



**HAL**  
open science

## L'outil logiciel ECORCE: cadre méthodologique et contexte scientifique

Anne Ventura, Michel Dauvergne, Philippe Tamagny, Agnès Jullien, Arnaud Feeser, Vincent Coin, Sarah Goyer, Luc Beaudelot, Hugues Odeon, Lionel Odie

### ► To cite this version:

Anne Ventura, Michel Dauvergne, Philippe Tamagny, Agnès Jullien, Arnaud Feeser, et al.. L'outil logiciel ECORCE: cadre méthodologique et contexte scientifique. Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux. IFSTTAR - Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux, pp.159, 2012, Routes et sécurité routière, 978-2720825965. hal-00908345

**HAL Id: hal-00908345**

**<https://hal.science/hal-00908345>**

Submitted on 22 Nov 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Série Routes

# **L'OUTIL LOGICIEL ECORCE : CADRE METHODOLOGIQUE ET CONTEXTE SCIENTIFIQUE**

## **Eco-Comparateur Routes Construction Entretien**

Décembre 2010

Sous la direction de Anne Ventura

Anne VENTURA, chargée de recherches, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Département Matériaux

Michel DAUVERGNE, technicien supérieur, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Département Infrastructures et Mobilité

Philippe TAMAGNY, directeur de recherches, responsable de Département, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Département Infrastructures et Mobilité

Agnès JULLIEN, directrice de recherches, responsable de Groupe, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Département Infrastructures et Mobilité

Arnaud FEESER, technicien supérieur, chargé d'études, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg

Sarah GOYER, ITPE, chargée d'études, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc

Vincent COIN, ITPE, responsable d'activité matériaux, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg

Luc BEAUDELLOT, technicien supérieur, responsable de l'unité « matériaux et innovations », Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement Nord Picardie

Hugues ODEON, IDTPE, chef de groupe terrassements et chaussées, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg

Lionel ODIE, IDTPE, chef d'unité, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc

Illustration de la page de couverture : ECORCE à l'horizon des routes - conception graphique Michelle Toujeron Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Prix de vente

Adresse de diffusion

Copyright LCPC et ISSN

# Sommaire

<b>PREFACE</b> .....	<b>11</b>
1 ANALYSE DE CYCLE DE VIE ET ECO-CONCEPTION .....	11
2 CONTEXTE DE LA RECHERCHE AU LCPC .....	13
2.1 <i>Introduction aux travaux de recherche</i> .....	13
2.2 <i>Méthodologie d'évaluation globale</i> .....	13
2.3 <i>Développement de l'éco-comparateur ECORCE</i> .....	14
3 LISTE DES ACRONYMES.....	15
<b>RESUME</b> .....	<b>18</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>18</b>
<b>PARTENAIRES D'ECORCE ET REMERCIEMENTS</b> .....	<b>19</b>
<b>I INTRODUCTION</b> .....	<b>20</b>
1 GENERALITES SUR L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE .....	21
1.1 <i>Analyse de Cycle de Vie et décision politique</i> .....	21
1.2 <i>Contexte scientifique de l'Analyse de Cycle de Vie</i> .....	22
1.2.1 Choix du système .....	22
1.2.2 Données environnementales.....	22
1.2.3 Allocation des co-produits.....	24
1.2.4 Classification des flux dans les catégories d'impact.....	24
1.2.5 Evaluation de l'impact environnemental .....	24
2 ROUTES ET ANALYSE DE CYCLE DE VIE .....	25
<b>II PRINCIPES GENERAUX D'ECORCE</b> .....	<b>26</b>
1 QU'EST-CE QU'ECORCE ?.....	26
2 PRINCIPES DE LA METHODE D'EVALUATION.....	28
3 PRINCIPES DE L'INTERFACE UTILISATEURS .....	30
4 DEMARCHE GENERALE D'UTILISATION DE L'OUTIL ECORCE.....	31
4.1 <i>Entrées/ définitions des couches de chaussées</i> .....	31
4.2 <i>Déroulement des calculs environnementaux</i> .....	31
4.3 <i>Sorties du logiciel - résultats</i> .....	31
5 PRECISIONS SUR LES INDICATEURS DE RESULTATS CHOISIS .....	32
<b>III SYSTEME ENVIRONNEMENTAL</b> .....	<b>34</b>
1 FRONTIERES DU SYSTEME EN LIEN AVEC L'OBJECTIF DE L'OUTIL .....	34
2 FRONTIERES DU SYSTEME EN LIEN AVEC LA LIMITE DES CONNAISSANCES .....	35
3 FRONTIERES DU SYSTEME EN LIEN AVEC LA DISPONIBILITE DES DONNEES.....	35
4 LISTE DES PROCEDES RETENUS .....	36
5 CONCLUSION .....	37
<b>IV DONNEES ENVIRONNEMENTALES</b> .....	<b>38</b>
1 DONNEES DE LA LITTERATURE.....	38
1.1 <i>Production de l'acier</i> .....	38
1.2 <i>Production du bitume</i> .....	40
1.3 <i>Production de la chaux</i> .....	41
1.4 <i>Production du ciment</i> .....	41
1.5 <i>Centrales matériaux hydrauliques</i> .....	44
1.6 <i>Transport routier</i> .....	44
1.7 <i>Engins de travaux publics</i> .....	45

2	DONNEES COLLECTEES PAR LE LCPC .....	45
2.1	<i>Production des agrégats d'enrobés</i> .....	45
2.2	<i>Carrières</i> .....	45
2.3	<i>Centrales d'enrobage</i> .....	47
3	ABSENCE DE DONNEES PUBLIQUES .....	48
4	CONCLUSION .....	49
<b>V</b>	<b>INDICATEURS ET RESULTATS ENVIRONNEMENTAUX .....</b>	<b>50</b>
1	INDICATEURS UTILISES DANS ECORCE .....	50
1.1	<i>Indicateur d'effet de serre</i> .....	51
1.2	<i>Indicateur d'eutrophisation</i> .....	51
1.3	<i>Indicateur d'acidification du milieu</i> .....	52
1.4	<i>Indicateur de formation d'ozone troposphérique</i> .....	52
1.5	<i>Indicateurs de toxicité et d'écotoxicité</i> .....	53
2	AUTRES INFORMATIONS ENVIRONNEMENTALES CALCULEES PAR ECORCE .....	54
2.1	<i>Inventaire des masses et/ou volumes de matériaux consommés</i> .....	54
2.2	<i>Inventaire de cycle de vie</i> .....	55
2.3	<i>Consommation d'énergie</i> .....	55
2.3.1	Production de l'énergie .....	55
2.3.2	Energie matière .....	56
2.4	<i>Consommation d'eau</i> .....	57
3	INDICATEURS DE CATEGORIES D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX NON CALCULEES DANS ECORCE .....	57
3.1	<i>Indicateur de raréfaction des ressources</i> .....	57
3.2	<i>Indicateur de diminution de la couche d'ozone stratosphérique</i> .....	58
4	CATEGORIES D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX NON PRISES EN COMPTE DANS ECORCE .....	58
5	CONCLUSION .....	59
<b>VI</b>	<b>PRINCIPES METHODOLOGIQUES DES CALCULS .....</b>	<b>60</b>
1	ETAPES DES CALCULS DES FLUX ET INDICATEURS UNITAIRES .....	60
1.1	<i>Discretisation par couche, par procédé et par opération</i> .....	60
1.2	<i>Calcul des indicateurs unitaires</i> .....	61
1.2.1	Principes de calcul.....	61
1.2.2	Unités .....	61
1.3	<i>Harmonisation des données environnementales unitaires</i> .....	62
1.3.1	Remarques générales .....	62
1.3.2	Cas des émissions radioactives.....	62
1.3.3	Cas des familles physico-chimique et des indicateurs d'état .....	62
1.3.4	Sources et valeurs des coefficients de contribution .....	64
1.4	<i>Hypothèses et coefficients de classification des flux aux différentes catégories d'impact</i> .....	64
2	CALCUL DES CONSTANTES PIVOTS .....	65
2.1	<i>Principes de calcul</i> .....	65
2.2	<i>Cas des procédés de production de matériaux</i> .....	66
2.2.1	Matériaux bitumineux .....	66
2.2.2	Matériaux hydrauliques.....	66
2.2.3	Enduits bitumineux .....	68
2.2.4	Couches d'accrochage.....	68
2.2.5	Cas des émulsions .....	68
2.2.6	Règles de prise en compte des matériaux alternatifs .....	69
2.3	<i>Cas des engins</i> .....	69
2.4	<i>Cas des transports</i> .....	69
<b>VII</b>	<b>EXEMPLES D'APPLICATIONS : ETUDES DE CAS.....</b>	<b>71</b>
1	ETUDES DE CAS CLASSIQUES DU CATALOGUE DES STRUCTURES .....	71
1.1	<i>Objectifs de l'étude</i> .....	71
1.2	<i>Etude des couches de surface</i> .....	72
1.2.1	Présentation des cas.....	72
1.2.2	Analyse des résultats .....	72
1.3	<i>Etude des couches d'assise</i> .....	73
1.3.1	Présentation des cas étudiés.....	73
1.3.2	Analyse des résultats .....	73
1.4	<i>Conclusions</i> .....	77
2	ETUDES COMPARATIVES DE TECHNIQUES D'ENTRETIEN.....	77

2.1	<i>Présentation des objectifs</i> .....	77
2.2	<i>Grave émulsion de reprofilage et retraitement à l'émulsion</i> .....	78
2.2.1	Description des cas étudiés.....	78
2.2.2	Résultats et analyse .....	78
2.3	<i>Retraitement en place au liant hydraulique et rechargement GB</i> .....	80
2.3.1	Présentation des cas étudiés.....	80
2.3.2	Résultats et analyse .....	80
3	ÉTUDE PARAMETRIQUE D'UNE GRAVE TRAITEE AUX LIANTS HYDRAULIQUES.....	82
3.1	<i>Objectifs de l'étude</i> .....	82
3.2	<i>Résultats et analyse</i> .....	82
4	CONCLUSIONS SUR LES ETUDES DE CAS .....	84
<b>VIII</b>	<b>ETUDE DE SENSIBILITE</b> .....	<b>85</b>
1	INTRODUCTION .....	85
2	METHODOLOGIE ADOPTEE POUR L'ETUDE DE SENSIBILITE.....	85
2.1	<i>Calcul de l'effet relatif d'un paramètre</i> .....	86
2.2	<i>Description des cas de référence</i> .....	86
3	RESULTATS .....	87
4	CONCLUSIONS.....	88
<b>IX</b>	<b>ECORCE ET LES AUTRES OUTILS ACV</b> .....	<b>90</b>
1	LES OUTILS GENERIQUES DE L'ACV .....	90
2	LES OUTILS DEDIES A L'EVALUATION DES ROUTES .....	91
2.1	<i>Éléments généraux</i> .....	91
2.2	<i>Entrées / sorties logiciels</i> .....	92
2.3	<i>Hypothèses environnementales</i> .....	93
2.4	<i>Résultats environnementaux</i> .....	94
2.5	<i>Bilan de la comparaison des logiciels</i> .....	95
3	COMPARAISON D'UNE ETUDE DE CAS ENTRE ECORCE, PALATE ET BILAN CARBONE® .....	95
3.1	<i>Description du cas</i> .....	95
3.1.1	Méthodes utilisées pour bilan Carbone®.....	96
3.1.2	Méthodes utilisées pour PaLATE.....	96
3.2	<i>Résultats</i> .....	97
3.2.1	Comparaison ECORCE et Bilan Carbone® .....	97
3.2.2	Comparaison ECORCE et PaLATE .....	98
4	BILAN DE L'ETUDE COMPARATIVE DES OUTILS .....	99
<b>X</b>	<b>LES UTILISATEURS D'ECORCE</b> .....	<b>100</b>
1	METHODE D'ANALYSE DES QUESTIONNAIRES .....	100
2	QUESTIONS SUR LES OBJECTIFS DE L'OUTIL .....	101
3	QUESTIONS SUR LE PRINCIPE GENERAL DE FONCTIONNEMENT .....	101
4	QUESTIONS SUR LES SORTIES DE L'OUTIL .....	102
5	QUESTIONS SUR LES CAS TRAITES PAR L'OUTIL .....	103
6	QUESTIONS SUR LES LIMITES DE L'EVALUATION.....	104
7	BILAN DES AVIS RECUEILLIS SUR ECORCE.....	104
<b>XI</b>	<b>CONCLUSION : APPORTS ET LIMITES D'ECORCE</b> .....	<b>105</b>
<b>XII</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>107</b>
1	REFERENCES CITEES DANS L'OUVRAGE .....	107
2	COMMUNICATIONS SUR ECORCE .....	113
<b>ANNEXES</b>	<b>.....</b>	<b>114</b>
1	DESCRIPTIF DES CAS ETUDIES (« CHAPITRE VII EXEMPLES D'APPLICATIONS : ETUDES DE CAS ») .....	114
1.1	<i>Structures, formules et mise en œuvre des couches de surface (page 72)</i> .....	114
1.2	<i>Structures, formules et mise en œuvre des couches d'assises (page 73)</i> .....	116
1.3	<i>Structure, formules et mise en œuvre de la grave émulsion de reprofilage (page 78)</i> .....	118
1.4	<i>Structure, formules et mise en œuvre du retraitement à l'émulsion (page 78)</i> .....	118
1.5	<i>Structure, formules et mise en œuvre du rechargement GB (page 80)</i> .....	119
1.6	<i>Structure, formules et mise en œuvre du retraitement en place au liant hydraulique (page 80)</i> ...	120
1.7	<i>Structure, formules et mise en œuvre d'une structure mixte (page 82)</i> .....	121

1.8	<i>Structure, formules et mise en œuvre d'une structure semi-rigide (page 82)</i> .....	122
1.9	<i>Structure, formules et mise en œuvre d'une structure souple (page 82)</i> .....	123
2	DESCRIPTIF DETAILLE DES RESULTATS (« CHAPITRE VII EXEMPLES D'APPLICATIONS : ETUDES DE CAS ») 125	
2.1	<i>Résultats pour les couches de surface (page 72)</i> .....	125
2.2	<i>Résultats pour les couches d'assises (page 73)</i> .....	129
2.3	<i>Résultats pour la grave émulsion de reprofilage (page 78)</i> .....	133
2.4	<i>Résultats pour le retraitement à l'émulsion (page 78)</i> .....	134
2.5	<i>Résultats pour le rechargement GB (page 80)</i> .....	134
2.6	<i>Résultats pour le retraitement en place au liant hydraulique (page 80)</i> .....	135
2.7	<i>Résultats pour la structure mixte (page 82)</i> .....	136
2.8	<i>Résultats pour la structure semi-rigide (page 82)</i> .....	140
3	DESCRIPTIF DETAILLE DES VALEURS DE REFERENCE, DE VARIATION ET DES RESULTATS PAR INDICATEUR (CHAPITRE VIII ETUDE DE SENSIBILITE PAGE 86) .....	144
3.1	<i>Couche en GB 0/14 EB 14</i> .....	144
3.2	<i>Couche en Grave émulsion</i> .....	146
3.3	<i>Couche en enduit</i> .....	147
3.4	<i>Couche d'accrochage</i> .....	148
3.5	<i>Couche matériau hydraulique</i> .....	149
3.6	<i>Couche béton armé continu</i> .....	150
4	DESCRIPTIF DETAILLE DU CAS ETUDIE ET DES RESULTATS DANS LA COMPARAISON DES OUTILS ECORCE, BILAN CARBONE® ET PALATE (PAGE 95) .....	152
4.1	<i>Cas étudié</i> .....	152
4.1.1	Bilan Carbone méthode 1 .....	152
4.1.2	Bilan Carbone méthode 2 : exemple de calcul pour la couche de grave ciment : .....	152
4.2	<i>Résultats Bilan Carbone®</i> .....	153
4.2.1	Méthode 1.....	153
4.2.2	Méthode 2 hors fabrication.....	153
4.2.3	Méthode 2 fabrication des matériaux routiers .....	154
4.3	<i>Résultats PaLATE</i> .....	155
5	QUESTIONNAIRE DISTRIBUE AVANT LE DEVELOPPEMENT D'ECORCE .....	156
6	SYNTHESE DES RETOURS UTILISATEURS DU RST .....	158

# 1 Liste des figures

FIGURE 1 : EXEMPLE DE POLITIQUES D'ENTRETIENS POUR UNE CHAUSSEE EN BAC .....	27
FIGURE 2 : SCHEMA DES ELEMENTS CONSIDERES POUR L'EVALUATION ENVIRONNEMENTALE .....	28
FIGURE 3 : SYSTEME ENVIRONNEMENTAL : PROCEDES INCLUS DANS ECORCE .....	29
FIGURE 4 : SCHEMA DE L'ENTREE METIER ET PARAMETRES ROUTIERS ASSOCIES .....	30
FIGURE 5: EXEMPLE DE PROFIL EN TRAVERS SUR UNE ROUTE NATIONALE HORS RESEAU STRUCTURANT (SETRA/LCPC 1994).....	30
FIGURE 6 : EXEMPLE DE PROFIL EN TRAVERS A 2X2 VOIES (SETRA/LCPC 1994).....	30
FIGURE 7: ORGANIGRAMME GENERAL D'ECORCE.....	32
FIGURE 8. TYPE D'INFORMATION DISPONIBLE SUR L'ENERGIE PRIMAIRE TOTALE D'UN SYSTEME DE PRODUCTION	55
FIGURE 9 : LES ETAPES DETAILLEES DES CALCULS DANS ECORCE.....	61
FIGURE 10 : METHODE DE CALCUL DES CONSTANTES PIVOTS A PARTIR DES DONNEES UTILISATEURS .....	65
FIGURE 11. COMPARAISON ENTRE SOLUTIONS GB AVEC AGREGATS (A) ET SANS AGREGATS (B).....	74
FIGURE 12. COMPARAISON ENTRE SOLUTIONS GB (A) ET EME (C) .....	75
FIGURE 13. COMPARAISON ENTRE STRUCTURES BITUMINEUSE EPAISSE (A) ET SEMI-RIGIDE (E) .....	76
FIGURE 14. COMPARAISON ENTRE STRUCTURES BITUMINEUSE EPAISSE (A), SEMI-RIGIDE (E) ET MIXTE (F).....	76
FIGURE 15. COMPARATIF ECORCE ET BILAN CARBONE® .....	97
FIGURE 16. COMPARATIF APRES ALIGNEMENT DES DONNEES ET DES SYSTEMES ENVIRONNEMENTAUX.....	98
FIGURE 17. COMPARAISON DES CONSOMMATIONS D'ENERGIE PAR PROCEDES ENTRE ECORCE ET PALATE .....	98
FIGURE 18. COMPARAISON DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE PAR PROCEDES ENTRE ECORCE ET PALATE .....	99
FIGURE 19. L'OUTIL COMME SUPPORT DECISIONNEL COMMUN .....	105
FIGURE 20. CONSOMMATIONS EN RESSOURCES NATURELLES PAR COUCHE DE ROULEMENT .....	125
FIGURE 21. BILAN ENERGETIQUE PAR COUCHE DE ROULEMENT.....	125
FIGURE 22. CONSOMMATION EN EAU PAR COUCHE DE ROULEMENT.....	126
FIGURE 23. EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE PAR COUCHE DE ROULEMENT .....	126
FIGURE 24. ACIDIFICATION PAR COUCHE DE ROULEMENT.....	127
FIGURE 25. EUTROPHISATION PAR COUCHE DE ROULEMENT .....	127
FIGURE 26. OZONE PHOTOCHIMIQUE PAR COUCHE DE ROULEMENT .....	128
FIGURE 27. POTENTIEL ECOTOXIQUE PAR COUCHE DE ROULEMENT .....	128
FIGURE 28. POTENTIEL TOXIQUE PAR COUCHE DE ROULEMENT .....	129
FIGURE 29. CONSOMMATIONS EN RESSOURCES NATURELLES SUR STRUCTURE GLOBALE AVEC COUCHE D'ASSISE .....	129
FIGURE 30. BILAN ENERGETIQUE SUR STRUCTURE GLOBALE AVEC COUCHE D'ASSISE.....	130
FIGURE 31. CONSOMMATION EN EAU SUR STRUCTURE GLOBALE AVEC COUCHE D'ASSISE.....	130
FIGURE 32. EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE SUR STRUCTURE GLOBALE AVEC COUCHE D'ASSISE .....	131
FIGURE 33. ACIDIFICATION SUR STRUCTURE GLOBALE AVEC COUCHE D'ASSISE.....	131
FIGURE 34. EUTROPHISATION SUR STRUCTURE GLOBALE AVEC COUCHE D'ASSISE .....	132
FIGURE 35. OZONE PHOTOCHIMIQUE SUR STRUCTURE GLOBALE AVEC COUCHE D'ASSISE .....	132
FIGURE 36. POTENTIEL ECOTOXIQUE SUR STRUCTURE GLOBALE AVEC COUCHE D'ASSISE .....	133
FIGURE 37. POTENTIEL TOXIQUE SUR STRUCTURE GLOBALE AVEC COUCHE D'ASSISE .....	133
FIGURE 38. CONSOMMATION EN ENERGIE POUR LA STRUCTURE MIXTE A DIFFERENTS TAUX DE CLINKER .....	136
FIGURE 39. CONSOMMATION EN EAU POUR LA STRUCTURE MIXTE A DIFFERENTS TAUX DE CLINKER .....	136
FIGURE 40. INDICATEUR D'EFFET DE SERRE POUR LA STRUCTURE MIXTE A DIFFERENTS TAUX DE CLINKER .....	137
FIGURE 41. INDICATEUR D'ACIDIFICATION POUR LA STRUCTURE MIXTE A DIFFERENTS TAUX DE CLINKER .....	137
FIGURE 42. INDICATEUR D'EUTROPHISATION POUR LA STRUCTURE MIXTE A DIFFERENTS TAUX DE CLINKER .....	138
FIGURE 43. INDICATEUR D'OZONE PHOTOCHIMIQUE POUR LA STRUCTURE MIXTE A DIFFERENTS TAUX DE CLINKER .....	138
FIGURE 44. INDICATEUR D'ECOTOXICITE POUR LA STRUCTURE MIXTE A DIFFERENTS TAUX DE CLINKER.....	139
FIGURE 45. INDICATEUR DE TOXICITE POUR LA STRUCTURE MIXTE A DIFFERENTS TAUX DE CLINKER .....	139
FIGURE 46. CONSOMMATION EN ENERGIE POUR LA STRUCTURE SEMI-RIGIDE A DIFFERENTS TAUX DE CLINKER..	140
FIGURE 47. CONSOMMATION EN EAU POUR LA STRUCTURE SEMI-RIGIDE A DIFFERENTS TAUX DE CLINKER.....	140
FIGURE 48. INDICATEUR D'EFFET DE SERRE POUR LA STRUCTURE SEMI-RIGIDE A DIFFERENTS TAUX DE CLINKER	141
FIGURE 49. INDICATEUR D'ACIDIFICATION POUR LA STRUCTURE SEMI-RIGIDE A DIFFERENTS TAUX DE CLINKER	141
FIGURE 50. INDICATEUR D'EUTROPHISATION POUR LA STRUCTURE SEMI-RIGIDE A DIFFERENTS TAUX DE CLINKER .....	142



FIGURE 51. INDICATEUR D'OZONE PHOTOCHIMIQUE POUR LA STRUCTURE SEMI-RIGIDE A DIFFERENTS TAUX DE CLINKER .....	142
FIGURE 52. INDICATEUR D'ECOTOXICITE POUR LA STRUCTURE SEMI-RIGIDE A DIFFERENTS TAUX DE CLINKER ...	143
FIGURE 53. INDICATEUR DE TOXICITE POUR LA STRUCTURE SEMI-RIGIDE A DIFFERENTS TAUX DE CLINKER.....	143

## 2 Liste des tableaux

TABLEAU 1. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES METHODES ACV PROCEDES ET IO. D'APRES (SANTERO ET AL. 2010).....	23
TABLEAU 2. DONNEES ENVIRONNEMENTALES DISPONIBLES CONCERNANT LA PRODUCTION DE L'ACIER .....	39
TABLEAU 3. COMPARAISON DES FLUX PAR SOURCE POUR LA PRODUCTION DE L'ACIER.....	39
TABLEAU 4. DONNEES ENVIRONNEMENTALES DISPONIBLES CONCERNANT LA PRODUCTION DU BITUME.....	40
TABLEAU 5. COMPARAISON DES FLUX D'ENERGIE, DE CO2 ET DE NOX POUR LA PRODUCTION DU BITUME .....	41
TABLEAU 6. DONNEES ENVIRONNEMENTALES DISPONIBLES CONCERNANT LA PRODUCTION DE CHAUX .....	41
TABLEAU 7. DONNEES ENVIRONNEMENTALES DISPONIBLES CONCERNANT LA PRODUCTION DU CIMENT.....	42
TABLEAU 8. COMPARAISON DES FLUX ISSUS DE LA PRODUCTION DU CIMENT .....	42
TABLEAU 9. COMPARAISON DES SYSTEMES ENVIRONNEMENTAUX ASSOCIES AUX DONNEES ENVIRONNEMENTALES DISPONIBLES CONCERNANT LA PRODUCTION DES MELANGES HYDRAULIQUES .....	44
TABLEAU 10. COMPARAISON DES DONNEES ENVIRONNEMENTALES CONCERNANT LA PRODUCTION DES MELANGES HYDRAULIQUES .....	44
TABLEAU 11. SYSTEME ENVIRONNEMENTAL ASSOCIE AUX DONNEES ENVIRONNEMENTALES DISPONIBLES CONCERNANT LA PRODUCTION DES AGREGATS D'ENROBES.....	45
TABLEAU 12. DONNEES ENVIRONNEMENTALES DISPONIBLES CONCERNANT LA PRODUCTION DE GRANULATS EN EXPLOITATION DE CARRIERE. ....	46
TABLEAU 13. COMPARAISON DES FLUX PAR SOURCE POUR LES CARRIERES DE ROCHES MASSIVES .....	47
TABLEAU 14. COMPARAISON DES FLUX PAR SOURCE POUR LES CARRIERES DE ROCHES ALLUVIONNAIRES .....	47
TABLEAU 15. DONNEES ENVIRONNEMENTALES DISPONIBLES CONCERNANT LA PRODUCTION D'ENROBES .....	47
TABLEAU 16. COMPARAISON DES FLUX PAR SOURCE POUR LES CENTRALES D'ENROBAGE .....	48
TABLEAU 17. HYPOTHESES DE DIMENSIONNEMENT .....	71
TABLEAU 18. COMPARAISON DE LA CONSOMMATION DE MATERIAUX ENTRE GE DE REPROFILAGE ET RETRAITEMENT A L'EMULSION .....	79
TABLEAU 19. COMPARAISON DES CONSOMMATIONS EN ENERGIE ET EN EAU ENTRE GE DE REPROFILAGE ET RETRAITEMENT A L'EMULSION .....	79
TABLEAU 20. COMPARAISON DES INDICATEURS D'EFFET DE SERRE, D'ACIDIFICATION ET D'EUTROPHISATION ENTRE GE DE REPROFILAGE ET RETRAITEMENT A L'EMULSION .....	79
TABLEAU 21. COMPARAISON DES INDICATEURS D'OZONE PHOTOCHIMIQUE, D'ECOTOXICITE ET DE TOXICITE ENTRE GE DE REPROFILAGE ET RETRAITEMENT A L'EMULSION .....	79
TABLEAU 22. QUANTITES DE MATERIAUX UTILISEES .....	80
TABLEAU 23. COMPARAISON DE LA CONSOMMATION DE MATERIAUX ENTRE RECHARGEMENT GB ET RETRAITEMENT EN PLACE AU LIANT HYDRAULIQUE .....	81
TABLEAU 24. COMPARAISON DES CONSOMMATIONS EN ENERGIE ET EN EAU ENTRE RECHARGEMENT GB ET RETRAITEMENT EN PLACE AU LIANT HYDRAULIQUE .....	81
TABLEAU 25. COMPARAISON DES INDICATEURS D'EFFET DE SERRE, D'ACIDIFICATION ET D'EUTROPHISATION ENTRE RECHARGEMENT GB ET RETRAITEMENT EN PLACE AU LIANT HYDRAULIQUE .....	81
TABLEAU 26. COMPARAISON DES INDICATEURS D'OZONE PHOTOCHIMIQUE, D'ECOTOXICITE ET DE TOXICITE CHRONIQUE ENTRE RECHARGEMENT GB ET RETRAITEMENT EN PLACE AU LIANT HYDRAULIQUE .....	82
TABLEAU 27. POINT D'EQUIVALENCE EN FONCTION DU TAUX DE CLINKER PAR INDICATEUR DES STRUCTURES MIXTE ET SEMI-RIGIDE A LA STRUCTURE SOUPLE .....	83
TABLEAU 28. PARAMETRE A OBSERVER POUR L'ETUDE DE SENSIBILITE ET ONGLETS DE SAISIE CONCERNES DANS ECORCE .....	87
TABLEAU 29. RESULTATS DES EFFETS RELATIFS DE LA VARIATION DE CHAQUE PARAMETRE POUR LES DIFFERENTS INDICATEURS.....	88
TABLEAU 30. TYPES D'ENTREES ET DE SORTIES DES OUTILS GENERIQUES (NC : NON COMMUNIQUE) .....	90
TABLEAU 31. ELEMENTS GENERAUX CONCERNANT LES DIFFERENTS OUTILS.....	91
TABLEAU 32. TYPES D'ENTREES ET DE SORTIES DES DIFFERENTS OUTILS .....	92
TABLEAU 33. HYPOTHESES ENVIRONNEMENTALES DES DIFFERENTS OUTILS .....	93
TABLEAU 34. TYPES DE RESULTATS ENVIRONNEMENTAUX FOURNIS PAR LES DIFFERENTS OUTILS.....	94

TABLEAU 35. VALEURS CORRIGÉES UTILISÉES DANS PALATE EN FONCTION DES ESTIMATIONS DES PRIX UNITAIRES DES MATERIAUX ROUTIERS EN FRANCE EN 2010 .....	96
TABLEAU 36. SYNTHÈSE DES RÉPONSES AU QUESTIONNAIRE PRÉLIMINAIRE CONCERNANT LES OBJECTIFS DE L'OUTIL .....	101
TABLEAU 37. SYNTHÈSE DES RÉPONSES AU QUESTIONNAIRE PRÉLIMINAIRE CONCERNANT LES PRINCIPES GÉNÉRAUX DE L'OUTIL .....	102
TABLEAU 38. SYNTHÈSE DES RÉPONSES AU QUESTIONNAIRE PRÉLIMINAIRE CONCERNANT LES SORTIES DE L'OUTIL .....	103
TABLEAU 39. SYNTHÈSE DES RÉPONSES AU QUESTIONNAIRE PRÉLIMINAIRE CONCERNANT LES CAS TRAITÉS PAR L'OUTIL .....	103
TABLEAU 40. SYNTHÈSE DES RÉPONSES AU QUESTIONNAIRE PRÉLIMINAIRE CONCERNANT LES LIMITES DE L'ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE.....	104
TABLEAU 41. COUCHES DE SURFACE .....	114
TABLEAU 42. COMPOSITION DES COUCHES DE SURFACE - * : MVA : MASSE VOLUMIQUE APPARENTE .....	114
TABLEAU 43. DESCRIPTIF DE LA MISE EN ŒUVRE DES COUCHES DE SURFACE .....	115
TABLEAU 44. CAS DE STRUCTURES ÉTUDIÉES AVEC COUCHES D'ASSISES .....	116
TABLEAU 45. FORMULATIONS ÉTUDIÉES .....	116
TABLEAU 46. DESCRIPTIF DE LA MISE EN ŒUVRE DES COUCHES D'ASSISES .....	117
TABLEAU 47. GE DE REPROFILAGE - DESCRIPTION DE LA STRUCTURE ÉTUDIÉE.....	118
TABLEAU 48. GE DE REPROFILAGE - DESCRIPTION DES FORMULES.....	118
TABLEAU 49. GE DE REPROFILAGE – DECONSTRUCTION ET MISE EN ŒUVRE .....	118
TABLEAU 50. RETRAITEMENT A L'ÉMULSION - DESCRIPTION DE LA STRUCTURE ÉTUDIÉE .....	119
TABLEAU 51. RETRAITEMENT A L'ÉMULSION- DESCRIPTION DES FORMULES.....	119
TABLEAU 52. RETRAITEMENT A L'ÉMULSION– DECONSTRUCTION ET MISE EN ŒUVRE .....	119
TABLEAU 53. RECHARGEMENT GB - DESCRIPTION DE LA STRUCTURE ÉTUDIÉE .....	119
TABLEAU 54. RECHARGEMENT GB - DESCRIPTION DES FORMULES .....	119
TABLEAU 55. RECHARGEMENT GB – DECONSTRUCTION ET MISE EN ŒUVRE.....	120
TABLEAU 56. RETRAITEMENT EN PLACE AU LIANT HYDRAULIQUE - DESCRIPTION DE LA STRUCTURE ÉTUDIÉE ....	120
TABLEAU 57. RETRAITEMENT EN PLACE AU LIANT HYDRAULIQUE - DESCRIPTION DES FORMULES .....	120
TABLEAU 58. RETRAITEMENT EN PLACE AU LIANT HYDRAULIQUE – DECONSTRUCTION ET MISE EN ŒUVRE .....	121
TABLEAU 59. DESCRIPTION DE LA STRUCTURE MIXTE ET FORMULATIONS.....	121
TABLEAU 60. MISE EN ŒUVRE DE LA STRUCTURE MIXTE.....	122
TABLEAU 61. DESCRIPTION DE LA STRUCTURE SEMI-RIGIDE ET FORMULATIONS .....	122
TABLEAU 62. MISE EN ŒUVRE DE LA STRUCTURE SEMI-RIGIDE .....	123
TABLEAU 63. DESCRIPTION DE LA STRUCTURE BITUMINEUSE ET FORMULATIONS .....	123
TABLEAU 64. MISE EN ŒUVRE DE LA STRUCTURE BITUMINEUSE .....	124
TABLEAU 65. GE DE REPROFILAGE – CONSOMMATION DE MATERIAUX .....	133
TABLEAU 66. GE DE REPROFILAGE – CONSOMMATION EN ÉNERGIE ET EN EAU .....	134
TABLEAU 67. GE DE REPROFILAGE – INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX.....	134
TABLEAU 68. RETRAITEMENT A L'ÉMULSION– CONSOMMATION DE MATERIAUX .....	134
TABLEAU 69. RETRAITEMENT A L'ÉMULSION– CONSOMMATION EN ÉNERGIE ET EN EAU .....	134
TABLEAU 70. RETRAITEMENT A L'ÉMULSION– INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX.....	134
TABLEAU 71. RECHARGEMENT GB – CONSOMMATION DE MATERIAUX.....	134
TABLEAU 72. RECHARGEMENT GB – CONSOMMATION EN ÉNERGIE ET EN EAU .....	135
TABLEAU 73. RECHARGEMENT GB – INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX.....	135
TABLEAU 74. RETRAITEMENT EN PLACE AU LIANT HYDRAULIQUE – CONSOMMATION DE MATERIAUX .....	135
TABLEAU 75. RETRAITEMENT EN PLACE AU LIANT HYDRAULIQUE – CONSOMMATION EN ÉNERGIE ET EN EAU ....	135
TABLEAU 76. RETRAITEMENT EN PLACE AU LIANT HYDRAULIQUE – INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX .....	135
TABLEAU 77. VALEURS DE RÉFÉRENCES ET DE VARIATION DES PARAMÈTRES POUR LE CAS GB 0/14 EB 14 ASSISE .....	144
TABLEAU 78. RESULTATS DU CAS DE RÉFÉRENCE GB 0/14 EB 14 ASSISE SANS AGREGATS RECYCLÉS .....	144
TABLEAU 79. RESULTATS DU CAS DE RÉFÉRENCE GB 0/14 EB 14 ASSISE AVEC 10% D'AGREGATS RECYCLÉS.....	144
TABLEAU 80. RESULTATS EN FONCTION DES VALEURS DE VARIATION POUR LE CAS GB 0/14 EB 14.....	145
TABLEAU 81. EFFET RELATIF DE LA DE LA VARIATION POUR LE CAS GB 0/14 EB 14.....	145
TABLEAU 82. VALEURS DE RÉFÉRENCES ET DE VARIATION DES PARAMÈTRES POUR LE CAS GRAVE EMULSION ..	146
TABLEAU 83. RESULTATS DU CAS DE RÉFÉRENCE GRAVE EMULSION .....	146
TABLEAU 84. RESULTATS EN FONCTION DES VALEURS DE VARIATION POUR LE CAS GRAVE EMULSION .....	146
TABLEAU 85. EFFET RELATIF DE LA DE LA VARIATION POUR LE CAS GRAVE EMULSION .....	147
TABLEAU 86. VALEURS DE RÉFÉRENCES ET DE VARIATION DES PARAMÈTRES POUR LE CAS ENDUIT .....	147
TABLEAU 87. RESULTATS DU CAS DE RÉFÉRENCE ENDUIT .....	147

TABLEAU 88. RESULTATS EN FONCTION DES VALEURS DE VARIATION POUR LE CAS ENDUIT .....	148
TABLEAU 89. EFFET RELATIF DE LA VARIATION POUR LE CAS ENDUIT .....	148
TABLEAU 90. VALEURS DE REFERENCES ET DE VARIATION DES PARAMETRES POUR LE CAS ACCROCHAGE .....	148
TABLEAU 91. RESULTATS DU CAS DE REFERENCE ACCROCHAGE .....	148
TABLEAU 92. RESULTATS EN FONCTION DES VALEURS DE VARIATION POUR LE CAS ACCROCHAGE .....	149
TABLEAU 93. EFFET RELATIF DE LA VARIATION POUR LE CAS ACCROCHAGE .....	149
TABLEAU 94. VALEURS DE REFERENCES ET DE VARIATION DES PARAMETRES POUR LE CAS GRAVE HYDRAULIQUE (VNO : VARIATION NON OBSERVEE) .....	149
TABLEAU 95. RESULTATS DU CAS DE REFERENCE GRAVE HYDRAULIQUE .....	149
TABLEAU 96. RESULTATS EN FONCTION DES VALEURS DE VARIATION POUR LE CAS GRAVE HYDRAULIQUE .....	150
TABLEAU 97. EFFET RELATIF DE LA VARIATION POUR LE CAS GRAVE HYDRAULIQUE .....	150
TABLEAU 98. VALEURS DE REFERENCES ET DE VARIATION DES PARAMETRES POUR LE CAS BETON ARME CONTINU .....	150
TABLEAU 99. RESULTATS DU CAS DE REFERENCE GRAVE BETON ARME CONTINU.....	150
TABLEAU 100. RESULTATS EN FONCTION DES VALEURS DE VARIATION POUR LE CAS BETON ARME CONTINU .....	151
TABLEAU 101. EFFET RELATIF DE LA VARIATION POUR LE CAS BETON ARME CONTINU .....	151

# Préface

## **1 Analyse de Cycle de Vie et éco-conception**

Les prémices de l'ACV ont fait leur apparition dans les années 60 aux Etats-Unis sous le nom de Resources and Environmental Profiles Analysis (REPA), autrement dit, les analyses des profils environnementaux et d'utilisation des ressources naturelles. Ces REPA étaient des outils précurseurs en termes d'évaluation environnementale puisqu'ils se distinguaient par une approche « cycle de vie ». Ces outils permettaient de quantifier les consommations de matière et d'énergie et les rejets liés à un produit « du berceau à la tombe ». A la fin des années 60, ces outils commencent à être de plus en plus utilisés par les industriels et en 1969, un grand industriel américain, Coca-Cola®, commande une étude, auprès des chercheurs du Midwest Research Institute utilisant cette méthodologie, afin de réaliser une étude comparative pour des emballages de boisson.

Cette approche cycle de vie connaît un véritable essor à la fin des années 70 après les deux chocs pétroliers successifs et la prise de conscience des possibles changements climatiques et de l'épuisement de certaines ressources. Ces outils d'évaluation intègrent les flux sortants représentant une charge environnementale tels que les flux de déchets. Ils permettent uniquement de réaliser des inventaires en termes de flux de matière et d'énergie entrants et sortants du système étudié. L'introduction de la notion d'impacts potentiels sur l'environnement illustre le passage des REPA aux Analyses du Cycle de Vie (ACV) ou Life Cycle Assessment (LCA). En termes de méthodologie, les ACV apportent une finesse et une complexité à l'évaluation environnementale en développant des méthodes de calcul des impacts potentiels sur l'environnement associés aux flux identifiés lors de l'inventaire. Cette avancée méthodologique induit un fort intérêt de la part des industriels qui y voit un important potentiel en termes de communication.

Aux débuts des années 80, la SETAC (Society of Environmental Toxicology And Chemistry), financée par les industriels américains, détermine de manière plus formelle et consensuelle la première méthodologie de l'ACV. Certains organismes ont fortement contribué à l'émergence de l'ACV, par exemple, l'office fédéral suisse de l'environnement connu sous la désignation « Buwal » et certaines universités (Leiden aux Pays-bas, Copenhague au Danemark, Lund en Suède). Un des premiers laboratoires français à s'intéresser à cet outil est, en 1991, le Laboratoire d'Analyse Environnementale des Procédés et des Systèmes Industriels (LAEPSI) de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, rapidement rejoint par l'ENSAM Chambéry.

En 1991, une des plus importantes réunions de la SETAC Europe formalise, pour la première fois, la méthodologie ACV. Deux ans plus tard, la SETAC publie son premier guide de bonnes pratiques qui fut la base de tous les développements ultérieurs. Afin de favoriser la recherche sur le développement méthodologique de l'ACV et ses applications, un journal consacré uniquement à l'ACV est créé en 1996. Il s'agit de l'International Journal of Life Cycle Assessment.

Le début des années 90 est également marqué par des tentatives de normalisation pour uniformiser et standardiser la pratique des ACV. L'Association Française de NORmalisation (AFNOR) publie en 1994 une norme expérimentale sous la forme du fascicule de

documentation NF FD X30-300 présentant les concepts fondamentaux et la définition de certains termes. La France a donc été la première à élaborer une norme grâce à la demande des industriels et à la poussée d'un bureau d'études Ecobilan créé en 1990. L'International Standards Organisation (ISO) prend le pas en 1997 avec la norme ISO 14040 intitulée «Principes et cadre» et a continué avec la 14041 en 1998 portant sur les première et deuxième étapes de l'ACV, la 14042 portant sur la troisième étape en 2000 et la 14043 portant sur la quatrième étape en 2000.

Cet élan en termes de normalisation a été dans un premier temps un moteur pour le développement de la recherche en ACV. Ce mouvement s'est ensuite un peu essoufflé avec seulement quelques laboratoires et industriels travaillant sur le développement de l'ACV.

Depuis quelques années, l'ACV retrouve un vif intérêt dans le domaine de l'éco-conception comme le montre le livre d'Anne Ventura intitulé : « L'outil Logiciel ECORCE : cadre méthodologique et contexte scientifique ». Cet ouvrage propose un outil opérationnel, basé sur l'ACV, pour prendre en compte l'environnement dans la conception de nouvelles chaussées et infrastructures routières. L'auteur précise bien au préalable l'intérêt de considérer le cycle de vie de ces systèmes, à savoir l'identification et la prise en compte des transferts de pollution. Par exemple, une étape du cycle de vie peut s'avérer très " propre " au niveau de ses frontières mais poser en amont et en aval des problèmes d'environnement. Concrètement, en considérant le cycle de vie, on a pu montrer que le recyclage n'est pas, dans tous les cas, synonyme de bénéfique pour l'environnement.

L'outil proposé par Anne Ventura est alors utile dans la recherche d'amélioration afin de savoir où il faut agir pour réduire les impacts environnementaux du cycle de vie des chaussées. En revanche la réponse à la question du comment agir est du ressort des compétences du spécialiste du système « Chaussée ».

En conclusion, comme le préconise un certain nombre d'instances politiques et scientifiques internationales (ONU, UE, ...) et nationales (ADEME, ANR, ...), les sciences pour l'ingénieur doivent se mettre aujourd'hui au service du développement durable. Il n'est plus suffisant de se préoccuper du traitement des pollutions en aval des sources d'émission. A cette période d' « éco-efficacité » doit succéder une ère d' « éco-conception » des produits et procédés. Pour cela, il est nécessaire d'améliorer les procédés existants et d'imaginer de nouvelles stratégies de production visant à un respect maximal de l'environnement par l'économie de matières premières, par la diminution de l'énergie à mettre en jeu et par la réduction des rejets polluants. En parallèle, une utilisation des énergies renouvelables accessibles par des voies compatibles avec les objectifs du développement durable et en substitution aux produits d'origine fossile est nécessaire. L'outil ECORCE proposé par Anne Ventura devrait permettre d'appliquer cette stratégie d'éco-conception au domaine des Ponts et Chaussées.

