge	**1**	**2**	5	**1**
Diminution des GES	9	7	5	6
Diminution de la pollution des eaux	4	4	**2**	4
Diminution de nuisances	6	**3**	**1**	**2**
Economie d'énergie	**2**	7	7	4

- *Représentation des riverains par chacun des acteurs rencontrés*

La représentation des préoccupations environnementales des riverains au sens des différents acteurs de la profession est représentée dans la *Figure 4*. le même profil se dégage de l'ensemble des acteurs sollicités. Le point de vue du terrassier est légèrement différent des autres.

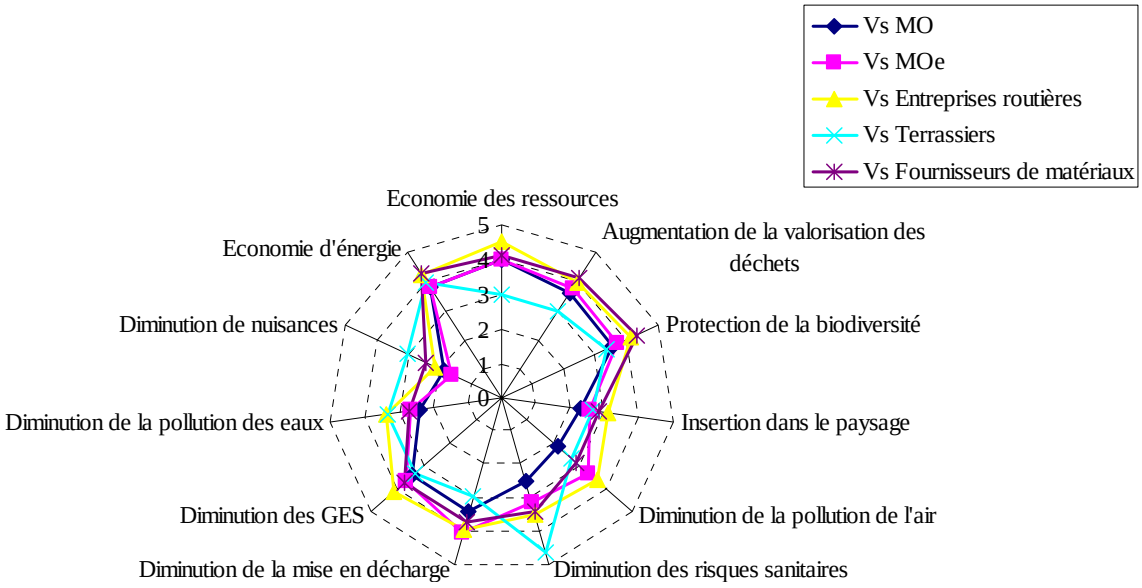


Figure 4. Représentation des riverains par les différents acteurs de la profession.

RESUME

Une méthode d'évaluation environnementale de tronçons routiers, modulaire, basée sur l'Analyse de Cycle de Vie et développée au LCPC, a été étendue aux calculs d'impacts et aux matériaux alternatifs. L'objet de cette thèse était de comparer des variantes d'autoroutes interurbaines utilisant des matériaux naturels et alternatifs et d'étendre l'outil associé au milieu urbain, tout en menant une réflexion sur l'accessibilité de l'outil par des non-spécialistes de l'environnement. Les spécificités de conception urbaine ont été implémentées sur une base de dimensionnement classique. L'extension aux matériaux alternatifs a été traitée pour des laitiers de hauts fourneaux. Plusieurs applications à des cas types de chaussées ainsi que des études d'ouvrages sont présentées. Une enquête sous forme d'entretiens et de questionnaires a été réalisée auprès de différents acteurs de la profession, permettant de dégager la place des critères environnementaux au sein du processus décisionnel.

ABSTRACT

Multicriteria approach of the use of alternative materials in pavements

A modular environmental assessment method of road sections based on Life Cycle Analysis and developed by LCPC, has been extended to impacts calculations and alternative materials assessment. The purpose of this thesis was to compare highway design using natural and alternative materials and to extend the associated tool to urban areas. Besides a detailed analysis of the practice tool clarity by non specialists of the environmental framework was carried out. The urban design has been implemented on the basis of classical design. The extension to alternative materials has been done for blast furnace slag. Several applications for pavement typical cases as well as for engineering works studies are presented. Besides, an investigation by means of interviews and questionnaires was conducted among various stakeholders, to identify the weight of environmental criteria in the decision-making process.