*Patrick ROUSSEAUX,*

*Professeur de l'Université de Poitiers, Directeur de l'IRIAF (Institut des Risques Industriels, Assurantiels et Financiers), et rattaché pour la recherche à l'Institut P', CNRS - Université de Poitiers - Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique (ENSMA), UPR 3346, Département Fluides, Thermique, Combustion*

## **2 Contexte de la recherche au LCPC**

### **2.1 Introduction aux travaux de recherche**

Dans le cadre de l'opération de recherche du LCPC « Approche globale de l'environnement dans le domaine routier » des travaux de recherche ont été conduits, visant à développer des méthodes et des outils d'évaluation environnementale globale des infrastructures au cours de leur cycle de vie. Quatre unités du LCPC y ont participé ainsi que dix unités des LRPC. L'opération s'est déroulée au cours de la période 2004-2008.

L'environnement a été pris en compte via les milieux –air, eau et sols–, via les déchets engendrés ou consommés, ainsi qu'à travers les ressources et l'énergie utilisées pour construire et entretenir les infrastructures routières. Au-delà de la sphère environnementale, l'économie a été abordée par la monétarisation des rejets (flux de polluants vers l'air) et la perte de temps de l'utilisateur lors de travaux d'entretien. La sphère sociale a été approchée également par l'évaluation de la perception tant des acteurs routiers de l'environnement que des riverains lors de la réalisation de travaux (vibrations et bruits) via la conduite d'entretiens et de questionnaires.

Les recherches ont été élaborées grâce aux connaissances sectorielles d'experts de différents domaines (écologie, géotechnique, mécanique, physico-chimie, combustion, aménagement..) appliquées à différents types d'objets (matériaux, ouvrages et réseau routier), et sur des approches globales (de type ensemblier) intégrant plusieurs domaines couverts par le développement durable (environnement, économie, social).

La démarche qui constituait un fil conducteur pour l'opération a consisté en une *approche méthodologique* d'évaluation, appliquée à des *études de routes existantes* pour en dégager les effets produits sur l'environnement et à des *études de projets routiers en préparation*.

### **2.2 Méthodologie d'évaluation globale**

Des méthodes d'analyse multicritères ont été mises en place en s'appuyant sur les acteurs du domaine urbain comme interurbain tant sur des cas de voiries que sur des routes. L'importance du choix des critères a été soulignée. La méthode des Modules Routiers sur laquelle se fondent les outils proposés, consiste à définir un tronçon routier type associé à un système pour lequel sont calculés des flux (environnementaux et monétaires) et des indicateurs d'impacts environnementaux, sur la base de la méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie (ACV). De fait, ces développements se sont appuyés aussi sur les pratiques et les principes mécaniques de la construction routière. L'ACV a été adapté aux ouvrages dans le contexte français, c'est-à-dire sans tenir compte de leur fin de vie. Afin de s'adapter à la multiplicité des choix techniques liés à la construction et à l'entretien d'ouvrages interurbains ou urbains au cours de leur cycle de vie, la méthode d'évaluation et les outils développés sont paramétrables et modulaires.

Différents calculs de flux de polluants et de consommation de ressources, dont l'eau, et d'énergie ont été effectués pour évaluer les productions de granulats naturels et recyclés, de liants routiers, les productions d'enrobés et de béton, ainsi que la mise en œuvre des matériaux routiers sur chaussées. Des indicateurs environnementaux de la littérature internationale (ACV) ont été utilisés pour réaliser les calculs d'impact à partir de ces différents flux, avec les outils Excel® Modules Routiers Élémentaires (MRE) et de Voirie Urbaine (MVU) qui ont été élaborés dans cette optique. Les travaux de recherche conduits ont été évalués par les pairs du domaine de recherches ; ils se sont déroulés notamment dans le cadre de travaux de doctorats amenant à des publications internationales. C'est

sur cette base de recherches qu'il a été décidé en 2008 par la direction du LCPC de développer et d'implémenter un logiciel désigné par le terme « Eco-comparateur » plus abouti qu'un fichier Excel® et diffusable à des utilisateurs praticiens.

## 2.3 Développement de l'éco-comparateur ECORCE

Le logiciel ECORCE constitue ainsi l'aboutissement des travaux de recherche du LCPC en partenariat avec différentes composantes du RST

Le logiciel vise ainsi à mettre en balance au stade de la définition du profil en travers de la route, des critères de choix autres que les seuls critères de performances mécaniques. Seul le linéaire est visé par les développements logiciels présentés dans cet ouvrage, les ouvrages de type passage à faune, ponts, tunnels... n'ont pas été intégrés dans la première version du logiciel.

Parmi différents axes d'investigation retenus pour le développement du logiciel ECORCE, les points suivants ont particulièrement été analysés : la collecte de données environnementales pertinentes, la définition d'indicateurs globaux adaptés, l'analyse des critères des acteurs de la route face au choix de solutions et la pertinence de scénarii d'évaluation environnementale en relation avec une durée de service. Un jeu conséquent d'indicateurs a également été retenu pour cet éco-comparateur afin d'éviter l'évaluation nécessairement partielle que constituerait une approche « monocritère ». Le choix du critère à retenir à partir de simulations ECORCE est ainsi celui du décideur, l'utilisateur du logiciel obtient quant à lui des résultats pour tous les indicateurs à chaque cas qu'il étudie.

Deux années de tests de l'outil ont été à ce jour effectuées par le RST et le LCPC avec la version d'ECORCE 1.0 qui est présentée dans cet ouvrage, ceci afin d'acquérir du recul sur les potentialités de l'outil et de nous forger collectivement une connaissance en matière d'évaluation environnementale des structures et techniques routières. Suite aux nombreuses journées organisées sur ce thème par le RST et par la profession, le constat largement partagé est qu'il est indispensable de continuer à développer des approches méthodologiques intégratrices.

Si l'intérêt des éco-comparateurs est maintenant bien compris et partagé, ce type d'outils se situe dans un contexte en pleine évolution où le stade du consensus méthodologique n'est pas atteint que ce soit sur les données, les indicateurs, les critères environnementaux, où la prise en compte de la durée de vie des ouvrages. Cela nécessite une démarche de réflexion collective, qui se situe au-delà de la seule question des routes, car elle concerne à la fois la démarche « cycle de vie » et le génie civil dans son ensemble. Cette démarche collective passe par des groupes et réseaux de réflexion, qui se mettent en place à de multiples niveaux : professionnel, RST, et recherche internationale.

Concernant les routes particulièrement, le problème doit être élargi à l'échelle d'un ensemble vaste d'infrastructures implantées dans un territoire. Et à terme, la question de l'inter-modalité doit pouvoir être abordée également. Cette ouverture nécessite, outre la prise en compte assez large des milieux environnants, de disposer d'une méthodologie cohérente d'évaluation des ouvrages construits, en prenant en compte les pratiques des acteurs concernés. Une prochaine version d'ECORCE ?

*Agnès JULLIEN*

*Responsable de l'opération « Approche globale de l'environnement dans le domaine routier »*

*Anne VENTURA*

*Responsable de sujets dans l'opération « Approche globale de l'environnement dans le domaine routier »*

### **3 Liste des acronymes**

ACCV	Analyse du Coût de Cycle de Vie
ACV	Analyse de Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
ADP	Abiotic Depletion Potential
AE	Agrégats d'Enrobés
AFNOR	Association Française de Normalisation
AP	Acidification Potential
ATHIL	Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques
BAC	Béton Armé Continu
BBDr	Béton Bitumineux Drainant
BBME	Béton Bitumineux à Module Élevé
BBSG	Béton Bitumineux Semi Grenu
BBTM	Béton Bitumineux Très Mince
BC	Béton de Ciment
BD	Bande Dérasée
BDD	Bande Dérasée Droite
BDG	Bande Dérasée Gauche
CAM	Coefficient d'Agressivité Moyen
CETE	Centre d'Étude Technique de l'Équipement
CHANGER	Calculator for Harmonised Assessment and Normalisation of Greenhouse gas Emissions for Roads
COGNM	Composés Organiques Gazeux Non Méthaniques
COV	Composés Organiques Volatils
COVNM	Composés Organiques Volatils Non Méthaniques
CP	Constantes Pivots
CROW	Technology Platform for Transport, Infrastructure and Public Space in the Netherlands.
CTL	Construction Technology Laboratories
DALY	Disabled Adjusted Life Years
DCB	DiChloroBenzène
DBO	Demande Biologique en Oxygène
DCO	Demande Chimique en Oxygène
DDGC	Démarches Durables en Génie Civil (LCPC)
DSMRP	Decision Support Model for Road Pavements



EB	Enrobés Bitumineux
ECORCE	Eco-COMparateur Routes Construction Entretien
EF	Facteur d'Équivalence
EI	Eutrophication Index
EME	Enrobés à Module Élevé
EP	Eco-toxicity Potential
EPLCA	European Platform on Life Cycle Assessment
ESAR	Entretien, Sécurité et Acoustique des Routes (LCPC)
EUSES	European Union System for the Evaluation of Substances
FU	Flux Unitaires
GB	Grave Bitume
GC	Grave Ciment
GE	Grave Émulsion
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupement Intergouvernemental des Experts sur le Changement Climatique
GNT	Grave Non Traitée
GWP	Global Warming Potential
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
HC	HydroCarbures
ICV	Inventaire de Cycle de Vie
IISI	International Iron and Steel Institute
INIES	base de données française de référence sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits de construction
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPP	Politique Intégrée des Produits
IO	Input-Output
IRF	International Road Federation
ISO	International Standard Organization
IU	Indicateurs Unitaires
IVL	Swedish Environmental Research Institute
LCA	Life Cycle Assessment <sup>0</sup>
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LH	Liant Hydraulique
LHR	Liant Hydraulique Routier
LRPC	Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées
MRA	Module Routier Assemblé
MRE	Module Routier Élémentaire
ODP	Ozone Depletion Potential

PaLATE	Pavement Life Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects
PF	Plate-Forme
PM	Particules de Matière
POCP	Photo Chemical Ozone Potential
RCR	Ratio de Caractérisation du Risque
REACH	Règlement sur l'Enregistrement, l'Evaluation, l'Autorisation et les restrictions des substances Chimiques
RST	Réseau Scientifique et Technique
SANEF	Société d'Autoroutes du Nord-Est de la France
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SETRA	Service d'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements
SMIT	Structures et Matériaux pour les Infrastructures de Transport (LCPC)
SPOLD	Society for the Promotion of LCA Development
TC	Trafic Cumulé
TP	Toxicity Potential
TPC	Terre-Plain Central
VOC	Volatil Organic Compounds
WMO	World Meteorological Organization

## Résumé

Parmi les nombreuses stratégies susceptibles d'aborder de façon rationnelle la question du développement durable, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthodologie fondamentale permettant de tester et d'analyser les activités humaines. La norme ISO 14040 définit l'ACV comme la compilation et l'évaluation des entrants et sortants d'un système de production, ainsi que leurs impacts environnementaux potentiels, correspondant au cycle de vie d'un produit. Ainsi, l'utilisation de la méthodologie ACV appliquée aux routes déclinée sous la forme d'un outil accessible à des non experts en ACV peut permettre d'apporter un support rationnel aux décisions. C'est dans ce cadre que se situe l'outil logiciel ECORCE : ECO-comparateur Routes Construction Entretien. Cependant, l'ACV est un domaine de la recherche en constante évolution, et le fait de développer un outil logiciel nécessite de fixer certaines hypothèses pour lesquelles la communauté scientifique n'a pas toujours trouvé une réponse. Ainsi, il ne faut pas perdre de vue que l'outil contient certains choix d'hypothèses qui reflètent un état de connaissances à la période où il a été développé, et qu'il est donc lui-même susceptible d'évoluer au fur et à mesure de l'obtention de nouvelles données, des avancées méthodologiques et scientifiques.

## Abstract

Among various existing possibilities to consider sustainable development in a rational manner, Life Cycle Assessment (LCA) is a fundamental method enabling to test and evaluate human activities. The ISO 14040 standard defines LCA as the compilation and evaluation of inputs and outputs flows of a production system, their potential environmental impacts, during the whole life cycle of a product. In that frame, the development of a LCA based tool can bring a rational support to decisions concerning road pavements. ECORCE (French acronym meaning Eco-comparison of Roads Construction and maintenance) was developed with this intention. However, LCA is a dense and dynamic field of research, and any LCA based tool development does require setting assumptions for which the scientific community has still not stated. Thus, the tool implies choices that reflect the knowledge at the moment it was developed. It is expected to integrate new knowledge in the future.

## Partenaires d'ECORCE et remerciements

ECORCE est le premier outil logiciel d'évaluation environnementale développé et qualifié par le LCPC. Il est un produit issu de la méthodologie des modules routiers élémentaires, élaborée dans le cadre de l'opération de recherche 11M042 du LCPC, pilotée par Agnès Jullien et intitulée « Approche globale de l'environnement dans le domaine routier ».

Dans le cadre de cette opération de recherche, une méthode d'évaluation environnementale modulaire, faisant appel à une démarche systémique et appelée *méthode des modules routiers* (Ventura et al. 2008a) a été développée au LCPC depuis 2002. Cette méthode, appliquée aux routes, vise à réaliser une évaluation globale, au sens du développement durable, selon deux volets :

- l'un désigné par le terme Module Routier Élémentaire (MRE) qui concerne des effets très globaux dans le temps et dans l'espace des pratiques de construction et de maintenance de routes (terrassements, assainissement, chaussées) pour une durée de service à définir ;
- l'autre désigné par le terme de Module Routier Assemblé (MRA) qui se rapporterait à des effets locaux sur le territoire liés à l'insertion même de la route et aux services qu'elle rend.

La méthodologie des modules routiers a été notamment abordée sous l'angle de la construction et de l'entretien structurel des routes, autour de deux thèses (Hoang 2005) et (Sayagh 2007). (Hoang 2005) a été co-dirigée par le professeur Yves Crozet du Laboratoire d'Economie des Transports de l'université de Lyon. (Sayagh 2007) a été co-financée par le LCPC et l'ADEME. Ces travaux de thèse ont également bénéficié du soutien de plusieurs entités du Réseau Scientifique et Technique : le CETE de l'Ouest, le LRPC de Nancy, ainsi que de plusieurs unités du LCPC : ESAR et SMIT.

L'outil Excel® a également pu être amélioré et testé sur la base de cas réels grâce au concours de l'entreprise SANEF, de la ville de Dunkerque et de la Communauté Urbaine de Dunkerque Grand Littoral.

Enfin, en vue de son évolution vers l'outil logiciel dans sa version actuelle, ECORCE, l'outil Module Routier a été testé par les LRPC de Strasbourg et de Saint-Brieuc.

Enfin, l'outil ECORCE a été développé avec le concours du Réseau Scientifique et Technique, à travers deux séries de consultations :

- un questionnaire préliminaire diffusé avant le développement, ayant reçu 19 réponses de 12 LRPC (Nancy, Bordeaux, Est Parisien, Aix-en-Provence, Autun, Clermont-Ferrand, Lille, Nice, Lyon, Saint-Brieuc, Saint-Quentin, Strasbourg) ;
- une demande de retours après la diffusion de deux versions provisoires, entre septembre et décembre 2008, et à laquelle ont répondu : les LRPC de Saint-Quentin, Rouen, le Est Parisien et Strasbourg.

Le LCPC tient à remercier l'ensemble de ces partenaires qui ont contribué d'une façon ou d'une autre à la recherche et/ou au développement du logiciel ECORCE.

Le LCPC remercie également tout spécialement Madame Chantal Proust HDR de l'Université d'Orléans pour sa revue critique des données environnementales du logiciel ECORCE.

# I Introduction

*Anne Ventura*

L'émergence du concept de développement durable (Brundtland, 1987) a affirmé la nécessité de prendre en compte les aspects à la fois économiques, sociaux et environnementaux des activités humaines. Dans un cadre aussi large, prendre des décisions de façon rationnelle devient un véritable défi.

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthodologie fondamentale permettant de tester et d'analyser les activités humaines et représente une manière rationnelle d'aborder la question du développement durable. La norme ISO 14040 (AFNOR 1997) définit l'ACV comme la compilation et l'évaluation des entrants et sortants d'un système de production, ainsi que leurs impacts environnementaux potentiels, correspondant au cycle de vie d'un produit. L'ACV donne ainsi la photographie complète d'un produit et de ses impacts environnementaux, en évitant les écueils liés aux déplacements potentiels des effets environnementaux d'une étape du cycle de vie vers une autre, ou bien d'un effet environnemental vers un autre. Cette méthode est maintenant souvent utilisée dans l'ingénierie (Rousseaux 2005) car elle a montré sa capacité à s'adapter à une grande variété de produits, avec une grande souplesse.

Ainsi, l'utilisation de la méthodologie ACV appliquée aux routes, déclinée sous la forme d'un outil accessible à des non experts en ACV, peut permettre d'apporter un support rationnel aux décisions. C'est dans ce cadre que se situe l'outil logiciel ECORCE : ECO-comparateur Routes Construction Entretien. Cependant, l'ACV est un domaine de la recherche en constante évolution, et le fait de développer un outil logiciel nécessite de fixer certaines hypothèses pour lesquelles la communauté scientifique n'a pas toujours trouvé une réponse. Ainsi, il ne faut pas perdre de vue que l'outil contient certains choix d'hypothèses qui reflètent un état de connaissances, et qu'il est donc lui-même susceptible d'évoluer au fur et à mesure de l'obtention de nouvelles données, des avancées méthodologiques et scientifiques.

L'objectif de cet ouvrage est de présenter le cadre méthodologique d'ECORCE, et dans quel contexte de recherche scientifique il s'inscrit ; car ECORCE est avant tout un outil issu de la recherche, mais destiné à renseigner des maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre et entreprises, sur les impacts environnementaux potentiels de leurs choix technologiques. Pour ces raisons, ECORCE intègre des choix méthodologiques qui ont été faits en fonction des connaissances et des moyens mis en œuvre durant la période de sa conception et de son développement, mais également en fonction des attentes de la société à laquelle il est destiné, attentes exprimées de façon générale et imprécise, auxquelles les chercheurs doivent donner une traduction scientifique.

ECORCE ne prétend donc pas être un outil finalisé et définitif, mais un premier pas vers une prise en compte rationnelle des impacts environnementaux dans les choix technologiques de construction de chaussées.

L'ouvrage est destiné aux lecteurs désireux de comprendre la méthodologie derrière l'outil, démarche indispensable pour celui qui veut savoir à quoi cet outil peut lui servir, mais également à quoi il ne peut pas lui servir.

L'ouvrage comporte 11 parties. L'introduction présente le contexte de l'ACV comme méthodologie utile à la décision, quelques unes des questions actuelles de la recherche autour de cette méthodologie, les études traitant des routes et chaussées, ainsi le contexte de l'ACV dans l'activité de recherche au LCPC. La deuxième partie est à lire comme un résumé étendu des principes généraux de l'outil ECORCE. Les parties 3 à 6 entrent dans le détail des hypothèses de la méthodologie ACV : le système environnemental, les données utilisées, les indicateurs choisis pour représenter les résultats, ainsi que la méthode de calcul du logiciel. La partie 7 présente différentes études de cas. La partie 8 présente une étude de sensibilité destinée à mettre en évidence les paramètres les plus influents sur les résultats. La partie 9 compare l'outil ECORCE à d'autres outils ACV : des outils génériques et des outils dédiés aux chaussées. La partie 10 présente les résultats de différentes consultations menées au sein du RST, concernant les besoins exprimés antérieurement au développement de l'outil logiciel en termes d'évaluation environnementale, ainsi que les retours des différents testeurs suite à une étape de tests. La partie 11 conclut en rappelant les principaux choix méthodologiques effectués et les potentialités d'évolution futures.

## **1 Généralités sur l'Analyse de Cycle de Vie**

Les objectifs des ACV sont de pouvoir comparer différentes possibilités d'actions humaines en lien avec la production d'un bien ou d'un service. Et ceci, tout le long de la chaîne des actions technologiques ayant mené à ce produit, allant du produit initial à sa fin de vie, et ce d'une manière équitable et objective. Pour cela, il faut comptabiliser les flux de matières et d'énergie qui circulent entre différents éléments de la chaîne technologique, et les traduire en termes d'effets sur l'environnement.

### **1.1 Analyse de Cycle de Vie et décision politique**

En Europe, l'utilisation de l'analyse de cycle de vie (ACV) pour évaluer les performances environnementales des produits devient courante, particulièrement depuis le lancement de la Politique Intégrée des Produits (IPP 2001) en 2001. Cette politique est partie du constat que la politique traditionnelle concentrée sur la réglementation de sites et de leurs procédés de production n'était pas appropriée pour résoudre un certain nombre de grands enjeux environnementaux. En effet, des mesures considérées comme bénéfiques à l'échelle d'un site et sur un enjeu environnemental particulier pouvaient être à l'origine d'autres effets négatifs sur d'autres sites et/ou sur d'autres enjeux environnementaux. Ce phénomène est qualifié de phénomène de transfert. Ainsi dans le cadre de la Politique Intégrée des Produits, ont été mis en place des processus de régulations indirects touchant aux produits plutôt qu'aux sites de production, impactant simultanément l'ensemble de la chaîne des acteurs (producteurs, distributeurs, consommateurs, associations de défense de l'environnement...) plutôt qu'à un acteur en particulier, impliquant à long terme plutôt qu'aux effets immédiats. Parmi les processus de régulations indirects mis en place par la Politique Intégrée des Produits, on trouve le marché des quotas de CO<sub>2</sub>, ou encore le système REACH. Chacune de ces régulations fait appel à une information environnementale faisant le lien entre chaque étape du cycle de vie d'un produit. Ainsi les méthodologies basées sur l'ACV ont indirectement contribué et contribuent toujours à un ensemble de décisions politiques. En dehors de l'Europe et en dehors d'un cadre général tel que la Politique Intégrée des Produits, d'autres pays utilisent également les approches de cycles de vie. Dans le domaine des routes, on peut citer le Québec, où les ACV et les Analyses du Coût de Cycle de Vie (ACCV) sont utilisées par le Ministère des Transports (Cormier et Thébeau 2003) pour guider les choix de types de chaussées.

## 1.2 Contexte scientifique de l'Analyse de Cycle de Vie

Afin de connaître les apports et les limitations de tous les outils basés sur l'ACV, il apparaît important de comprendre le contexte de la recherche scientifique dans ce domaine. En effet, si les objectifs des ACV sont simples, les questions soulevées par ces objectifs sont nombreuses, parmi lesquelles :

- Quels sont les éléments de la chaîne technologique à intégrer (c'est-à-dire le choix du système) ?
- Quelles sont les données utilisables ?
- Comment répartir les flux d'une action technologique entre différents co-produits (allocation) ?
- Comment traduire les flux de matières et d'énergie en effets sur l'environnement ?

Chacune de ces questions peut recevoir plusieurs réponses méthodologiques.

### 1.2.1 Choix du système

Concernant les éléments de la chaîne technologique à intégrer ou non dans une étude ACV, deux niveaux de problèmes se posent. Le premier niveau est inhérent à toute méthode systémique : le système est choisi en fonction de l'objectif. Les éléments de la chaîne technologique sans rapport avec l'objectif doivent être écartés du système. Le deuxième niveau est celui de l'exhaustivité des éléments technologiques restants dans le système, qui peut rester très vaste après le premier tri. Un groupe international d'experts (SETAC, 1993) a proposé plusieurs règles, au choix du praticien :

1. écarter les procédés dont la masse produite représente moins de quelques pourcents (en général entre 1% et 5%) du produit étudié ;
2. écarter les procédés dont l'énergie de production représente moins de quelques pourcents (en général entre 1% et 5%) de l'énergie de production du produit étudié ;
3. écarter les procédés dont l'ensemble des impacts environnementaux représente moins de quelques pourcents (en général entre 1% et 5%) des impacts environnementaux du produit étudié.

La norme P01010 (AFNOR 2004) préconise d'utiliser la règle n°1 avec une valeur de 5%. La règle n°2 implique un calcul préalable des énergies pour l'ensemble de la chaîne technologique. Cependant, ces deux règles présentent des limites, car un procédé peu important en masse ou en énergie peut contribuer de façon beaucoup plus importante à un effet environnemental. La règle n°3 est donc sans doute la plus pertinente, mais elle implique un calcul préalable des impacts environnementaux, ce qui revient à mener une étude ACV complète.

### 1.2.2 Données environnementales

Un rapport de l'Académie des Technologies (Caseau et al. 2001) discute notamment du problème de l'hétérogénéité des données. Il en résume clairement les contours comme suit : « *A priori, les ACV ne devraient éprouver aucune difficulté pour adopter une démarche comparative. La norme ISO 14040 est très claire sur ce point : les **évaluations sont faites par comparaisons entre solutions**. Ceci vaut aussi bien pour les fournisseurs des produits que pour ceux qui les mettent en œuvre [...]. Les décideurs utilisent l'ACV pour trouver "la meilleure solution", et donc raisonnent en différentiel.*

*Dans la mesure où les comparaisons portent sur des processus bien maîtrisés par les auteurs de l'étude ACV, on peut penser que le passage au raisonnement en différentiel ne*

présentera pas de difficulté majeure. Tout naturellement, on utilisera des coûts "proportionnels" comme base de ces comparaisons, ce qui sera facilité par le fait que l'ACV repose sur une analyse complète des processus de production, de distribution, et d'utilisation. Mais le tableau change complètement si l'on doit prendre en compte des processus très "extérieurs à l'entreprise", et utiliser des chiffres qui relèvent de la macroéconomie ».

Cette constatation met en évidence que le problème des données n'est pas déconnecté de celui des éléments de la chaîne technologique à intégrer ou non dans l'évaluation.

Deux grandes familles méthodologiques d'ACV existent : celles basées sur des données environnementales par procédés de production, et celles basées sur des bases de données macro-économiques, appelées Input-Output (IO) (EIO/LCA 2010). Des méthodologies combinant ces deux méthodes existent également, les méthodes hybrides. Chacune de ces approches a des avantages et des inconvénients résumés dans le Tableau 1.

Méthode	Forces	Faiblesses
<b>Procédés</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procédés détaillés et analyses spécifiques</li> <li>- Comparaison de produits spécifiques</li> <li>- Améliorations de procédés, analyses des points faibles</li> <li>- Evaluation de développement de produits futurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fixation subjective des frontières du système</li> <li>- Coûteux en temps et financièrement</li> <li>- Nouveaux procédés difficiles à introduire</li> <li>- Utilisation de données propriétaires</li> <li>- Ne peut pas être reproduit en cas d'utilisation de données confidentielles</li> <li>- Incertitudes dans les données</li> </ul>
<b>Input/Output</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluations larges (tous les effets environnementaux directs et indirects sont inclus)</li> <li>- Inclut les industries, les produits, les services, les économies nationales</li> <li>- Analyses de sensibilité, scénarii de planification</li> <li>- Données publiques, résultats reproductibles</li> <li>- Evaluation de développement de produits futurs</li> <li>- Information sur chaque élément du système économique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Beaucoup d'évaluations de produits contiennent des données agrégées</li> <li>- Evaluation de procédés difficile</li> <li>- Difficulté de lier des valeurs monétaires à des données physiques</li> <li>- Les données économiques et environnementales peuvent refléter des pratiques dépassées</li> <li>- Les importations ne sont pas traitées comme telles</li> <li>- Difficulté à appliquer à un système économique ouvert</li> <li>- Données disponibles essentiellement américaines</li> <li>- Incertitudes dans les données</li> </ul>

**Tableau 1. Avantages et inconvénients des méthodes ACV procédés et IO. D'après (Santero et al. 2010)**

L'approche « procédés de production » est majoritairement utilisée en Europe, et nécessite l'utilisation de bases de données spécifiques de l'ACV. C'est une approche montante où chaque procédé est considéré de façon discrète, et l'ensemble agrégé sur un système. Un format d'échange standard, baptisé SPOLD, pour des données environnementales adaptées aux ACV existe depuis environ 10 ans (Singhofen et al. 1996) et est utilisé dans les logiciels ACV les plus connus. La plateforme européenne de l'ACV a récemment proposé un manuel de référence concernant le format de données (EPLCA 2008).

La méthode IO utilise une approche descendante où les informations sont dérivées de données macro-économiques de productions, flux de marchandises, bénéfiques par branches industrielles, à l'échelle d'un pays. Elles couplent ces données avec des valeurs de pollutions déclaratives des industriels, pour construire des bases de données de flux par branches industrielles et produits fabriqués.



### 1.2.3 Allocation des co-produits

La répartition des flux d'un même procédé entre plusieurs co-produits et/ou déchets, appelée allocation, reste une question d'actualité avec de multiples propositions méthodologiques :

- allocations au prorata : soit des masses, soit des énergies, soit du prix de vente,
- allocations par extension du système : on soustrait au système A la contribution d'un produit hors du système mais qui serait remplacé par le recyclage d'un déchet issu du système A.

Deux études spécifiques au génie civil (Sayagh et al. 2009) et (Chen et al. 2010) ont montré la sensibilité de ces hypothèses d'allocation sur l'évaluation finale d'une chaussée, mais également le fait que ces hypothèses ne sont pas basées sur des modèles physico-chimiques, mais restent des choix d'ordre politique.

### 1.2.4 Classification des flux dans les catégories d'impact

L'étape de classification des flux dans les catégories d'impact, est l'étape consistant à répartir la masse des flux qui participent à différentes catégories.

Cependant, cette étape, bien que mentionnée par la communauté scientifique d'un point de vue conceptuel (SETAC 1993), est systématiquement négligée des calculs. En effet, si un composé chimique participe à plusieurs catégories d'impact, la totalité de sa masse est affectée à chacune de ces catégories, ce qui revient à un comptage multiple.

Udo de Haes (1996) avait proposé une première approche de cette problématique, en définissant les notions de d'impact parallèles, en série, indirects et combinés. Cependant, la méthode de répartition reste depuis, une question scientifique ouverte (Reap et al. 2008) sur laquelle peu de recherches ont été menées (Aissani 2008), (Ventura 2010).

### 1.2.5 Evaluation de l'impact environnemental

La méthode ACV utilise des indicateurs d'impact afin de faire le lien entre le flux émis et son effet sur l'environnement. La norme ISO 14040 ne recommande pas l'utilisation d'indicateurs particuliers, elle ne donne que le cadre méthodologique général. Ainsi, il existe plus d'une trentaine de gamme d'indicateurs différentes, parmi lesquels il est encore difficile d'avoir une vue générale. Parmi les différentes méthodes Aissani (2008) distingue les méthodes conformistes et les méthodes scientifiques. Les méthodes conformistes, dites « non scientifiques » qui utilisent des seuils de référence basées sur des normes, la réglementation ou des objectifs, ou des calculs monétaires. Les méthodes scientifiques utilisent la connaissance des mécanismes d'impact pour caractériser les impacts. Dans cette famille de méthodes, une classification des modèles de calculs d'indicateurs a récemment été proposée (Bare et Gloria, 2008) en fonction de leur complexité croissante :

- « Midpoint » : représente un point précis de la chaîne de cause à effet entre les facteurs d'impacts (flux) et les modèles « endpoint ».
- « Endpoint » : éléments physiques que la société désigne comme devant être protégés. Ils sont liés à des facteurs d'impact et parfois à des « midpoint », et incorporent peu de modèles et/ou de paramètres chiffrés.
- « Pondération des Dommages » potentiellement créés par des facteurs d'impacts (flux) sur des « endpoints » agrégés en « aires de protection ». La pondération des dommages

- inclue toujours des paramètres de pondérations utilisés pour agréger les effets « endpoints ».
- « Pondération » des facteurs d'impacts potentiels sur chaque « aires de protection » afin de n'obtenir qu'une seule note.

Un exemple d'aire de protection est « ressources naturelles » avec comme modèle « midpoint » une comptabilisation des différentes ressources abiotiques et biotiques. Le modèle « endpoint » s'intéressera aux effets liés à l'utilisation des minerais (pour des ressources abiotiques) ou bien aux impacts sur la pêche (pour des ressources biotiques). Le modèle « pondération des dommages » calculera une masse prélevée par rapport à une masse en réserve ou bien des coûts externes.

A la suite des calculs d'indicateurs, il existe une étape de normation, suivie d'une étape de pondération. La normation consiste à calculer le ratio entre la valeur d'un indicateur obtenue, et une valeur de référence. On obtient alors une valeur relative, sans dimension, pour chaque catégorie d'impact. Cela permet d'effectuer alors l'étape de « pondération » pourra se faire en fonction d'objectifs politiques, d'objectifs de réduction...

## **2 Routes et Analyse de Cycle de Vie**

Dans ce contexte, différentes études internationales ont été publiées autour des années 2000, sur divers supports.

Certaines approches basées sur la méthode IO, se sont penchées sur des tendances générales propres à un pays (Piantanakulchai et al. 1998), (Gerilla et al. 2000). D'autres visent à comparer différents choix technologiques pour la construction et l'entretien des chaussées : (Lundström 1998), (Athena 1999), (Mroueh et al. 2000), (Stripple 2000), (Mroueh et al. 2001), (Pontarollo et Smith 2001), (Rouwette et Schuurmans 2001), (Stripple 2001). Dans le contexte français, deux études ACV ont été publiées en 2003 : (Chappat et Bilal 2003), (Peuportier 2003).

Le LCPC a également mené plusieurs études basées sur l'ACV, dans le but de développer une méthode appropriée à l'évaluation environnementale des routes. La première étude date de 1998 (Pereira et al. 1998) et s'est intéressée à la contribution du trafic. Une évaluation a été menée sur l'utilisation de différents taux de fraisats recyclés dans une couche d'enrobé, sur un site précis de route, en intégrant des mesures pour la collecte de données et la réalisation d'un inventaire (Jullien et al. 2006), ainsi que le calcul d'indicateurs (Ventura et al. 2008b). Une première thèse (Hoang 2005) s'est concentrée sur la réalisation d'un Inventaire de Cycle de Vie (ICV) à l'étape de la conception de chaussées d'autoroutes, comparant des technologies et employant des données de la littérature. Une deuxième thèse (Sayagh 2007) a élargi l'approche à des chaussées urbaines et à l'emploi de matériaux recyclés. Deux autres thèses se sont penchées sur des procédés particuliers du système environnemental des infrastructures : les carrières (Martaud 2008) et les bétons (Chen 2009).

Deux travaux de synthèse de différentes autres études ACV (Ventura et Jullien 2009) et (Santero et al. 2010), ont notamment mis en évidence de grandes disparités dans la qualité des données renseignées pour les liants notamment, concernant les unités fonctionnelles utilisées et les frontières des systèmes. Cette grande variabilité rend hasardeuse toute généralisation des résultats. Dans ce contexte, l'utilisation d'un outil permettant de calculer des indicateurs environnementaux en fonction des paramètres de dimensionnement et des natures de matériaux utilisés propres à chaque cas de chaussée, prend tout son sens.

## II Principes généraux d'ECORCE

*Philippe Tamagny, Hugues Odéon, Agnès Jullien, Anne Ventura*

Cette partie présente le logiciel ECORCE, ses hypothèses, ses fonctionnalités et potentialités, et ses limites.

### 1 *Qu'est-ce qu'ECORCE ?*

ECORCE est un outil logiciel permettant une évaluation de l'impact environnemental d'une structure de chaussée, en ce qui concerne les travaux de construction et de maintenance, pour une durée de service définie. Le présent ouvrage n'inclue pas d'éléments concernant les travaux de terrassement ; mais l'inclusion des couches supérieures du terrassement est prévue dans une version ultérieure du logiciel.

ECORCE permet de mener deux types d'analyses environnementales :

- l'évaluation a priori qui vise à proposer des approches environnementales prédictives de scénarii de construction et/ou entretien structurel, par exemple au stade de l'appel d'offres, mais également pour la planification d'entretiens. Dans ce cadre, l'analyse environnementale complète les critères classiques de coûts et performances mécaniques.
- l'évaluation a posteriori qui consiste à réaliser des bilans environnementaux pour des configurations routières existantes (scénarii de construction et/ou entretien structurel),

L'évaluation globale pratiquée par ECORCE est une évaluation uniquement basée sur la méthode normalisée d'Analyse de Cycle de Vie. Elle s'appuie sur l'analyse des flux de matières au sein d'un système.

Les résultats sont donnés en flux d'inventaires de cycle de vie et en valeur d'indicateurs d'impacts environnementaux potentiels. Les indicateurs, choisis parmi ceux disponibles dans la littérature scientifique, sont les suivants :

- ressources en matériaux consommés et matériaux produits,
- énergie et eau consommées,
- indicateurs de catégories d'impacts suivantes : effet de serre, acidification, eutrophisation, ozone troposphérique, écotoxicité, toxicité chronique,
- liste détaillée des flux d'inventaire par compartiment d'émission (air, eau, sol) et/ou ressources consommées.

Les résultats sont rapportés au cas d'étude, ou détaillés par opération ou par couche de chaussée.

La structure de chaussée est décrite par sa géométrie : épaisseur et nature des couches, profil en travers (y compris les accotements). ECORCE permet de définir les phases de construction et d'entretien de la structure, à partir de la définition de séquences de travaux à réaliser (déconstruction ou reconstruction) et des années de réalisation des travaux d'entretien, comme montré sur la Figure 1. Un ou plusieurs entretiens peuvent être pris en

compte. La construction initiale peut ou non être intégrée à l'analyse selon le souhait de l'utilisateur.

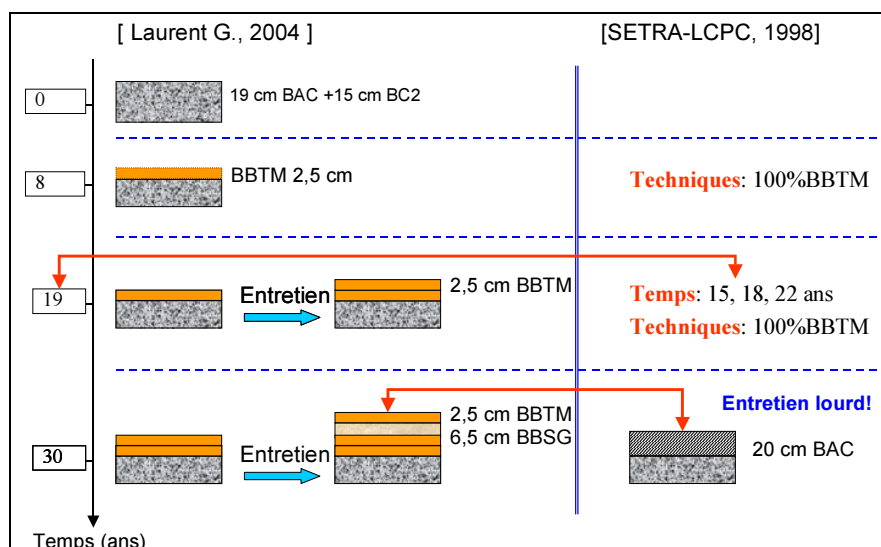


Figure 1 : Exemple de politiques d'entretiens pour une chaussée en BAC

Les matériaux pris en compte sont des matériaux classiques (liés ou non liés) ; ECORCE permet également de prendre en compte les agrégats d'enrobés.

Les limites d'utilisation d'ECORCE sont les suivantes :

2. L'utilisation de déchets et matériaux alternatifs autres que les agrégats d'enrobés n'est pas traitée dans ECORCE
3. La disponibilité des données environnementales à tous les stades de l'élaboration des ressources reste un élément limitant des potentialités d'ECORCE.
4. Certains des indicateurs choisis font l'objet d'un consensus international clair, d'autres sont encore en discussion dans la communauté scientifique.
5. La connaissance préalable de la structure de chaussée à étudier, du type de travaux à prendre en compte, de la durée de service comprenant les opérations d'entretien identifiées par une date de réalisation et décrivant les séquences de travaux est requise. Les choix des structures de chaussées et de la politique d'entretien (dates, descriptif des opérations) sont libres.
6. La variable temps n'intervient pas dans les calculs environnementaux.
7. Il n'est pas possible de valider les résultats obtenus, dans aucun des deux types d'approches ci-dessus (a priori ou a posteriori). Seule une approche comparative des solutions prend du sens.
8. La qualité des résultats est totalement dépendante de la qualité des données environnementales disponibles.
9. Un seul cas d'étude peut être traité à la fois ; chaque variante doit faire l'objet d'un cas d'étude spécifique.

## 2 Principes de la méthode d'évaluation

Le principe de l'évaluation environnementale réalisé par ECORCE est schématisé sur la Figure 2. Il adopte la méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie (AFNOR 1997-2000). Celle-ci impose la définition d'une « unité fonctionnelle » et d'un « système ».

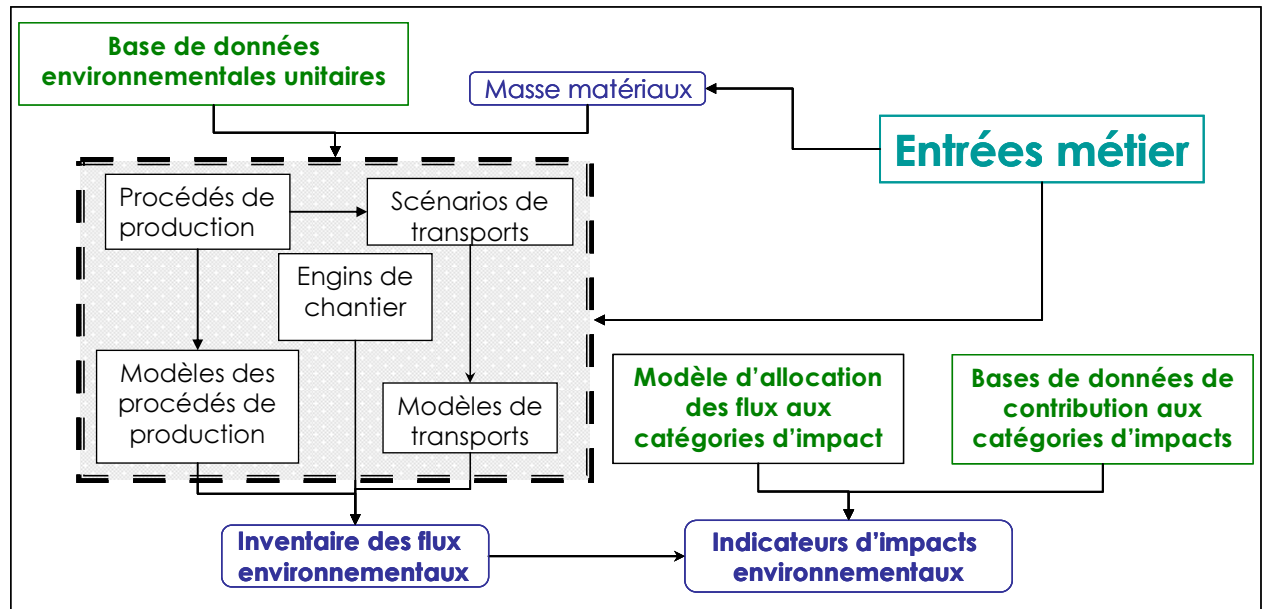


Figure 2 : Schéma des éléments considérés pour l'évaluation environnementale

Dans ECORCE, l'unité fonctionnelle est un tronçon routier (à une ou plusieurs voies, de longueur paramétrable), pour lequel vont être fournis la géométrie de la chaussée (profil transversal), sa structure (épaisseur des couches), les matériaux utilisés, les moyens de mise en œuvre et les séquences d'entretien prévues, de manière à répondre au cahier des charges du projet (Figure 1).

Ces données définissant l'unité fonctionnelle « tronçon routier » permettent :

- d'une part de calculer les masses de matériaux routiers et de matières premières nécessaires à sa construction et à son entretien,
- d'autre part de définir des scénarii de fabrication, de transports et d'entretien (en intégrant également des paramètres de distances, de types d'engins utilisés, et d'organisation des chantiers).

Le système d'ECORCE comporte un ensemble de procédés de production de matières premières, de fabrication de mélanges, de transports et de mise en œuvre (Figure 3). Chaque procédé a fait l'objet d'une évaluation permettant de chiffrer l'impact de la production, de la fabrication, du transport ou de la mise en œuvre d'une unité de matériau par rapport à différents indicateurs d'impact environnemental. Cette évaluation repose sur une base de données constituée à partir de données bibliographiques jugées fiables.

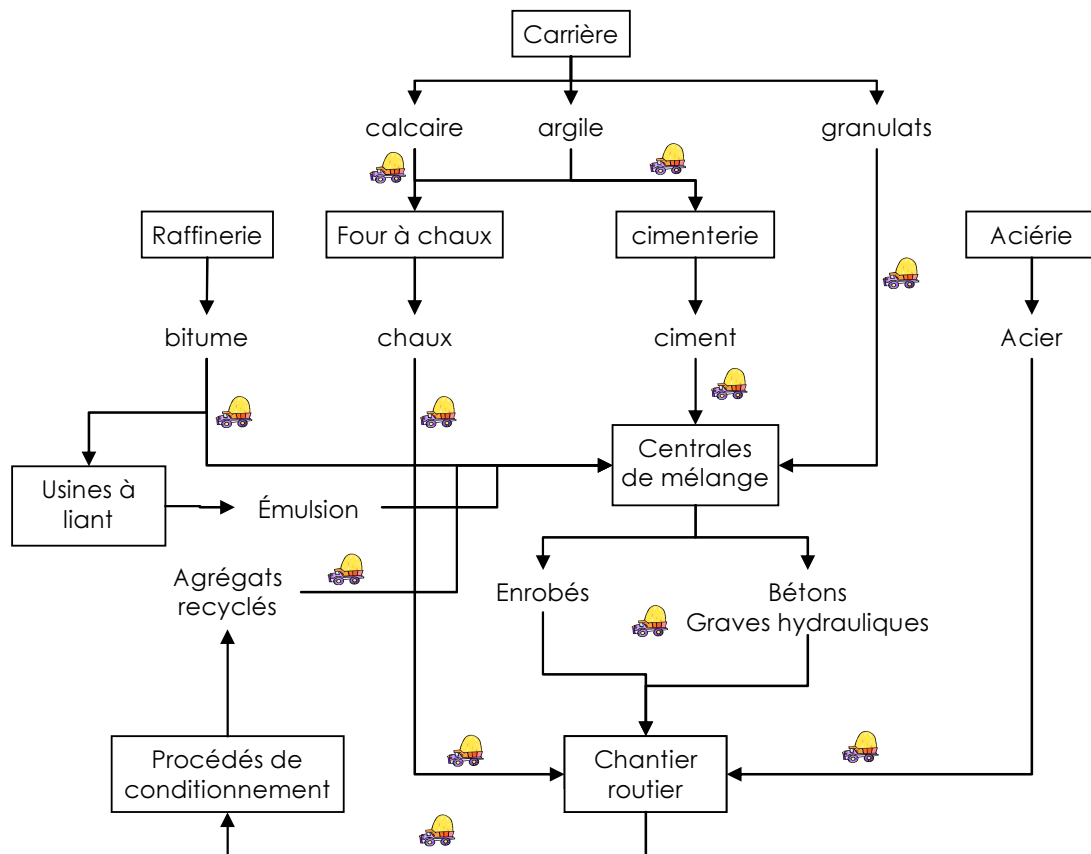


Figure 3 : Système environnemental : procédés inclus dans ECORCE

ECORCE réalise alors l'évaluation de l'inventaire de cycle de vie pour le système défini, en calculant couche par couche, procédé après procédé, la contribution de la production des constituants, de la fabrication du mélange, du transport et de la mise en œuvre du matériau, à un panel d'indicateurs d'impacts environnementaux potentiels.

Le logiciel utilise l'ensemble ou une partie du système de la Figure 3 en fonction des entrées spécifiques du cas d'étude et il calcule une gamme d'indicateurs d'impact environnementaux prédéfinie parmi lesquels l'utilisateur choisit ceux qui l'intéresse.

Les limites d'Ecorce en ce qui concerne les procédés sont les suivantes :

10. Il n'est pas possible de jouer sur les limites amont liées aux procédés de production de l'énergie ou des matières premières, qui par ailleurs, et en fonction du niveau de détail des données d'inventaire unitaires par procédé, peuvent être différentes. Par exemple l'inventaire de la production du ciment prend en compte une part d'émissions liée à la production de l'énergie, ce qui n'est pas le cas pour la production du bitume.
11. Le procédé transport est limité au transport de matériaux et de matériels par route.

### 3 Principes de l'interface utilisateurs

Une entrée "métier" a été développée pour une utilisation par un spécialiste de chaussées (Figure 4). Cette entrée « métier » permet la saisie du système étudié en définissant successivement :

- les caractéristiques géométriques de la structure de chaussée (avec ou sans accotements), en profil en travers et épaisseurs des couches ; la Figure 5 et la Figure 6 donnent deux exemples de profils en travers pouvant être pris en compte ;
- la nature des matériaux utilisés pour la construire ;
- le descriptif des phases de travaux à réaliser (déconstruction, construction).

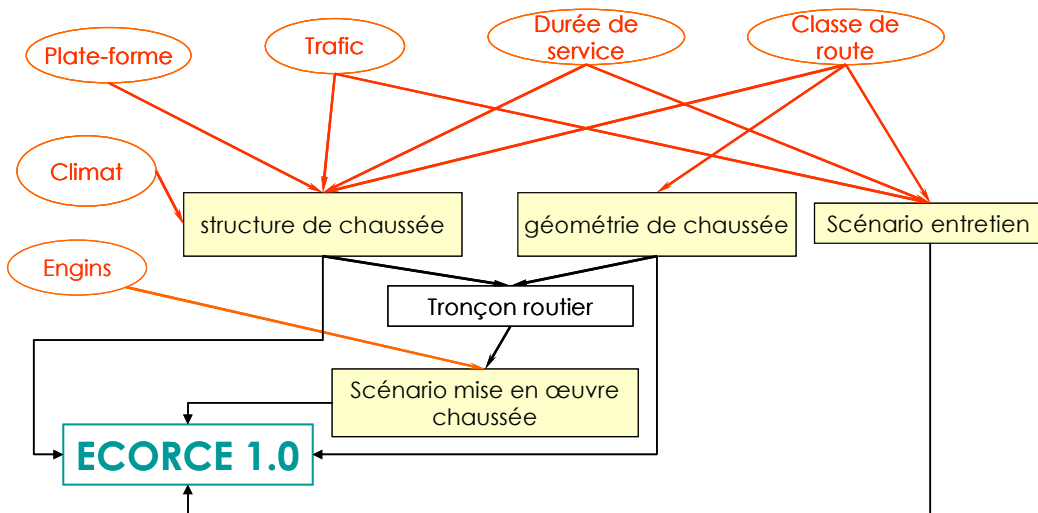


Figure 4 : schéma de l'entrée métier et paramètres routiers associés

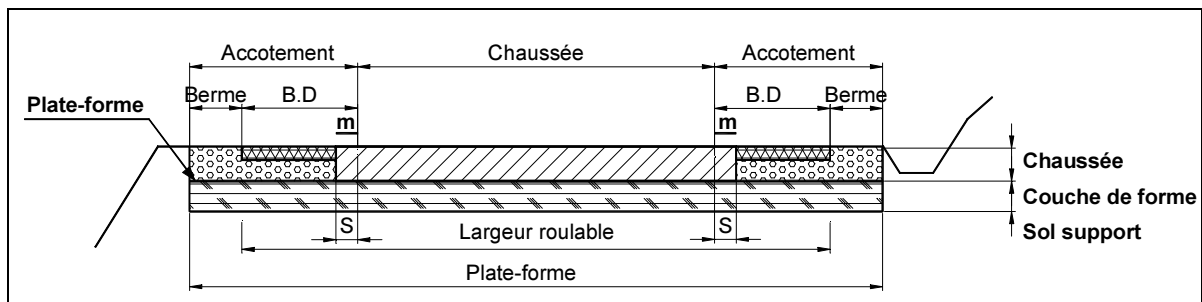


Figure 5: Exemple de profil en travers sur une route nationale hors réseau structurant (SETRA/LCPC 1994)

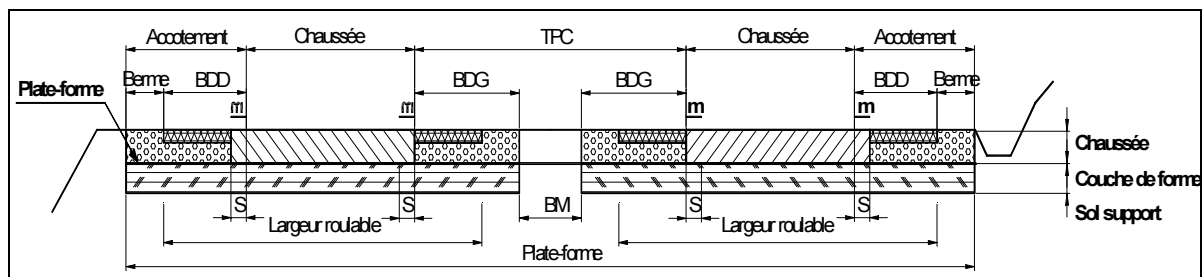


Figure 6 : Exemple de profil en travers à 2x2 voies (SETRA/LCPC 1994)

Les résultats se présentent sous forme de graphiques précisant, par indicateur d'impact environnemental, la contribution de l'ensemble de la structure ou d'une partie seulement.

Hormis pour les matériaux et les inventaires, une liste de valeurs d'indicateurs unitaires pour chaque procédé de production est également affichée à l'écran pour l'utilisateur, par tonne ou m<sup>3</sup> de matériaux, permettant une vérification aisée des ordres de grandeur de résultats.

## **4 Démarche générale d'utilisation de l'outil ECORCE**

### **4.1 Entrées/ définitions des couches de chaussées**

La définition de l'ensemble des actions métier à prendre en considération (travaux neufs ou/et entretien) permet de préciser le cas d'étude et de préparer la saisie des données techniques liées à sa réalisation. Cette première phase aboutit à un bilan des masses de matériaux à utiliser. S'ensuit le choix de l'ensemble des constituants (associés à un procédé prédéfini dans ECORCE) permettant d'élaborer ces matériaux, de scénarii de transport pour les déplacer d'un site industriel à l'autre (Figure 3) avant de les acheminer et les mettre en œuvre sur le chantier grâce à des engins.

### **4.2 Déroulement des calculs environnementaux**

En fonction des données saisies, le logiciel choisit le système représentatif des procédés de production, de consommations et d'émissions des transports, puis de consommations et d'émissions des engins de chantier. Les modèles utilisés permettent alors d'évaluer les consommations énergétiques, en eau et en ressources, ainsi que les émissions à l'air, à l'eau et au sol d'un procédé en fonction des quantités caractéristiques de ce procédé : consommation en gasoil pour le transport, masse d'enrobé fabriqué en centrale d'enrobage, volume de béton en centrale à béton, ... Ils s'appuient sur des calculs (cas des transports, par exemple) et/ou des résultats de mesures (cimenterie).

Les calculs sont effectués pour chaque couche de chaussée, par procédé.

### **4.3 Sorties du logiciel - résultats**

Deux types de résultats sont proposés en sortie d'ECORCE :

① les *flux environnementaux* totaux d'Inventaire de Cycle de Vie (ICV) : flux entrants (masses de matériaux, eau et énergie consommées), et flux sortants (émissions dans l'air, l'eau et le sol).

Ces flux sont exprimés en unités usuelles de masse, volume, énergie ; leur interprétation est immédiate et ne donne pas lieu à débat.

② les *indicateurs d'impacts potentiels* sur l'environnement, pour les catégories d'impact effet de serre, acidification, eutrophisation, ozone photochimique, éco-toxicité et toxicité chronique. Les unités dans lesquelles sont exprimés les indicateurs d'impacts potentiels sont facilement compréhensibles par des experts mais difficiles à s'approprier par des non spécialistes. Des détails sont donnés à ce sujet dans le paragraphe « présentation des indicateurs environnementaux ».

L'utilisateur devra se former à ces unités et s'habituer aux ordres de grandeur des résultats produits avec des cas simples afin d'acquérir du recul sur les résultats. Pour l'y aider,



chaque graphique proposé est assorti d'un tableau qui donne les valeurs de référence de l'indicateur concerné par procédé, par unité de matériaux produit.

La Figure 7 illustre les principales étapes de saisie de données, calculs et sortie de résultats d'ECORCE.

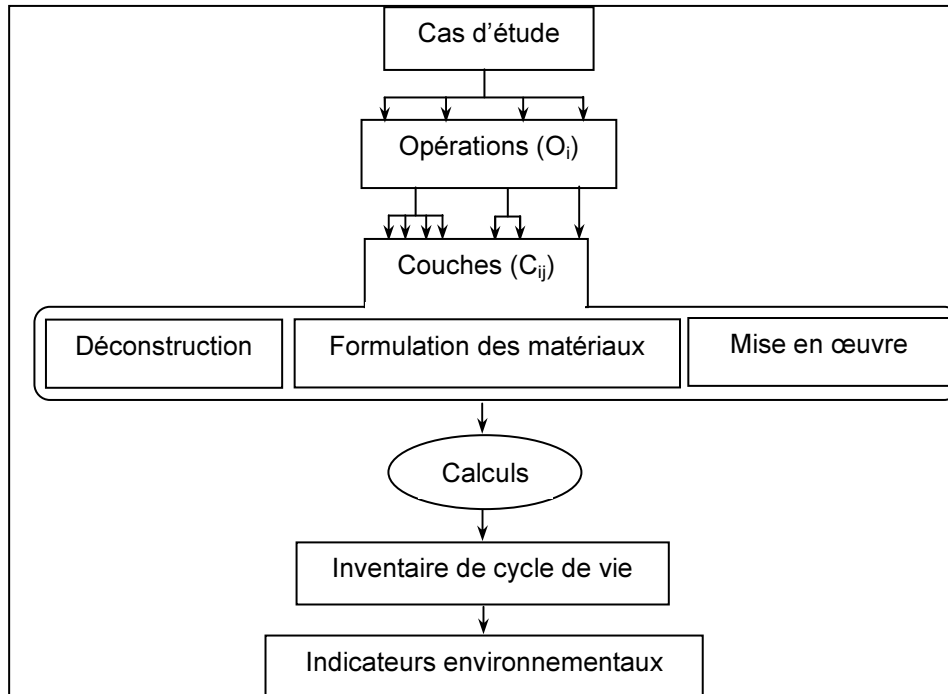


Figure 7: Organigramme général d'ECORCE

## 5 Précisions sur les indicateurs de résultats choisis

1 Economie de ressources : ECORCE calcule les quantités de matériaux consommés dans le cas d'étude, en tonnes ou mètres cubes. Les indicateurs d'épuisement des ressources naturelles existants dans d'autres outils ACV sont mal adaptés aux matériaux du génie civil (granulats en particulier) et ne sont donc pas implémentés.

12. ECORCE ne calcule pas d'indicateur d'épuisement des ressources naturelles.

2 Consommation d'énergie : ECORCE calcule les équivalents énergétiques (en Mega Joule) de toutes les énergies consommées, quelles qu'en soit l'origine, hormis la « feedstock energy » contenue dans le bitume (voir § 2.3.2 Energie matière page 56).

3 Consommation d'eau : les consommations d'eau (en m<sup>3</sup>) de chacun des procédés, résultants soit de données unitaires d'inventaire (bitume, granulats) soit de données de formulation (béton) ou de mise en œuvre (compactage), sont calculées.

4 Effet de serre : ECORCE calcule l'indicateur GWP (Global Warming Potential, unité : kg équivalent CO<sub>2</sub>), défini par le GIEC (Groupement Intergouvernemental des Experts sur le Changement Climatique). Cet indicateur caractérise l'effet de serre provoqué par l'accumulation de certains gaz dans l'atmosphère qui absorbent une partie du rayonnement infrarouge 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 globale de la température du globe. Les effets sur le climat sont encore mal

connus, et certaines évaluations prévoient un impact sanitaire considérable dû à l'augmentation et à la prolifération de maladies tropicales.

- 5 Eutrophisation : L'eutrophisation - indicateur EI (Eutrophication Index, unité : kg équivalent  $PO_4$ ) - 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 et est susceptible d'avoir des conséquences sanitaires dans les pays en voie de développement.
- 6 Acidification : l'acidification - indicateur AP (Acidification Potential, unité : kg équivalent  $SO_2$ ) 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, entraînant la disparition de certaines espèces aquatiques.
- 7 Ozone Troposphérique : La formation d'ozone troposphérique - indicateur POCP (Photo Chemical Ozone Potential, unité : kg équivalent éthylène) - 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. Ceux-ci contiennent 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, personnes âgées), et sont reconnus pour augmenter les taux de mortalité chez ces populations.
- 8 Toxicité : La toxicité - indicateur TP (Toxicity Potential, unité : kg équivalent 1,4DCB) - est liée aux effets toxiques de substances sur l'homme exposé à leur présence de manière chronique.
- 9 Ecotoxicité : L'écotoxicité - indicateur EP (Eco-toxicity Potential, unité : kg équivalent 1,4DCB) - est liée aux effets toxiques de substances causant la disparition directe ou indirecte (par exemple en affectant la reproduction) des espèces animales ou végétales d'un écosystème.

# III Système environnemental

*Anne Ventura, Agnès Jullien, Philippe Tamagny*

Les frontières d'un système environnemental d'une étude ACV sont délimitées entre le système technologique et l'environnement naturel. Elles précisent la zone géographique et la période de temps considérées, marquent la limite entre le système de production du produit considéré et la production de l'équipement servant à le produire, et enfin, délimitent le produit étudié, d'autres produits éventuellement en lien avec le produit étudié (Tillman et al. 1994). ECORCE est un outil destiné à une utilisation française, il comporte donc un maximum de données adaptées au pays considéré. Dans tous les cas, les frontières doivent être en relation avec l'objectif de l'étude ACV.

Le système environnemental général d'ECORCE est donné dans la Figure 3. Il comprend :

- l'élaboration des matériaux au sein des industries (raffinerie, cimenterie, carrière, fours à chaux et aciérie),
- les transports de matériaux et des engins de chantier,
- la fabrication des mélanges (centrales d'enrobage, centrales béton et graves hydrauliques, centrales à émulsions),
- la construction et l'entretien des chaussées (engins de chantier dont déconstruction).

La période de temps considérée dans ECORCE est au choix de l'utilisateur qui peut introduire des opérations d'entretien. La fin de vie de la chaussée ne figure pas explicitement : en France elle n'a pas de sens car les chaussées sont entretenues pour ne pas avoir de fin de vie. Cependant, il est possible de considérer la fin de vie en utilisant la fonction de déconstruction et en décrivant les engins utilisés.

## **1 Frontières du système en lien avec l'objectif de l'outil**

ECORCE porte sur la comparaison de structures de chaussées et de leur entretien. Ainsi, tous les procédés non directement liés à cette comparaison (dont l'inclusion n'est pas susceptible de changer les comparaisons technologiques) sont écartés :

- l'entretien courant (autre que structurel) des routes : viabilité hivernale, balayage, fauchage, peinture, signalisation, sécurité...
- les activités générales, les bâtiments et le transport du personnel.
- le trafic : les véhicules ne sont pas supposés avoir des effets environnementaux différents selon le type de chaussée considéré, cependant certains aspects restent à explorer (voir 2 ci-dessous).

Enfin, ne figure pas dans le système, la production et le transport de l'énergie. Ce choix est expliqué en 2.3.1 (page 55).

## **2 Frontières du système en lien avec la limite des connaissances**

Les limites des connaissances, conduisent à écarter certains aspects du système : le trafic, les émissions dans l'eau dues aux ouvrages et aux stocks de matériaux, les émissions atmosphériques des matériaux lors de leur mise en œuvre.

Il pourrait être pertinent de considérer le trafic à l'intérieur du système de plusieurs manières. D'une part, le trafic en ce qui concerne les conséquences des travaux d'entretien (influence sur les consommations des ralentissements), et il s'agit d'une des évolutions souhaitables de l'outil. D'autre part, certaines études mentionnent une éventuelle différence de consommations des véhicules en fonction du type de revêtement de surface. Enfin, les particules produites par le contact pneu-chaussée sont susceptibles d'être différentes en nature et en quantité selon le matériau de la couche de roulement. La recherche dans ces domaines est en cours, et devrait aboutir à une prise en compte future dans l'outil, si des différences étaient avérées.

Les émissions dans l'eau et les sols, à la fois dues aux ouvrages et aux stocks de matériaux, ne sont pas incluses dans le système. Bien que beaucoup d'études aient été menées dans ce domaine, il n'existe pas de loi de comportement suffisamment générale pour être incluse dans une approche ACV, sur les relargages de polluants aqueux issus des structures de chaussées et de stocks de matériaux.

Les émissions dans l'air des matériaux mis en œuvre ne sont pas incluses dans l'outil actuel. Les phénomènes de carbonatation pendant la vie en service des structures en béton pourraient contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre de ces matériaux.

## **3 Frontières du système en lien avec la disponibilité des données**

Les données utilisées dans ECORCE sont des données publiques. Aucune base de données environnementales commerciale n'est utilisée. Quel que soit le cas d'étude, l'évaluation proposée repose sur la quantité et la qualité des données disponibles.

Par rapport au système qui correspondrait parfaitement à l'objectif de l'outil, certaines frontières sont modifiées, elles sont:

- soit rétrécies (cf. alinéa a) en excluant des procédés qui devraient être inclus car aucune donnée n'a été trouvée,
- soit élargies (cf. alinéa b) à des procédés non souhaités car les données trouvées ne permettent pas de soustraire la contribution d'un procédé inclus dans les inventaires fournis.

Il faut souligner que ces restrictions sont directement liées au choix de ne pas recourir aux bases de données ACV internationales.

### **a) liste des procédés exclus en raison de la non-disponibilité des données**

- Les procédés d'élaboration des *additifs* pour le bitume, des *additions* pour le ciment et des *adjuvants* pour le béton, ne font pas l'objet de publications donc de données publiques.
- Il n'existe pas de données spécifiques par *types de bitume* (fluidifiés, fluxés, modifiés, spécial et routier). Ils sont donc tous assimilés à un bitume 50/70 dont les données environnementales sont disponibles.
- Il n'existe pas de données spécifiques par *types de ciments*. La contribution de la fabrication d'un ciment est calculée à partir de son pourcentage en *clinker* par rapport à celui d'un ciment de type CPA CEM I 52.5 dont les données environnementales sont disponibles.

- Les procédés d'élaboration des matériaux suivants : *fibres, acide, dope d'adhésivité, émulsifiants, épaississant, fluxant, phase, les fines d'apport, joints béton, produits de dénudage, produits de cure, produits débituminants, résine* car aucune référence publique n'a été trouvée les concernant.
- La production et la maintenance des équipements et matériels (engins, installations industrielles), qui sont différentes selon les matériaux de chaussées utilisés, est importante à considérer selon la norme. Cette question a été examinée par Frischknecht et al. (2007) pour un grand nombre d'équipements industriels, qui confirme que les équipements ne peuvent pas être écartés *a priori*, et que leurs effets sur les résultats d'indicateurs sont loin d'être négligeables. Ce type d'étude a également été mené pour les centrales à bétons (Chen, 2009), en utilisant un outil ACV générique et une base de données payante. Cependant, les données publiques sur cet aspect ne sont pas suffisantes.
- Il en est de même concernant le traitement des eaux et des déchets, dont les technologies et émissions sont variables.

b) liste des procédés inclus en raison du niveau de détail insuffisant concernant les références utilisées

Les publications utilisées relatives aux procédés d'élaboration de l'*acier* et du *ciment* incluent les contributions des procédés de fabrication de l'énergie électrique. Certaines données typiques de la fabrication de l'énergie électrique ont néanmoins été retirées des données utilisées (voir Données de la littérature page 38). De fait, les procédés acier et ciment sont ainsi désavantagés par rapport au bitume car ils incluent en partie la production d'énergie.

## **4 Liste des procédés retenus**

Les procédés retenus sont désignés dans l'outil selon une logique métier spécifique au Génie civil comme précisé ci-après.

### Pour les matériaux :

- Agrégats pour Production d'agrégats,
- Acier pour Production d'acier,
- Bitume pour Production de bitume,
- Chaux pour Production de chaux,
- Clinker pour Production de ciment,
- Emulsion pour Production d'émulsion, une partie de ce procédé étant appelée Eau-Emulsion afin de distinguer la consommation d'eau lors de la production de l'émulsion,
- Enrobés chauds pour Production d'enrobés,
- Granulats pour Production de granulats,
- Matériaux hydrauliques pour les bétons et les graves hydrauliques ; une partie de ce procédé étant appelée Eau\_Matériauxhydrauliques afin de distinguer la consommation d'eau lors de la fabrication des matériaux hydrauliques.

### Pour les engins de chantier :

- EnginsD pour les engins de déconstruction de la chaussée ; une partie de ce procédé étant appelée Eau\_enginsD afin de distinguer la consommation d'eau des engins de déconstruction,
- EnginsC pour les engins de (re)construction de la chaussée ; une partie de ce procédé étant appelée Eau\_enginsC afin de distinguer la consommation d'eau des engins de mise en œuvre.

### Pour les transports :

- Transports pour les transports d'engins de chantier comme de matériaux en rapport avec les listes ci-dessus.

Par ailleurs, les frontières des systèmes associés à chacun de ces procédés sont reliées en particulier aux sources de données environnementales unitaires de la littérature qui ont été utilisées. Le détail de ces frontières est fourni dans la partie *III Système environnemental* (page 34).

## **5 Conclusion**

Les frontières du système environnemental utilisées dans ECORCE représentent essentiellement un compromis entre leur pertinence quant à la question posée (solutions à comparer) et la disponibilité des données publiques. Cette question des données est cruciale, notamment lorsqu'il s'agit de traiter des innovations technologiques pour lesquelles il n'existe pas forcément d'information.

Il faut donc retenir que les frontières sont largement évolutives, au fur et à mesure des avancées des connaissances.

## IV Données environnementales

*Anne Ventura, Agnès Jullien*

Dans cette version d'origine du logiciel, le principe d'une base de données environnementales non modifiable mais dont l'origine des données est connue a été retenu. Un travail de sélection ainsi que d'harmonisation de ces données a cependant été nécessaire.

Concernant les données environnementales retenues, elles se scindent en deux groupes : celles issues de la littérature et celles collectées par le LCPC.

### 1 Données de la littérature

Lorsque les données environnementales sont disponibles, compte-tenu de l'hétérogénéité des données et du manque de détails de celles-ci, et ce malgré un nombre satisfaisant de références bibliographiques disponibles, il a été choisi pour la version actuelle d'ECORCE d'utiliser une seule référence environnementale par procédé d'élaboration d'un matériau.

Lorsque c'était possible, le choix s'est porté sur des études dont l'objectif est clairement de fournir un inventaire de données environnementales, dont les flux sont issus de plusieurs sites.

On distingue pour les transports :

- ceux qui sont comptabilisés dans les procédés élémentaires (acier, bitume... centrales pour matériaux hydrauliques) et dans ce cas on précise « transports inclus dans le système » sans pouvoir distinguer le transport routier du transport ferroviaire ou par bateau car le niveau de détails des références ne le permet pas ;
- ceux qui sont explicitement calculés par ECORCE, il s'agit uniquement de transport routier.

L'ensemble des valeurs de flux unitaires utilisés donné dans les références n'est pas fourni par le LCPC qui n'est pas propriétaire des données et ne peut donc pas légalement les diffuser sans l'accord des parties concernées.

#### 1.1 Production de l'acier

Beaucoup de sources de données concernant la production d'acier sont disponibles. Les informations environnementales fournies sont variables, parfois très détaillées, parfois avec seulement des valeurs d'énergie consommée. Parmi les références trouvées, toutes ne sont pas destinées à produire des inventaires, certaines valeurs peuvent être notamment extraites de rapports environnementaux d'entreprises. Les références retenues pour la présente analyse sont celles dont l'objectif est d'établir un inventaire et dont les données sont les plus détaillées : (Häkkinen et Mäkelä, 1996), (IISI, 1999) et (Stripple, 2001). La première étude (Häkkinen et Mäkelä, 1996) est un article de recherche consacré aux routes et donnant des valeurs environnementales pour la production d'acier. La seconde référence

(IISI, 1999) est internationale et regroupe des données issues de cinquante sites de production d'acier dont 28 en Europe. Les sites sont classés en trois types : hauts fourneaux laminage revêtement et sites intégrés, fours électriques à arc et réduction directe. La troisième étude reprend des données d'origine suisse, dont la référence est donnée (Sauter, 1994), mais non accessible. Aucune information sur l'origine des données ni sur les frontières du système ne sont disponibles. Le Tableau 2 compare les frontières du système environnemental pour ces différentes références. Le Tableau 3 compare des valeurs de flux pour chacune des références. On constate de très grandes différences concernant la consommation d'énergie, et les émissions de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, poussières, et méthane.

Référence	Recyclage d'acier	extraction des matières premières	Production de l'énergie	Transports	Production de l'acier
(Häkkinen et Mäkelä, 1996)	X	X		X	X
(IISI, 1999)*		X	X	X	X
(Stripple, 2001)	nc				
ECORCE		X	X	X	X

**Tableau 2. Données environnementales disponibles concernant la production de l'acier**  
nc : non communiqué - \*référence retenue pour ECORCE

Référence		(Häkkinen et Mäkelä, 1996)	(IISI, 1999)*	(Stripple, 2001)
Energie totale consommée	MJ/tonne	6 200	8 271	25 320
SO <sub>2</sub>	kg/tonne	0,98	1,96	7,34
NOx		1,6	0,99	4,86
CO <sub>2</sub>		290	436	2 200
CO			3,73	1
COGNM			0,10	1,2
HAP			nc	3,35.10 <sup>-5</sup>
H <sub>2</sub> S			8,63.10 <sup>-4</sup>	1,94.10 <sup>-2</sup>
Poussières			0,21	39,2
N <sub>2</sub> O			0,02	0,03
CH <sub>4</sub>			0,75	9,1
DCO			9,60.10 <sup>-3</sup>	9,30.10 <sup>-3</sup>
Ntot			2,71.10 <sup>-3</sup>	7,47.10 <sup>-3</sup>

**Tableau 3. Comparaison des flux par source pour la production de l'acier**  
nc : non communiqué, COGNM (Composés Organiques Gazeux Non Méthaniques), HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), DCO (Demande Chimique en Oxygène), Ntot (Azote total)  
\*valeur retenue pour ECORCE : Electric Arc Furnace route for bars and engineering steel – Route total with no system expansion (no allocation) – appendix 7C,D, p. 70-71

La référence (IISI, 1999) est la référence retenue pour ECORCE. Cependant, les données concernant la production d'électricité n'étant pas suffisamment détaillées, il n'a pas été possible de soustraire cette contribution aux données unitaires.



## 1.2 Production du bitume

Parmi les données disponibles concernant les raffineries ou la production du bitume, seules deux références, (Blomberg et al, 1999) et (Stripple, 2001), fournissent explicitement des inventaires de cycle de vie du bitume. Une troisième, (Energetics, 1998), fournit des données sur les raffineries en général. Enfin, un article, (Jimenez et Overcash, 2000), compare les bases de données existantes sur les raffineries. Le Tableau 4 compare les frontières du système environnemental pour ces différentes références, ainsi qu'avec l'étude (Häkkinen et Mäkelä, 1996) qui fournit également des données sur la production du bitume.

Référence	Extraction du pétrole brut	Transport par bateau	Raffinage		Stockage	Production d'énergie
			Procédés de distillation	Procédés annexes*		
(Häkkinen et Mäkelä, 1996)	X	X	X			
(Energetics, 1998)			X			
(Blomberg et al, 1999)*	X	X	X	X	X	X
(Stripple, 2001)	X	X	X			
(Jimenez et Overcash, 2000)	Variable selon les bases de données					
ECORCE	X	X	X	X	X	

**Tableau 4. Données environnementales disponibles concernant la production du bitume**

\* *dessalage, traitement des eaux, éclairage et chauffage des bâtiments, manutention, contrôles, laboratoires, torchère, systèmes de refroidissement...*

L'étude environnementale de (Stripple, 2001) considère un pétrole brut extrait au Venezuela (Laguna) dont 60% de la masse donne du bitume. Le pétrole est acheminé par bateau jusqu'en Europe, à la raffinerie de Nynäs à Nynäshamm.

L'étude environnementale de (Blomberg et al, 1999) considère un pétrole brut moyen composé à 70% de pétrole du Moyen Orient et à 30% de pétrole du Venezuela. Le pétrole est acheminé par bateau jusqu'en Europe (indéfini).

Les données fournies par ces différentes sources ne sont pas toutes comparables, car chaque référence ne fournit pas les mêmes informations. Le Tableau 5 compare quelques données communes entre ces références. L'étude de (Stripple, 2001) donnant le détail des inventaires par procédé, il a été possible de les comparer en fonction des parties du système choisies. On constate une bonne cohérence des données d'énergie entre (Stripple, 2001) et (Energetics, 1998) pour le procédé raffinage seul. L'ajout au système de l'extraction et du transport augmente la consommation d'énergie de 50%, le CO<sub>2</sub> de 330%, et les NOx de 912%, par rapport au raffinage seul. L'ajout au système du stockage fait augmenter la consommation d'énergie de 20%, mais pas les émissions en CO<sub>2</sub> et NOx. Enfin l'ajout au système des procédés de production d'électricité (selon des moyennes suédoises) fait augmenter l'énergie de 16%, le CO<sub>2</sub> de 8% et les NOx de 26%. Les valeurs issues de la totalité du système de (Stripple, 2001) peuvent être comparées à celles de (Blomberg et al, 1999). Pour cette dernière référence les émissions en CO<sub>2</sub> et en NOx sont doublées par rapport à (Stripple, 2001), et la consommation d'énergie est presque multipliée par quatre. L'étude (Stripple, 2001) ne prend en compte qu'une seule provenance de pétrole, une seule raffinerie, et une moyenne suédoise de production d'électricité, alors que l'étude (Blomberg et al, 1999) prend en compte une moyenne Européenne pour tous ces procédés. Ceci laisse supposer une très grande variabilité.

La source retenue pour ECORCE est (Blomberg et al, 1999). Le détail de la proportion d'énergie électrique consommée (10% de l'énergie totale consommée) ainsi que les émissions associées étant donnés, les données d'inventaire ont été recalculées en soustrayant la contribution de la production d'électricité.

Référence	Energie (MJ/tonne)	CO <sub>2</sub> (kg/tonne)	NO <sub>x</sub> (kg/tonne)
(Häkkinen et Mäkelä, 1996)	6 000	330	2,9
(Energetics, 1998)*	661	nc	nc
(Stripple, 2001)	663	37	0,08
	950	159	0,81
	1 132	160	0,81
	1 313	173	1,02
(Blomberg et al, 1999)	4 900	280	2,10
(Jimenez et Overcash, 2000)**	nc	380	2,89

**Tableau 5. Comparaison des flux d'énergie, de CO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub> pour la production du bitume**  
nc : non calculé ou non communiqué

\*valeur recalculée à partir de données fournies par procédés de distillation, en allouant 50% des flux au bitume sur l'hypothèse d'une allocation massique retenue dans les deux inventaires (hypothèse variable selon la provenance du pétrole)

\*\*valeur médiane obtenue pour les produits naphta et diesel (valeur non fournie pour le bitume), d'après la comparaison de cinq sources de données indépendantes selon les auteurs

### 1.3 Production de la chaux

Une seule référence (Stripple, 2001) fournit des données environnementales sur la production de chaux. Elle a donc été utilisée dans ECORCE.

Référence	Extraction des matières premières	Transports	Procédés de production	Production d'énergie
(Stripple, 2001)	X	X	X	
ECORCE	X	X	X	

**Tableau 6. Données environnementales disponibles concernant la production de chaux**

### 1.4 Production du ciment

Toutes les références trouvées ont pour objectif d'établir un inventaire de cycle de vie, avec des systèmes pouvant être différents (Tableau 7). Parmi les différentes références, l'étude de Josa et al (2004) compare des données environnementales de différentes cimenteries européennes, en se limitant aux seuls procédés de production du clinker et du ciment.

Référence	Extraction des matières premières	Transports	Procédé de production	Production de l'énergie
(Häkkinen et Mäkelä, 1996)	X	X	X	X
(ATHIL, 2001)	X	X	X	X
(CTL, 2003)	X		X	
(Josa et al. 2004)	X		X	
(ATHIL, 2005)*	X	X	X	X
ECORCE	X	X	X	(X)

**Tableau 7. Données environnementales disponibles concernant la production du ciment**  
*nc : non calculé ou non communiqué – \*référence choisie pour ECORCE*

Le Tableau 8 permet de comparer des valeurs de flux d'inventaires pour les différentes références. Dans l'étude (Josa et al, 2004) différents types de ciments sont considérés. Dans le Tableau 8 ne figurent que des valeurs minimale et maximales trouvées par les auteurs concernant 7 cas de ciments de type CEM I contenant entre 95% et 100% de clinker.

Référence	Unité	(Häkkinen et Mäkelä, 1996)*	(CTL, 2003)*	(ATHIL, 2001)**	(ATHIL, 2005)*	(Josa et al. 2004)*	
						min	Max
Energie fossile consommée	MJ/tonne	4 900	5 307	3 254	7 954	2 980	4 900
Energie électrique consommée		450				310	557
CO <sub>2</sub>	kg/tonne	780	900	664,5	953,9	355	853
NOx		3,7	2,6	1,3	2,6	0,96	3,70
SO <sub>2</sub>		0,63	1,97	0,7	0,50	0,09	1,33
CO		1,9	0,88	1,1	1,26		
HC		0,13	0,05				
COGNM		0,91	0,01	0,23	0,50		
CH <sub>4</sub>		0,75	0,04	0,16	0,31		
HAP		3,6.10 <sup>-5</sup>		1,6.10 <sup>-5</sup>	2,28.10 <sup>-5</sup>		
Benzène		6,9.10 <sup>-5</sup>		1,8.10 <sup>-4</sup>	7,19.10 <sup>-4</sup>		
aq Phénol		2,1.10 <sup>-5</sup>		1,7.10 <sup>-4</sup>	6,73.10 <sup>-4</sup>		
poussières		0,39		6,00.10 <sup>-2</sup>	1,97.10 <sup>-2</sup>	0,16	10,00
N <sub>2</sub> O		2,1.10 <sup>-5</sup>		2,52.10 <sup>-3</sup>	3.10 <sup>-3</sup>		
Cr		7,8.10 <sup>-5</sup>		1,2.10 <sup>-5</sup>	1,9.10 <sup>-5</sup>		
Pb		0,49.10 <sup>-5</sup>		8,9.10 <sup>-5</sup>	4,7.10 <sup>-5</sup>		
Zn		0,18.10 <sup>-5</sup>		2,1.10 <sup>-4</sup>	4,94.10 <sup>-5</sup>		
Hg		9,2.10 <sup>-5</sup>		9,7.10 <sup>-5</sup>	1,1.10 <sup>-8</sup>		
TI		0,25.10 <sup>-5</sup>		3,1.10 <sup>-5</sup>	2,85.10 <sup>-5</sup>		
As		2,3.10 <sup>-5</sup>		6,9.10 <sup>-5</sup>			
Cd		2.10 <sup>-5</sup>		1,2.10 <sup>-5</sup>	1,4.10 <sup>-5</sup>		
aq COD		4,2.10 <sup>-4</sup>		1,56.10 <sup>-2</sup>	1,1.10 <sup>-2</sup>		
aq N tot		6,9.10 <sup>-7</sup>		1,9.10 <sup>-8</sup>	3,7.10 <sup>-5</sup>		
aq Huiles		1,4.10 <sup>-4</sup>		2,8.10 <sup>-3</sup>	6,4.10 <sup>-3</sup>		
Calcaire			1 200	1 191	1 165	1 390	1 200
Argile			345		36	346	1 600
Cendres volantes			6,27				
Sable de fonderie			3,14				
Sable			10,77		0,054		
Fer			7,63	6,3.10 <sup>-2</sup>	1,23.10 <sup>-1</sup>		
Gypse anhydre			50,71			30	60
Eau			177,21	772	2 152		1 410

**Tableau 8. Comparaison des flux issus de la production du ciment**  
*nc : non communiqué - \* CEM I - \*\* CEM II -*

L'étude de (Josa et al, 2004) permet d'observer une variabilité importante des flux pour un même type de ciment. Pour ECORCE, il a été choisi de calculer des valeurs environnementales à partir du pourcentage de clinker qui est demandé à l'utilisateur. Ce ratio est assimilé à un ciment de type CEM I (Portland). Les données retenues pour ECORCE sont celles de (ATHIL, 2005), car ce sont les données les plus complètes de ciment CEM I en termes de nombre de flux. Concernant les flux examinés par (Josa et al 2004), les ordres de grandeurs sont trouvés comparables, bien que les données de la référence (ATHIL, 2005) se situent plutôt dans des valeurs hautes. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que la référence (ATHIL, 2005) choisie pour ECORCE intègre la contribution de la production d'énergie dans son inventaire. Les détails sont insuffisants pour retrancher cette contribution. Cependant, les flux suivants ont été retirés de la base de données, car ils correspondent à des émissions de production d'énergie d'origine nucléaire :

émissions radioactives dans l'air : Krypton (Kr85), Radon (Rn226), Gas (unspecified), Xenon (Xe133), Tritium (H3), Radioactive Substance (unspecified), Carbon (C14), Radon (Rn222), Radium (Ra106), Radium (Ra226), Uranium (U238), Uranium (U234), Radon (Rn220), Thorium (Th230), Polonium (Po210), Lead (Pb210), Aerosols and Halogenes (unspecified), Iodine (I129), Cesium (Cs137), Strontium (Sr90), Plutonium (Pu214 beta XXX), Cesium (Cs134), Potassium (K40), Iodine (I133), Protactinium (Pa234m), Thorium (Th234), Radium (Ra228), Promethium (Pm147), Thorium (Th228), Iodine (I131), Cerium (Ce144), Thorium (Th232), Uranium (U235), Plutonium (Pu alpha), Cobalt (Co60), Cobalt (Co58), Curium (Cm alpha), Americium (Am241), Uranium (U alpha), Technetium (Tc99), Neptunium (Np237), Plutonium (Pu239), Plutonium (Pu238)

émissions radioactives dans l'eau : Tritium (H3), Radium (Ra226), Strontium (Sr90), Ruthenium (Ru106), Antimony (Sb125), Carbon (C14), Thorium (Th230), Plutonium (Pu241 beta), Thorium (Th228), Cesium (Cs137), Cobalt (Co60), Radium (Ra228), Uranium (U234), Uranium (U238), Radium (Ra224), Radioactive Substance (unspecified), Cesium (Cs134), Cerium (Ce144), Manganese (Mn55), Technetium (Tc99), Iodine (I129), Plutonium (Pu alpha XXX), Uranium (U235), Silver (Ag110m), Protactinium (Pa234m), Thorium (Th234), Cobalt (Co58), Americium (Am241), Plutonium (Pu238), Mix (Zr95, Nb95), Curium (Cm alpha), Plutonium (Pu239), Antimony (Sb124), Curium (Cm244), Uranium (U alpha XXX), Neptunium (Np237), Manganese (Mn54), Iodine (I131)

émissions radioactives dans le sol : Plutonium (Pu241), Plutonium (Pu240), Cesium (Cs135), Plutonium (Pu239), Americium (Am243), Technetium (Tc99), Strontium (Sr90), Zirconium (Zr93), Curium (Cm244), Plutonium (Pu242), Americium (Am241), Radium (Ra226), Thorium (Th230), Uranium (U234), Tin (Sn126), Neptunium (Np237), Selenium (Se79), Uranium (U238), Samarium (Sm151), Palladium (Pd107), Uranium (U235), Uranium (U233), Curium (Cm245), Cesium (Cs137), Iodine (I129)

## 1.5 Centrales matériaux hydrauliques

Peu de références ont été trouvées concernant la production des mélanges hydrauliques. Le Tableau 9 présente les systèmes associés à ces données.

Référence	Engins	Transports	Procédé de production	Production de l'énergie
(Stripple, 2001)*	X		X	X
(CTL, 2003)	X		X	
ECORCE	X		X	

**Tableau 9. Comparaison des systèmes environnementaux associés aux données environnementales disponibles concernant la production des mélanges hydrauliques**  
\*référence choisie pour ECORCE

Référence	Unité	(CTL, 2003)	(Stripple, 2001)
Energie totale consommée	MJ/m <sup>3</sup>	247	69
CO <sub>2</sub>	kg/m <sup>3</sup>	14,2	3,46
NO <sub>x</sub>		$1,43.10^{-2}$	$3,13.10^{-2}$
SO <sub>2</sub>		$8,37.10^{-2}$	$1,66.10^{-3}$
COGNM		$2,65.10^{-4}$	$2,25.10^{-3}$
poussières		$1,01.10^{-1}$	$1,25.10^{-3}$
Eau		0,14	0,10

**Tableau 10. Comparaison des données environnementales concernant la production des mélanges hydrauliques**

Dans le Tableau 10, on constate de grandes disparités entre les références concernant la consommation d'énergie, les émissions de CO<sub>2</sub> et les COGNM.

La référence utilisée dans ECORCE est (Stripple 2001), à laquelle la contribution de la fabrication de l'énergie a été soustraite. Par rapport à la référence (CTL, 2003) correspondant à celle d'un producteur unique, (Stripple 2001) présente l'avantage d'être une référence déjà agrégée sur plusieurs sites.

## 1.6 Transport routier

La référence (AFNOR, 2006) a été utilisée pour la valeur moyenne de consommation des poids lourds. Les autres valeurs d'émissions de cette norme n'ont pas été utilisées car elles incluent les procédés de fabrication du carburant, hors des limites du système environnemental d'ECORCE.

La référence (Hugrel et Joumard, 2006) a été utilisée pour les valeurs d'émissions atmosphériques des moteurs de poids lourds. Les valeurs choisies sont les valeurs agrégées sur tous types de circulation, et correspondant à l'année 2005.

## 1.7 Engins de travaux publics

Dans le cas des engins, leurs moteurs ont été assimilés à des moteurs de poids lourds roulant en milieu urbain, les valeurs choisies sont les valeurs agrégées sur tous types de circulation, et correspondant à l'année 2005 dans la référence (Hugrel et Joumard 2006).

## 2 Données collectées par le LCPC

### 2.1 Production des agrégats d'enrobés

Une étude ACV concernant l'utilisation de fraisats d'enrobés recyclés dans une couche de liaison, a été menée par le LCPC (Jullien et al, 2006). La partie des mesures concernant la production d'agrégats, incluant leur production par fraisage et leur transport jusqu'à la centrale d'enrobage, a été extraite et exprimée sous forme de flux utilisables dans l'ACV (Jullien 2007).

Référence	Engins de déconstruction	Transports	Concassage criblage	Engins centrale
(Jullien 2007)*	X	X		
ECORCE	X			

**Tableau 11. Système environnemental associé aux données environnementales disponibles concernant la production des agrégats d'enrobés**  
*\*référence choisie pour ECORCE*

La conséquence de l'utilisation de ces données dans ECORCE est que l'on ne fait pas de distinction entre les agrégats et les fraisats. D'autre part, ECORCE n'inclut pas le transport car la provenance des agrégats ou fraisats est demandée à l'utilisateur.

De plus, le fait de saisir un pourcentage d'agrégats dans la formule d'un enrobé peut conduire à double-compter une partie de la déconstruction au cas où l'utilisateur souhaite saisir cette partie de procédé.

Enfin, ces données n'incluent pas la consommation d'eau de la fraiseuse, mais celle-ci peut être saisie dans l'onglet déconstruction.

### 2.2 Carrières

Plusieurs références donnent des inventaires de carrières : (Athena, 1999), (Stripple, 2001), (Häkkinen et Mäkelä, 1996) et (Martaud, 2008). La référence (Stripple, 2001) mentionne l'origine des données comme provenant de Sabema, qui est probablement une entreprise suédoise de matériel de TP après recherche sur internet (<http://www.balticnordic.com/en/company-information/AQSKST/Sabema-Material-AB.html>). (Häkkinen et Mäkelä, 1996) ne mentionne pas l'origine des données.

Seules les données de (Martaud, 2008) sont issues de campagnes de mesures sur différents sites de carrières françaises. Les références (Stripple, 2001) et (Häkkinen et Mäkelä, 1996) distinguent les procédés de production de granulats concassés (crushed rocks) issus de roches massives, des procédés de production de gravier et de sable qui proviendraient plutôt de roches alluvionnaires (sans que cela soit explicitement précisé).

La référence (Martaud, 2008) présente des études de sites (avec mesures de consommations) concernant différents types de carrières. Un modèle de site de carrière a été développé.

Le Tableau 13 compare les valeurs de flux communes entre les références, concernant les roches massives. Le détail des frontières du système environnemental est détaillé pour la référence (Stripple, 2001). On constate des ordres de grandeurs comparables en ce qui concerne les consommations d'énergie, avec toutefois une variation du simple au double selon les références : de 25,6 à 52 MJ/tonne. Par contre il existe de grandes disparités d'ordre de grandeurs concernant les émissions, entre (Stripple, 2001) d'une part, et (Häkkinen et Mäkelä, 1996) et (Martaud, 2008) d'autre part. Notamment, selon (Stripple, 2001), la valeur en CO<sub>2</sub> du procédé d'extraction seul est très faible, et l'essentiel des émissions proviendrait de la production d'électricité. Ce résultat paraît aberrant car, pour les moteurs fonctionnant à l'énergie fossile, les valeurs en CO<sub>2</sub> sont corrélées à celles de la consommation d'énergie (qui est du même ordre que pour les autres références). D'autre part, certaines erreurs de calculs ont été identifiées dans le document. Entre (Häkkinen et Mäkelä, 1996) et (Martaud, 2008) les plus grandes différences concernent les émissions en CO, COGNM et CH<sub>4</sub>. Pour ces flux, les données de (Athena, 1999) sont du même ordre de grandeur que (Martaud, 2008), excepté pour le CH<sub>4</sub>.

Référence	Extraction (engins)	Explosifs*	Lavage	Production de l'énergie
(Häkkinen et Mäkelä, 1996)	X		nc	
(Athena, 1999)	X	nc	nc	
(Stripple, 2001)	X		nc	X
(CTL, 2003)	X		nc	
(Martaud, 2008)*	X	X	X	

**Tableau 12. Données environnementales disponibles concernant la production de granulats en exploitation de carrière.**

*nc : non communiqué, \* référence choisie pour ECORCE*

Le Tableau 13 compare les valeurs de flux en fonction des frontières du système environnemental pour (Stripple, 2001) car le détail des données le permet. On constate des ordres de grandeur similaires, excepté une forte augmentation pour les émissions de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>. Ceci laisse supposer une production majoritaire en énergie fossile que l'on peut attribuer à la production de carburant utilisés pour les engins. Cependant, la différence d'un facteur 10<sup>6</sup> pour le CO<sub>2</sub> est néanmoins très surprenante.

Bien que les données environnementales soient disponibles par classe granulaire dans (Martaud, 2008), ECORCE ne propose pas cette distinction, ni non plus concernant le type de roche (massive ou alluvionnaire) car les différences n'ont pas été trouvées significatives par (Martaud, 2008). Les données sur les granulats utilisées dans ECORCE se rapportent donc à une carrière de roches massives qui produit des granulats routiers sans distinction de classe.

Référence		(Stripple, 2001)		(Athena, 1999)**	(Häkkinen et Mäkelä, 1996)	(Martaud, 2008)	(CTL, 2003)
		Carrière	Carrière + prod. énergie				
Energie	MJ/tonne	38,09	38,09	230	52	25,6	108
SO <sub>2</sub>	kg/tonne	6,46.10 <sup>-4</sup>	7,88.10 <sup>-4</sup>	1,14.10 <sup>-2</sup>	6,5.10 <sup>-3</sup>	1,97.10 <sup>-3</sup>	6,1.10 <sup>-3</sup>
NOx		1,21.10 <sup>-2</sup>	1,23.10 <sup>-2</sup>	8,99.10 <sup>-2</sup>	1,2.10 <sup>-2</sup>	5,01.10 <sup>-2</sup>	3,54.10 <sup>-2</sup>
CO <sub>2</sub>		1,34.10 <sup>-6</sup>	1,42	7,87	2,0	1,15	-
CO		1,44.10 <sup>-3</sup>	1,49.10 <sup>-3</sup>	4,93.10 <sup>-2</sup>	2,5.10 <sup>-3</sup>	2,19.10 <sup>-2</sup>	3,53.10 <sup>-2</sup>
COGNM		8,66.10 <sup>-4</sup>	8,90.10 <sup>-4</sup>	9,69.10 <sup>-3</sup>	2.10 <sup>-5</sup>	5,79.10 <sup>-3</sup>	5,3.10 <sup>-3</sup>
Poussières		4,76.10 <sup>-4</sup>	4,77.10 <sup>-4</sup>	7,19.10 <sup>-2</sup>	1,9.10 <sup>-3</sup>	9,33.10 <sup>-3</sup>	3,4.10 <sup>-1</sup>
N <sub>2</sub> O		2,72.10 <sup>-5</sup>	3,61.10 <sup>-5</sup>	-	nc	1,97.10 <sup>-3</sup>	-
CH <sub>4</sub>		8,05.10 <sup>-7</sup>	3,82.10 <sup>-6</sup>	8,75.10 <sup>-4</sup>	4,3.10 <sup>-3</sup>	2,81	1,05.10 <sup>-3</sup>
aq DCO		2,04.10 <sup>-5</sup>	2,04.10 <sup>-5</sup>	-	nc	nc	-
aq Ntot		3,23.10 <sup>-6</sup>	3,23.10 <sup>-6</sup>	-	nc	nc	-
aq Phénol	9,68.10 <sup>-6</sup>	9,68.10 <sup>-6</sup>	-	-	nc	-	

Tableau 13. Comparaison des flux par source pour les carrières de roches massives  
nc : non communiqué, \* valeur retenue dans ECORCE (caractéristiques du site n°1), \*\* valeur calculée pour 1,6 t/m<sup>3</sup>

Référence		(Stripple, 2001)		(Häkkinen et Mäkelä, 1996)	(Martaud, 2008)
		Carrière	Carrière + prod. énergie		
Energie	MJ/tonne	0,886	0,886	0,243	
SO <sub>2</sub>	kg/tonne	3,06.10 <sup>-5</sup>	4,67.10 <sup>-5</sup>	4.10 <sup>-2</sup>	2,57.10 <sup>-3</sup>
NOx		5,75.10 <sup>-4</sup>	5,97.10 <sup>-4</sup>	3,1.10 <sup>-2</sup>	3,36.10 <sup>-2</sup>
CO <sub>2</sub>		6,36.10 <sup>-2</sup>	7,28.10 <sup>-2</sup>	7,9	1,486.10 <sup>-2</sup>
CO		6,86.10 <sup>-5</sup>	7,36.10 <sup>-5</sup>	7,5.10 <sup>-3</sup>	2,18.10 <sup>-2</sup>
COGNM		4,14.10 <sup>-5</sup>	4,40.10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-3</sup>	9,15.10 <sup>-3</sup>
Poussières		2,29.10 <sup>-5</sup>	2,31.10 <sup>-5</sup>	2,1.10 <sup>-2</sup>	1,43.10 <sup>-3</sup>
N <sub>2</sub> O		1,29.10 <sup>-6</sup>	2,30.10 <sup>-6</sup>	nc	2,15.10 <sup>-3</sup>
CH <sub>4</sub>		4,03.10 <sup>-8</sup>	3,76.10 <sup>-7</sup>	2.10 <sup>-2</sup>	3,07.10 <sup>-4</sup>
aq DCO		9,67.10 <sup>-7</sup>	9,67.10 <sup>-7</sup>	nc	
aq Ntot		1,53.10 <sup>-7</sup>	1,53.10 <sup>-7</sup>	nc	
aq Phénol	4,59.10 <sup>-7</sup>	4,59.10 <sup>-7</sup>	nc		

Tableau 14. Comparaison des flux par source pour les carrières de roches alluvionnaires  
nc : non communiqué

## 2.3 Centrales d'enrobage

Quelques sources de données publiques existent (Tableau 15) concernant les centrales d'enrobage à chaud. Hormis (Jullien et al. 2008), qui mentionne un Tambour Sécheur Enrobeur fonctionnant au gaz naturel, les autres références ne précisent ni le type de technologie, ni le type de carburant utilisé.

Système : centrale d'enrobage à chaud	Procédé d'enrobage à chaud	Cuves à liant	Engins centrale	Stocks de constituants	Emissions diffuses
(Athena, 1999)	X	X	X	X	X
(Stripple 2001)	X	nc	nc	nc	nc
(Jullien et al. 2008)	X		X		
ECORCE	X				

Tableau 15. Données environnementales disponibles concernant la production d'enrobés



Certaines des données d'inventaire sont comparées dans le Tableau 16, pour les différentes sources. Les valeurs sont dans les mêmes ordres de grandeur concernant la consommation d'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> et CO. Les autres flux ont des valeurs très dispersées.

Référence		(Stripple, 2001)	(Athena, 1999)*	(Jullien et al 2008)
Energie	MJ/tonne	287,3	319,5	249,2
SO <sub>2</sub>	kg/tonne	1,43.10 <sup>-2</sup>	1,36.10 <sup>-1</sup>	4,43.10 <sup>-3</sup>
NOx		4,56.10 <sup>-2</sup>	1,89.10 <sup>-2</sup>	6,02.10 <sup>-3</sup>
CO <sub>2</sub>		22,5	18,97	9,83
CH <sub>4</sub>		0	0	2,70.10 <sup>-4</sup>
CO		3,71.10 <sup>-3</sup>	4,77.10 <sup>-3</sup>	7,71.10 <sup>-3</sup>
COGNM		-	1,70.10 <sup>-4</sup>	1,14.10 <sup>-2</sup>
Poussières		2,85.10 <sup>-3</sup>	3,62.10 <sup>-2</sup>	-

Tableau 16. Comparaison des flux par source pour les centrales d'enrobage  
*\*calculé pour un enrobé à 2,35 t/m<sup>3</sup>*  
*nc : non communiqué*

### 3 Absence de données publiques

Aucune référence n'a été trouvée concernant les procédés d'élaboration des matériaux suivants : fibres, acide, dope d'adhésivité, émulsifiants, épaississant, fluxant, phase, fines d'apport, joints béton, produits de dénudage, produits de cure, produits débituminants, résine.

D'autre part, bien que très importants en terme d'impacts environnementaux potentiels, en particulier lorsque des matériaux alternatifs sont utilisés, les rejets de polluants dans l'eau sont éminemment liés aux conditions météorologiques et à l'état mécanique des couches de surface. La contribution des matériaux par rapport à celle du trafic est difficile à isoler. Pour ces différentes raisons, il n'existe pas actuellement de données génériques de flux environnementaux émis dans l'eau par la chaussée, en fonction notamment des matériaux utilisés, et cet aspect n'est pas traité dans ECORCE.

Concernant les matériaux hydrauliques, il existe des réactions de carbonatation qui se produisent lors de la vie en service du béton exposé à l'air. Ces réactions absorbent le CO<sub>2</sub> présent dans l'air, qui réagissant avec les composés du béton, se carbonate. Cette « consommation » de CO<sub>2</sub> diminue la contribution totale des matériaux hydrauliques à l'effet de serre. Le phénomène dépend de la surface spécifique du béton en contact avec l'air, et des conditions climatiques. Actuellement, des données environnementales adaptées à la démarche ACV ne sont pas disponibles.

Enfin, les données fournies par l'INRETS concernant les moteurs de poids lourds ne concernent que les polluants réglementés : CO, CO<sub>2</sub>, COG, particules, SO<sub>2</sub> et NOx. Certains composants tels que les HAP sont connus comme étant émis mais ne bénéficient pas de nombreuses mesures et méthodes d'évaluation. Les valeurs environnementales ne sont donc pas facilement disponibles. Ceci revient à sous-estimer la contribution des transports à certaines catégories d'impact, notamment la toxicité et l'écotoxicité.

## **4 Conclusion**

Certaines des limites d'ECORCE sont directement liées au choix d'utiliser des données publiques. Celui-ci permet une diffusion large du logiciel, ce qui est conforme à un objectif de l'état de favoriser un changement des pratiques dans les choix de solutions techniques, en prenant en compte des critères environnementaux. Ce choix introduit certaines limites cependant, puisque les données présentent une certaine hétérogénéité du point de vue des hypothèses de systèmes qu'elles contiennent.

D'une part, l'inclusion ou non de la fabrication de l'énergie, induit des hypothèses différentes selon chaque référence. D'autre part, il existe des différences concernant l'exhaustivité des flux renseignés. Notamment il y a un décalage entre le nombre des flux proposés par certaines références, et le nombre de flux, nécessairement plus réduit selon les appareillages disponibles, proposés par les approches expérimentales.

# V Indicateurs et résultats environnementaux

Anne Ventura

Ce chapitre présente les indicateurs utilisés dans ECORCE. Il positionne et justifie le choix du type d'indicateurs et autres grandeurs choisis pour ECORCE (parties 1 et 2) parmi les nombreux indicateurs disponibles en ACV (voir § 1.2.5 Evaluation de l'impact environnemental page 24). Il résume les phénomènes environnementaux représentés par les indicateurs. Il permet également de présenter et d'expliquer pourquoi certains indicateurs qui n'ont pas été retenus (partie 3), ce qui diffère d'une approche ACV classique. Il rappelle que certains types d'impacts environnementaux ne sont pas pris en compte par le calcul ACV (partie 4). Enfin, la conclusion rappelle l'ensemble de ces éléments et souligne les spécificités du calcul, notamment en ce qui concerne la classification des impacts.

## 1 Indicateurs utilisés dans ECORCE

En lien avec la classification proposée par (Bare et Gloria, 2008), ECORCE utilise des indicateurs de type scientifiques, qualifiés de « midpoint », en français « indicateurs de pression ». Ces indicateurs représentent la potentialité des effets sur l'environnement provoqués par l'émission ou le prélèvement d'un flux dans l'environnement, et non l'effet environnemental effectif. Comme leur nom l'indique, ils représentent la pression exercée sur l'environnement, mais ne modélisent pas l'effet environnemental en lui-même. L'avantage de ces indicateurs réside dans la simplicité de leur calcul et la transparence de la méthode utilisée. D'autre part, ECORCE étant destiné à une approche comparative de solutions techniques en dehors de tout contexte de localisation de la route, une approche de modélisation des effets réels sur l'environnement n'est pas nécessaire. Ce type d'approche ne pourra être développé qu'en intégrant une localisation des impacts environnementaux.

De plus, ECORCE n'intègre pas non plus d'étape de « pondération » visant à ne donner qu'une seule note environnementale finale. En général, l'étape de pondération se déroule en deux phases :

- une étape de « normalisation » où chaque résultat d'indicateur est transformé en une valeur sans dimension, exprimée en pourcentage par rapport à une valeur de référence de cet indicateur (par exemple la valeur française annuelle),
- une étape d'agrégation, où l'on effectue une somme pondérée de l'ensemble des valeurs sans dimensions.

Dans ces deux étapes, le choix, à la fois des valeurs de références et des coefficients de pondérations reposent sur des considérations politiques, techniques, économiques ou sociales. En effet, choisir des valeurs de référence ou des coefficients plus ou moins importants, aboutit artificiellement à plus ou moins réduire l'intensité de telle ou telle catégorie d'impact. Ainsi ces choix appartiennent aux décideurs, qui peuvent effectuer facilement cette opération en utilisant des valeurs de référence et coefficients, fixés par exemple dans un cadre consultatif.

## 1.1 Indicateur d'effet de serre

L'effet de serre est provoqué par l'accumulation de certains gaz dans l'atmosphère, qui absorbent une partie du rayonnement infrarouge 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. Les effets sur le climat sont encore mal connus, et certaines évaluations prévoient un impact sanitaire considérable lié à l'augmentation et à la prolifération de maladies tropicales (Goedkoop et al., 2001).

L'indicateur choisi pour cette catégorie est le Potentiel de Réchauffement Global (GWP) (IPCC 2007). Le GWP d'une substance est 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<sub>2</sub> et il est calculé de la manière suivante :

$$GWP_i = \frac{\int_0^T a_i \cdot c_i(t) \cdot dt}{\int_0^T a_{CO_2} \cdot c_{CO_2}(t) \cdot dt} \quad (\text{sans dimension}) \quad (1)$$

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,  $a_{CO_2}$  : absorption de la radiation thermique suite à une augmentation de la concentration du CO<sub>2</sub>,  $c_{CO_2}(t)$  : concentration du CO<sub>2</sub> restant au temps  $t$  après son émission,  $T$  le nombre d'années sur lesquels l'intégration est effectuée.

Le coefficient ainsi déterminé est multiplié par les flux des substances concernées, donnant une valeur finale exprimée en kg d'équivalent CO<sub>2</sub>. Les valeurs de GWP <sub>$i$</sub>  retenues considèrent un calcul intégral effectué sur une durée de 100 ans, qui correspond à la durée de vie d'une molécule de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (IPCC 2007).

## 1.2 Indicateur d'eutrophisation

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. L'eutrophisation des estuaires est un phénomène généralisé dans le monde, et est suspectée depuis longtemps d'être la cause d'impacts sanitaires dans les pays en voie de développement (Scott et al. 1993), (Camargo et Alonso 2006), (Flemer et Champ 2006).

L'indicateur correspond à la somme de tous les précurseurs d'eutrophisation, en multipliant la masse mesurée par son facteur d'équivalence. Il est exprimé sous la forme d'équivalents phosphates (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>). 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 (Goedkoop 1996).

$$EI_i = \frac{m_i^P}{\mu_i} \cdot \frac{\mu_{PO_4^{3-}}}{m_{PO_4^{3-}}^P} \quad (\text{sans dimension}) \quad (2)$$

avec  $EI_i$  : la masse en PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> ayant le même effet eutrophique potentiel qu'une unité de masse de la substance  $i$ ;  $m_i$  : le potentiel de biomasse en équivalent phosphate,  $\mu_i$  : la masse molaire de la substance  $i$ ;  $m_{PO_4^{3-}}^P$  : le potentiel de biomasse d'une unité de phosphate;  $\mu_{PO_4^{3-}}$  : la masse molaire du phosphate ( $\mu_{PO_4^{3-}} = 79 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ).

Le coefficient ainsi déterminé est multiplié par les flux des substances concernées, donnant une valeur finale exprimée en kg d'équivalent  $\text{PO}_4^{3-}$ .

### 1.3 Indicateur d'acidification du milieu

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.

On définit le potentiel d'acidification comme étant le rapport du nombre des équivalents du potentiel en protons  $\text{H}^+$ , par unité de masse de la substance, sur la valeur de référence du dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) (Goedkoop 1996).

$$AP_i = \frac{n_i^{\text{H}^+}}{\mu_i} \cdot \frac{\mu_{\text{SO}_2}}{n_{\text{SO}_2}^{\text{H}^+}} \quad (\text{sans dimension}) \quad (3)$$

avec  $n_i^{\text{H}^+}$  : le nombre de protons  $\text{H}^+$  correspondant à la forme acide de la substance  $i$ ,  $\mu_i$  : la masse molaire de la substance  $i$ ,  $n_{\text{SO}_2}^{\text{H}^+}$  : le nombre de protons  $\text{H}^+$  correspondant au dioxyde de soufre ( $n_{\text{SO}_2}=2$ ),  $\mu_{\text{SO}_2}$  : la masse molaire du dioxyde de soufre ( $\mu_{\text{SO}_2} = 64 \text{ g.mol}^{-1}$ ).

Le coefficient ainsi déterminé est multiplié par les flux des substances concernées, donnant une valeur finale exprimée en kg d'équivalent  $\text{SO}_2$ .

### 1.4 Indicateur de formation d'ozone troposphérique

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.

L'indicateur POCP (Photochemical Ozone Creation Potential) est la valeur la plus utilisée en Europe pour décrire ce phénomène. Il 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 (Derwent et al 1996).

$$\text{POCP}_i = \frac{m_{\text{O}_3}^i}{m_{\text{O}_3}^{\text{éthylène}}} \quad (\text{sans dimension}) \quad (4)$$

avec  $\text{POCP}_i$  : l'indicateur de formation d'ozone potentielle,  $m_{\text{O}_3}^i$  la masse d'ozone produite par 1 kg du précurseur chimique  $i$  (kg) émis dans la basse atmosphère, et  $m_{\text{O}_3}^{\text{éthylène}}$  la masse d'ozone produite par 1 kg du précurseur éthylène (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. 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 (Derwent et al 1998), (Altenstedt et Pleijel, 1998).

## 1.5 Indicateurs de toxicité et d'écotoxicité

Beaucoup de travaux concernant les modèles de toxicité et d'écotoxicité ont été effectués au cours des 20 dernières années, mettant en évidence à la fois l'importance accordée par la société aux effets environnementaux sur la santé humaine, mais aussi la difficulté à représenter fidèlement ces impacts par des indicateurs simples. En effet, tout d'abord, de nombreuses disciplines scientifiques différentes interviennent dans ces domaines : toxicologie, médecine (épidémiologie, cancérologie, génétique), écologie, physico-chimie, phénomènes de transferts, phytologie, zoologie... De plus, les effets d'une substance peuvent être multiples, parmi lesquels la génotoxicité, l'altération de la motricité, l'atteinte aux fonctions reproductives, qui, s'ils ne sont pas mortels pour les individus, ont des effets sur la pérennité des espèces. Etablir des liens entre ces différents domaines afin d'avoir une vue globale reste donc un travail de longue haleine, encore en pleine évolution pour les spécialistes des domaines concernés.

La norme P01010 propose d'utiliser le concept de volume critique pour calculer un indicateur de toxicité. Cet indicateur représente le volume (gazeux ou liquide) dans lequel il faudrait diluer la masse de la substance émise pour la rendre conforme à une valeur seuil. Le choix de cette valeur seuil peut se faire sur des critères toxicologiques (seuil minimum sans effet toxique observé) ou bien sur des seuils réglementaires. C'est le cas de la norme P01010 qui utilise un seuil réglementaire. L'indicateur calculé représente donc le volume (gazeux ou liquide) dans lequel il faudrait diluer la masse d'une substance pour la rendre conforme à la réglementation.

Plusieurs remarques peuvent être faites sur cet indicateur. Tout d'abord sur la méthode de calcul de l'indicateur lui-même, qui présente l'avantage d'être extrêmement simple, mais qui présente l'inconvénient de ne pas pouvoir intégrer l'effet des substances cancérogènes pour lesquelles il n'existe pas de seuil. Ensuite, le choix spécifique de la norme P01010 qui utilise les seuils d'émission réglementaires. Là encore, ce choix a l'avantage de la simplicité et garantit que les mesures existent puisque la réglementation l'exige. Cependant, la conséquence de ce choix est que l'indicateur calculé ne reflète pas un phénomène toxique éventuel, mais une conformité réglementaire. D'autre part, il ne permet pas de considérer des émissions de substances qui ne sont pas réglementées.

Pour considérer les phénomènes dans leur ensemble, le projet européen ExternE (ExternE, 2003), lancé en 1991, avait pour objet d'évaluer les coûts externes de la pollution due à l'utilisation d'énergie, notamment sur la santé. Les travaux de ce groupe de recherche se sont inspirés de la méthodologie d'analyse du risque, méthodologie scientifique internationalement reconnue et utilisée pour évaluer des impacts écologiques et sanitaires sur des cas particuliers. L'originalité du projet ExternE a été d'adapter cette méthodologie à des évaluations globales, par pays et pour l'Europe. Les résultats français du projet ExternE sont principalement regroupés dans une thèse concernant les dommages dus aux émissions de polluants atmosphériques (Spadaro, 1999). La démarche mise en place par le projet ExternE ne concernait pas directement l'ACV, mais a permis de lier la méthodologie d'analyse du risque à une approche globale, ce qui correspond aux objectifs de la démarche ACV. Des spécialistes de l'ACV et de l'analyse du risque sanitaire ont également mené des travaux pour rapprocher les deux méthodologies (Assies, 1998), (Finizio et Villa, 2002), (Irving Olsen, 2001)... montrant l'intérêt de cette approche. Ce courant de réflexions a amené Huijbregts et al. (2000) à proposer un modèle d'indicateur adapté à l'ACV qui a été retenu pour ECORCE.

Le modèle d'Huijbregts et al. (2000) consiste à calculer un facteur d'équivalence (EF) pour chaque substance, en se fondant sur une démarche d'analyse du risque. Pour chaque unité

massique d'une substance émise dans un compartiment initial (eau douce, eau de mer, air, sol industriel et sol agricole), sa 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 :

$$TP_{i,c_1 \rightarrow c_2} = w_i \cdot \frac{RCR_{i,c_1 \rightarrow c_2}}{RCR_{réf}} \quad (\text{sans dimension}) \quad (5)$$

où  $TP_{i,c_1 \rightarrow c_2}$  est le potentiel toxique de la substance  $i$  émise dans le compartiment  $c_1$  et transférée dans le compartiment  $c_2$  ;  $w_i$  est un facteur de pondération dépendant des échelles géographiques des compartiments  $c_1$  et  $c_2$  ;  $RCR_{i,c_1 \rightarrow c_2}$  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 (1,4DCB).

Le coefficient ainsi déterminé est multiplié par les flux des substances concernées, donnant une valeur finale d'indicateur exprimée en kilogramme d'équivalents 1,4DCB. Le modèle présente des limites. Comme il est destiné à évaluer les effets de long terme, le modèle ne considère pas les substances à effet aiguë, comme par exemple le CO reconnu toxique (Omaye, 2002). D'autre part, il ne fournit pas encore de valeurs pour toutes les substances toxiques.

Certains choix ont été faits dans ECORCE. Ceux-ci seront probablement amenés à subir des évolutions. Pour les HAP, le détail des molécules n'étant pas donné de façon uniforme dans toutes les références bibliographiques, il a été choisi d'utiliser le facteur d'équivalence générique aux HAP cancérigènes fourni par le modèle (Huijbregts et al. 2000). De plus, le modèle (Huijbregts et al. 2000) fournit un indicateur d'écotoxicité par grand type de milieux vivants touchés : eau douce, eau de mer, sédiments d'eau douce, sédiments marins, milieux terrestres et êtres humains. Hormis la toxicité pour l'homme qui est distinguée dans ECORCE, les autres indicateurs de toxicités pour les différents écosystèmes sont agrégés en un seul indicateur d'écotoxicité. Cette simplification devrait à terme être reconsidérée si une approche plus localisée des émissions était adoptée.

## **2 Autres informations environnementales calculées par ECORCE**

### **2.1 Inventaire des masses et/ou volumes de matériaux consommés**

A partir des données saisies, concernant la géométrie des couches et leur composition, les masses de chaque matériau routier et de ses composants élémentaires sont calculées. ECORCE ne calcule pas d'indicateur agrégé de consommation de ressources. La raison est expliquée plus loin (voir § 3.1 page 57).

Cette information est la seule permettant de visualiser les économies de ressources naturelles effectuées en cas d'utilisation d'agrégats d'enrobés recyclés.

## 2.2 Inventaire de cycle de vie

L'inventaire de cycle de vie est donné pour l'ensemble du cas saisi, toutes opérations et couches confondues.

## 2.3 Consommation d'énergie

La Figure 8 présente une vision schématique des différents types d'énergie que l'on peut trouver ou renseigner dans une ACV.

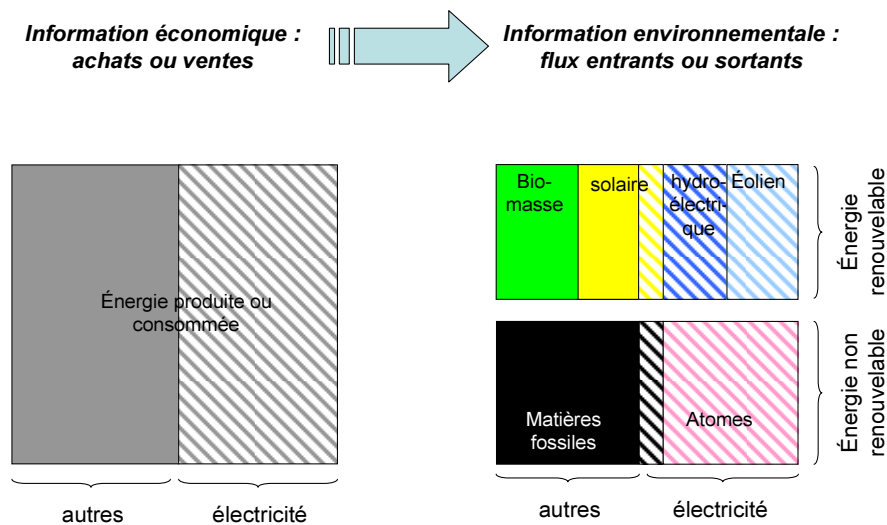


Figure 8. Type d'information disponible sur l'énergie primaire totale d'un système de production

L'information sur l'énergie d'un système de production paraît triviale au premier abord. Sa valeur est souvent disponible à partir des données économiques : achats ou ventes d'énergie, pour laquelle on distingue l'énergie électrique des autres formes d'énergie (Figure 8) issues de matières premières (par exemple fioul ou gaz naturel...).

Cependant, la méthodologie ACV distingue plusieurs sortes d'énergies :

- L'énergie primaire : c'est l'énergie contenue dans la matière première (pétrole, charbon, uranium), généralement égale au pouvoir calorifique inférieur ou supérieur de la matière première.
- L'énergie secondaire : c'est de l'énergie primaire transformée en un type d'énergie différent (hydrogène, électricité...).
- L'énergie grise : c'est l'énergie primaire totale utilisée pour créer un produit.
- L'énergie de procédé : c'est l'énergie primaire consommée pour les opérations de fabrication d'un produit. Elle est contenue dans l'énergie grise.
- L'énergie matière : c'est l'énergie contenue dans un matériau non utilisé comme un carburant. Elle est contenue dans l'énergie grise.

### 2.3.1 Production de l'énergie

L'évaluation des impacts environnementaux liés à la production d'énergie requiert de connaître la source d'énergie (Figure 8), chaque mode de production ayant ses propres impacts environnementaux. D'autre part, comme tout prélèvement de ressource naturelle,



l'impact environnemental de la consommation d'énergie sera lié au caractère renouvelable ou non de la ressource utilisée.

Il a été choisi, dans ECORCE, de ne pas inclure la contribution de la production d'énergie, pour deux raisons.

La première est liée aux incertitudes concernant les sources d'énergie. En effet, les hypothèses retenues pour la répartition de l'énergie entre ses différentes sources, sont variables selon les inventaires. La méthodologie ACV impose donc de connaître un niveau de détail qui n'est pas toujours accessible, notamment concernant les modes de production d'électricité : des hypothèses sont en général fixées par pays, en fonction de la connaissance de leur politique énergétique. Ceci reste une approximation assez grossière, car l'énergie électrique n'étant pas stockable, elle est produite en fonction de la demande. En réalité, pour faire face à des pics de consommation, les fournisseurs d'électricité disposent de systèmes de production différents, plus ou moins rapides à mettre en route, et ils peuvent également s'alimenter en dehors des frontières de la zone de distribution. Ainsi les impacts environnementaux de la fabrication de l'énergie restent incertains.

La deuxième est liée aux décisions que peut prendre l'utilisateur d'ECORCE. En effet, en l'état actuel, l'utilisateur n'a pas vraiment de choix concernant les sources d'énergie, alors que la diminution de l'énergie consommée reste un paramètre sur lequel il peut agir. Ceci est susceptible de changer à l'avenir et il faudra à terme pouvoir inclure les effets de la production d'énergie. Mais justement, en raison du choix potentiel de l'utilisateur, il apparaît plus approprié de prévoir qu'il choisisse lui-même la répartition entre les différentes sources d'énergie. C'est pour cela que les données utilisées dans ECORCE excluent, lorsque c'est possible, la contribution de la production d'énergie, afin de faciliter ultérieurement un choix de répartition propre à l'utilisateur.

### 2.3.2 *Energie matière*

Le pouvoir calorifique inférieur du bitume est d'environ 40 MJ/kg. La décision d'inclure l'énergie matière du bitume dans l'énergie consommée est un point critique des ACV dans le domaine de la route (Santero et al. 2010). Selon la SETAC (1993) : « la prise en compte de l'énergie contenue dans les matériaux organiques est complexe. Les matières premières organiques peuvent être utilisées comme des matériaux ou comme des carburants. Dans ce dernier cas, le matériau est brûlé, produisant une énergie utilisable et des émissions atmosphériques, et ce faisant, dissipe de façon irréversible l'énergie disponible initialement. Dans le cas des énergies fossiles (pétrole, gaz naturel...) ceci représente une diminution des ressources naturelles. A contrario, quand la matière organique est utilisée comme un matériau, l'énergie associée reste contenue dans le matériau. Le contenu énergétique de ce matériau reste disponible pour une éventuelle utilisation comme carburant une fois que le matériau aura rempli sa fonction ».

Le fait de comptabiliser l'énergie matière du bitume comme une énergie consommée revient à poser la question de sa disponibilité en tant que ressource énergétique. Deux possibilités de traiter le bitume comme une source d'énergie existent.

- Le bitume pourrait servir de combustible dans certaines industries (chaudières, fours...). Dans ce cas, il est un carburant très polluant car il contient beaucoup d'impuretés (métaux lourds, composés soufrés...) qui sont rejetés par la combustion. De plus, son facteur d'émission de carbone est plus élevé que ceux des autres carburants (gaz naturel, gasoil, charbon...).
- Le bitume pourrait être converti en carburants pétroliers plus légers dans les raffineries. Dans ce second cas, la conversion induit des procédés fortement émissifs et fortement consommateurs d'énergie : craquage, hydrotraitement, désasphaltage... Il n'est pas acquis

que cette conversion soit technologiquement et/ou économiquement réalisable de façon systématique.

Autrement dit, l'utilisation du bitume comme matériau dans les enrobés présente certains avantages environnementaux : séquestration de carbone et d'autres polluants qui seraient rejetés en cas de combustion ou de conversion en fractions plus légères. Bien que la norme ISO 14040 préconise de comptabiliser l'énergie matière, elle ne discute pas des répercussions de la combustion. En effet, en raison de l'importance historique du pétrole comme ressource énergétique non renouvelable, seul le contenu énergétique des matériaux produits à partir du pétrole est comptabilisé.

D'une part, cette façon de comptabiliser est perçue comme pénalisante pour les matériaux organiques comparativement à tous les autres matériaux issus de matières premières non renouvelables (SETAC, 1994). D'ailleurs, la SETAC recommande de calculer séparément l'énergie consommée par les procédés et l'énergie matière contenue dans les matériaux (SETAC, 1994a).

D'autre part, comptabiliser l'énergie uniquement, en ignorant les autres aspects environnementaux générés ou évités est en désaccord avec la philosophie scientifique de l'ACV qui préconise de ne négliger a priori aucun effet sur l'environnement.

Ainsi, dans la méthodologie adoptée dans ECORCE, seule figure actuellement l'énergie consommée par les procédés ; l'énergie matière n'est pas comptabilisée dans l'indicateur « consommation d'énergie ». Bien que l'énergie matière du bitume (et des autres matériaux organiques) doit à terme être intégrée dans les approches ACV, la façon de l'intégrer reste donc une question encore en suspens.

## 2.4 Consommation d'eau

ECORCE fournit également une valeur globale de consommation d'eau, consommée par les procédés et par les formules de matériaux hydrauliques. Cette valeur est indicative, dans le sens où aucune distinction n'est faite concernant la provenance de l'eau consommée : puisage dans une nappe phréatique ou dans des eaux superficielles, eaux du réseau. Le recyclage de l'eau par certains procédés n'est pas explicité.

## 3 Indicateurs de catégories d'impacts environnementaux non calculées dans ECORCE

### 3.1 Indicateur de raréfaction des ressources

La catégorie d'impact « raréfaction des ressources naturelles » est souvent scindée en trois types de ressources : minérales, fossiles et biologiques. La raréfaction des ressources minérales est couramment calculée par un indicateur ADP (Abiotic Depletion Potential) dont le coefficient de contribution est calculé comme suit (Guinée et al. 2002) :

$$ADP_i = \frac{DR_i}{R_i} \cdot \frac{R_{Sb}}{DR_{Sb}} \quad (\text{sans dimension}) \quad (6)$$

où  $R_i$  est le taux de prélèvement annuel de la ressource  $i$  (kg/an),  $DR_i$  est la réserve mondiale de la ressource  $i$  (en kg),  $R_{Sb}$  est le taux de prélèvement annuel de la ressource  $Sb$  (Antimoine) (kg/an), et  $DR_{Sb}$  est la réserve mondiale de la ressource  $Sb$  (Antimoine) (en kg).

Le coefficient ainsi déterminé est multiplié par les flux des substances concernées, donnant une valeur finale d'indicateur exprimée en kilogramme d'équivalents Sb. Cependant, la représentativité de cet indicateur concernant les ressources en granulats est discutable. Selon Habert et al. (2010), les gisements de cette ressource sont essentiellement liés à des facteurs locaux et un gisement mondial global est difficile à caractériser.

### 3.2 Indicateur de diminution de la couche d'ozone stratosphérique

L'indicateur Ozone Depletion Potential (ODP) est défini comme suit (WMO 1991) :

$$ODP_i = \frac{(\Delta O_3)_i}{(\Delta O_3)_{CFC-R11}} \text{ (sans dimension) } \quad (7)$$

où  $(\Delta O_3)_i$  est la capacité de diminution d'ozone de la molécule  $i$  (kg), et  $(\Delta O_3)_{CFC-R11}$  est la capacité de diminution d'ozone de la molécule CFC-R11 (kg).

Le coefficient ainsi déterminé est multiplié par les flux des substances concernées, donnant une valeur finale d'indicateur exprimée en kilogramme d'équivalents CFC-R11. Cependant, depuis la convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone en 1986, les émissions de composés chlorofluorocarbonés sont interdites. Ainsi la valeur de cet indicateur de pression est toujours proche de zéro et il n'est plus calculé. Un indicateur de dommages ne donnerait pas forcément une valeur nulle car de nombreuses études épidémiologiques, telles que (Diepgen et Mahler 2002), reconnaissent que la diminution de la couche d'ozone stratosphérique est responsable d'une augmentation des cas de cancers de la peau, les effets des substances émises il y a plusieurs dizaines d'années étant différés dans le temps.

## 4 Catégories d'impacts environnementaux non prises en compte dans ECORCE

Certaines catégories d'impact ne sont pas prises en compte dans ECORCE.

La diminution des ressources d'origine biologique n'est pas prise en compte, car les matériaux utilisés ne sont pas d'origine biologique. Cependant, dans le cas des liants d'origine végétale ou d'utilisation de biocarburants, un indicateur de cette catégorie deviendrait pertinent.

Les nuisances (bruit, odeurs, vibrations) générées par la construction routière ne sont pas intégrées dans ECORCE. De fait, ces effets sont souvent liés à des conditions locales, et il serait peu pertinent de les agréger sur l'ensemble du cycle de vie de la chaussée.

De même, les impacts très localisés de diminution de biodiversité ne sont pas non plus intégrés dans ECORCE.

## **5 Conclusion**

Les indicateurs utilisés dans ECORCE font partie de la famille des indicateurs de pression : bien que la signification du chiffre obtenu et son unité soient peu accessibles pour les non spécialistes, les raisons de ce choix sont que la méthode de calcul est simple à comprendre et transparente, et qu'elle est directement basée sur les propriétés physicochimiques des flux. En effet, l'utilisation d'indicateurs de dommage, du type « Nombre d'années de vie perdues » sont plus explicites dans leur signification, mais reposent sur des méthodes de calcul plus complexes. D'autre part, il ne faut pas perdre de vue que l'ACV reste une méthode comparative par définition, qu'elle compare des produits ou des services entre eux, et ne cherche pas à évaluer l'impact environnemental réel. Ainsi, comparer les résultats d'indicateurs entre les différentes solutions, suffit pour comparer les solutions.

D'autre part, ECORCE diffère de la démarche ACV classique de deux points de vue. D'une part, il n'utilise pas tous les indicateurs proposés (pour les raisons qui sont exposées plus haut dans ce chapitre). D'autre part, il utilise un modèle de classification des polluants dans les catégories d'impact, problématique scientifique non résolue jusqu'à aujourd'hui (voir 1.2.4 Classification des flux dans les catégories d'impact, page 24). De ce fait ECORCE apporte une méthode nouvelle qui est détaillée plus loin dans cet ouvrage (voir 1.4 Hypothèses et coefficients de classification des flux aux différentes catégories d'impact, page 64). La méthode utilisée est la classification équiprobable (Ventura 2010), mais à terme, cette classification doit permettre de relier les indicateurs au territoire.

# VI Principes méthodologiques des calculs

Anne Ventura, Philippe Tamagny, Agnès Jullien

## 1 Etapes des calculs des flux et indicateurs unitaires

### 1.1 Discrétisation par couche, par procédé et par opération

A l'exception des masses de matériaux consommés (onglet *matériaux*) et des calculs de flux de polluants émis vers l'environnement (onglet *inventaires*), dont les valeurs totales pour le cas d'étude sont reportés dans des tableaux (sans distinction de position de la couche dans la chaussée ou de la nature de l'opération choisie), les résultats sont présentés sous forme de graphiques qui précisent la part respective de chaque procédé, par couche de chaussée et par opération.

Le calcul des flux et indicateurs totaux est issu du calcul d'indicateurs unitaires correspondant à l'expression suivante :

$$Ind^{j,p} = \sum_{i=1}^k \alpha_i^{j,p} \cdot C_i^j \cdot m_i^p \quad (8)$$

avec :  $Ind^{j,p}$  : indicateur de la catégorie d'impact  $j$  pour le procédé  $p$  (unité spécifique indicateur / unité de référence du procédé  $p$ ) ;  $\alpha_i^{j,p}$  : coefficient de classification du flux  $i$  à la catégorie d'impact  $j$  pour le procédé  $p$  (sans unité) ;  $C_i^j$  : coefficient de contribution du flux  $i$  à la catégorie d'impact  $j$  (unité spécifique indicateur / kg de  $i$ ) ;  $m_i^p$  : masse du flux unitaire  $i$  émis par le procédé  $p$  (kg/unité de référence du procédé  $p$ )

La Figure 9 illustre les étapes suivies pour réaliser les calculs d'indicateurs de l'équation (8), à partir de la base de données environnementales implémentée dans l'outil pour ce qui est de la version ECORCE, et en relation avec la base de données techniques qui correspond à l'entrée métier.

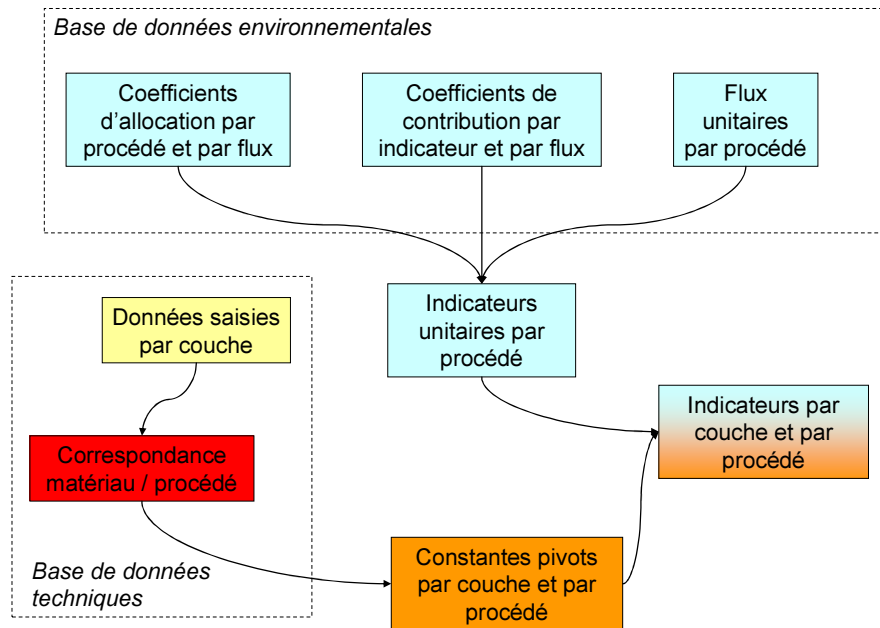


Figure 9 : Les étapes détaillées des calculs dans ECORCE

Le calcul des indicateurs totaux, propres au cas d'étude saisi par l'utilisateur, consiste en la multiplication de deux matrices : la matrice des indicateurs unitaires par procédé (IU) et la matrice des constantes pivots (CP). La matrice résultats est obtenue par :

$$R(n,l) = CP(n,m) \cdot IU(m,l) \quad (9)$$

avec :  $n$ , le nombre de couches de chaussées différentes,  $m$ , le nombre de procédés de production différents, et  $l$  le nombre d'indicateurs calculés.

## 1.2 Calcul des indicateurs unitaires

### 1.2.1 Principes de calcul

La matrice des indicateurs unitaires par procédé  $IU(m,l)$  est calculée à partir de 3 matrices formant la base de données environnementales : la matrice des flux unitaires, la matrice des classifications et la matrice des contributions.

La matrice  $FU(k,m)$  des flux unitaires  $m_i^p$  ( $i$  allant de 1 à  $k$ ) regroupe les données environnementales correspondant aux inventaires conformes à la démarche d'ACV, pour chaque procédé  $p$  (de 1 à  $m$ ) de production de matériau ainsi que pour les émissions et consommations liées aux engins et aux transports.

La matrice des classifications  $A(k,m)$  regroupe les coefficients de classification  $\alpha_i^{j,p}$  par flux  $i$  (de 1 à  $k$ ) et par procédé  $p$  (de 1 à  $m$ ).

### 1.2.2 Unités

Pour chaque procédé, l'inventaire est exprimé en fonction d'une unité fonctionnelle propre à la référence bibliographique.

- Dans le cas des procédés de production de matériaux, l'unité de référence est toujours la masse du matériau produit. Ainsi, les résultats seront obtenus en calculant d'abord la masse des matériaux en fonction des entrées de l'utilisateur.
- Dans le cas des engins, l'unité de référence est l'énergie consommée, c'est donc cette grandeur qui doit être calculée en fonction des entrées de l'utilisateur.
- Dans le cas des transports, l'unité de référence est le kilomètre parcouru.

Enfin, dans le cas des procédés dont le nom commence par « Eau\_ », il s'agit de calculer une masse en eau variable, dépendant des entrées de l'utilisateur. Dans ce cas, elle est non proportionnelle à l'unité de l'inventaire et une colonne procédé spécifique est créée dans la matrice des flux unitaires.

La matrice des contributions  $C(k,l)$  regroupe les coefficients de contribution par flux  $i$  (de 1 à  $k$ ) et par indicateur  $j$  (de 1 à  $l$ ).

### 1.3 Harmonisation des données environnementales unitaires

Les références utilisées pour les calculs des indicateurs ne fournissent pas nécessairement un panel de polluants harmonisé et exhaustif. Ainsi, une démarche d'harmonisation a été menée pour aboutir à la base de données environnementales qui est utilisée dans ECORCE.

#### 1.3.1 Remarques générales

Les polluants non réglementés et/ou émis en faibles quantités sont souvent absents des inventaires fournis ou mal renseignés quant aux propriétés qui jouent un rôle dans leur effet sur l'environnement. Par exemple la nature et le degré d'oxydation des espèces métalliques ou bien les formules chimiques des polluants organiques tels que les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques... Ces lacunes aboutissent, pour certains procédés, à sous-estimer des résultats d'indicateurs, notamment de toxicité et d'écotoxicité. *A contrario*, l'existence de données très détaillées pour un procédé peut faire ressortir artificiellement ce procédé par rapport aux autres.

D'autre part, pour certains flux, les coefficients de contribution à un indicateur donné peuvent ne pas être connus car on ne dispose actuellement d'aucune information environnementale fiable les concernant.

#### 1.3.2 Cas des émissions radioactives

Dans le cas des procédés impliqués dans le système environnemental des chaussées, les émissions de composés radioactifs sont exclusivement issus des procédés de fabrication de l'énergie électrique nucléaire. Ce procédé étant a priori exclu du système, les émissions radioactives ont donc été retirées des inventaires.

#### 1.3.3 Cas des familles physico-chimique et des indicateurs d'état

Certains inventaires peuvent mentionner non pas des formules ou appellations chimiques précises, mais des données non spécifiques telles que des familles chimiques ou physiques et des indicateurs d'état. Ce type de données est fréquemment trouvé lorsqu'il est exigé par la réglementation. Les données disposant de coefficients de contribution pour un indicateur

donné, sont mentionnées ci-dessous. Les autres données sont conservées dans l'inventaire à titre d'information.

#### Liste des données non spécifiques utilisées dans les calculs d'indicateurs

- Les émissions dans l'air de particules (et autres appellations *PM*, poussières, particules solides...) spécifient une masse totale de particules. Elles ont été regroupées dans une émission atmosphérique nommée PM10 (particules de matière de diamètre inférieur à 10 micromètres) pour laquelle il existe un coefficient de contribution à la toxicité.
- La famille des métaux est très large et n'apporte pas l'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...). 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.
- 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 appellations « matière azotée » et « azote Kjeldahl » sont intégrés dans N-tot. Cette valeur est utilisée dans l'indicateur d'eutrophisation.
- Le P-tot (phosphore total) regroupe le phosphore présent dans les composés organiques et minéraux dans un effluent aqueux. Cette valeur est utilisée dans l'indicateur d'eutrophisation.
- Les émissions atmosphériques de COV (Composés Organiques Volatils) sont, par définition, des molécules organiques à l'état de vapeur à température et à pression ambiantes (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. Dans ce cas, on parle de COVNM (non méthanique). Les HC (Hydrocarbures) sont également des molécules organiques, exclusivement composées d'atomes de carbone et d'hydrogène.
- Ont été intégrés sous le terme COGNM (Composés Organiques Gazeux Non Méthaniques), pour lequel il existe un coefficient de contribution à l'indicateur de formation d'ozone photochimique, les émissions atmosphériques avec les appellations suivantes : matière organique, hydrocarbures non spécifiés, COV, COVNM.
- Les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) ne sont pas tous identifiés chimiquement et un coefficient de contribution à la toxicité et à l'écotoxicité générique est défini. Les flux appelés Hydrocarbures Aromatiques, ainsi que les HAP identifiés (ex : benzo(a)pyrène) ont été comptabilisés sous l'appellation générique HAP.
- les émissions atmosphériques de « matière halogénée », « hydrocarbures halogénés » et « Organiques Halogénés Adsorbables » ont été regroupées sous l'appellation « halogénés » pour laquelle existe un coefficient de classification à la formation d'ozone photochimique.
- La DCO (Demande Chimique en Oxygène) est la concentration en masse d'oxygène, équivalente à la quantité d'un oxydant défini, consommée par les matières dissoutes ou en suspension lorsque l'on traite un échantillon d'eau avec l'oxydant dans des conditions définies. Il existe un coefficient de contribution à l'indicateur d'eutrophisation pour la DCO.
- Les émissions de chrome non spécifiées (CrIII ou CrVI) ont été attribuées au CrVI (hypothèse pessimiste).

#### Liste des données non spécifiques non utilisées dans les calculs d'indicateurs

- Les émissions atmosphériques appelées « goudron » (tars en anglais) ;
- les huiles et corps gras saponifiables ;



- les émissions dans l'eau de particules (et autres appellations *PM*, poussières, particules solides...);
- la DBO (Demande Biologique en Oxygène), qui correspond à la quantité d'oxygène nécessaire à la décomposition biologique des matières organiques d'un échantillon, en un temps déterminé (5 jours à 20 °C par exemple : DBO<sub>5</sub>);
- les émissions dans l'eau appelées « VOC », « matière organique en suspension », « matière organique dissoute », « hydrocarbures » et « matière organique »;
- les « matières sulfurées » émises dans l'eau;
- les sels minéraux, sels de lithium...

### 1.3.4 Sources et valeurs des coefficients de contribution

Les coefficients de contribution du GWP sont issus de (IPCC 2007). Les coefficients de contribution des indicateurs AP, EI et POCP sont issus de (Goedkoop 1996). Les coefficients de contribution des indicateurs TP, EP sont issus de (Huijbregts et al. 2000).

## 1.4 Hypothèses et coefficients de classification des flux aux différentes catégories d'impact

La méthode de classification utilisée dans ECORCE est la méthode par équiprobabilité (Ventura 2010). Certains polluants peuvent contribuer à différentes catégories d'impact. Dans ce cas, le coefficient de classification  $\alpha_i^j$  est différent de 1.

Lorsque la contribution d'un polluant à chaque catégorie d'impact est exclusive, c'est-à-dire lorsque le polluant est dégradé lors de sa contribution à l'impact, la contribution à chaque catégorie a été considérée comme équiprobable.

$$\alpha_i^j = \frac{1}{N_i^j} \quad (10)$$

avec :  $\alpha_i^j$  : coefficient de classification du flux *i* à la catégorie d'impact *j* (sans unité);  $N_i^j$  : nombre de catégories d'impact auxquelles contribue le polluant *i* de façon exclusive (sans unité)

La contribution d'un polluant à une catégorie d'impact peut être de nature successive à un autre impact. Dans ce cas, la contribution entre catégories successives ainsi qu'avec aucune contribution, est considérée comme équiprobable.

$$\alpha_i^{j'} = \frac{\alpha_i^j}{N_i^{j'} + 1} \quad j' \text{ étant successif à } j \quad (11)$$

avec :  $\alpha_i^{j'}$  : coefficient de classification du flux *i* à la catégorie d'impact *j'* successive à la catégorie *j* (sans unité);  $\alpha_i^j$  : coefficient de classification du flux *i* à la catégorie d'impact *j* (sans unité);  $N_i^{j'}$  : nombre de catégories d'impact successives à *j* auxquelles contribue le polluant *i* (sans unité)

L'équiprobabilité est une hypothèse par défaut et extrêmement simpliste. Cette hypothèse a néanmoins le mérite d'éviter de compter deux fois la contribution d'un polluant (cas où  $\alpha_i^j=1$  par défaut).

La proportion massique d'un polluant participant à différents impacts dépend de beaucoup de paramètres, notamment de son temps de résidence dans l'atmosphère, de son lieu d'émission, des conditions météorologiques... La détermination précise de coefficients de classifications reste une question scientifique d'actualité. Un premier cadre conceptuel a été proposé pour cette problématique (Ventura 2010), mais non encore utilisé dans ECORCE.

## 2 Calcul des constantes pivots

### 2.1 Principes de calcul

La matrice des constantes pivots CP(n,m) est spécifique du cas étudié, et est obtenue à partir des saisies utilisateurs et d'une base de données techniques.

Une matrice des constantes pivots est calculée pour chaque couche et par procédé, à partir des données saisies. L'appellation « constantes pivots » est propre à la structure du programme. Pour un procédé donné, il s'agit de la valeur de référence par laquelle on doit multiplier les valeurs d'inventaire de la littérature afin d'obtenir l'inventaire spécifique au cas étudié. Par exemple, pour le procédé de production du bitume, toutes les valeurs d'inventaire étant exprimées par tonne de bitume produit, la constante pivot sera la masse de bitume calculée par ECORCE, propre au projet saisi, et exprimée en tonnes.

La procédure de calcul diffère selon les spécificités de saisie propres à chaque matériau : normes de référence, type de matières premières, unités...

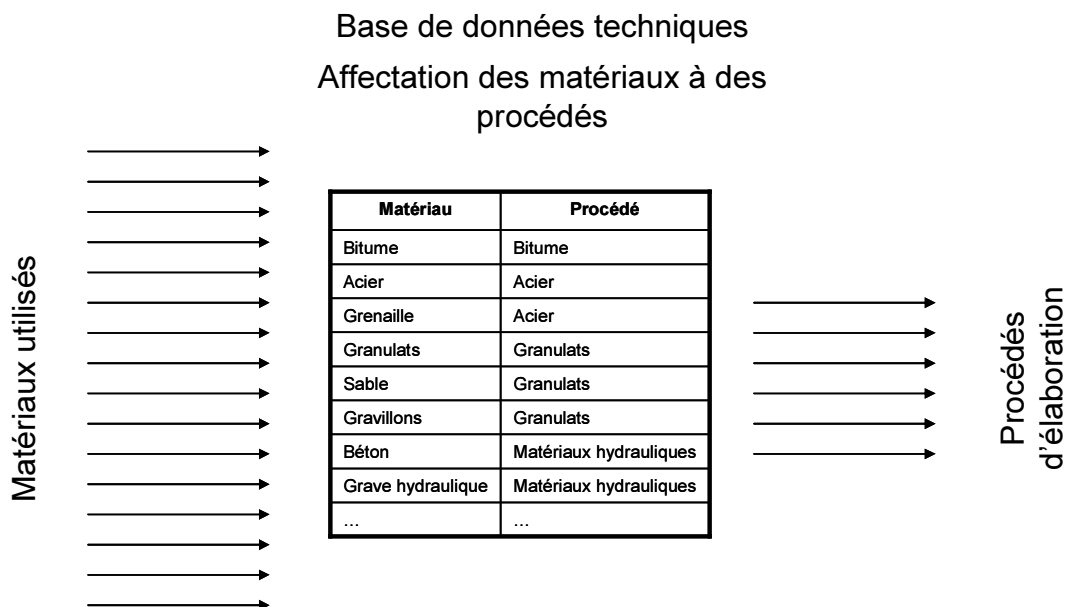


Figure 10 : méthode de calcul des constantes pivots à partir des données utilisateurs

Pour certains procédés, certains flux d'inventaire ne sont pas proportionnels à la constante pivot. C'est le cas de la consommation d'eau pour les engins de chantier, qui n'est pas proportionnelle à la consommation en carburant. Dans ce cas, la valeur est stockée dans un

procédé à part, nommé « eau\_engin ». On retrouve la même approche pour l'eau théorique consommée et calculée à partir de la formulation des matériaux hydrauliques. Elle est stockée dans un procédé nommé « eau\_formulation\_et\_mise\_en\_oeuvre matériaux hydrauliques ».

## 2.2 Cas des procédés de production de matériaux

### 2.2.1 Matériaux bitumineux

Pour les matériaux bitumineux, la composition est demandée en %. Les masses des composants sont calculées à partir du volume de la couche et de sa masse volumique :

$$M_i = V_{couche} \cdot \frac{mv_{enrobé}}{1000} \cdot \frac{C_i}{100} \quad (12)$$

$M_i$  : masse du composant  $i$  (tonnes) ;  $V_{couche}$  : volume de la couche ( $m^3$ ) ;  $mv_{enrobé}$  : masse volumique en place de l'enrobé dans la couche ( $kg/m^3$ ) ;  $C_i$  : teneur du matériau  $i$  dans la formule de l'enrobé (%)

La masse de l'enrobé est calculée comme suit :

$$M_{enrobé} = V_{couche} \cdot \frac{mv_{enrobé}}{1000} \quad (13)$$

Avec :  $M_{enrobé}$  : masse de l'enrobé (tonnes) ;  $V_{couche}$  : volume de la couche ( $m^3$ ) ;  $mv_{enrobé}$  : masse volumique en place de l'enrobé de la couche ( $kg/m^3$ )

### 2.2.2 Matériaux hydrauliques

#### a) cas des matériaux hydrauliques consommés dans la formule

Selon l'utilisation du matériau (béton ou grave hydraulique), le format des unités d'entrées s'adapte au format « métier » des données. Le calcul des masses diffère également.

Pour le béton, la composition est demandée en  $kg/m^3$ , et les masses des composants sont calculées à partir du volume de la couche, puis converties en tonnes :

$$M_i = V_{couche} \cdot \frac{c_i}{1000} \quad (14)$$

Avec :  $M_i$  : masse du composant  $i$  (tonnes) ;  $V_{couche}$  : volume de la couche ( $m^3$ ) ;  $c_i$  : masse du composant  $i$  dans la couche ( $kg/m^3$ )

Pour les graves hydrauliques, la composition est demandée en %. Les masses des composants sont calculées à partir du volume de la couche et de sa masse volumique humide :

$$M_i = V_{couche} \cdot \frac{mv_{gravehydraulique}}{1000} \cdot \frac{C_i}{100} \quad (15)$$

Avec :  $M_i$  : masse du composant  $i$  (tonnes) ;  $V_{couche}$  : volume de la couche ( $m^3$ ) ;  $mv_{gravehydraulique}$  : masse volumique de la grave hydraulique humide en place dans la couche ( $kg/m^3$ ) ;  $C_i$  : teneur du matériau  $i$  dans la formule de la grave hydraulique (%)

La masse d'eau est également calculée à partir de cette formule, bien qu'elle ne corresponde qu'à une quantité d'eau théorique qui ne reflète pas exactement l'eau consommée. Celle-ci est en effet ajustée en fonction de la teneur en eau des granulats.

#### b) cas des matériaux hydrauliques consommés lors de la mise en œuvre

Les matériaux consommés lors de la mise en œuvre sont demandés en  $kg/m^2$ . Leurs masses sont donc calculées à partir de la formule suivante :

$$M_i = S_{couche} \cdot \frac{C_i}{1000} \quad (16)$$

Avec :  $M_i$  : masse du composant  $i$  (tonnes) ;  $S_{couche}$  : surface de la couche ( $m^2$ ) ;  $C_i$  : dosage du matériau  $i$  à la mise en œuvre ( $kg/m^2$ )

Le calcul de la masse de grenaille diffère car l'utilisateur peut définir un pourcentage de grenaille qui est recyclé :

$$M_{grenaille} = S_{couche} \cdot \frac{C_{grenaille}}{1000} \cdot \left(1 - \frac{R_{grenaille}}{100}\right) \quad (17)$$

Avec :  $M_{grenaille}$  : masse de grenaille consommée (tonnes) ;  $S_{couche}$  : surface de la couche ( $m^2$ ) ;  $C_{grenaille}$  : dosage de grenaille à la mise en œuvre ( $kg/m^2$ ) ;  $R_{grenaille}$  : proportion de grenaille recyclée (%)

#### c) cas particulier du ciment

Une masse de clinker est calculée à partir d'un pourcentage de clinker défini par l'utilisateur, entrant dans la composition du liant hydraulique :

$$M_{clinker} = M_{ciment} \cdot \frac{R_{clinker}}{100} \quad (18)$$

Avec :  $M_{clinker}$  : masse de clinker consommée (tonnes) ;  $M_{ciment}$  : masse de liant hydraulique consommée (tonnes) ;  $R_{clinker}$  : proportion de clinker dans le liant hydraulique (%)

Cette masse de clinker est la masse qui sera utilisée pour calculer les flux environnementaux dus à la fabrication du liant hydraulique. En effet, les données utilisées sont limitées à un ciment de type CEM I 52.5 à forte teneur en clinker. Les masses des autres composants présents dans le liant hydraulique ne sont donc pas attribuées à sa fabrication.

### 2.2.3 Enduits bitumineux

Les masses de matériaux consommés pour les enduits bitumineux sont calculées de la façon suivante :

$$M_i = S_{couche} \cdot \frac{d_i}{1000} \quad (19)$$

Avec :  $M_i$  : masse du composant  $i$  (tonnes) ;  $S_{couche}$  : surface de la couche ( $m^2$ ) ;  $d_i$  : dosage du matériau  $i$  à la mise en œuvre ( $kg/m^2$ )

Dans le cas des gravillons, l'unité courante étant volumique, leur masse est calculée à partir de la formule suivante :

$$M_{gravillons} = S_{couche} \cdot \frac{d_{gravillons} \cdot mv_{gravillons}}{1000000} \quad (20)$$

Avec :  $M_{gravillons}$  : masse des gravillons (tonnes) ;  $S_{couche}$  : surface de la couche ( $m^2$ ) ;  $mv_{gravillons}$  : masse volumique foisonnée des gravillons ( $kg/m^3$ ) ;  $d_{gravillons}$  : dosage des gravillons à la mise en œuvre ( $L/m^2$ )

### 2.2.4 Couches d'accrochage

Les masses de matériaux consommés pour les couches d'accrochage sont calculées de la façon suivante :

$$M_i = S_{couche} \cdot \frac{d_i}{1000} \quad (21)$$

Avec :  $M_i$  : masse du composant  $i$  (tonnes) ;  $S_{couche}$  : surface de la couche ( $m^2$ ) ;  $d_i$  : dosage du matériau  $i$  à la mise en œuvre ( $kg/m^2$ )

### 2.2.5 Cas des émulsions

Lorsque le matériau (enrobé, enduit ou couche d'accrochage) contient une émulsion de bitume, la composition de l'émulsion est demandée en %. Les masses des composants de l'émulsion sont calculées à partir de la masse de l'émulsion calculée précédemment :

$$M_j = M_{émulsion} \cdot \frac{C_j}{100} \quad (22)$$

Avec :  $M_j$  : masse du composant  $j$  (tonnes) ;  $M_{émulsion}$  : masse de l'émulsion dans la couche (tonnes) ;  $C_j$  : teneur du matériau  $j$  dans l'émulsion (%)

## 2.2.6 Règles de prise en compte des matériaux alternatifs

Parmi les matériaux alternatifs utilisés dans les matériaux de chaussées, ECORCE ne permet de considérer que le cas de la réutilisation des agrégats d'enrobés. Le choix de ce matériau dans la définition du cas d'étude implique la déclaration du pourcentage utilisé dans la formule de l'enrobé.

L'utilisation d'agrégats d'enrobés permet éventuellement d'économiser des granulats et du bitume. Le calcul de la diminution du pourcentage de ces composants issus de matières premières naturelles est laissé à la charge de l'utilisateur qui déclare la formule.

## 2.3 Cas des engins

ECORCE calcule une consommation (en gasoil et/ou en eau) pour chaque engin à partir des données saisie par l'utilisateur, selon la formule suivante :

$$C_{engin} = c_{unitaire} \cdot \Delta t_{engin} \quad (23)$$

Avec :  $C_{engin}$  : consommation de l'engin (L gasoil) ;  $c_{unitaire}$  : consommation unitaire de l'engin (L gasoil/h) ;  $\Delta t_{engin}$  : durée de fonctionnement de l'engin (h)

L'ensemble des consommations des engins (en gasoil et/ou en eau) est sommée par couche, selon la formule (22).

$$C_{engin}^{couche} = \sum_{i=1}^n C_{engin}^i \quad (24)$$

Avec :  $C_{engin}^i$  : Consommation de l'engin  $i$  (L gasoil ou L d'eau) ;  $C_{engin}^{couche}$  : Consommation des engins de la couche (L gasoil ou L d'eau) ;  $n$  : nombre d'engins saisis pour la couche

La consommation en gasoil des moteurs d'engins est convertie en méga-Joules (MJ) par le biais de la formule (25).

$$C_{engin}^{couche} (MJ) = C_{engin}^{couche} (Lgasoil) \cdot 35,952 \quad (25)$$

Avec :  $C_{engin}^{couche} (MJ)$  : Consommation d'énergie des engins de la couche en MJ ;  $C_{engin}^{couche} (Lgasoil)$  : Consommation d'énergie des engins de la couche en L gasoil ; 35,952 : facteur de conversion du carburant en MJ/L

## 2.4 Cas des transports

Seul le transport routier est inclus dans ECORCE. Le logiciel calcule un nombre de véhicules kilomètres à partir duquel les consommations et les émissions du transport seront calculées.

Pour l'ensemble des matériaux, excepté le béton, le nombre de véhicules kilomètres est calculé de la façon suivante :

$$vkm_{couche} = \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{Cap} \cdot 1,8 \cdot D_i \quad (26)$$

Avec :  $vkm_{couche}$  : nombre d'équivalents kilomètres parcourus pour l'ensemble des matériaux  $i$  (km) ;  $M_i$  : masse du matériau  $i$  transporté (tonnes) ou volume uniquement pour le béton ( $m^3$ ) ;  $Cap$  : capacité de transport du camion ( $Cap = 24$  tonnes sauf béton transporté en camion toupie avec  $Cap = 8 m^3$ ) ;  $D_i$  : distance à parcourir pour le transport du matériau  $i$  (km) ; 1,8 : coefficient d'aller-retour en considérant un retour à vide

Pour le ciment et la grenaille, la masse affectée au procédé est inférieure à la masse utilisée : masse de clinker et masse de grenaille non recyclée (voir 2.2.2). Cependant, pour les transports, c'est la masse totale qui est utilisée : masse de ciment et masse totale de grenaille.

Concernant les transports par camion, la norme (AFNOR 2006) propose un coefficient d'aller-retour égal à 1,7, et demande que soient inclus dans la masse des emballages et des palettes, la masse totale transportée. Etant donné le nombre très divers de produits transportés dans des conditionnements différents, la masse des emballages et palettes n'est pas comptée dans ECORCE. Ceci est compensé en utilisant un coefficient d'aller-retour de 1,8.

# VII Exemples d'applications : études de cas

*Arnaud Feeser, Sarah Goyer, Vincent Coin, Luc Beaudelot, Michel Dauvergne, Hugues Odéon, Lionel Odie, Anne Ventura*

## 1 Etudes de cas classiques du catalogue des structures

### 1.1 Objectifs de l'étude

Cette étude a pour objectif de balayer les résultats environnementaux obtenus avec le logiciel ECORCE pour un ensemble de cas représentatifs de structures couramment rencontrées en France, couvrant une partie de la gamme de matériaux de chaussées du catalogue des structures de 1998 (SETRA/LCPC 1998). Les cas sont ceux correspondant à un trafic TC5<sub>20</sub> sur une portance de 120 MPa (PF3). Cependant, un ajustement structurel a été réalisé afin d'obtenir des durées de vie homogènes. Cet ajustement s'est fait à l'aide du logiciel ALIZE. Les principales hypothèses retenues sont récapitulées dans le Tableau 17.

Type de structure	Bitumineuse épaisse	Semi-rigide	Mixte
Classe de trafic	TC5 sur 20 ans		
Plate Forme	PF3 – 120 MPa		
Nombre de Poids Lourds	Environ 4 millions sur 20 ans		
Croissance arithmétique	2,00%		
Risque	Selon catalogue 1998 (SETRA/LCPC 1998)		
CAM	Selon catalogue 1988 (SETRA/LCPC 1998)		

**Tableau 17. Hypothèses de dimensionnement**

Les données géométriques de la route sont identiques pour les tous cas étudiés, à savoir une longueur de 4 000 mètres et une largeur de 7 mètres.

L'étude est scindée en deux parties. Elle s'intéresse tout d'abord aux couches de surface des chaussées (couche de liaison et couche de roulement) : différents cas de couches de roulement et liaison sont comparés. Dans un second temps, l'étude porte sur différents cas de couches d'assise.



## 1.2 Etude des couches de surface

### 1.2.1 Présentation des cas

Cinq cas de couches de surface sont étudiés indépendamment du reste de la structure. Les principales caractéristiques choisies pour les différents cas étudiés sont indiquées dans le Tableau 41 et le Tableau 42 de l'annexe 1 (page 114). En termes d'acheminement des matériaux et matériels, les hypothèses de distance retenues sont identiques, quelle que soit la technique de couche de surface employée. Les seules variations prises en compte sont inhérentes à la technique d'enrobés et à sa mise en œuvre :

- les épaisseurs de mise en œuvre (voir Tableau 41) ;
- le temps de travail des engins, inhérent à la technique d'enrobés mis en œuvre ;
- les pourcentages des différents constituants entrant dans la composition du mélange ;
- la couche d'accrochage, le cas échéant qui lie les deux couches de surface entre elles (un dosage plus important a été retenu sous les couches de roulement minces – 350 g/m<sup>2</sup> de bitume résiduel contre 250 g/m<sup>2</sup> pour les couches de roulement épaisses).

Les cas des couches de surface ont été choisis pour répondre aux diverses possibilités techniques offertes aux maîtres d'ouvrage :

- les couches de roulement minces, réputées pour limiter les nuisances sonores et les projections d'eau, et améliorer la macrorugosité et le niveau d'adhérence (BBTM et BBDr) et sont mises en œuvre sur une couche de liaison, il s'agit des cas 1 et 2 ;
- dans le cas où les performances des couches de roulement ne sont pas nécessaires, on peut se contenter d'une seule couche de surface épaisse qui assure la fonction mixte de liaison et roulement, ce sont les cas 3 et 4 (à deux épaisseurs différentes).
- par différence entre les cas 1-2 et le cas 4, on dispose d'un ordre de grandeur de la valeur environnementale du BBTM et du BBDr seuls, à prendre en compte dans les solutions de rechargement ou d'entretien léger de l'état de surface d'une chaussée existante ;
- enfin, on a la possibilité de recycler des agrégats d'enrobés dans la couche de surface à hauteur de 10%, il s'agit du cas 5.

### 1.2.2 Analyse des résultats

Les résultats obtenus pour chacune des couches de surface sont détaillés sur les figures de l'annexe 2 (page 125), par indicateur d'impact. On constate globalement une allure identique pour tous les résultats environnementaux :  $2 > 1 > 3 > 4 > 5$  (on rappelle que les distances de transport étant les mêmes dans tous les cas).

Concernant les couches de surface à performances spécifiques (cas 1 et 2), l'ensemble des indicateurs est favorable au cas 1 (BBTM) en raison d'une épaisseur moindre. La différence d'épaisseur inhérente au domaine d'emploi du BBDr (plus 1,5 centimètres de BBDr par rapport au BBTM environ) n'est pas compensée par sa masse volumique apparente plus faible.

Malgré des épaisseurs de couches assez proches pour les cas 1 et 3, cette dernière donne de meilleurs résultats pour tous les indicateurs environnementaux. En effet, la solution 3 est légèrement moins dosée en liant hydrocarboné. Bien que celui-ci ne représente que 5 à 6% en masse dans le mélange final, il est manifestement le facteur ayant le plus de poids sur le bilan environnemental, et ce, quel que soit l'indicateur considéré. De plus, la solution 3 est également légèrement plus performante au niveau environnemental en termes de mise en œuvre et du transport de matériau (distances identiques mais tonnage d'enrobé plus faible).

La comparaison des cas 1-2 et du cas 4, montre que la couche de liaison compte à hauteur de 50% à 60% de la valeur environnementale des couches de surface pour les cas 1 et 2 respectivement.

Une diminution d'épaisseur de 2 centimètres (cas 4 par rapport au 3) entraîne une diminution des valeurs d'indicateurs de 20% environ. Il faut noter que la différenciation entre un BBSG et un BBME n'est prise en compte dans ECORCE uniquement s'il existe une différence de teneur en liant. Les différences qui pourraient exister au niveau de la raffinerie et de la centrale d'enrobage, dues à des grades de bitume différents, ne sont pas prises en compte faute de données environnementales adaptées (voir le chapitre IV Données environnementales page 38).

L'utilisation d'agrégats recyclés (cas 4 et 5) montre des écarts assez faibles. Cependant on constate l'effet de la réduction à la fois des impacts liés au bitume, à l'exploitation des granulats et au transport de matériaux. Il est à noter que pour les cas testés, nous avons considéré que les agrégats réutilisés dans la formule étaient en stock à la centrale d'enrobage. La notion d'agrégats employée dans le logiciel est toutefois légèrement erronée puisqu'il ne permet pas pour le moment de distinguer le fraisat de l'agrégat. Ainsi, le concassage et criblage complémentaires qui permettront de réguler l'homogénéité du matériau ne sont pas pris en compte dans le bilan environnemental. De même, l'humidité du matériau n'a pas été intégrée au calcul environnemental, sa variation pouvant induire des surchauffes en centrale.

## **1.3 Etude des couches d'assise**

### *1.3.1 Présentation des cas étudiés*

Dans cette partie, différents types de structures sont étudiées, en faisant varier les couches d'assises et en gardant une couche de roulement unique (BBSG sur 6 centimètres), comme étant le choix le plus courant. En effet, l'utilisation d'un BBME pourrait conduire à une légère réduction des épaisseurs de la couche d'assise, pour des performances en termes de durée de vie égales. Ce cas étant relativement atypique, il n'a pas été retenu.

Les principales caractéristiques choisies pour les différents cas étudiés sont indiquées dans le Tableau 44 et le Tableau 45 de l'annexe 1 (page 116). En termes d'acheminement des matériaux et matériels, les hypothèses retenues sont identiques, quelle que soit la technique de structure de chaussée employée. Ainsi, aucune distinction n'est faite par exemple sur la distance entre la centrale de fabrication et le chantier, que l'on utilise un matériau hydrocarboné ou un matériau traité au liant hydraulique.

### *1.3.2 Analyse des résultats*

Le détail des résultats obtenus par indicateur d'impact et pour chacun des cas sont présentés sur les figures de l'annexe 2 (page 129). Les éléments généraux que l'on peut constater sont les suivants :

- le bilan énergétique est plus favorable, à distance égale d'approvisionnement, pour les chaussées traitées aux liants hydrauliques, contenant 20% de clinker. Les chaussées mixtes en revanche ont le bilan le plus défavorable, expliqué entre autres par l'épaisseur de matériau hydrocarboné ;
- les émissions de gaz à effet de serre donnent plutôt la tendance inverse, à savoir un bilan plus favorable pour les matériaux hydrocarbonés. Encore une fois, la structure mixte se

- distingue défavorablement, cette fois ci par la présence de matériaux traités aux liants hydrauliques ;
- concernant les indicateurs d'acidification, d'eutrophisation et d'ozone photochimique, les solutions avec 30 % d'agrégats sont trouvées assez favorables car elles influent simultanément sur les trois facteurs les plus influents sur ces indicateurs : l'élaboration du bitume et des granulats et le transport ;
  - concernant la préservation des ressources naturelles, les solutions recyclant les agrégats permettent d'économiser à la fois sur la ressource en bitume et sur la ressource en granulats naturels.

Pour comparer globalement les solutions les unes par rapport aux autres, des graphiques de type radars sont utilisés (Figure 11), où la valeur 100 % est donnée à la valeur environnementale la plus élevée parmi les cas comparés, et où les autres valeurs sont exprimées relativement à cette référence. Il est à noter que, faute d'indicateur ressources naturelles, seule la masse de granulats consommés est représentée (ils représentent à eux seuls environ 95 % des mélanges).

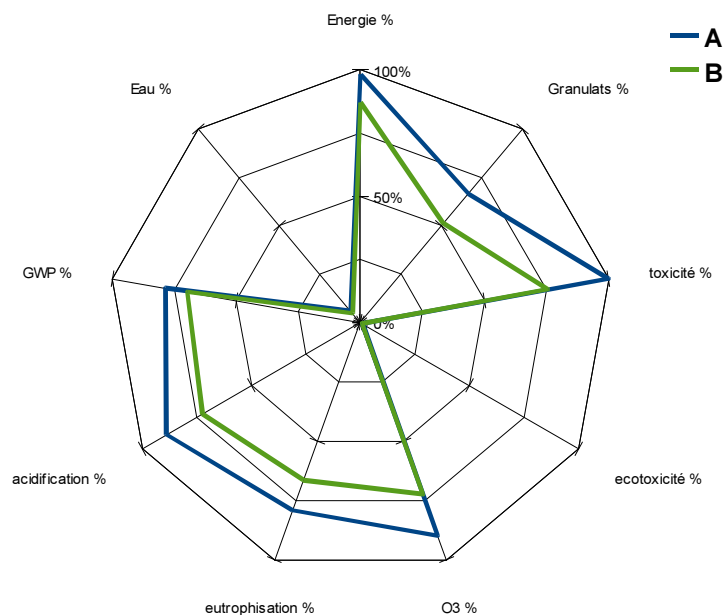
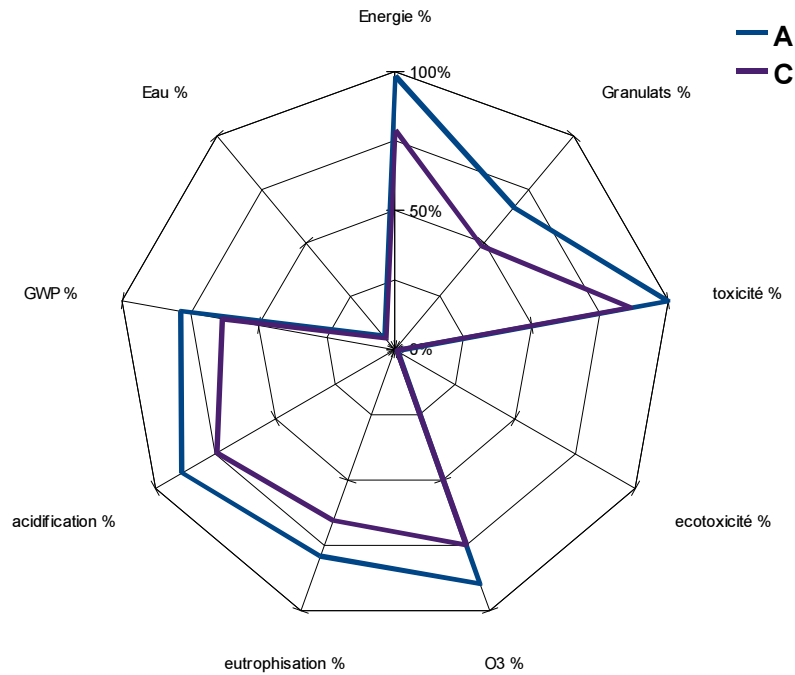


Figure 11. Comparaison entre solutions GB avec agrégats (A) et sans agrégats (B)

Le gain observé est d'autant plus important qu'il joue sur les indicateurs à échelle globale (long terme et enjeu planétaire), à savoir la consommation en énergie, les émissions de gaz à effet de serre et la consommation en ressources naturelles. Le terme « agrégats » employé est toutefois erroné car, comme nous l'avions précédemment cité, il ne s'agit que de fraisats. Leur élaboration ne prend donc pas en compte, dans les bilans environnementaux, les opérations qui lui sont liées (criblage, concassage, ...) et la valeur obtenue est donc légèrement sous-estimée. L'ajout de 30% d'agrégats dans la solution d'EME (solution D comparée à la solution C) permettrait également, et dans la même mesure que pour la comparaison ci dessus, d'économiser environ 10 à 15% de la consommation en énergie et en émission de gaz à effet de serre.

Enfin, comme pour la couche de roulement traitée précédemment, nous avons considéré dans ces études de cas que les agrégats étaient stockés sur le lieu de la centrale d'enrobage. D'éventuels surcoûts environnementaux liés au rabotage de l'ancienne chaussée et au transport jusqu'à la centrale des fraisats serait pris en compte dans ce chantier de déconstruction.



**Figure 12. Comparaison entre solutions GB (A) et EME (C)**

Le diagramme en radar (Figure 12) représentant la structure d'EME ressemble en tout point à celui de la GB. Elle est caractéristique des solutions traitées aux matériaux hydrocarbonés. De plus, le gain environnemental réalisé semble très proche, à en juger par les deux graphiques déjà élaborés, de celui d'une solution de GB avec 30 %. Comme expliqué ci-dessus, l'ajout d'agrégats dans la solution en EME permettrait de réduire une partie des indicateurs, grâce aux économies réalisées. Enfin, il faut rappeler que l'élaboration des EME dans le logiciel ECORCE ne prend pas en compte le surcoût environnemental lié à l'élaboration du bitume, plus dur, en raffinerie, ni même l'élévation de température qu'il occasionne en centrale d'enrobage.

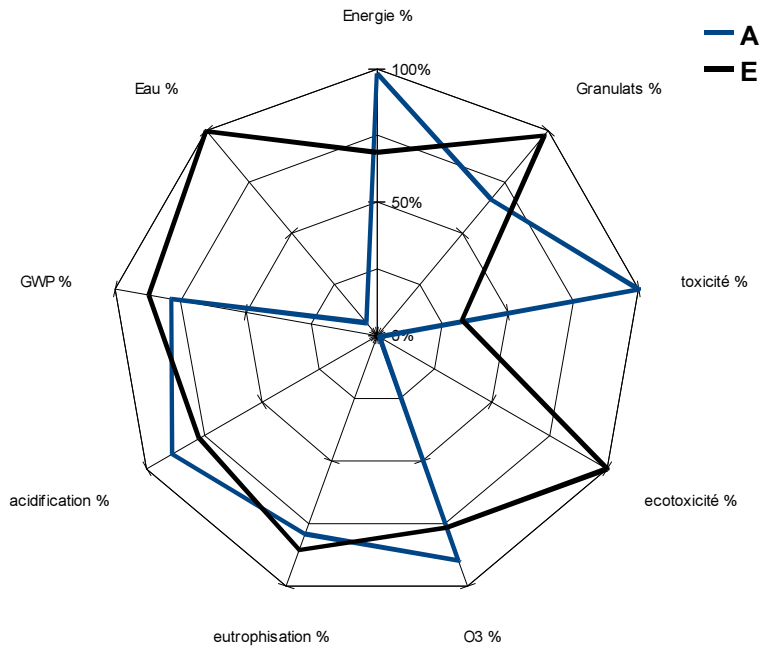


Figure 13. Comparaison entre structures bitumineuse épaisse (A) et semi-rigide (E)

La comparaison de la Figure 13 met en évidence les différences fondamentales qui existent entre les deux types de matériaux. Ressortent notamment les indicateurs de consommation en eau, de préservation de la ressource en granulats et d'écotoxicité en faveur des solutions bitumineuses épaisses (GB – structure A) et ceux de consommation en énergie et de toxicité chronique pour les chaussées semi-rigides (GC – structure E). Le choix de formulation retenu pour cette Grave Ciment est l'adjonction d'un liant hydraulique contenant très peu de clinker (20%). Il est à noter qu'un ciment plus fortement dosé nous donnerait des valeurs bien plus défavorables, à l'image des cas traités dans les études de sensibilité de cet ouvrage.

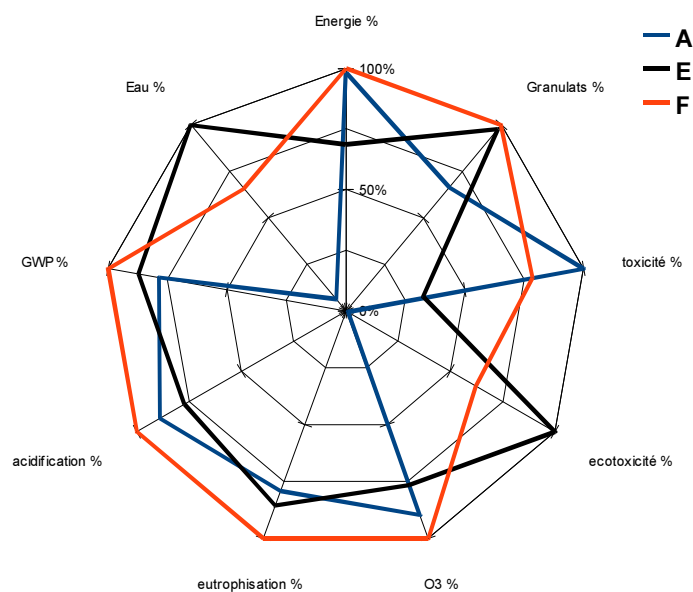


Figure 14. Comparaison entre structures bitumineuse épaisse (A), semi-rigide (E) et mixte (F)

Nous constatons que le graphique lié à la structure mixte GB/GC (Figure 14), plus épaisse finalement dans sa globalité que les deux autres, met en évidence des valeurs de consommation en énergie, d'émission de gaz à effet de serre et de consommation en granulats plutôt défavorables. Cependant, ce résultat doit être mis en perspective de la durée de vie des chaussées ainsi qu'à la totalité des scénarii d'entretien sur leur vie en service, liés aux matériaux structurels choisis (exemples : pontage de fissures, renouvellement de couche de roulement, rechargements, ...).

## **1.4 Conclusions**

La réduction des épaisseurs de couches de surface, à condition toutefois de répondre aux exigences mécaniques de la chaussée et aux exigences de qualité d'usage (adhérence, uni longitudinal, résistance aux cisaillements, ...), est le critère fondamental car il limite l'utilisation du liant hydrocarboné, qui reste a fortiori le critère déterminant.

De plus, l'adjonction d'agrégats dans la couche de roulement, à l'échelle de la structure, n'a finalement que peu d'incidence sur le bilan global. Seule une utilisation systématique et plus massive en couches d'assise (sous réserve que leur qualité soit compatible avec le référentiel technique en vigueur) nous permettra réellement d'apprécier les gains environnementaux.

Les critères de moindre importance correspondent à l'exploitation des granulats et le passage en centrale de fabrication.

Il faut rappeler que pour les différents exemples traités dans cette partie, que les additions au bitume et au ciment ne sont pas pris en compte par ECORCE.

## **2 Etudes comparatives de techniques d'entretien**

### **2.1 Présentation des objectifs**

Cette étude vise à comparer des techniques d'entretien alternatives à des techniques classiques jugées équivalentes.

- Dans le premier cas traité, il s'agit de deux techniques pouvant être utilisées pour résorber des déformations et apporter une étanchéité d'une chaussée à faible trafic. Une grave émulsion de reprofilage est comparée à un retraitement à l'émulsion.
- Dans le second cas, il s'agit de deux techniques pouvant être utilisées pour conforter structurellement une chaussée de trafic moyen.

Dans les deux cas, l'équivalence technique se fait sur la base du guide de retraitement en place à froid, et des classes de trafic proposées. Une étude de dimensionnement n'a pas été réalisée spécifiquement pour ce cas, les épaisseurs mises en œuvre sont donc choisies en fonction du retour d'expérience, et des limites technologiques.

Pour établir ces bilans, les informations issues de chantiers réels ont été utilisées. La géométrie (longueur et largeur) est équivalente pour les cas comparés. Par contre, les épaisseurs modélisées sont celles réellement mises en œuvre ; elles dépendent donc des techniques.

Chaque cas se décline de la même façon : une première partie présente les cas comparés, et une seconde les principaux résultats. Le détail des structures, formules, mise en œuvre et distances de transports est donné dans l'annexe 1 (page 114), tandis que le détail des résultats par technique est présenté en annexe 2 (page 125).

Afin de comparer les techniques, on définit, pour un indicateur I, l'économie permise par le retraitement par rapport à la technique classique, comme la variabilité relative du résultat  $\Delta$  (sans unité) :

$$\Delta = \frac{(I_1 - I_2)}{I_1} \quad (27)$$

Avec :  $I_1$  est la valeur de l'indicateur pour la technique alternative ;  $I_2$  est la valeur de l'indicateur pour la technique classique

## 2.2 Grave émulsion de reprofilage et retraitement à l'émulsion

### 2.2.1 Description des cas étudiés

La grave émulsion de reprofilage correspond à un entretien courant de chaussée à trafic faible à moyen, par reprofilage et imperméabilisation : Grave Emulsion (GE) avec enduit superficiel en couche de roulement. La comparaison est faite avec un retraitement en place à l'émulsion de bitume de classe II, tel que proposé dans le guide de retraitement en place à froid pour les classes de trafic inférieures à T3 : retraitement sur 6 cm + enduit superficiel en couche de roulement.

Afin de modéliser une grave émulsion à partir d'ECORCE, un certain nombre d'hypothèses ont dû être faites. En particulier :

- la fabrication en centrale a été modélisée comme celle d'une grave hydraulique (en remplaçant l'eau et l'émulsion de la formule de GE par de l'eau) ;
- les impacts dus au bitume et à l'émulsion de bitume ont été calculés par le biais d'un enrobé à chaud (en remplaçant les granulats et l'eau de la GE par des granulats).

Enfin, l'étude a été réalisée sur la base d'informations issues de chantiers réels :

- géométrie du chantier,
- nature des liants bitumineux (pourcentage de liant résiduel),
- accrochage de la GE au support,
- dosage moyen de GE ( $50 \text{ kg/m}^2$ ),
- consommation de l'atelier de mise en œuvre,
- distances de transport.

### 2.2.2 Résultats et analyse

Par rapport à la technique classique d'entretien, consistant à reprofiler la chaussée à la grave émulsion (mise en œuvre à la niveleuse) et à l'imperméabiliser par la mise en œuvre d'un enduit bicouche prégravillonné, le retraitement en place à l'émulsion de bitume, suivi d'un enduit bicouche en couche de roulement, permet une économie importante de matériaux (Tableau 18) :

- En granulats neufs (économie de 72%, les 102 tonnes de granulats du « retraitement » constituant l'enduit) cette économie est amplifiée par le choix par l'absence de prégravillonnage...
- En liants hydrocarbonés : la faible teneur en liant résiduel ( $w_L \approx 3\%$ ) de la grave émulsion de recyclage, l'absence de couche d'accrochage et la réalisation d'un enduit non prégravillonné permet une économie de 20% de bitume sur l'ensemble de la structure.

Nom matériau	Consommation		Δ (%) (équation 27)
	Cas 1	Cas 2	
	Reprofilage + enduit	Retraitement + enduit	
GE (fabrication centrale) (tonnes)	258	-	-
Bitume (tonnes)	25	20	20%
Emulsion (tonnes)	36	36	0%
Eau d'apport (m <sup>3</sup> )	17	34	-100%
Granulats neufs (tonnes)	367	102	72%
Dont GE (tonnes)	224	-	
Dont enduit (tonnes)	143	102*	

*\*Enduit non pré-gravillonné*

**Tableau 18. Comparaison de la consommation de matériaux entre GE de reprofilage et retraitement à l'émulsion**

En revanche, la quantité d'eau d'apport du retraitement en place est deux fois plus importante que celle de la formule de grave émulsion fabriquée en centrale (Tableau 19). En effet, l'eau d'apport du retraitement en place a deux rôles : faciliter le fraisage inhérent à la technique de retraitement en place, et apporter l'eau de la formule de Grave Emulsion.

Cas (matériaux)	Consommation d'énergie		Consommation en eau	
	(MJ)	Δ (%)	(m <sup>3</sup> )	Δ (%)
Accrochage	10 279		2	
GE	106 869		48	
Enduit	88 700		16	
<b>Cas 1</b>	205 847	-	66	-
GE	32 886		60	
Enduit	69 114		15	
<b>Cas 2</b>	102 000	50%	75	-13%

**Tableau 19. Comparaison des consommations en énergie et en eau entre GE de reprofilage et retraitement à l'émulsion**

Ces économies de matériaux, ainsi que la réduction des distances de transport des granulats, permettent de réduire l'ensemble des autres indicateurs (émissions de GES, acidification, eutrophisation, émissions d'ozone photochimique, éco-toxicité et toxicité chronique) de 20 à 33% (Tableau 20 et Tableau 21).

Cas	GWP		AP		EI	
	(kg eq. CO <sub>2</sub> )	Δ (%)	(kg eq. SO <sub>2</sub> )	Δ (%)	(kg eq. PO <sub>4</sub> )	Δ (%)
<b>Cas 1</b>	11538	-	43	-	3.0	-
<b>Cas 2</b>	8175	29%	30	30%	2.0	33%

**Tableau 20. Comparaison des indicateurs d'effet de serre, d'acidification et d'eutrophisation entre GE de reprofilage et retraitement à l'émulsion**

Cas	POCP		EP		TP	
	(kg eq. éthylène)	Δ (%)	(kg eq. 1,4DCB)	Δ (%)	(kg eq. 1,4DCB)	Δ (%)
<b>Cas 1</b>	17.7	-	2152	-	122647	-
<b>Cas 2</b>	13.1	26%	1451	33%	98502	20%

**Tableau 21. Comparaison des indicateurs d'ozone photochimique, d'écotoxicité et de toxicité entre GE de reprofilage et retraitement à l'émulsion**



Néanmoins, compte tenu des faibles dosages d'émulsifiants et d'acides utilisés dans la fabrication des émulsions (généralement inférieur à 1% en masse) et du manque de données relatives aux procédés de fabrication, ces constituants n'ont pas été pris en compte dans le présent bilan environnemental.

## 2.3 Retraitement en place au liant hydraulique et rechargement GB

### 2.3.1 Présentation des cas étudiés

Dans le cas des entretiens structurels, on comparera une technique classique d'entretien (rechargement en GB + 6 cm de BBSG en couche de roulement) à un retraitement en place au liant hydraulique de classe IV, tel que proposé dans le guide de retraitement en place à froid pour les classes de trafic T3 et T2 (retraitement 30 cm + 6 cm de BBSG en couche de roulement).

- La solution étudiée est un retraitement en place au liant hydraulique de classe IV, tel que proposé dans le guide de retraitement en place à froid pour les classes de trafic T3 et T2 : retraitement 30 cm + 6 cm de BBSG en couche de roulement.

### 2.3.2 Résultats et analyse

Les quantités de matériaux routiers mis en œuvre dans les cas de technique « classique » ou du retraitement en place sont les suivantes (Tableau 22) :

Cas	Nom du matériau	Quantité
Retraitement	<i>Retraitement (tonnes)</i>	16 524
	<i>Enduit (m<sup>2</sup>)</i>	27 000
	<i>Accrochage (m<sup>2</sup>)</i>	47 031
	<i>BBSG (tonnes)</i>	8 419
	<i>GNT (tonnes)</i>	2 450
Enrobé	<i>Accrochage (m<sup>2</sup>)</i>	77 889
	<i>GB (tonnes)</i>	5 184
	<i>BBSG (tonnes)</i>	9 924
	<i>GNT (tonnes)</i>	4 710

**Tableau 22. Quantités de matériaux utilisées**

Par rapport à la technique classique de réhabilitation, consistant à recharger la chaussée afin d'améliorer ses caractéristiques structurelles, le retraitement en place permet une économie importante de matériaux naturels. En effet, la couche de matériau hydraulique contient uniquement des granulats recyclés (enrobés et GNT de l'ancienne chaussée). De plus, le retraitement en place permet de ne pas surélever la chaussée existante, et donc de limiter la hauteur des accotements. Enfin, le retraitement en place permet également une économie de bitume de plus de 150 %. Cependant, cette technique nécessite du ciment (ou un liant hydraulique routier) (Tableau 23).

Nom matériau	Consommation		Δ (%) (équation 27)
	Rechargement GB	Retraitement LH	
Bitume (tonnes)	730	285	156%
Ciment (tonnes)	-	574	-
Emulsion (tonnes)	31	39	-21%
Eau (formule) (m <sup>3</sup> )	141	850	-83%
Granulats (tonnes)	15 306	5 997	155%

**Tableau 23. Comparaison de la consommation de matériaux entre rechargement GB et retraitement en place au liant hydraulique**

La technique au liant hydraulique consomme beaucoup d'eau (Tableau 24), pour le fraisage, et la mise en œuvre de la grave hydraulique de recyclage. La consommation d'énergie est du même ordre de grandeur pour les deux techniques. Par contre, les émissions de gaz à effets de serre sont deux fois plus importantes pour le retraitement en place.

Cas (matériaux)	Consommation d'énergie		Consommation en eau	
	(MJ)	Δ (%)	(m <sup>3</sup> )	Δ (%)
GB 0/14	2 894 617		62	
BBSG 0/10	5 195 707		117	
Accrochage	123 832		39	
GNT accotements	229 584		266	
<b>Enrobé</b>	<b>8 443 740</b>	<b>-</b>	<b>484</b>	<b>-</b>
Retraitement	5 643 238		2 076	
Enduit de cure	132 343		25	
Accrochage	76 515		18	
BBSG 0/10	2 829 405		81	
GNT accotements	121 762		139	
<b>Retraitement</b>	<b>8 772 545</b>	<b>-4%</b>	<b>2 339</b>	<b>-383%</b>

**Tableau 24. Comparaison des consommations en énergie et en eau entre rechargement GB et retraitement en place au liant hydraulique**

L'impact sur l'acidification ou l'eutrophisation est faible (Tableau 25), mais les émissions d'ozone photochimique sont supérieures d'un tiers, et l'éco-toxicité est 272 fois supérieure pour le retraitement (Tableau 26) par rapport à un rechargement en grave bitume. En revanche la toxicité chronique est divisée par 2 lors de l'emploi de ciment par rapport au bitume (Tableau 26).

Malgré la forte économie de matériaux naturels, le bilan environnemental du retraitement en place au liant hydraulique est défavorable sur la base des GES (Tableau 25), par rapport à la solution d'entretien classique, ce qui s'explique par le très fort taux de clinker présent dans le liant utilisé pour le chantier suivi. Le calcul réalisé pour un retraitement en place à base de liant hydraulique routier (LHR) aboutirait sans doute à des résultats plus favorables, avec un taux de clinker de l'ordre de 20%, et de la chaux.

Cas	GWP		AP		EI	
	(kg eq. CO <sub>2</sub> )	Δ (%)	(kg eq. SO <sub>2</sub> )	Δ (%)	(kg eq. PO <sub>4</sub> )	Δ (%)
Enrobés	401 400	-	1 150	-	73	-
Retraitement	785 436	<b>-96%</b>	1 127	<b>2%</b>	85	<b>-16%</b>

**Tableau 25. Comparaison des indicateurs d'effet de serre, d'acidification et d'eutrophisation entre rechargement GB et retraitement en place au liant hydraulique**

Cas	POCP		EP		TP	
	(kg eq. éthylène)	$\Delta$ (%)	(kg eq. 1,4DCB)	$\Delta$ (%)	(kg eq. 1,4DCB)	$\Delta$ (%)
Enrobés	557	-	71 770	-	3 679 249	-
Retraitement	763	-37%	19 506 991	-27 080%	1 487 483	60%

**Tableau 26. Comparaison des indicateurs d'ozone photochimique, d'écotoxicité et de toxicité chronique entre Rechargement GB et retraitement en place au liant hydraulique**

En raison du manque de recul sur ces techniques alternatives, cette discussion se fait uniquement sur la base du bilan environnemental, sans préjuger du comportement technique et de la durée de vie des techniques respectives.

Il convient de signaler que compte tenu du manque de données relatives aux procédés de fabrication, les contributions environnementales des constituants (émulsifiants et acides) utilisés dans la fabrication des émulsions, ne sont pas prises en compte dans ECORCE. Même si leurs dosages sont faibles (généralement inférieur à 1% en masse), cela ne permet pas d'amenuiser l'importance de leur impact potentiel sur l'environnement.

### **3 Etude paramétrique d'une grave traitée aux liants hydrauliques**

#### **3.1 Objectifs de l'étude**

L'étude de cas consiste à évaluer l'impact environnemental de la variation de la teneur en liant d'une grave traitée aux liants hydrauliques routiers sur deux types de structures intégrant des couches de matériaux traités aux liants hydrauliques (mixte et semi-rigide), avec un liant au ciment présentant lui-même des teneurs en clinker différentes. Les différents résultats obtenus sont comparés à ceux d'une structure bitumineuse à chaud, classique. Les structures sont issues du catalogue 98 pour un TC5 30 -PF3 (SETRA/LCPC, 1998).

L'étude comprend plusieurs parties : une première présente les cas comparés, et une seconde les principaux résultats. Le détail des structures, formules, mise en œuvre et distances de transports est détaillé dans l'annexe 1 (page 114), tandis que le détail des résultats par technique est présenté en annexe 2 (page 125).

#### **3.2 Résultats et analyse**

Afin de comparer les deux types de structures (mixte et semi-rigide), on définit, pour chaque teneur en clinker, le seuil d'équivalence  $S_e$  comme étant la valeur du taux de liant telle que l'indicateur de la structure classique (souple) est égal à celui de la structure alternative.

La valeur de  $S_e$  (Tableau 27) représente le taux de liant à ne pas dépasser pour avoir une structure mixte ou semi-rigide plus performante que la structure souple, pour un indicateur environnemental donné. Il est donc logique que ce seuil soit plus bas pour les liants à fort taux de clinker.

La valeur minimale de teneur en liants utilisée dans les formulations étant généralement de 3%, différentes couleurs ont été représentées dans le tableau :

- en rose : le seuil est trop faible pour atteindre des performances identiques à la structure souple de référence ;

- en orange : le seuil est très proche des 3%, les performances peuvent être considérées identiques à la structure de référence compte-tenu des marges d'erreurs ;
- en vert : le seuil est largement supérieur à 3% et assure une meilleure performance que la structure souple de référence.

Structure		Structure mixte			Structure semi-rigide		
Taux de clinker		21%	35%	75%	21%	35%	75%
Seuil d'équivalence $S_e$	Consommation d'énergie	>7	6,1	2,7	>7	>7	5
	Consommation d'eau	na	na	na	na	na	na
	GWP	3,3	2	0,9	6,4	3,9	1,8
	AP	5,4	3,2	1,5	>7	>7	4,8
	EI	0,1	0,1	0,1	>7	5,6	2,7
	POCP	6,0	3,5	1,8	>7	5,9	3,1
	EP	0,6	0,4	0,2	0,5	0,3	0,1
	TP	>>7	>>7	>>7	>>7	>>7	>>7

**Tableau 27. Point d'équivalence en fonction du taux de clinker par indicateur des structures mixte et semi-rigide à la structure souple**  
na : non atteint

Globalement la structure semi-rigide obtient plus souvent de meilleures performances que la structure mixte, par rapport à la structure souple choisie comme référence.

Les indicateurs qui ne sont jamais améliorés sont la consommation d'eau et le potentiel écotoxique, tandis que les indicateurs toujours améliorés sont le potentiel toxique et la consommation d'énergie (sauf taux de clinker à 75% pour la structure mixte).

Cette étude met en évidence l'influence significative de la variation de la teneur en liant hydraulique routier d'une formule et du taux de clinker compris dans ce liant, dans une structure intégrant une couche de matériaux traités aux liants hydrauliques.

En outre, elle démontre également le fait que sur un plan environnemental, la structure mixte n'est pas un compromis entre la structure semi-rigide et la structure bitumineuse ; sous réserve que la durée de vie de la chaussée dimensionnée soit comparable.

Il faut rappeler les limites de cette approche que sont :

- l'hétérogénéité des données environnementales disponibles :
  - elles font que les indicateurs de toxicité sont toujours élevés pour les matériaux contenant du bitume, et ceux d'écotoxicité toujours élevés pour les matériaux contenant du ciment ;
  - elles font que les procédés de fabrication de l'énergie ne sont pas toujours retranchés des données d'inventaire disponibles.
- le choix des valeurs de la structure prise comme référence, notamment les valeurs de distances de transports qui sont dépendantes de conditions locales. Celles utilisées pour cette étude (voir annexe 1 page 121) sont volontairement sur des distances courtes concernant les liants hydrauliques, car le taux dans la formule dépend généralement des disponibilités locales (matériaux et type de liants). De ce fait, bien que la méthode proposée du seuil d'équivalence  $S_e$  soit généralisable, il n'en est pas de même concernant les valeurs obtenues qui restent des ordres de grandeurs, et il conviendrait de réappliquer cette méthode en fonction des conditions et usages locaux.

## 4 Conclusions sur les études de cas

Les études de cas présentées sont en lien avec des problématiques rencontrées par les maîtres d'œuvre et/ou maîtres d'ouvrage en termes d'impacts potentiels sur l'environnement des différents choix de structures qu'ils peuvent être amenés à faire.

Les questions posées par ces études sont différentes, et amènent des façons différentes de présenter et traiter leurs résultats. On peut constater qu'ECORCE permet de traiter dans leur diversité, les techniques les plus classiques, mais pas encore complètement les innovations (enrobés tièdes, matériaux recyclés, additifs...). ECORCE permet également de structurer la présentation des hypothèses de manière homogène.

Cependant, il convient de rappeler que les résultats présentés permettent de fournir des ordres de grandeurs et des tendances, mais qu'ils sont susceptibles de différer à l'avenir de ce qu'ils sont actuellement et ceci pour plusieurs raisons.

- En premier lieu, les connaissances sur les consommations et les émissions spécifiques à chaque procédé de production, sont en constante évolution. Les résultats sont inféodés à un numéro de version d'une base de données. En effet, la pertinence et la complétude des données publiées à des fins d'utilisations dans les ACV sont très différentes d'une source à l'autre (voir la partie IV Données environnementales page 38). La base de données d'ECORCE n'est donc pas figée. Les résultats présentés dans cet ouvrage ont été calculés à partir d'une version datée de janvier 2010. Cette base a déjà fait l'objet d'une revue critique, mais doit subir plusieurs étapes de vérification, et doit, à plus long terme, changer de numéro de version en intégrant les évolutions de connaissances. Plusieurs mises à jour ont été effectuées depuis cette version, concernant notamment des erreurs d'attribution de données, notamment des émissions en NOx non comptabilisées dans le procédé aciérie. En décembre 2010, date de l'édition, un changement important a également été effectué, suite à une erreur sur la valeur de consommation d'énergie procédé de la centrale d'enrobage (Tableau 16), qui est maintenant corrigée à 165 MJ/tonne. Les résultats présentés surestiment donc la consommation d'énergie pour le procédé centrale d'enrobage.
- D'autre part, même en utilisant une base de données identique, un certain nombre de paramètres utilisés dans ces différentes études de cas, est dépendant de conditions locales, notamment les distances d'acheminement des matériaux et des matériels, ainsi que le parc d'engins disponible.

Dans ce contexte, il apparaît intéressant de mieux connaître la manière dont chacun des paramètres peut avoir un effet sur l'ensemble des cas traités par indicateur. C'est l'objet de la partie suivante : VIII Etude de sensibilité.

# VIII Etude de sensibilité

*Anne Ventura, Michel Dauvergne, Arnaud Feeser, Sarah Goyer, Vincent Coin, Luc Beaudelot, Hugues Odéon, Lionel Odie*

## **1 Introduction**

Comme il a été souligné dans le chapitre concernant les études de cas (page 71), les résultats obtenus et présentés sont dépendants d'un grand nombre de paramètres. De plus, ils sont tributaires de données environnementales évolutives, la base de données d'ECORCE n'étant pas encore stabilisée au moment de la rédaction de l'ouvrage. Ils sont difficilement généralisables. Lorsqu'un utilisateur d'ECORCE traite un cas, il est donc confronté à de multiples choix.

L'objet de cette partie est de fournir à l'utilisateur des éléments sur l'effet des variations de chacun des paramètres saisis dans ECORCE, et ce, sur chaque résultat d'indicateurs environnementaux. Parmi la diversité des solutions possibles, l'utilisateur peut ainsi repérer, pour un indicateur donné, quels sont les paramètres les plus influents, qui permettront une amélioration significative.

Il s'agit donc de faire ressortir les contributions propres à chaque paramètre.

La démarche adoptée est donc de les faire varier un par un, indépendamment des relations qu'ils peuvent avoir entre eux. Elle est donc déconnectée d'une approche technique (dimensionnement de chaussée, formules, caractéristiques géométriques et de mise en œuvre), bien que les valeurs de références et de variations soient fixés dans le cadre de valeurs courantes pour chaque type de couche étudié. Néanmoins, l'effet de chacun des paramètres est calculé de façon à être indépendant des valeurs de référence et de variation choisies.

Cette étude de sensibilité présente tout d'abord la méthode de calcul de l'effet d'un paramètre, puis présente les valeurs de références et de variations utilisées, pour enfin donner un résultat synthétique de la sensibilité des résultats donnés par ECORCE.

## **2 Méthodologie adoptée pour l'étude de sensibilité**

La démarche adoptée est la suivante : pour chaque famille de matériaux (enrobés hydrocarbonés, matériaux traités aux liants hydrauliques, matériaux non traités, bétons et enduits), un cas de référence est défini, puis on étudie une variante de ce cas de référence en faisant varier la valeur d'un seul paramètre dans une plage déterminée. A partir de ces deux cas (référence et variante) on calcule l'effet relatif de ce paramètre.

## 2.1 Calcul de l'effet relatif d'un paramètre

Soit un paramètre  $i$  dont on veut étudier l'effet. On définit  $v_i$  comme étant la variabilité relative de ce paramètre  $i$  (sans unité).

$$v_i = \frac{(i_{\text{var}} - i_{\text{réf}})}{i_{\text{réf}}} \quad (28)$$

Avec :  $v_i$  est la variabilité relative du paramètre  $i$  observé (sans unité),  $i_{\text{réf}}$  la valeur choisie comme référence pour le paramètre  $i$  observé (dans l'unité spécifique au paramètre observé), et  $i_{\text{var}}$  la valeur choisie comme variante pour le paramètre  $i$  observé (dans l'unité spécifique au paramètre observé).

L'influence de la variation  $v_i$  sur les résultats environnementaux est calculée comme suit :

$$r_i = \frac{(r_{\text{var}} - r_{\text{réf}})}{r_{\text{réf}}} \quad (29)$$

Avec :  $r_i$  est la variabilité relative du résultat lié à la variation du paramètre  $i$  observé (sans unité),  $r_{\text{réf}}$  est le résultat obtenu pour le cas de référence (dans l'unité spécifique au résultat observé), et  $r_{\text{var}}$  est le résultat obtenu pour la variante lié à la variation du paramètre  $i$  observé (dans l'unité spécifique au résultat observé).

On définit  $E_i$  l'effet relatif de la variation d'un paramètre sur un résultat environnemental tel que :

$$E_i = \frac{r_i}{v_i} \quad (30)$$

L'intérêt de la grandeur  $E_i$  est qu'elle est indépendante des valeurs de référence et de variantes choisies.

## 2.2 Description des cas de référence

Certains paramètres sont spécifiques d'un matériau donné, tandis que d'autres sont des paramètres généraux (voir Tableau 28). Il est donc nécessaire de définir plusieurs cas de référence afin de balayer l'ensemble des paramètres. Chaque cas de référence consiste en une seule couche de chaussée.

Les différents cas de référence sont : enrobés, grave émulsion, enduit, grave hydraulique, et béton armé continu. L'ensemble des valeurs de référence et de variations utilisées pour chaque cas est précisé dans les Annexes (page 144).

Paramètre			Onglet définition du cas d'étude	Onglets formulations					Onglet Engins (déconstruction ou mise en œuvre)
Nom	Unité	Symbole		Mat. bitumineux	Accrochage	Enduit bitumineux	Emulsions	Mat. hydrauliques et cons.	
Longueur	m	L							
Epaisseur	cm	e							
Largeur	m	l							
Distance centrale-chantier	km	d <sub>m</sub>							
Distance matériel-chantier	km	d <sub>e</sub>							
Distance matériau*-centrale	km	d <sub>g</sub>							
Distance matériau*-chantier	km	d <sub>i</sub>							
Masse volumique en place	kg/m <sup>3</sup>	mva							
Teneur/dosage en liant	selon matériau	T <sub>i</sub>	%	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>		
Teneur en agrégats	selon matériau	T <sub>a</sub>	%		L/m <sup>2</sup>		kg/m <sup>3</sup>		
Teneur en bitume émulsion	%	T <sub>b</sub>							
Teneur en clinker	%	T <sub>c</sub>							
Consommation grenaille	kg/m <sup>2</sup>	C <sub>g</sub>							
Consommation acier	kg/m <sup>2</sup>	C <sub>a</sub>							
Consommation d'un engin	Lgasoil/h	C <sub>e</sub>							
Durée totale chantier	h	D <sub>c</sub>							

**Tableau 28. Paramètre à observer pour l'étude de sensibilité et onglets de saisie concernés dans ECORCE**  
\*matériaux : liants, granulats, consommables

### 3 Résultats

Les résultats de calcul de l'effet relatif par indicateur sont présentés dans le Tableau 29.

On constate que quel que soit le matériau considéré, la variation des paramètres géométriques de la couche se répercute presque entièrement (entre 82% et 106%) sur l'ensemble des indicateurs.

Par contre, la variation des distances se répercute assez faiblement (de 0% à 15%) quel que soit l'indicateur considéré. Les répercussions les plus importantes sont obtenues pour le transport des granulats et du matériau à mettre en œuvre : ces matériaux représentent les masses les plus importantes, bien que le kilométrage soit généralement faible.

La masse volumique est également un paramètre sensible puisque sa variation se répercute entre 86% et 100% selon les indicateurs.

L'effet de la variation de la teneur en liant a des répercussions variables selon le type de liant et les indicateurs. Pour les liants hydrocarbonés (émulsion accrochage, grave émulsion, GB 0/14 EB 14 assise), on constate une répercussion moyenne (entre 32% et 62%) pour les indicateurs énergie, GWP, EI et AP. La répercussion est assez forte (entre 57% et 67%) pour les indicateurs POCP et EP. Enfin, elle est très forte pour l'indicateur TP (98% à 100%). Ces résultats se retrouvent dans la ligne du tableau concernant la teneur en bitume de l'émulsion.

Pour les liant hydrauliques (matériau traité LH), on constate une répercussion moyenne de la variation de la teneur en liant (de 20% à 48%) pour les indicateurs énergie, EI et AP, et une forte pour les autres indicateurs : GWP, POCP, TP, EP. Ce résultat est à rapprocher avec celui concernant l'effet de la variation du taux de clinker (plus bas dans le tableau).



Paramètre	Unité	Ei (%)							
		énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP	
Longueur	Béton	m	100%	100%	98%	100%	101%	100%	100%
	Grave émulsion	m	88%	84%	82%	87%	83%	100%	100%
	GB 0/14 – EB 14 assise	m	99%	99%	101%	98%	100%	100%	100%
Largeur		m	98%	96%	96%	96%	106%	100%	100%
Distance centrale-chantier		km	3%	5%	9%	5%	3%	0%	0%
Distance carrière-centrale		km	6%	10%	15%	10%	5%	0%	0%
Distance liant-centrale		km	1%	2%	3%	2%	1%	0%	0%
Distance acheminement		km	1%	1%	2%	1%	0%	0%	0%
Masse volumique en place		kg/m <sup>3</sup>	98%	96%	86%	94%	97%	100%	100%
Teneur/dosage en liant	Matériau Traité LH	%	48%	61%	20%	30%	56%	92%	100%
	Emulsion accrochage	kg/m <sup>2</sup>	53%	44%	32%	50%	60%	100%	57%
	Grave émulsion	%	53%	44%	32%	50%	60%	100%	57%
	GB 0/14 – EB 14 assise*	%	42%	40%	46%	62%	67%	98%	67%
Teneur en agrégats**		%	-5%	-5%	-8%	-8%	-9%	-11%	-11%
Teneur en bitume émulsion		%	50%	40%	31%	45%	70%	99%	58%
Teneur en clinker		%	45%	59%	20%	25%	52%	92%	100%
Taux de grenaille recyclée		kg/m <sup>2</sup>	-9%	-5%	-8%	-9%	-5%	-59%	-1%
Consommation acier		kg/m <sup>2</sup>	4%	7%	10%	14%	6%	84%	1%
Durée totale chantier		h	2%	3%	9%	2%	1%	0%	0%

**Tableau 29. Résultats des effets relatifs de la variation de chaque paramètre pour les différents indicateurs**  
Orange : Ei > 55%, jaune : 0 % < Ei ≤ 55% ; vert : Ei ≤ 0%

La variation de la teneur en agrégats a une répercussion décroissante sur les indicateurs qui va de -5% à -11%.

De même, pour la variation du taux de grenaille recyclé, dont la variabilité se répercute à -59% pour l'indicateur TP, et de -1% à -9% pour les autres indicateurs. Cette sensibilité de l'indicateur TP au matériau acier se retrouve sur la consommation d'acier avec une répercussion de 84% sur l'indicateur TP et de 1% à 14% pour les autres indicateurs.

Enfin, la variabilité liée au chantier est faiblement répercutée : de 0% à 9% selon les indicateurs.

## 4 Conclusions

L'étude de sensibilité met en évidence les paramètres sur lesquels le concepteur de la chaussée peut jouer pour améliorer ses performances environnementales, pour un indicateur donné.

La diminution des paramètres géométriques (épaisseur, longueur, largeur) est incontestablement un paramètre très sensible quel que soit l'indicateur considéré.

Il en est de même pour la masse volumique : un matériau moins dense (essentiellement des granulats moins denses) améliorera les performances de l'ensemble des indicateurs.

Les distances, et la durée du chantier sont assez peu sensibles. Cependant, il ne faut pas oublier qu'en valeur absolue, les transports ont généralement un poids important dans les résultats, et qu'une faible amélioration relative peut s'avérer conséquente en valeur absolue. Concernant la durée du chantier, il faut rappeler que l'évaluation d'ECORCE ne prend pas en compte les effets de ralentissement du trafic.

On peut retenir également que les variations des quantités de bitume jouent essentiellement sur les indicateurs EP, TP et POCP, tandis que les variations des quantités de clinker jouent essentiellement sur les indicateurs GWP, EP, TP et POCP.

Enfin, l'augmentation des taux de recyclage améliore les performances environnementales sur l'ensemble des indicateurs, mais de façon assez peu sensible, excepté pour l'indicateur TP pour la grenaille. En effet, c'est l'indicateur sensible concernant la production d'acier.

# IX ECORCE et les autres outils ACV

Anne Ventura, Michel Dauvergne

## 1 Les outils génériques de l'ACV

Cette partie permet de comparer les outils non dédiés aux routes, notamment deux des outils génériques les plus utilisés : Simapro, Gabi, ainsi que l'outil Bilan Carbone. Ce dernier n'est pas un outil ACV à proprement parlé, puisqu'il ne permet que le calcul d'un indicateur relatif à l'effet de serre. Cependant, il est très utilisé en France pour des applications très variées, et sert donc de référence pour cet impact environnemental.

	<b>Gabi</b>	<b>SimaPro</b>	<b>Bilan Carbone</b>
<b>Date de sortie</b>	1990	1990	
<b>Modalités de diffusion</b>	Payant	Payant	Payant
<b>Support logiciel</b>	Format propriétaire	Format propriétaire	Microsoft Excel®
<b>Fonctionnement général</b>	Un à plusieurs projets	Un seul projet	Un seul projet
<b>Bases de données</b>	Choix parmi une liste préexistante, une seule base par projet, analyse de la pertinence de la base par rapport au produit étudié Possibilité de créer sa propre base	Choix parmi une liste préexistante, plusieurs bases par projet, analyse de la pertinence de la base par rapport au produit étudié Possibilité de créer sa propre base	Définie par l'outil : base INIES, publications professionnelles (Eurobitume, IVL, Colas, Athena), ADEME, observatoire de l'énergie...
<b>Système environnemental</b>	Défini par l'utilisateur schématiquement par assemblage de « boîtes » reliées à une base de données et définition des flux intermédiaires entre les « boîtes »	Défini par l'utilisateur en niveaux de procédés par rapport au produit étudié avec son unité de référence Extension de système possible pour quantifier les impacts évités	Défini par l'outil, avec possibilité de dissocier la partie amont (fabrication) de la partie aval (utilisation, vie en service, fin de vie) du produit.
<b>Unité fonctionnelle</b>	Définie par l'utilisateur, la cohérence des flux intermédiaires est contrôlée par le logiciel	Définie par l'utilisateur qui fait ses propres calculs de flux intermédiaires en fonction de son unité de référence, pas de vérification	Définie par l'utilisateur qui fait ses propres calculs de flux intermédiaires en fonction de son unité de référence, pas de vérification
<b>Inventaire des flux</b>	Oui	Oui, détaillé par procédé	Non
<b>Indicateurs</b>	11 méthodes différentes de calculs d'indicateurs	32 méthodes de différentes de calculs d'indicateurs	GWP
<b>Graphiques</b>		Histogramme de contribution des procédés ou de sous-systèmes, tous les indicateurs sur le même graphe exprimés en %	Histogrammes et secteurs avec détail des contributions par grande étape du cycle de vie et par éléments déclarés par l'utilisateur
		Histogramme de contribution des procédés pour chaque indicateur en valeurs normées par rapport à un référentiel prédéfini (choix dans une liste)	
		Possibilité d'un indicateur unique	

Tableau 30. Types d'entrées et de sorties des outils génériques (nc : non communiqué)

Cette comparaison rapide des fonctionnalités offertes montre que les ouvrages et infrastructures du génie civil ne sont pas faciles à appréhender avec de tels outils, où les masses servent de référence, tandis que la géométrie est souvent le paramètre d'entrée des concepteurs d'ouvrage. Ces outils sont donc réservés à des spécialistes de l'ACV et difficilement accessibles à des utilisateurs non experts.

## 2 Les outils dédiés à l'évaluation des routes

Plusieurs outils utilisant l'ACV comme méthodes d'évaluation environnementale existent. Cette partie consiste à fournir une base de comparaison commune à ces différents outils. La comparaison est effectuée sur les fonctionnalités des six logiciels (ECORCE inclus), à partir des documents mis à disposition du LCPC ou du domaine public (internet). Ainsi, certains éléments ne sont pas tous renseignés, selon la précision des informations disponibles. D'autres logiciels peuvent également exister de façon « confidentielle » (sans document publié) et ne sont donc pas inclus dans cette comparaison.

Hormis ECORCE, les logiciels comparés sont les suivants :

- PaLATE (Pavement Life Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects) développé par le Consortium on Green Design and Manufacturing, Université de Californie (Horvath et al. 2004).
- DSMRP (Decision Support Model for Road Pavements) développé par la CROW technology platform au Pays-Bas (van Leest et al. 2008)
- Gaïa développé par l'entreprise Eurovia en France
- CHANGER (Calculator for Harmonised Assessment and Normalisation of Greenhouse gas Emissions for Roads) développé par l'International Road Federation en Suisse (IRF 2010a et b)
- Écocalcateur anglais (pas de nom) développé par l'Université de Newcastle (Huang et al. 2009).

### 2.1 Eléments généraux

Comme on peut le voir dans le Tableau 31, deux outils sont sortis en 2004, les autres entre 2008 et 2009. Les modalités de diffusion sont très variables. Trois logiciels sont basés sur Microsoft Excel® et trois sont développés dans un langage de programmation.

	PaLATE	DSMRP	Gaïa	ECORCE 1	CHANGER	Ecocalcateur anglais
<b>Date de sortie</b>	2004	2004	2008	2009	2009	2009
<b>Modalités de diffusion</b>	Gratuit, sur demande	Payant, en néerlandais uniquement	Privé, non diffusé	Gratuit, diffusion limitée	Payant	nc
<b>Support logiciel</b>	Microsoft Excel®	Microsoft Excel®	nc	Java	nc	Microsoft Excel®

**Tableau 31. Eléments généraux concernant les différents outils**  
(nc : non communiqué)

## 2.2 Entrées / sorties logiciels

Le Tableau 32 détaille le type d'entrées nécessaires et de sorties fournies par les différents logiciels. Tous disposent d'une entrée paramétrée de la construction d'une chaussée, bien que les détails ne soient pas toujours fournis. Dans certains cas, il est possible de définir des scénarii d'entretien pour une structure de départ. Tous les outils permettent de saisir des formulations de matériaux routiers, certains disposent de catalogues de formules préétablis. Excepté DSMRP, tous les outils proposent un paramétrage de la mise en œuvre, mais ECORCE est le seul permettant de définir des consommations spécifiques à cette partie.

En termes de sorties, tous les outils proposent des graphiques, dont le détail n'est pas toujours communiqué.

	PaLATE	DSMRP	Gaïa	ECORCE 1	CHANGER	Ecocalculateur anglais
<b>Entrées</b>						
<b>Construction</b>	Paramétrable					
	géométrie par couche	épaisseur des couches (profils nc)	nc géométrie, formules préentrées, modifiables	géométrie par couche et familles de matériaux	nc	géométrie, formules préentrées, modifiables
<b>Entretien structurel</b>	Paramétrable : géométrie par couche	nc	Non	Paramétrable : géométrie par couche et familles de matériaux	nc	Paramétrable : géométrie, modifiables
<b>Formulations</b>	Paramétrable	Formules présaisies, paramétrable nc	Paramétrable	Paramétrable	Paramétrable	Paramétrable formules présaisies
<b>Consommables à la mise en œuvre</b>	Non	Non	nc	Paramétrable	nc	nc
<b>Mise en œuvre</b>	Paramétrable	Non	Paramétrable	Paramétrable	Paramétrable	Paramétrable
<b>Sorties</b>						
<b>Graphiques</b>	Oui, détaillé par transports, production des matériaux, mise en œuvre	Oui, détaillé entre types de coûts (directs, indirects et externes)	Oui	Oui, détaillé par contribution des procédés de production de chaque matériau, transports et mise en œuvre	Oui	nc
<b>Rapport</b>	Non	nc	Oui	Non	Oui	nc
<b>Export</b>	Non	nc	Oui (excel, word)	Non	Oui (excel, word, pdf, html)	nc

**Tableau 32. Types d'entrées et de sorties des différents outils  
(nc : non communiqué)**

## 2.3 Hypothèses environnementales

Le Tableau 33 recense les hypothèses environnementales de chaque outil. Concernant les bases de données, les versions développées sous Excel® permettent en général de pouvoir les modifier. Les documents publics disponibles ne citent pas les sources de données, cependant, pour les versions payantes ou privées, il est possible que ces sources soient fournies à l'achat de la licence. Il existe des différences importantes entre les logiciels concernant les éléments de système environnemental inclus ou non. Ces différences peuvent être à l'origine de très grandes disparités de résultats (Ventura et Jullien, 2009).

	PaLATE	DSMRP	Gaïa	ECORCE 1	CHANGER	Ecocalculateur anglais
<b>Données</b>						
<b>Base de données utilisées</b>	Paramétrable	Paramétrable	nc	Fixe	Input/output	nc
<b>Citation des sources</b>	Oui	nc	nc	Oui	Non	Oui
<b>Système environnemental</b>						
<b>Production des matières premières</b>	Fixe : bitume, ciment, acier, chaux, granulats, émulsions,	nc	Fixe : nc	Fixe : bitume, ciment, acier, chaux, granulats, agrégats d'enrobés	Oui : nc	Oui : nc
<b>Production de l'énergie</b>	Non	nc	Oui	Non	nc	Oui
<b>Transports</b>	Paramétrable : distance et mode	nc	Paramétrable : distance et mode	Paramétrable : distance, routier uniquement	Paramétrable : distance et mode	Paramétrable : distance, nc mode
<b>Procédés de production</b>	Paramétrable : centrales de mélange	nc	Fixe : nc, modélisation des postes d'enrobage	Fixe : centrales de mélange	Oui : nc	Oui : nc
<b>Procédés de mise en œuvre</b>	Paramétrable : engins, modèle d'émissions de fumées d'enrobé	nc	Paramétrable : engins	Paramétrable : engins	Paramétrable : engins	Paramétrable : engins
<b>Recyclage de déchets routiers</b>	Paramétrable : Agrégats d'enrobés	nc	Paramétrable : agrégats d'enrobés	Paramétrable : Agrégats d'enrobés	nc	Paramétrable : Agrégats d'enrobés
<b>Recyclage d'autres déchets</b>	Cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, sables de fonderies, pneus, verre	nc	nc	Non	nc	Verre, nc autres
<b>Production des matériels</b>	Non	nc	Oui	Non	nc	nc
<b>Entretien structurel de la chaussée</b>	Paramétrable	nc	Non	Paramétrable	nc	Paramétrable
<b>Entretien courant de la chaussée</b>	Non	nc	Non	Non	nc	Non
<b>Trafic routier</b>	Non	nc	Non	Non	nc	Non

**Tableau 33. Hypothèses environnementales des différents outils  
(nc : non communiqué)**

## 2.4 Résultats environnementaux

Le Tableau 34 recense le type de résultats disponibles selon les logiciels. Bien que la plupart des outils utilisent les mêmes bases d'indicateurs, tous les résultats ne sont pas détaillés de la même manière (répartitions entre procédés, monétarisation ou agrégation...).

	PaLATE	DSMRP	Gaïa	ECORCE 1	CHANGER	Ecocalcateur anglais
<b>Inventaire des flux</b>	Oui, tableaux Emissions de CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM10, CO, SO <sub>2</sub> , Pb, Hg	Non	nc	Oui, tableau agrégé sur le total du cas étudié	nc	Oui
<b>Consommations de ressources</b>	Consommation de matériaux (yd <sup>3</sup> )	Oui (monétarisé)	ADP	Consommation de matériaux (tonnes ou m <sup>3</sup> )	nc	Consommation de matériaux (tonnes)
	Consommation d'énergie (MJ)	Oui (monétarisé)	Consommation d'énergie (MJ)	Consommation d'énergie (MJ)	Consommation d'énergie (MJ)	Consommation d'énergie (MJ)
	Consommation d'eau (kg)	Oui (monétarisé)	Consommation d'eau (litres)	Consommation d'eau (m <sup>3</sup> )	nc	
<b>Effet de serre</b>	Non	GWP (monétarisé)	GWP	GWP	GWP	GWP
<b>Ozone stratosphérique</b>	Non	ODP (monétarisé)	ODP		Non	ODP
<b>Acidification</b>	Non	AP (monétarisé)	AP	AP	Non	AP
<b>Ozone photochimique</b>	Non	POCP (monétarisé)	POCP	POCP	Non	POCP
<b>Toxicité</b>	Potentiel toxique (cancer) = somme des flux (g) Potentiel toxique hors cancer) = somme des flux (g)	TP (monétarisé)	Volumes critiques (m <sup>3</sup> )	TP	Non	TP
<b>Ecotoxicité</b>	Non	EP détaillé par milieu récepteur (monétarisé)	Non	EP total	Non	EP détaillé par milieu récepteur
<b>Eutrophisation</b>	Non	EI (monétarisé)	Non	EI	Non	EI
<b>Occupation d'espace</b>	Non	Oui (monétarisé)	Non	Non	Non	Non
<b>Nuisances</b>	Non	Oui (monétarisé)	Non	Non	Non	DALY
<b>Mise en décharge</b>	Production de déchets dangereux (kg)	Non	Production de déchets (kg)		Non	Production de déchets (m <sup>3</sup> )
<b>Normalisation (agrégation en une « note » globale)</b>	Non	Oui	nc	Non	Non	Oui
<b>Monétarisation</b>	Oui, coûts directs	Oui, total des coûts externes méthode TWIN <sup>2002</sup>	Non	Non		

**Tableau 34. Types de résultats environnementaux fournis par les différents outils**

**ADP : Abiotic Depletion Potential (kg éq. Sb), GWP : Global Warming Potential (kg éq. CO<sub>2</sub>), EP : Ecotoxic Potential (kg éq. 1,4DCB), TP : Toxic Potential (kg éq. 1,4DCB), EI : Eutrophication Index (kg éq. PO<sub>4</sub>), ODP : Ozone Depletion Potential (kg CFC-R11), POCP : PhotoChemical Ozone Creation Potential (kg éq. éthylène), AP : Acidification Potential (kg éq. SO<sub>2</sub>), Disabled Adjusted Life Years (DALY), nc : non communiqué**

## 2.5 Bilan de la comparaison des logiciels

Comme le montre cette partie, de nombreux outils ont déjà été développés, de manière internationale. Tous visent à comparer des structures de chaussées. Ils offrent donc un mode de saisie assez similaire, par couche et par matériau, avec plus ou moins de modularité.

Cependant, les données et les systèmes sont très différents les uns des autres, ce qui doit probablement conduire à des résultats très différents. Une approche plus précise (calculs de cas identiques) serait souhaitable pour pouvoir comparer les résultats d'un outil à un autre. Cependant, les résultats proposés étant eux-mêmes très différents dans leurs unités et leurs modes de présentation, il faudrait également pouvoir les harmoniser. Les deux outils les plus anciens ont des approches opposées : PaLATE réalise des évaluations basées sur une approche Input/Output (IO), où les données environnementales sont des flux issus de calculs macroéconomiques (voir page 22). Ils ne sont pas (ou très peu) agrégés sous forme d'indicateurs. A l'inverse, DSMRP utilise une méthode où l'ensemble des effets environnementaux sont agrégés sous forme d'un seul indicateur monétaire (coûts externes), qui est donc mis en balance avec les coûts directs. Les outils les plus récents adoptent une position intermédiaire en agrégeant les flux environnementaux sous forme d'indicateurs par type d'effet sur l'environnement (catégories d'impact). Dans ces différents cas, les indicateurs utilisés sont sensiblement les mêmes. A noter l'outil CHANGER, basé aussi sur une approche IO, qui se concentre uniquement sur la consommation d'énergie et l'effet de serre.

Enfin, un outil logiciel des entreprises routières françaises, piloté par l'USSIRF, est en cours de développement au moment de la rédaction de cet ouvrage, et n'a donc pas pu être intégré dans la comparaison. Il fournira des indicateurs d'effet de serre et de consommation d'énergie « procédé », ainsi que des masses de matériaux consommées.

Globalement, on peut dire que le développement de ces outils est en pleine expansion, mais qu'il n'existe pas encore de consensus méthodologique international.

## 3 *Comparaison d'une étude de cas entre ECORCE, PaLATE et Bilan Carbone®*

### 3.1 Description du cas

Afin d'établir une comparaison sur deux des principales familles de matériaux, il a été choisi une structure mixte qui contient à la fois des matériaux traités aux liants hydrauliques et des matériaux traités aux liants hydrocarbonés à chaud.

La structure est issue du catalogue de structures et correspond à un trafic TC<sub>5,30</sub> sur une plate-forme PF3 soit : une couche de fondation en grave ciment de classe T3 de 20cm d'épaisseur et une couche de base en grave bitume de classe 3 de 12cm d'épaisseur. La couche de surface retenue est un BBSG de 7cm d'épaisseur.

Pour les émissions de GES de ces matériaux, l'outil Bilan Carbone® se base sur les données de (Chappat et Bilal 2003). Les couches d'accrochage ont été négligées. Les paramètres similaires à cette étude ont donc été retenus et sont détaillés dans les Annexes (page 152). Les dimensions de chacune des couches ont été fixées à 1000 mètres de longueur et 10 mètres de largeur.



### 3.1.1 Méthodes utilisées pour bilan Carbone®

Deux méthodes d'utilisation du Bilan Carbone® sont utilisables.

Une première méthode (M1) permet de saisir directement les quantités de matériaux routiers fabriqués, car l'outil donne accès à des matériaux de construction destinés aux routes et parkings : grave ciment, grave bitume de classe 3, et béton bitumineux, pour le présent cas. Cette méthode présente l'avantage de proposer des matériaux parfaitement en phase avec le métier du constructeur de route. Elle permet également de comparer différents types de structure rejoignant ainsi la vocation d'ECORCE. Par contre, contrairement à ECORCE, elle ne permet ni de distinguer la part des différents constituants du matériau considéré, ni de choisir un procédé particulier.

Une seconde méthode (M2) permet de saisir des quantités de matières premières, leurs frets, ainsi que des consommations de carburant. Les matières premières s'apparentant à des constituants de matériaux routiers sont la pierre de carrière et le ciment. Le bitume n'apparaît pas en tant que matière première, mais il est possible dans l'onglet « Energie interne » de faire apparaître les émissions amonts (concernant les étapes de leur production) et les émissions de combustion de nombreux produits pétroliers. Le bitume a été saisi en tant que « autres hydrocarbures ». Toutefois, pour correspondre à ECORCE, seules les émissions amont ont été retenues car dans le cas de la route, retenir les émissions liées à la combustion du bitume n'a pas de sens. Pour le transport, nous avons retenu la méthode par les « véhicules.km » disponible dans l'onglet « FRET ». Pour compléter cette deuxième méthode, il faut aussi pouvoir intégrer la fabrication des matériaux routiers et notamment celle des matériaux bitumineux à chaud qui constitue une source importante d'émission de GES. Pour l'obtenir il faut saisir d'une part l'énergie électrique et d'autre part l'énergie fossile (pétrole ou gaz naturel) consommées lors de la fabrication.

### 3.1.2 Méthodes utilisées pour PaLATE

Dans PaLATE, s'agissant d'une méthodologie ACV I/O (voir 1.2.2 page 22), les émissions et la consommation d'énergie, sont calculées en référence au dollar. Le prix unitaire à la tonne du produit ou du procédé considéré intervient donc directement sur le résultat.

Pour rendre les résultats comparables entre ECORCE et PaLATE, il est nécessaire de ramener les émissions et la consommation d'énergie aux masses ou volumes de matériaux utilisés. Pour cela, il faut utiliser les prix en cours en France, actuellement. Les valeurs de prix utilisées dans PaLATE datent de 1995. Entre 1995 et 2010, le cours du dollar n'a pratiquement pas changé (1\$ = 5F en 1995 et 1\$ = 0.7942€ soit 5.20F en 2010), il n'a qu'une influence négligeable sur le résultat.

L'examen des prix montre des ordres de grandeurs proches de ceux pratiqués en France, sauf pour le bitume. Le Tableau 35 donne les prix utilisés considérés représentatifs de la pratique française.

	Prix PALATE 95	Estimation Prix France 2010
Bitume	1 000 \$	250 \$
Ciment	84 \$	125 \$
Granulats	11 \$	18 \$
Fabrication grave ciment	31 \$	31 \$
Fabrication enrobés	28 \$	28 \$

**Tableau 35. Valeurs corrigées utilisées dans PaLATE en fonction des estimations des prix unitaires des matériaux routiers en France en 2010**

## 3.2 Résultats

### 3.2.1 Comparaison ECORCE et Bilan Carbone®

La Figure 15 donne les résultats obtenus en utilisant ECORCE et Bilan Carbone®, méthodes 1 et 2. On constate qu'ECORCE fournit des valeurs moins élevées que celles données par les deux méthodes Bilan Carbone®.

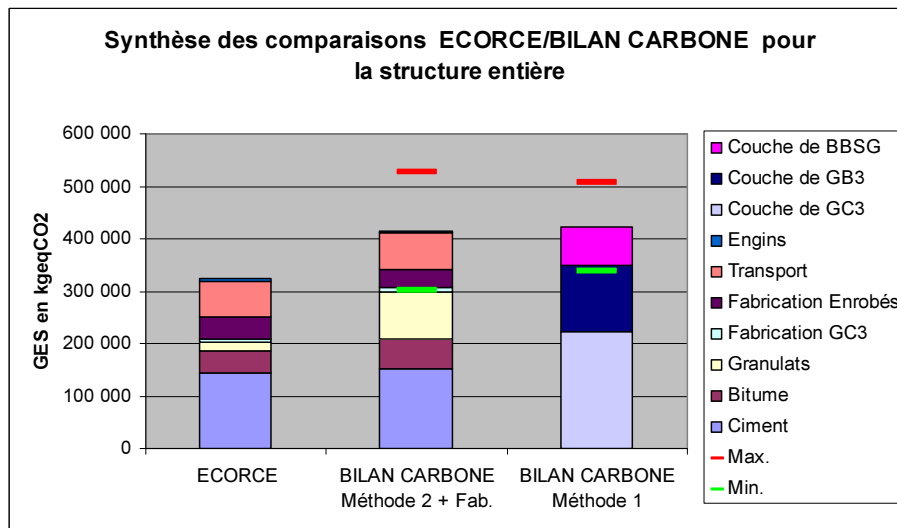


Figure 15. Comparatif ECORCE et Bilan Carbone®

Pour la fabrication des granulats, les données utilisées dans Bilan Carbone® sont celles de deux études canadienne (Athena 1999) et suédoise (Stripple 2001), mentionnées page 45. Dans la méthode 2, Bilan Carbone® annonce le facteur d'émissions pour les « pierres de carrières » comme une première estimation et lui affecte une incertitude de 80%. ECORCE, utilise des données recueillies dans une carrière française (Martaud 2008) dont la représentativité n'est pas non plus garantie.

Pour la fabrication du bitume, Bilan Carbone® et ECORCE utilisent les mêmes données (Blomberg et al. 1999) mais, dans ECORCE, les émissions de GES liées à la production de l'énergie ont été retirées (voir valeurs et justifications pages 40 et 55).

Ce sont ces différences de données et de frontières du système environnemental qui expliquent les différences de résultats observées. Lorsque ces différences sont modifiées dans ECORCE (rajout des flux liés à la production d'énergie) et changement des données environnementales des carrières, on obtient le résultat présenté sur la Figure 16.

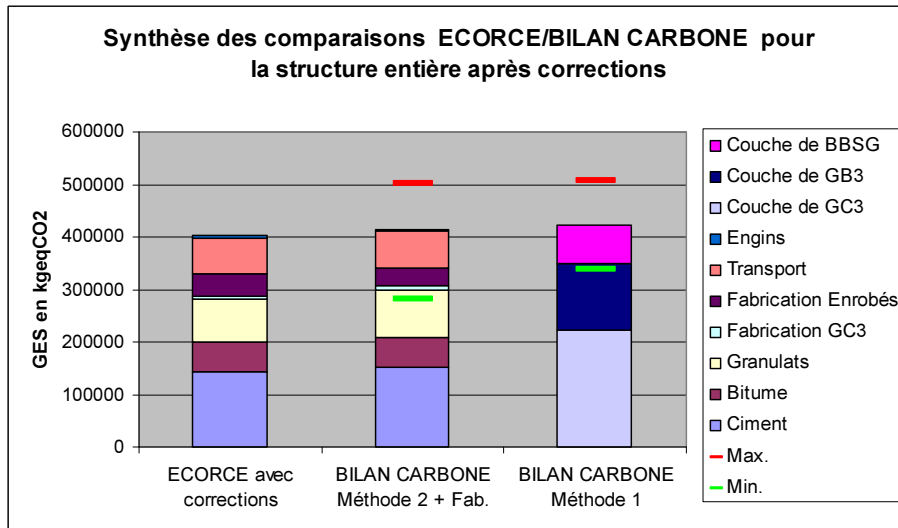


Figure 16. Comparatif après alignement des données et des systèmes environnementaux

### 3.2.2 Comparaison ECORCE et PaLATE

Pour les résultats de consommations d'énergie, comme pour les émissions de gaz à effet de serre, ECORCE donne des résultats systématiquement inférieurs à ceux de PaLATE. Afin de comprendre l'origine de ces différences, les résultats ont été analysés par procédés.

La comparaison de l'énergie consommée (Figure 17) donne des résultats très inférieurs pour ECORCE, concernant la fabrication des granulats et celle de la grave ciment, tandis que les résultats sont comparables entre les deux outils, concernant les procédés de production du ciment, du bitume, de l'enrobé ainsi que le transport et la contribution des engins.

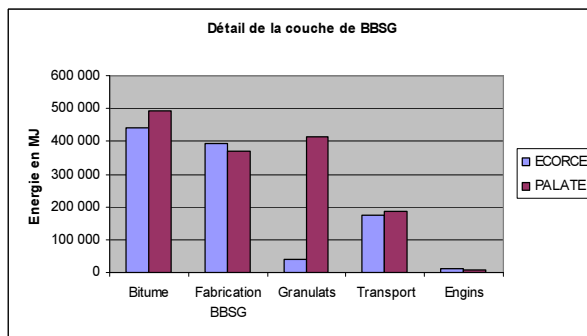
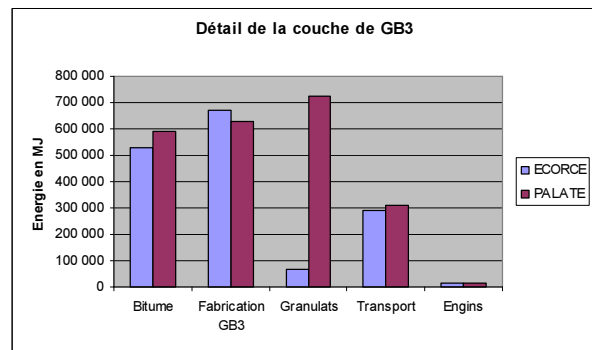
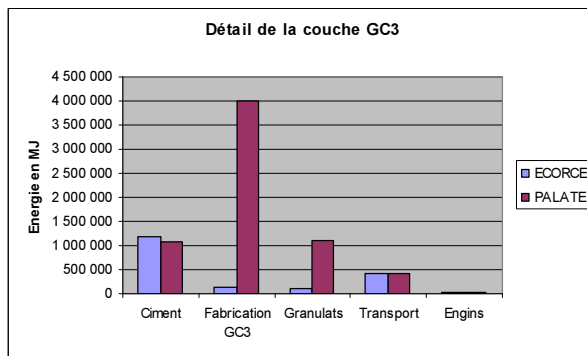


Figure 17. Comparaison des consommations d'énergie par procédés entre ECORCE et PaLATE

La comparaison des émissions de gaz à effet de serre (Figure 18) donne également des résultats très inférieurs pour ECORCE, concernant la fabrication des granulats et celle de la grave ciment. ECORCE est par contre supérieur à PaLATE concernant la fabrication des enrobés. Les résultats sont comparables entre les deux outils, concernant les procédés de production du ciment, du bitume, le transport et la contribution des engins.

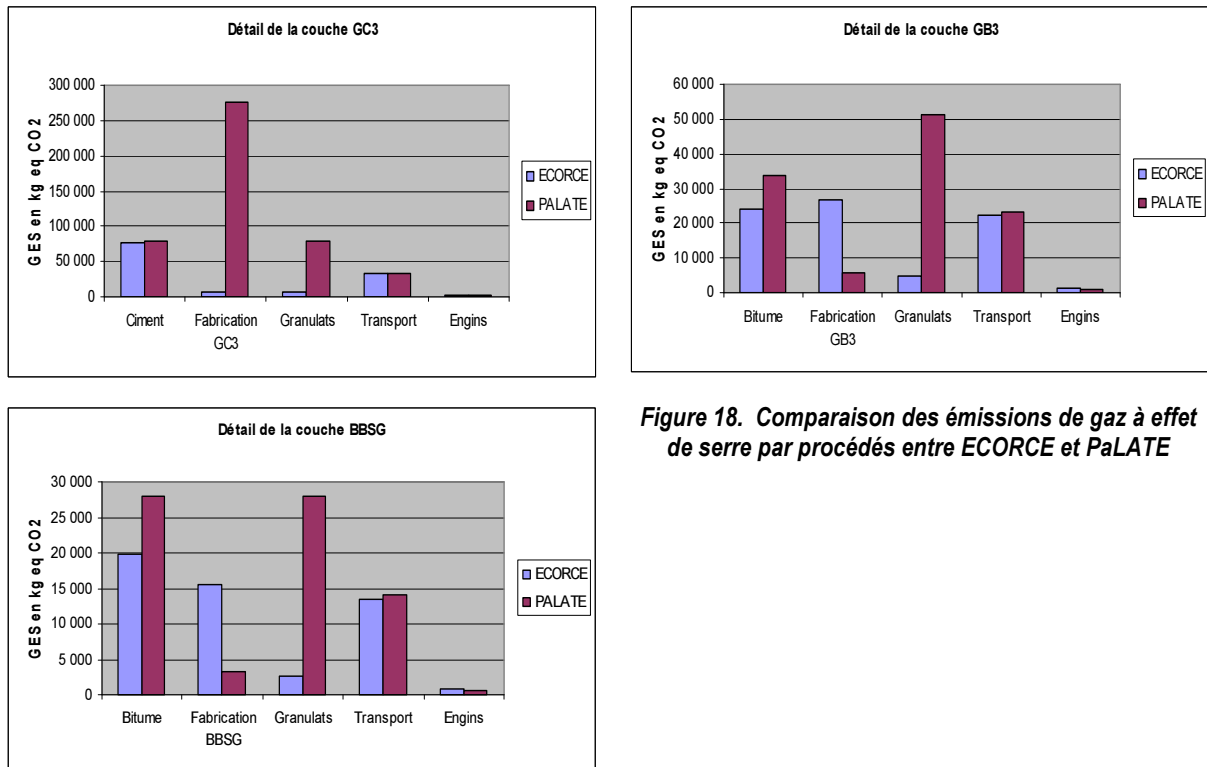


Figure 18. Comparaison des émissions de gaz à effet de serre par procédés entre ECORCE et PaLATE

#### 4 Bilan de l'étude comparative des outils

Comme on peut le constater, il existe des différences parfois importantes, entre les résultats, des différents logiciels. Elles proviennent essentiellement des données utilisées, celles-ci étant en lien avec le système environnemental qui les génère. Ainsi, l'intégration des procédés de fabrication de l'énergie dans les facteurs d'émission utilisés par la méthode BilanCarbone® entraîne des différences par rapport à ECORCE. De même, PaLATE utilisant des données I/O, ne spécifie pas de bornes de système (voir explications du Tableau 1 page 23).

# X Les utilisateurs d'ECORCE

*Michel Dauvergne, Anne Ventura*

En juin 2008, le LCPC a mené une enquête par questionnaires auprès du RST afin d'évaluer la pertinence de l'outil à développer et de cerner les besoins des futurs utilisateurs par rapport aux possibilités offertes par les approches basées sur l'ACV.

Le questionnaire distribué est présenté en annexe 3. Un total de 19 réponses est parvenu au LCPC, représentant 12 Laboratoires régionaux et 7 CETE : 6 réponses viennent du LR de Nancy, 2 du LR de Bordeaux, 2 du LREP, une du LR de Aix-en-Provence, une du LR d'Autun, une du LR de Clermont-Ferrand, une du LR de Lille, une du LR de Nice, une du LR de Lyon, une du LR de Saint-Brieuc, une du LR de Saint-Quentin, une du LR de Strasbourg.

Cette partie présente les résultats de cette enquête, dont l'intérêt est de pouvoir confronter la vision d'un outil issu d'une méthodologie conçue sur la base de l'Analyse de Cycle de Vie, à la vision d'utilisateurs futurs, non experts, mais en attente de nouvelles possibilités permettant d'évaluer les conséquences de leurs choix, sous forme d'indicateurs environnementaux quantifiés. ECORCE a également fait l'objet de tests qui ne sont pas présentés dans l'ouvrage mais qui sont récapitulés dans l'annexe 6. Celle-ci contient les remarques des utilisateurs d'ECORCE, et un classement de ces remarques en fonction du type de problème : ergonomie (23 remarques), absence de la fonctionnalité (27), bug à corriger (9 corrigés pour la version finale), formation (6).

La méthode d'analyse des questionnaires est d'abord présentée, puis les résultats sont détaillés.

## 1 Méthode d'analyse des questionnaires

A la plupart des questions, il fallait répondre par une évaluation du degré de pertinence (0\_25\_50\_75\_100%) ou bien cocher une case « sans avis ».

Pour ces questions, la réponse moyenne a été calculée comme suit :

- Non prise en compte des sans avis
- Calcul du % moyen de pertinence sur les autres réponses

Pour la question **1°) c.** concernant la fréquence d'utilisation de l'outil, la réponse moyenne a été calculée en affectant les pourcentages suivants :

- 0% aux réponses « jamais »
- 25% aux réponses « une à plusieurs fois par an »
- 75% aux réponses « une à plusieurs fois par mois »
- 100% aux réponses « une à plusieurs fois par semaine »

Pour la question **1°) d.** concernant la nécessité d'une formation pour utiliser l'outil, la réponse moyenne a été calculée en ne prenant pas en compte les « sans avis » et en affectant les pourcentages suivants :

- 0% aux réponses « non »

- 100% aux réponses « oui »

Enfin, les interviewés pouvaient compléter leurs réponses par des commentaires libres qui ont été synthétisés au niveau de chaque réponse ou à la fin s'ils étaient d'ordre général.

## 2 Questions sur les objectifs de l'outil

Le Tableau 37 présente les réponses aux questions 1a à 1d, ainsi qu'une synthèse des commentaires recensés.

Question		Nombre de réponses	Pertinence	Commentaires
N°	Intitulé			
1a	Un outil permettant des comparaisons environnementales à priori de variantes de couches de chaussées serait-il utile ?	19	96%	« Vérifier » les publicités des entreprises Avoir une aide aux différentes phases d'un projet (APS, DCE, AO, DET)
1b	L'outil a-t-il vocation à être utilisé par les services de l'Etat, RST et DIR en particulier ?	19	96%	Prévoir à terme une diffusion plus large Conserver l'outil dans le RST si possible
1c	A quelle fréquence pensez-vous avoir l'usage d'un tel outil ?	18		Une à plusieurs fois par semestre
1d	Pensez-vous que l'usage d'un tel outil nécessite une formation ?	18	100%	

**Tableau 36. Synthèse des réponses au questionnaire préliminaire concernant les objectifs de l'outil**

Concernant la question 1a, toutes les variantes sont possibles dans ECORCE, à l'exclusion de certains procédés comme les enrobés tièdes, les graves émulsions, les enrobés froids pour lesquels les données de flux de polluants sont indisponibles.

Les commentaires relatifs à la question 1b montrent des avis contradictoires. ECORCE a été diffusé au sein du RST (groupes chaussées) dans une version  $\beta$  en octobre 2008, puis dans une version consolidée et qualifiée en avril 2009. Il a été appliqué par le RST à un certain nombre d'études de terrain avec un retour détaillé des utilisateurs, ce qui a permis de détecter et corriger quelques erreurs résiduelles.

Les réponses à la question 1c montrent que la demande d'éco-comparateurs est grandissante.

## 3 Questions sur le principe général de fonctionnement

Le Tableau 37 présente les réponses obtenues concernant les questions 2a à 2d.

Les utilisateurs réclament à la fois transparence et validation du LCPC sur les données utilisées dans l'outil. La possibilité de compléter les données manquantes par des données propres à l'utilisateur ou propres aux entreprises, ne reçoit pas l'unanimité des réponses (63% de pertinence), et les commentaires précisent que cette possibilité doit être encadrée par un certain nombre de précautions.

La version 1 d'ECORCE ne permet pas à l'utilisateur d'ECORCE d'ajouter ses propres données, et utilise des données environnementales publiées, choisies selon les critères exposés dans le chapitre IV Données environnementales (page 38).

Question		Nombre de réponses	Pertinence	Commentaires
N°	Intitulé			
2a	Certaines valeurs issues de la bibliographie ou d'études particulières devront-elles être disponibles dans l'outil lorsque l'entreprise ne sera pas en mesure de fournir les informations (par exemple dans le cas où l'entreprise ne connaît pas les données de ses fournisseurs) ?	18	92%	Oui sinon on sera vite bloqué Il faut des valeurs « défaut » ou « moyenne » partout Les valeurs « défaut » contenues doivent être pénalisantes pour pénaliser l'entreprise qui n'en fournirait pas
2b	Les indicateurs d'impacts pourraient-ils être calculés à partir de données fournies par l'entreprise et dont elle a la responsabilité ?	19	63%	Ce sont des données sensibles De préférence, piocher dans une base de données consensuelle* Oui dans un premier temps pour avancer l'outil Oui pour impliquer l'entreprise et pour vérifier l'actualité de nos valeurs A utiliser avec précaution A condition de citer les sources
2c	L'outil devra-t-il proposer une base de référence permettant de confronter les valeurs des données fournies par les entreprises à des cas déjà connus ?	19	91%	
2d	La base de données de l'outil pourra-t-elle être complétée par les utilisateurs au fur et à mesure de l'utilisation de l'outil ?	17	63%	Avec contrôle Sous réserve de validation Utilisateurs référents d'abord puis restitution à l'ensemble du réseau Veille technologique indispensable Oui pour la première version mais centralisation et validation par équipe responsable de l'outil A condition de transmettre un minimum d'infos sur l'obtention des données

**Tableau 37. Synthèse des réponses au questionnaire préliminaire concernant les principes généraux de l'outil**

#### **4 Questions sur les sorties de l'outil**

Le Tableau 38 présente les réponses obtenues concernant les questions 3a à 3d.

Le fait d'avoir un outil fournissant des indicateurs autres que consommation d'énergie et contribution au changement climatique, est exprimé comme majoritairement souhaitable.

Bien que souhaité également par les utilisateurs, le fait de proposer des « équivalents parlants » (question 3c) n'a pas été retenu dans ECORCE. Les raisons de ce choix sont expliquées dans le §1 Indicateurs utilisés dans ECORCE (page 50).

Question		Nombre de réponses	Pertinence	Commentaires
N°	Intitulé			
3a	Dans un premier temps, les sorties pourraient-elles être limitées à des indicateurs d'impact sur la consommation en énergie et les gaz à effet de serre ?	17	93%	Mieux dans un premier temps si les autres indicateurs ne sont pas suffisamment documentés Il faut bien démarrer par quelque chose Oui mais le risque est qu'on s'arrête là
3b	Indiquez la pertinence que vous accordez aux indicateurs suivants :			
	Potentiels d'eutrophisation (milieux naturels)	14	76%	Autres indicateurs proposés : Nuisances (sonores, délais d'exécution, temps de renouvellement) Fragilité de la chaussée Proximité des matériaux Recyclage
	Potentiels d'acidification (milieux naturels et urbains)	14	70%	
	Formation d'ozone à basse altitude (smog)	13	75%	
	Potentiels d'écotoxicité (espèces vivantes)	11	84%	

Question		Nombre de réponses	Pertinence	Commentaires
N°	Intitulé			
				Consommation de matières premières
3c	L'outil doit-il traduire chaque indicateur de la comparaison finale en un « équivalent parlant » pour un non initié (par ex : équivaut à X km parcourus avec un camion)	17	71%	Propositions d'équivalents : Graduation A à E Equivalent produit classique Tonne équivalent carbone Classement indiciaire alpha numérique Energie équivalent proposée pour une famille de quatre personnes Litres de gazole
3d	L'outil doit-il permettre des sorties graphiques ? si oui, précisez-les ci-après :	13	73%	Histogrammes, histogrammes cumulés Camembert avec la part de chaque indicateur Export vers un tableur Diagramme comparant énergie consommée en fonction de la variante

**Tableau 38. Synthèse des réponses au questionnaire préliminaire concernant les sorties de l'outil**

## 5 Questions sur les cas traités par l'outil

Le Tableau 39 présente les réponses obtenues concernant les questions 4a à 4d.

Actuellement, ECORCE dans sa version 1, ne répond pas à la demande concernant les enrobés tièdes, graves émulsions et enrobés froids, pour lesquels des données consolidées de flux de polluants sont indisponibles. Pour les mêmes raisons, les agrégats d'enrobés sont les seuls déchets intégrés dans la première version. Le retraitement en place n'est pas inclus en tant que procédé à part entière, même si le calcul environnemental des impacts liés au chantier est possible si l'on connaît les consommations des engins concernés.

Question		Nombre de réponses	Pertinence	Commentaires
N°	Intitulé			
4 a	L'outil doit-il viser les variantes pour une même couche de chaussée (par exemple, une couche de roulement en enrobés chauds, tièdes, basse température, froids...) ?	19	93%	
4 b	L'outil doit-il viser l'emploi de solutions intégrant des agrégats d'enrobés, en prenant en compte différents scénarii de rabotage, collecte des agrégats, conditionnement des agrégats ?	17	97%	Quid du retraitement en place ? Il pourrait être intéressant de noter les différentes structures selon leur recyclabilité.
4 c	L'outil doit-il viser l'emploi de solutions intégrant des déchets d'autres provenances que la route ? Si vous avez coché >50% indiquez les déchets qui vous intéressent.	19	89%	MIOM cités 15 fois Laitiers cités 6 fois Sables de fonderies cités 5 fois Béton concassé cité 5 fois Déchets ou coproduits industriels cités 2 fois Déchets du BTP cités 2 fois Schistes houillers cités 2 fois Cendres citées 2 fois Déchets inertes de centre de recyclage cités 1 fois Sols traités pour assise de chaussées cités 1 fois
4 d	L'outil doit-il viser le choix de différentes structures de chaussées ?	19	96%	

**Tableau 39. Synthèse des réponses au questionnaire préliminaire concernant les cas traités par l'outil**



## 6 Questions sur les limites de l'évaluation

Le Tableau 40 présente les réponses obtenues concernant les questions 5a à 5d.

Question		Nombre de réponses	Pertinence	Commentaires
N°	Intitulé			
5 a	L'outil doit-il prendre en compte l'élaboration et l'acheminement des matières premières (bitume, ciment, granulats...) ?	19	93%	Oui mais sans prendre en compte l'élaboration des machines Pas évident de définir à priori d'où viennent ces matières L'acheminement des matières premières complique l'évaluation, dans un premier temps, une approche à partir de données génériques validées pourrait être utilisée À terme, d'autres moyens de transport que le seul routier
5 b	L'outil doit-il prendre en compte les transports routiers pour l'acheminement des matériaux ou des matériels (centrale chantier, agence chantier) ?	19	92%	Certaines infos sont difficiles à obtenir pour de grands chantiers
5 c	L'outil doit-il intégrer les durées de vies des solutions dans son calcul, à partir d'hypothèses sur la stratégie d'entretien ?	18	82%	Si on veut cette précision, il faut intégrer certaines spécificités (temps d'attente avant remise en circulation, déviation, itinéraire de contournement pour certains trafics...) Aspect mécanique vu par ailleurs ! L'aspect « durée de vie » pourrait se faire dans un deuxième temps pour ne pas retarder la sortie de l'outil

**Tableau 40. Synthèse des réponses au questionnaire préliminaire concernant les limites de l'évaluation environnementale**

L'élaboration des principales matières premières est incluse dans ECORCE, mais pas la fabrication du matériel (engins, sites industriels...). L'acheminement des matériaux et matières premières est paramétrable, mais le transport routier est le seul mode possible.

Enfin, il est possible de prendre en compte la durée de vie de la chaussée en définissant des opérations d'entretien.

## 7 Bilan des avis recueillis sur ECORCE

Les résultats recueillis auprès de non experts en ACV, montrent cependant que les avis convergent avec les questionnements scientifiques autour de la méthodologie (voir Contexte scientifique de l'Analyse de Cycle de Vie page 22). En effet, les réponses montrent que les utilisateurs futurs s'interrogent sur la qualité des données utilisées et leur validation, sur la nécessité de ne pas limiter l'évaluation à un seul indicateur mais encourage l'exhaustivité, et affirment l'importance d'intégrer la vie en service de la structure.

Au-delà de ces questions, ils expriment leur préoccupation de voir intégré dans l'outil les technologies innovantes qui répondent aux grands enjeux environnementaux, mais dont il est actuellement difficile de vérifier la pertinence : retraitement en place, enrobés coulés à froid, matériaux recyclés... ECORCE ne permet pas d'intégrer l'ensemble de ces technologies, mais doit rester évolutif pour permettre à terme de les comparer aux solutions classiques.

# XI Conclusion : apports et limites d'ECORCE

Anne Ventura

Au-delà des méthodes, le développement d'outils, permet d'offrir un support commun à tous les acteurs d'un projet routier, sur la base d'une information scientifique tangible et fiabilisée. Les experts de la route peuvent évaluer les conséquences environnementales de leurs choix, et les intégrer dans leurs décisions finales, parmi d'autres critères : économiques, techniques et sociaux. Ainsi le passage de la méthode à l'outil est une démarche permettant de relier des expertises différentes (Figure 19) et de traduire le concept du développement durable en démarches applicables.

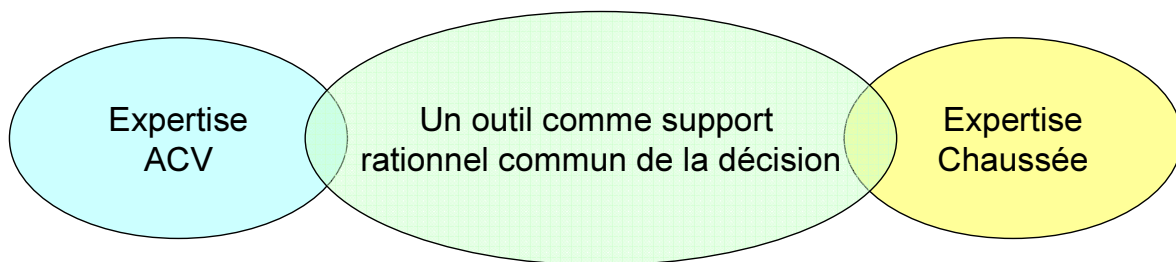


Figure 19. L'outil comme support décisionnel commun

L'intérêt d'un outil d'évaluation partagé est d'apporter un éclairage à chacun des acteurs selon le point de vue qui est le sien et les critères qui le positionnent dans le processus décisionnel du projet. L'évaluation recouvrant l'ensemble des étapes de construction et séquences d'exploitation et entretien, chaque acteur peut y voir les conséquences de ses choix. Ainsi, l'outil pourrait peut-être permettre aux décideurs d'intervenir différemment, plus en amont, quant aux choix et évaluations de variantes techniques. Pour l'utilisateur d'ECORCE, les différentes études de cas présentées dans le chapitre VII Exemples d'applications : études de cas (page 71) doivent pouvoir le renseigner sur les possibilités offertes par l'outil.

ECORCE est amené à être diffusé auprès de la communauté professionnelle comme support rationnel de concertation entre acteurs. Bien que nécessaire du point de vue global du développement durable, son utilisation n'apparaît cependant pas envisageable sans un accompagnement des acteurs vers un socle commun de connaissances liées à la méthodologie ACV, ses intérêts et ses limites.

Tout d'abord, les entrées d'ECORCE sont celles attendues par un expert chaussées, ce sont des entrées dites « métier » : le paramétrage ne répond pas aux exigences d'un modèle de calcul scientifique pour lequel on recherche classiquement à isoler des paramètres indépendants les uns des autres. L'outil propose un paramétrage interdépendant, rendant la prédiction difficile. Dans ce sens, l'outil reflète un système de choix complexe.

Cette complexité se retrouve également dans la multiplicité des choix de données, de systèmes environnementaux, d'indicateurs. L'outil ECORCE concrétise un ensemble de

choix nécessaires à son développement, mais qui, pour certains, restent discutables en l'état actuel des connaissances.

Ainsi en est-il, par exemple, du choix des données environnementales. Le choix d'utiliser des données publiques permet une diffusion et une utilisation potentiellement larges de l'outil. Cependant, ces données n'offrent pas la même représentativité que les bases de données internationales dédiées. De même, d'autres choix décrits dans cet ouvrage, pourraient, à terme, évoluer si les connaissances de la communauté scientifique progressent. C'est le cas de la prise en compte de l'énergie matière, par exemple, des interactions possibles entre matériau de surface et consommation des véhicules, ou bien encore de l'intégration de matériaux et technologies innovantes.

D'autre part, il ne faut pas perdre de vue que l'ACV reste une méthode comparative par définition, qu'elle compare des produits ou des services entre eux, et ne cherche pas à évaluer l'impact environnemental réel. Ainsi, comparer les résultats d'indicateurs obtenus pour les différentes solutions testées, suffit pour comparer les solutions. Les indicateurs choisis pour ECORCE sont donc des indicateurs dits « de pression », ils sont basés sur les propriétés physicochimiques des flux, et représentent un impact potentiel. Ils ont l'avantage d'avoir une méthode de calcul simple et transparente.

Enfin, ECORCE diffère de la démarche ACV classique car il utilise un modèle de classification des polluants dans les catégories d'impact, lorsque ceux-ci contribuent à plusieurs catégories. Il s'agit d'une originalité propre à ce logiciel, la méthode n'étant pas utilisée par les autres.

L'ensemble de ces aspects est en constante évolution. Dans ce contexte, deux points essentiels sont à retenir. D'une part, l'exigence de transparence sur la méthode, qui seule permettra des améliorations futures. D'autre part, si la validité des résultats n'est pas encore acquise et nécessitera des investigations futures, l'outil permet, grâce à l'étude de sensibilité (Tableau 29 page 88), de mettre en évidence des leviers d'action en vue d'améliorer les performances environnementales des solutions techniques que l'on compare.

## XII Bibliographie

### 1 Références citées dans l'ouvrage

- AFNOR **1997** ISO 14040. *Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework*. Norme ISO 14040.
- AFNOR **1998** ISO 14041. *Environmental management. Life cycle assessment. Goal and scope definition and inventory analysis*. Norme ISO 14041.
- AFNOR **2000** ISO 14042. *Environmental management. Life cycle assessment. Life cycle impact assessment*. Norme ISO 14042.
- AFNOR **2000** ISO 14043. *Environmental management. Life cycle assessment. Life cycle interpretation*. Norme ISO 14043.
- AFNOR **2004** NF P01-010 Décembre 2004. Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction.
- AFNOR **2006** FD P01015, *Qualité environnementale des produits de construction – Fascicule de données énergie et transport*, 2006
- Aissani **2008** Aissani L., Intégration des paramètres spatio-temporels et des risques d'accident à l'Analyse du Cycle de Vie: application à la filière hydrogène énergie et à la filière essence. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 344 p.
- Altenstedt et Pleijel **1998** Altenstedt J., Pleijel K. **1998**. POCP for individual VOC under European conditions. *Report B-1305 from IVL*, 53 p.
- Athena **1999** Life Cycle Embodied energy and global warming emissions for concrete and asphalt roadways, *Report from Athena Sustainable Materials Institute submitted to the Canadian Portland Cement Association in association with John Emery Geotechnical Engineering Limited, Venta Glaser & Associates, Jan Consultants*, 102 p.
- Bare et Gloria **2008** Bare J.C., Gloria T.P., 2008. Environmental impact assessment taxonomy providing comprehensive coverage of midpoints, endpoints, damages, and areas of protection. *Journal of Cleaner Production* 16, pp. 1021-1035.
- Blomberg et al **1999** 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.
- Brundtland **1987** Brundtland, *Notre Avenir à Tous. Rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement*. Ed. ONU Avril 1987

- Camargo et Alonso **2006** Camargo J.A., Alonso A., 2006. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. *Environmental International* Vol. 32, No. 6, pp. 831-849.
- Caseau et al. **2001** Caseau P., Gauthier D., Mazéas H., Lecouls H., Sidoroff S., Les Analyses du Cycle de Vie, rapport de l'Académie des Technologies, [http://www.academie-technologies.fr/flipbook/homme\\_machin/FR/pdf/flipbook.pdf](http://www.academie-technologies.fr/flipbook/homme_machin/FR/pdf/flipbook.pdf)
- Chappat et Bilal **2003** Chappat M., Bilal J., 2003. La route écologique du futur. Consommation d'énergie et émission de gaz à effet de serre. *Report COLAS*, 40p.
- Chen **2009** Chen C. 2009. Etude des bétons de construction classiques et alternatifs par la méthode d'Analyse de Cycle de Vie. *Thèse LCPC-Université Technologique de Troyes*, 265 p.
- Chen et al. **2010** Chen C., Habert G., Bouzidi Y., Jullien A., Ventura A., 2010. LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: an application to mineral additions in concrete. *Resource, Conservation and Recycling*, Vol. 54, No. 12, pp. 1231-1240.
- Cormier et Thébeau **2003** Cormier B. et Thébeau D., 2003. Processus d'élaboration de l'orientation ministérielle sur le choix des types de chaussées de Transports Québec, *Annual congress of transports association of Canada, St John's (Canada), September 21<sup>st</sup>-24<sup>th</sup>*.
- CTL **2003** Construction Technology Laboratories, 2003. Life Cycle Inventory of Slag Cement Concrete, Report of Projet No. 312012, 19 p.
- Derwent et al. **1996** Derwent R.G., Jenkin M.E., Saunders S.M., 1996. Photochemical Ozone Creation Potentials for a large number of reactive hydrocarbons under european conditions, *Atmospheric Environment* Vol.30, No.2, pp. 181-199.
- Derwent et al. **1998** Derwent R.G., Jenkin M.E., Saunders S., Pilling M.J., 1998. Photochemical ozone creation potentials for organic compounds in Northwest Europe calculated with a master chemical mechanism, *Atmospheric Environment* Vol.32, No. 14/15, pp. 2429-2441.
- Diepgen et Mahler **2002** Diepgen T.L., Mahler V., 2002. The epidemiology of skin cancer. *British Journal of Dermatology* Vol. 146 (Suppl. 61): 1-6.
- EIOLCA **2010** Carnegie Mellon Green Design Institute. *Site internet consulté en septembre 2010*. <http://www.eiolca.net/methods.html#beg>
- Energetics **1998** Energetics Incorporated (Columbia, Maryland), 1998. *Energy and Environmental profile of the U.S Petroleum Refining Industry*. Report prepared for U.S. Department of Energy Office and Industrial Technologies, December 1998, 121 p.
- EPLCA **2008** European Platform on LCA, International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook, ILCD reference elementary flows table, <http://lct.jrc.ec.europa.eu/assessment/projects#d>, last update March 2010.
- Finizio et Villa **2002** Finizio A. et Villa S. 2002. Environmental risk assessment for pesticides: a tool for decision making. *Environmental Impact Assessment Review* Vol. 22, No. 3, pp. 235-248.
- Flemer et Champ **2006**. Flemer D.A., Champ M.A. 2006. What ist he future fate of estuaries given nutrient over-enrichment, freshwater diversion and low flows ? *Marine Pollution Bulletin* Vol. 52, No. 3, pp. 247-258.
- Frischknecht et al. **2007** Frischknecht R., Althaus H.J., Bauer C., Doka G., Heck T., Jungbluth N., Kellenberger D., 2007. The environmental relevance of capital goods in life cycle assessments of products and services. *Int. J. Ica* Vol.12, Sp. Iss. 1 from

*3rd International Conference on Life Cycle Management, Aug. 27-29, Zurich (Switzerland), pp. 7-17.*

- Gerilla et al. **2000** Gerilla G.P., Takeyama Y., Inamura H., 2000. Environmental impacts of the road and building Construction industry in Japan. Proceedings of the International Symposium on Lowland Technology, Saga (Japan), Oct. 4-6 2000. <http://people.revoledu.com/gloria/pdf/ISLT2000.pdf>, consulté en janvier 2010.
- Goedkoop **1996** Goedkoop M.J. 1996. The Eco-Indicator 95: Description of the impact assessment methodology, NOH report 9514 A; PRé Consultants; Amersfoort (NL); July 1995. <http://www.pre.nl/eco-indicator95/eco-indicator95.htm>
- Goedkoop et al. **2001** Goedkoop M, Spriensma R. The Eco-indicator 99, a damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, methodology report. PRe Consultants BV; 2001, 132 p.
- Guinée et al. **2002** Guinée JB, Gorrée M, Heijungs R, Huppés G, Kleijn R, van Oers L, Sleeswijk A, Suh S, Udo de Haes HA, de Bruijn H, van Duin R, Huijbregts MAJ. Life cycle assessment: an operational guide to the ISO Standards. Dordrecht (NL): Kluwer Academic Publishers; 2002.
- Habert et al. **2010** Habert G., Bouzidi Y., Chen C., Jullien A. 2009. Development of a depletion indicator for natural resources used in concrete. Resources, Conservation and Recycling, Vol. 54 pp. 364-376.
- Häkkinen et Mäkelä, **1996** Häkkinen T., Mäkelä K., 1996. Environmental adaption of concrete – Environmental impact of concrete and asphalt pavements, VTT Research Notes 1752, 93 p.
- Heijungs **1996** Heijungs R., **1996**. Identification of key issues for further investigations in improving the reliability
- Hoang **2005** Hoang T., 2005. Tronçons autoroutiers : une méthodologie de modélisation environnementale et économique pour différents scénarios de construction et d'entretien, *PhD from Ecole Centrale de Nantes, 322 p., November 3<sup>rd</sup> 2005.*
- Horvath et al. **2004** Horvath A., 2004. Pavement Life Cycle Assessment tool for environment and economic effects (PaLATE). User Manual from Consortium on Green Design and Manufacturing, University of California, Berkeley, 14 p. <http://www.recycledmaterials.org/Resources/CD/PaLATE/PaLATE%20User%20Manual.pdf>, consulté en janvier 2010.
- Huang et al. **2009** Huang Y., Bird R., Heidrich O., 2009. Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. Journal of Cleaner Production Vol. 17, pp. 283-296.
- Hugrel et Joumard **2006** Hugrel C. et Joumard R., *Directives et facteurs agrégés d'émission des véhicules routiers en France de 1970 à 2025*, Rapport LTE n°0611 de l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS), 2006.
- Huijbregts et al. **2000** Huijbregts M.A.J., Thissen U., Guinée J.B., Jager T., Kalf D., van de Meent D., Ragas A.M.J., Wegener Sleeswijk A., Reijnders L., *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.
- IISI **2002** International Iron and Steel Institute, 2002. *World steel life cycle inventory. Methodology report 1999/2000*. Committee on environmental affairs Brussels, October 2002, 90 p, 1999.

- IPCC 2007** Intergovernmental Panel on Climate Change, Fourth assessment report, Climate Change 2007 the physical science basis. Chapter 2: Changes in Atmospheric constituents and radiative forcing, 106p., téléchargeable sur : <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>, 2007.
- IPP 2001** Integrated Product Policy, Green paper and related documents, 2001. <http://ec.europa.eu/environment/ipp/2001developments.htm>
- IRF 2010a** International Road Federation, The green path to climate neutral roads - The IRF Greenhouse Gas Calculator, [http://www.irfnet.org/geneva/files-upload/Environment/Green%20House%20Gas/GHG\\_ProjectSheet\\_website.pdf](http://www.irfnet.org/geneva/files-upload/Environment/Green%20House%20Gas/GHG_ProjectSheet_website.pdf) consulté le 9 janvier 2010
- IRF 2010b** International Road Federation, Changer – Calculator for Harmonised Assessment and Normalisation of Greenhouse gas Emissions for Roads, <http://www.irfghg.org/faq.php> consulté le 9 janvier 2010
- Irving Olsen et al. 2001** Irving Olsen S., Christensen F.M., Hauschild M., Pedersen F., Larsen H.F., Torslov J., 2001. Life Cycle Impact Assessment and risk assessment of chemicals – a methodological comparison. *Environmental Impact Assessment Review Vol. 21, No. 4, pp. 385-404.*
- Jiménez et Overcash 2000** 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.
- Josa et al 2004** Josa A., Aguado A., Heino A., Byars E., Cardim A., 2004. Comparative analysis of available life cycle inventories of cement in the EU. *Cement and Concrete Research* 34, pp. 1313-1320.
- Jullien et al. 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 RN76 – Evaluation technique et environnementale d'une couche de liaison d'enrobé bitumineux pour différents taux de recyclage*, Ed. LCPC, Coll. Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées CR42, 239 p.
- Jullien 2007** Jullien A., 2007. *Life Cycle Assessment of materials and structures – Methods, indicators and tools*, Orgagec 3<sup>rd</sup> European Symposium Organic Materials for construction: technical and environmental performances, Paris Marne la Vallée (France), August 27-29<sup>th</sup>2007.
- Jullien et al 2008** Jullien A., Monéron P., Ventura A., Paranhos R., Schemid M., Lombradi B., De Sars T., 2008. *Environmental assessment of a hot mix asphalt process*, Proceedings of the International Symposium on Asphalt Pavements and environment, Zürich, Suisse , ISBN: 978-3-905594-51-5, 18-20 August 2008, p 255-266.
- Lundström 1998** Lundström K., 1998. Influence des chaussées en béton et asphalte sur le milieu. *8<sup>th</sup> International Symposium on Concrete Road, September 13-16 1998, Lisbon-Portugal. Theme V: Safety and Environment, pp. 195-202.*
- McKone et al 2001** McKone Thomas E. and Hertwich Edgar G., 2001. The Human Toxicity Potential and a Strategy for Evaluating Model Performance in LCIA. *International Journal of Life Cycle Assessment Vol. 6 (2), pp. 106-109.*
- Martaud 2008** Martaud T., 2008. *Evaluation environnementale de la production de granulats naturels en exploitation de carrières - Indicateurs, Modèles et Outils* Co-Directrices de thèse Agnès JULLIEN (LCPC) et Chantal PROUST (Université d'Orléans),



dans le cadre de l'école doctorale : Sciences et technologies (ED N°177, Université d'Orléans), doctorat sciences de l'Univers, soutenue le 22 octobre 2008, 211 p.

- Mroueh et al. **2000** Mroueh U. M., Eskola P., Laine-Ylijoki J. et al., 2000. Life cycle assessment of road construction. *Report of Tielaitos, Helsinki, Finland, 59 p. annexe.*
- Mroueh et al. **2001**. Mroueh U. M., Eskola P., Laine-Ylijoki J., 2001. Life cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction. *Waste Management Vol. 21, pp. 271-277.*
- Omaye **2002** Omaye S.T. 2002. Metabolic modulation of carbon monoxide toxicity. *Toxicology Vol. 180, No. 2, pp. 139-150.*
- Pereira et al. **1998** Pereira A., Blanc I., Coste J.F. 1998. Contribution of life cycle assessment: global atmospheric emissions for motorway infrastructures. *International Journal of Vehicle Design Vol.20, No. 1/2/3/4, pp. 201-209.*
- Peuportier **2003** Peuportier B., 2003. Analyse de vie d'un kilomètre de route et comparaison de six variantes. *Report du Centre Energétique de l'Ecole de Mines de Paris pour CIM béton, 48p.*
- Piantanakulchai et al. **1998** Piantanakulchai M., Inamura H., Takeyama Y., 1998. A life cycle inventory analysis of carbon dioxide for a highway construction project using input-output scheme – a case study of the Tohoku expressway construction works. *Japan Society of Civil Engineers No. 21 (2), pp. 641-644.* <http://library.isce.or.jp/isce/open/00039/1998/21-2-0641.pdf>, consulté en janvier 2010.
- Pontarollo and Smith **2001** Pontarollo G., Smith T., 2001. A life-Cycle Analysis Of the Environmental Impacts of Asphalt and Concrete Road. *Paris IRF World Road Congress.*
- Reap et al. **2008** Reap J., Roman F., Duncan S., Bras B. A survey of unresolved problems in life cycle assessment. Part II: impact assessment and interpretation. *International Journal of LCA 13:374-388.*
- Rousseaux **2005** Rousseaux P. Analyse du Cycle de Vie. *Techniques de l'Ingénieur, 2005, G5500, pp. 1-4.*
- Rouwette et Schuurmans **2001** Rouwette R.R.J.H., Schuurmans, 2001. LCA concrete motorway pavement- An example of the use of JPG LCI data. *Final report for critical review IN 01/18, Belgium, 43p.*
- Santero et al. **2010** Santero N., Masanet E., Horvath A., 2010. Life Cycle Assessment of Pavements: A Critical Review of Existing Litterature and Research. *Portland Cement Association R&D Serial No. SN3119a, 88 p.*
- Sauter **1994** Sauter P., 1994. Environmental Life Cycle Inventories of Energy Systems, Bundesamt für Energiewirtschaft, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland.
- Sayagh **2007** Sayagh S., 2007. Approche multicritère de l'utilisation de matériaux alternatifs dans les chaussées, thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, soutenue le 12 décembre 2007.
- Sayagh et al. **2009** Sayagh S., Ventura A., Hoang T., François D., Jullien A., 2009. Sensitivity of the LCA allocation procedure for BFS recycled into pavement structures. *Resources, Conservation and Recycling, in press.*
- Scott et al. **1993** Scott W.E., van Steenderen R.A., Welch D.I., Health aspects of eutrophication. *National Institute for Water Research (Pretoria)*



[http://docs.watsan.net/Scanned\\_PDF\\_Files/Class\\_Code\\_2\\_Water/203.3-85HE-2022.pdf](http://docs.watsan.net/Scanned_PDF_Files/Class_Code_2_Water/203.3-85HE-2022.pdf), 13 p.

- SETAC **1993** Consoli, F., D. Allen, I. Boustead, J. Fava, W. Franklin, A.A. Jensen, N. de Oude, R. Parrish, D. Postlethwaite, B. Quay, J. Siéguin and B. Vigon, 1993. (Eds.). Guidelines for life cycle assessment. A code of practice. Brussels (Belgium), Society of Environmental Toxicology and Chemistry – Europe and North America.
- SETAC **1994a** *Life-Cycle Impact Assessment Data Quality : a conceptual Framework*, Ed. SETAC Foundation for Environmental Education, Florida, 1994.
- SETAC **1994b** *A technical framework for Life-Cycle Assessment – 2<sup>nd</sup> edition*, Ed. SETAC Foundation for Environmental Education, Florida, 1994.
- SETAC **1996** Udo de Haes H., Heijungs R., Hostetter P., Finnveden G., Jolliet O., Nichols P., Hauschild M., Potting J., White P., Lindeijer E., 1996. Towards a methodology for Life Cycle Impact Assessment, Society of Environmental Toxicology and Chemistry – Europe, Ed. Udo de Haes (Brussels).
- SETRA/LCPC **1994** Conception et dimensionnement des structures de chaussées – guide technique. Ed. LCPC (Paris).
- SETRA/LCPC **1998** Corté J.F., Guidoux Y., De Boissoudy A., Dauzats M., Goyon V., Kobisch R., Leroux C., Odéon H., Sanchez D., 1998. Réseau Routier National – Catalogue des structures types de chaussées neuves. Ed. LCPC (Paris).
- Singhofen et al. **1996** Singhofen A, Hemming C, Weidema B, Grisel L, Bretz R, de Smet B, Russell D., 1996. Life Cycle Inventory Data: Development of a common format. *International Journal of LCA* 1(3):171-178.
- Spadaro **1999**. Spadaro J. 1999. Evaluation des dommages de la pollution de l'air: modélisation, études de sensibilité, et application. *Thèse de l'école des Mines de Paris, décembre 1999*.
- Stripple **2000** Stripple H., 2000. Life cycle inventory of asphalt pavements. *Rapport IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd., Gothenburg, 70 p. and annexe*.
- Stripple **2001** Stripple H., 2001. *Life cycle assessment of road. A pilot study for inventory analysis. 2<sup>nd</sup> revised Edition*. Report from the IVL Swedish Environmental Research Institute, 96 p.
- Tillman et al. **1994** Tillman A.-M., Ekvall T., Baumann H., Rydberg T., 1994. Choice of system boundaries in life cycle assessment, *Journal of Cleaner Production Vol. 2, No. 1, pp. 21-29*.
- Udo de Haes **1996** Udo de Haes H.A. Part I - Discussion of general principles and guidelines for practical use in *Towards a methodology for life cycle impact assessment* Ed. Udo de Haes H.A., published by SETAC Europe.
- van Leest et al. **2008** van Leest A.J., van Hartkamp S.B., Meijer J.P.R., 2008. Decision support model for road pavements based on whole life costing, life cycle assessment and multi-criteria analysis. Report from CROW technology platform, [http://therightenvironment.net/Downloads/ISCP08\\_paper\\_ISCP9026-Decision\\_Support\\_Model.PDF](http://therightenvironment.net/Downloads/ISCP08_paper_ISCP9026-Decision_Support_Model.PDF), consulté en septembre 2010
- Ventura et al. **2008** Ventura A., Monéron P., Jullien A., 2008. Environmental impact of a binding course pavement section, with asphalt recycled at varying rates – use of Life Cycle Methodology, *Journal of Road Materials and Pavement Design, Vol.9 Special Issue EATA 2008, pp. 319-338*.
- Ventura et Jullien **2009** Ventura A., Jullien A., 2009. Life Cycle Assessment applied to road pavements: an analysis of method and results relevancy. Sixth International

Conference on maintenance and rehabilitation of pavements and technological control, July 8-10, Torino (Italy).

Ventura **2010** Ventura A. 2010. Classification of chemicals into emission-based impact categories: first approach for equiprobable and site specific conceptual frames. *International Journal of Life Cycle Assessment*, in press.

WMO **1991** World Meteorological Organization, 1991. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 25 Scientific Assessment of Ozone Depletion.

## **2 Communications sur ECORCE**

Ecoconstruction – un logiciel de référence pour la route, *Magazine Le Moniteur n° 5534 du 18/12/2009*.

Le LCPC met au point un écocomparateur des chaussées routières, *Environnement magazine Hebdo du 01/02/2010, n°44, Technologies, p. 4, 159 mots*.

Jullien A., 2010. Encart « ECORCE, un logiciel global et multi-acteurs », *dossier Cap sur les chaussées de demain, La Gazette/Guide SMCL\_15 novembre 2010, p. 44, 180 mots*.

Ventura A., Dauvergne M., Jullien A., Tamagny P., 2009. ECORCE 1.0, Eco-comparateur routes, construction et entretien, *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, N°876, mai-juin 2009, pp92-96*.

Ventura A., Dauvergne M., Jullien A., Tamagny P., 2010. ECORCE 1.0 Eco-comparateur routes, construction, entretien. Encadré dans le Dossier Infrastructures routières et changement climatique, *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, N°883, mars 2010*.

Ventura A., Jullien A., Tamagny P., Dauvergne M., 2010. ECORCE : a Life Cycle Assessment tool for construction and maintenance of road pavements, *Abstract book of the 20<sup>th</sup> Annual Meeting of the Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) Europe, 23-27 May 2010, Seville (Spain), p. 282*.

Ventura A., Jullien A., Dauvergne M., Tamagny P., 2010. ECORCE 1.0 : a configurable Life Cycle Assessment tool for construction and maintenance of road pavements. *Transport Research Arena (TRA) 7<sup>th</sup>-10<sup>th</sup> June 2010, Brussels (Belgium)*.

# Annexes

## 1 Descriptif des cas étudiés (« chapitre VII Exemples d'applications : études de cas »)

### 1.1 Structures, formules et mise en œuvre des couches de surface (page 72)

Structures	1	2	3	4	5
Couches de Roulement	BBTM <sup>(1)</sup>	BBDr <sup>(2)</sup>	BBSG <sup>(3)</sup> ou BBME <sup>(4)</sup>	BBSG ou BBME	BBSG ou BBME (10 % agrégats)
Appellation					
Épaisseurs	2,5 cm	4 cm	8 cm	6 cm	6 cm
Couches de Liaison	BBSG ou BBME	BBSG ou BBME			
Appellation					
Épaisseurs	6 cm	6 cm			

Tableau 41. Couches de surface

- (1) **BBTM** : Béton Bitumineux Très Mince - Appellation européenne **BBTM 6**.  
 (2) **BBDr** : Béton Bitumineux Drainant - Appellation européenne **BBDr 6**.  
 (3) **BBSG** : Béton Bitumineux Semi Grenu – Appellation européenne **EB 10 roulement** ou **EB 10 liaison**.  
 (4) **BBME** : Béton Bitumineux à Module Élevé - Appellation européenne **EB 10 roulement** ou **EB 10 liaison**.

Techniques	BBTM	BBDr	BBSG / BBME	BBSG agrégats
MVA*	2080 kg/m <sup>3</sup>	1850 kg/m <sup>3</sup>		2300 kg/m <sup>3</sup>
Distance centrale	20 km			
Granulats		92,20%	91,60%	82,10%
Distance carrière	15 km			
Bitume		5,80%	5,50%	5,00%
Distance raffinerie	100 km			
Filler		2,00%		2,90%
Distance filler	150 km			
Agrégats		-		10,00%
Distance stock		-		0 km

Tableau 42. Composition des couches de surface - \* : MVA : Masse Volumique Apparente

### Couche de roulement

<b>Roulement</b>	BBTM	<b>BBDr</b>	<b>BBSG</b>	<b>BBSG</b>	<b>BBSG r</b>
<b>épaisseur</b>	2,5	<b>4 cm</b>	<b>8 cm</b>	<b>6 cm</b>	<b>6 cm</b>
<b>Longueur</b>	4000 m	4000 m	4000 m	4000 m	4000 m
<b>Largeur</b>	7 m	7 m	7 m	7 m	7 m
<b>Distance</b>	20 km	20 km	20 km	20 km	20 km
<b>MVA</b>	2080	<b>1850</b>	<b>2300</b>	<b>2300</b>	<b>2300</b>
Granulats %	92,2	92,2	<b>91,6</b>	<b>91,6</b>	<b>82,1</b>
distance granulats	15 km	15 km	15 km	15 km	15 km
Bitume %	5,8	5,8	<b>5,5</b>	<b>5,5</b>	<b>5</b>
distance bitume	100	100	100	100	100
Agrégats %	-	-	-	-	<b>10</b>
distance agrégats	-	-	-	-	<b>0</b>
Filler %	2	2	<b>2,9</b>	<b>2,9</b>	<b>2,9</b>
distance filler	150	150	150	150	150
Nb jours	1	1	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>
<b>Finisseur (3m/min – 5m/min) (2 – 1)</b>	13,3	<b>16,7</b>	<b>44,4</b>	<b>44,4</b>	<b>44,4</b>
Carburant	15	15	15	15	15
Eau	0	0	0	0	0
Distance	20	20	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>P2 (1)</b>	-	-	<b>19,6</b>	<b>19,6</b>	<b>19,6</b>
Carburant	-	-	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>
Eau	-	-	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
Distance	-	-	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>VT1 (2 – 1)</b>	10,8	<b>14,1</b>	-	-	-
Carburant	12	12	-	-	-
Eau	210	210	-	-	-
Distance	0	0	-	-	-
<b>VT2 (1)</b>	-	-	<b>19,2</b>	<b>19,2</b>	<b>19,2</b>
Carburant	-	-	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>12</b>
Eau	-	-	<b>210</b>	<b>210</b>	<b>210</b>
Distance	-	-	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Transport outils / personnel (2)</b>	1	1	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>
Carburant	8	8	8	8	8
Eau	0	0	0	0	0
Distance	40	40	<b>120</b>	<b>120</b>	<b>120</b>
<b>Citerne (1)</b>	1	1	1	1	1
Carburant	20	20	20	20	20
Eau	0	0	0	0	0
Distance	0	0	0	0	0

### Couche d'accrochage

<b>Formulation</b>	ECR 65	ECR 65	ECR 65	ECR 65	ECR 65
<b>épaisseur</b>	0	0	0	0	0
<b>Longueur</b>	4000 m	4000 m	4000 m	4000 m	4000 m
<b>Largeur</b>	7,2 m	7,2 m	7,2 m	7,2 m	7,2 m
<b>Emulsion (couche 1)</b>	0,35	0,35	<b>0,25</b>	<b>0,25</b>	<b>0,25</b>
<b>Distance</b>	100	100	100	100	100
Bitume	65	65	65	65	65
distance bitume	100	100	100	100	100
Acide	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
distance acide	51	51	51	51	51
Dope	2	2	2	2	2
distance dope	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Emulsifiant	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
distance emulsifiant	36	36	36	36	36
Epaississant	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
distance epaississant	43	43	43	43	43
Fluxant	1	1	1	1	1
distance fluxant	71	71	71	71	71
Eau	31,65	31,65	31,65	31,65	31,65
distance eau	0	0	0	0	0
<b>Epandeuse à liant</b>	1	1	1	1	1
Carburant	10	10	10	10	10
Eau	0	0	0	0	0
Distance	0	0	0	0	0

### Couche de liaison

<b>Liaison</b>	BBSG	BBSG	-	-	-
<b>épaisseur</b>	6 cm	6 cm	-	-	-
<b>Longueur</b>	4000 m	4000 m	-	-	-
<b>Largeur</b>	7,2 m	7,2 m	-	-	-
<b>Distance</b>	20 km	20 km	-	-	-
<b>MVA</b>	2300	2300	-	-	-
Granulats %	91,6	91,6	-	-	-
distance granulats	15 km	15 km	-	-	-
Bitume %	5,5	5,5	-	-	-
distance bitume	100	100	-	-	-
Filler %	2,9	2,9	-	-	-
distance filler	150	150	-	-	-
Nb jours	3	3	-	-	-
<b>Finisseur (3m/min – 5m/min) (2 – 1)</b>	44,4	44,4	-	-	-
Carburant	15	15	-	-	-
Eau	0	0	-	-	-
Distance	0	0	-	-	-
<b>P2 (1)</b>	19,6	19,6	-	-	-
Carburant	12	12	-	-	-
Eau	0	0	-	-	-
Distance	0	0	-	-	-
<b>VT2 (1)</b>	19,2	19,2	-	-	-
Carburant	12	12	-	-	-
Eau	210	210	-	-	-
Distance	0	0	-	-	-
<b>Transport outils / personnel (2)</b>	3	3	-	-	-

Tableau 43. Descriptif de la mise en œuvre des couches de surface

## 1.2 Structures, formules et mise en œuvre des couches d'assises (page 73)

Structures	A	B	C	D	E	F
	bitumineuses épaisses				semi-rigide	mixte
Couche de surface	BBSG 6 cm					
Couche de base	GB (1) 9 cm	GB 9 cm ≈ 30 % agrégats	EME (2) 12 cm	EME 12 cm ≈ 30 % agrégats	GC (3) 30 cm	GB 12 cm
Couche de fondation	GB 9 cm	GB 9 cm ≈ 30 % agrégats				GC 18 cm
Couche de forme *	PF 3 – 120 MPa					

**Tableau 44. Cas de structures étudiés avec couches d'assises**

\* : non pris en compte dans le calcul ECORCE, GC : Grave Ciment

(1) GB : Grave Bitume – Appellation européenne EB 14 base et EB 14 fondation (EB 14 assise)

(2) EME : Enrobés à Module Élevé – Appellation européenne EB 14 base et EB 14 fondation (EB 14 assise)

Techniques	GB	GB agrégats	EME	EME agrégats	GC
MVA*	2327 kg/m <sup>3</sup>		2347 kg/m <sup>3</sup>		2396 kg/m <sup>3</sup>
Distance centrale	20 km				
Granulats	92,70%	65,60%	91,60%	64,60%	87,90%
Distance carrière	15 km				
Liant**	4,40%	2,90%	5,50%	3,90%	5,60%
Distance raffinerie	100 km				***
Distance cimenterie					100 km
Eau					6,50%
Filler	2,90%				-
Distance filler	150 km				-
Agrégats	-	28,60%	-	28,60%	-
Distance stock	-	0 km	-	0 km	-

**Tableau 45. Formulations étudiées**

: MVA : Masse Volumique Apparente, \*\* Les liants représentent la part de bitume ou de liant hydraulique. Pour ce dernier, un pourcentage de clinker de 20 % a été retenu, \*\*\* Suivant les structures utilisées et le trafic en présence, nous pouvons être amenés dans ce matériau à considérer la préfissuration et l'enduit de protection

<b>Couche de base</b>						
Base	GB	GB r	-	-	-	GB
épaisseur	9 cm	9 cm	-	-	-	12 cm
Longueur	4000 m	4000 m	-	-	-	4000 m
Largeur	7,2 m	7,2 m	-	-	-	7,2 m
Distance	20 km	20 km	-	-	-	20 km
MVA	2327	2327	-	-	-	2327
Granulats %	92,7	65,6	-	-	-	92,7
distance granulats	15 km	15 km	-	-	-	15 km
Bitume %	4,4	2,9	-	-	-	4,4
distance bitume	100	100	-	-	-	100
Agrégats %	-	28,6	-	-	-	-
distance agrégats	-	0	-	-	-	-
Filler %	2,9	0	-	-	-	2,9
distance filler	150	150	-	-	-	150
Nb jours	4	4	-	-	-	5
Finisseur (3m/min – 5m/min) (2 – 1)	66,7	66,7	-	-	-	74,1
Carburant	15	15	-	-	-	15
Eau	0	0	-	-	-	0
Distance	0	0	-	-	-	40
P2 (1)	63,2	63,2	-	-	-	70,2
Carburant	12	12	-	-	-	12
Eau	0	0	-	-	-	0
Distance	0	0	-	-	-	0
V12 (1)	29,5	29,5	-	-	-	34,2
Carburant	12	12	-	-	-	12
Eau	210	210	-	-	-	210
Distance	0	0	-	-	-	20
Transport outils / personnel (2)	4	4	-	-	-	5
Carburant	8	8	-	-	-	8
Eau	0	0	-	-	-	0
Distance	160	160	-	-	-	200
Citerne (1)	1	1	-	-	-	1
Carburant	20	20	-	-	-	20
Eau	0	0	-	-	-	0
Distance	0	0	-	-	-	0
<b>Couche d'accrochage</b>						
Fomulation	ECR 65	ECR 65	-	-	-	ESU
épaisseur	0	0	-	-	-	0,2
Longueur	4000 m	4000 m	-	-	-	4000 m
Largeur	7,4 m	7,4 m	-	-	-	7,4 m
Emulsion (couche 1)	0,25	0,25	-	-	-	1,4 Kg/m <sup>2</sup>
Distance	100	100	-	-	-	100
Bitume	65	65	-	-	-	65
distance bitume	100	100	-	-	-	100
Acide	0,1	0,1	-	-	-	0,1
distance acide	51	51	-	-	-	51
Dope	2	2	-	-	-	2
distance dope	2,5	2,5	-	-	-	2,5
Emulsifiant	0,2	0,2	-	-	-	0,2
distance emulsifiant	36	36	-	-	-	36
Epaississant	0,05	0,05	-	-	-	0,05
distance epaississant	43	43	-	-	-	43
Fluxant	1	1	-	-	-	1
distance fluxant	71	71	-	-	-	71
Eau	31,65	31,65	-	-	-	31,65
distance eau	0	0	-	-	-	0
Gravillons couche 1	-	-	-	-	-	7 l/m <sup>2</sup>
jet	-	-	-	-	-	0,05
MVA gravillon	-	-	-	-	-	1700
distance granulats	-	-	-	-	-	15 km
épanduse à liant	1	1	-	-	-	3
Carburant	10	10	-	-	-	10
Eau	0	0	-	-	-	0
Distance	20	20	-	-	-	20
Camion benne	-	-	-	-	-	5
Carburant	-	-	-	-	-	30
Eau	-	-	-	-	-	0
Distance	-	-	-	-	-	20
Batayeuse	-	-	-	-	-	1
Carburant	-	-	-	-	-	30
Eau	-	-	-	-	-	0
Distance	-	-	-	-	-	20
<b>Couche de fondation</b>						
Fondation	GB	GB r	EME	EME r	GC	GC
épaisseur	9 cm	9 cm	12 cm	12 cm	30 cm	18 cm
Longueur	4000 m	4000 m	4000 m	4000 m	4000 m	4000 m
Largeur	7,4 m	7,4 m	7,2 m	7,2 m	7,4 m	7,4 m
Distance	20 km	20 km	20 km	20 km	20 km	20 km
MVA	2327	2327	2347	2347	2396	2396
Granulats %	92,7	65,6	91,6	64,6	87,9	87,9
distance granulats	15 km	15 km	15 km	15 km	15 km	15 km
Bitume %	4,4	2,9	5,5	4,0	-	-
distance bitume	100	100	400	400	-	-
Agrégats %	-	28,6	-	28,6	-	-
distance agrégats	-	0	-	0	-	-
Filler %	2,9	0	2,9	2,9	-	-
distance filler	150	150	150	150	-	-
Eau %	-	-	-	-	6,5	6,5
distance eau	-	-	-	-	0	0
LH %	-	-	-	-	5,6	5,6
% clinker	-	-	-	-	20	20
distance LH	-	-	-	-	100	100
Nb jours	4	4	5	5	6	5
Finisseur (3m/min – 5m/min) (2 – 1)	66,7	66,7	74,1	74,1	-	-
Carburant	15	15	15	15	-	-
Eau	0	0	0	0	-	-
Distance	40	40	40	40	-	-
Niveleuse	-	-	-	-	34,4	35,3
Carburant	-	-	-	-	12	12
Eau	-	-	-	-	0	0
Distance	-	-	-	-	20	20
P1 (2)	-	-	-	-	96,2	98,6
Carburant	-	-	-	-	12	12
Eau	-	-	-	-	0	0
Distance	-	-	-	-	40	40
P2 (1)	63,2	63,2	33,8	33,8	-	-
Carburant	12	12	12	12	-	-
Eau	0	0	0	0	-	-
Distance	40	40	20	20	-	-
V11 (2 – 1)	-	-	33,1	33,1	79,6	48,4
Carburant	-	-	12	12	12	12
Eau	-	-	210	210	0	0
Distance	-	-	20	20	40	40
V12 (1)	29,5	29,5	-	-	-	-
Carburant	12	12	-	-	-	-
Eau	210	210	-	-	-	-
Distance	20	20	-	-	-	-
Transport outils / personnel (2)	4	4	5	5	6	5
Carburant	8	8	8	8	8	8
Eau	0	0	0	0	0	0
Distance	160	160	200	200	240	200
Citerne (1)	1	1	1	1	3	3
Carburant	20	20	20	20	20	20
Eau	0	0	0	0	0	0
Distance	20	20	20	20	20	20
<b>Préfixsuration</b>						
Fomulation	-	-	-	-	Préfixsuration	Préfixsuration
épaisseur	-	-	-	-	0	0
Longueur	-	-	-	-	9600	9860
Largeur	-	-	-	-	0,2	0,15
Emulsion (couche 1)	-	-	-	-	1,85	1,85
Distance	-	-	-	-	100	100
Bitume	-	-	-	-	65	65
distance bitume	-	-	-	-	100	100
Acide	-	-	-	-	0,1	0,1
distance acide	-	-	-	-	51	51
Dope	-	-	-	-	2	2
distance dope	-	-	-	-	2,5	2,5
Emulsifiant	-	-	-	-	0,2	0,2
distance emulsifiant	-	-	-	-	36	36
Epaississant	-	-	-	-	0,05	0,05
distance epaississant	-	-	-	-	43	43
Fluxant	-	-	-	-	1	1
distance fluxant	-	-	-	-	71	71

Tableau 46. Descriptif de la mise en œuvre des couches d'assises

### 1.3 Structure, formules et mise en œuvre de la grave émulsion de reprofilage (page 78)

N° couche	Nom du matériau	Type de couche	Epaisseur (cm)	Longueur (km)	Largeur (m)
1	Accrochage	Couche d'accrochage	-	1000	5,6
2	GE reprofilage	/	2,3	1000	5,6
3	Enduit	Enduit	-	1000	5,6

\*L'épaisseur utilisée dans la modélisation est une moyenne du reprofilage effectif allant de 5 cm en rive à 0 en axe de chaussée

Tableau 47.GE de reprofilage - description de la structure étudiée

N° couche	Nom du matériau	Nom du composant	Dosage / pourcentage / masse	Distance d'approvisionnement (km)
1	Accrochage	Emulsion 1	0,4 kg/m <sup>2</sup>	26
	Emulsion 1	Bitume	69%	150
Eau		31%	0	
2	GE reprofilage	Emulsion 2	6,5%	0
		Eau	6,7%	0
		Granulats	86,8%	50
	Emulsion 2	Bitume	69%	150
		Eau	31%	0
3	Enduit	6/10	8,6 L/m <sup>2</sup>	73
		Emulsion 3	1,5 kg/m <sup>2</sup>	26
		4/6	6,1 L/m <sup>2</sup>	73
		Emulsion 3	1,5 kg/m <sup>2</sup>	26
		2/4	3,6 L/m <sup>2</sup>	73
	Emulsion 3	Bitume	69%	150
		Eau	31%	0

Tableau 48.GE de reprofilage - description des formules

N° couche	Engin	D/C*	Durée (h)	Conso. gasoil (L/h)	Conso. eau (L/h)	Distance (km)
1	Epandeuse	C	0H30	12,5		23
2	Niveleuse		13H	5,8		23
	compacteur (cylindre)		8H	6,7	100	23
	compacteur (pneu)		13H	8,5	100	23
	3		Gravillonneur	6H	10,4	0
Gravillonneur			3H30	10,4	0	23
Compacteur mixte			6H	5,1	0	23
Répandeuse			1H30	12,7	0	23
Répandeuse	1H30		12,7	0	23	

\* C : construction / D : déconstruction

Tableau 49.GE de reprofilage – déconstruction et mise en œuvre

### 1.4 Structure, formules et mise en œuvre du retraitement à l'émulsion (page 78)

N° couche	Nom du matériau	Type de couche	Epaisseur (cm)	Longueur (m)	Largeur (m)
1	Retraitement	/	6	1000	5,6
2	Enduit	Enduit	-*	1000	5,6

\*Dans ECORCE, l'entité élémentaire considérée est la couche de matériau, définie par ses caractéristiques géométriques (épaisseur, longueur, largeur). Dans le cas d'un répandage de liant, l'épaisseur réelle n'intervient pas dans le calcul, seul le dosage en kg/m<sup>2</sup> est pris en compte.

**Tableau 50. Retraitement à l'émulsion - description de la structure étudiée**

N° couche	Nom du matériau	Nom du composant	Dosage / pourcentage	Distance d'approvisionnement (km)
1	Retraitement	Emulsion 1	3%	110
		Agrégats	91%	0
		Eau d'apport	6%	5
	Emulsion 1	Bitume	45%	150
		Eau	55%	0
2	Enduit	Emulsion 2	1,3 kg/m <sup>2</sup>	110
		6/10	8L/m <sup>2</sup>	2,4
		Emulsion 2	1,45 kg/m <sup>2</sup>	110
		4/6	5L/m <sup>2</sup>	2,4
	Emulsion 2	Bitume	69%	150
		Eau	31%	0

**Tableau 51. Retraitement à l'émulsion- description des formules**

N° couche	Engin	D/C	Durée (h)	Conso. gasoil (L/h)	Conso. eau (L/h)	Distance (km)
1	Fraiseuse	D	9H30	57,2	0	150
	Tracteur eau		9H30	9,6	0	91
	Tracteur émulsion		9H30	5,1	0	41
	Tandem vibrant	C	14H40	8,6	100	15
	Compacteur à pneu		13H00	6,5	100	5
2	Compacteur mixte	C	3H55	5,1	0	15
	Gravillonneur		6H	10,5	0	30
	Epandeuse		3H	12,5	0	30

**Tableau 52. Retraitement à l'émulsion- déconstruction et mise en œuvre**

## 1.5 Structure, formules et mise en œuvre du rechargement GB (page 80)

N° couche	Nom du matériau	Type de couche	Epaisseur (cm)	Longueur (m)	Largeur (m)
1	BBSG	Matériau bitumineux	6	2805	7
2	Accrochage	Couche d'accrochage	0	8167	8
3	GB	Matériau bitumineux	12	11127	7
4	GNT	Matériau non traitée	13	6080	1.5

**Tableau 53. Rechargement GB - description de la structure étudiée**

N° couche	Nom du matériau	Nom du composant	Dosage / pourcentage / masse	Distance d'approvisionnement (km)
1	BBSG	Bitume	5.45 %	375
		Granulats	94.55 %	2
2	Accrochage	Emulsion de bitume	0.4 kg/m <sup>2</sup>	250
	Emulsion	Bitume	69%	185
		Eau	31%	0
3	GB	Bitume d'apport	4.6 %	375
		Granulats	95.4 %	2
4	GNT	Granulats	94%	2
		Eau	6%	0
Toutes	Enrobé			30

**Tableau 54. Rechargement GB - description des formules**



Nom du matériau	Engin	D/C	Durée (h)	Conso. Gasoil (L/h)	Conso. eau (L/h)	Distance d'acheminement (km)
BBSG	Finisseur	C	40	15	0	35
	Compacteur	C	40	7	200	35
	Compacteur	C	40	12	220	35
	Compacteur	C	40	6	200	35
	Compacteur	C	40	5 ?	100	35
GB	Finisseur	C	24	15	0	35
	Compacteur	C	24	7	200	35
	Compacteur	C	24	12	220	35
	Compacteur	C	24	6	200	35
	Compacteur	C	24	5 ?	100	35
Accrochage	Répandeuse	C	3	12	0	35
GNT	Gravillonneur	C	11	10	0	35
	Compacteur	C	11	7	200	35

**Tableau 55.Rechargement GB – déconstruction et mise en œuvre**

## 1.6 Structure, formules et mise en œuvre du retraitement en place au liant hydraulique (page 80)

N° couche	Nom du matériau	Type de couche	Epaisseur (cm)	Longueur (m)	Largeur (m)
1	Retraitement	Matériau hydraulique	30	4 500	6
2	Enduit	Enduit bitumineux	-	4 500	6
3	Accrochage	Couche d'accrochage	-	4 500	6
4	BBSG	Enrobé bitumineux	5	5 227	8
5	GNT	Matériau hydraulique	6,5	6 080	3

**Tableau 56.Retraitement en place au liant hydraulique - description de la structure étudiée**

N° couche	Nom du matériau	Nom du composant	Dosage / pourcentage / masse	Distance d'approvisionnement (km)
1	Retraitement	LHR	3,8%	750
		Eau	4,7%	10
		agrégats	91,5%	0
2	Enduit	Emulsion	1 kg/m <sup>2</sup>	250
		4/6	7 L/m <sup>2</sup>	2
	Emulsion	Bitume	69%	185
		Eau	31%	0
3	Accrochage	Emulsion	0,4 kg/m <sup>2</sup>	250
	Emulsion	Bitume	69%	185
		Eau	31%	0
4	BBSG	Bitume	5,45 %	375
		Granulat	94,55 %	2
5	GNT	Granulats	94%	2
		Eau	6%	0

**Tableau 57.Retraitement en place au liant hydraulique - description des formules**

Nom du matériau	Engin	D/C*	Durée (h)	Conso. gasoil (L/h)	Conso. eau (L/h)	Distance (km)
Retraitement	Raboteuse	D	20	47	1 500	70
	Niveleuse	D	3	8	0	75
	Fraiseuse / Raboteuse	C	88	72	0	600
	Epandeuse de liant	C	88	10	0	600

	Niveleuse	C	88	8	0	75
	Compacteur	C	88	5	200	75
	Compacteur	C	88	5	100	75
	Compacteur	C	88	5	100	75
Enduit	Gravillonneur	C	11	10	0	35
	Epandeuse	C	11	12	0	35
Accro	Epandeuse	C	3	12	0	35
BBSG	Finisseur	C	40	15	0	35
	Compacteur	C	40	7	200	35
	Compacteur	C	40	12	220	35
	Compacteur	C	40	6	200	35
	Compacteur	C	40	5	100	35
GNT	Gravillonneur	C	11	10	0	35
	Compacteur	C	11	7	200	35

*D/C : phases de déconstruction ou de construction*

**Tableau 58. Retraitement en place au liant hydraulique – déconstruction et mise en œuvre**

## 1.7 Structure, formules et mise en œuvre d'une structure mixte (page 82)

	GTLH	GB	BB
<b>épaisseur cm</b>	20	12	8
<b>Longueur m</b>	1000	1000	1000
<b>Largeur m</b>	8,3	7,9	7,5
<b>Distance Chantier /centrale</b>	40	40	40
<b>MVA</b>	2350	2400	2350
<b>Granulats %</b>	94 / 91,5 / 90,5 / 89	95,7	93,7
distance carrière/centrale( km )	10	50	100
<b>Bitume %</b>		4,3	5,3
Distance raffinerie /centrale (km)		200	200
<b>Filler %</b>		0	1
Distance carrière/centrale ( km)	-	-	200
<b>Eau %</b>	5	-	-
distance eau km	0	-	-
<b>LH %</b>	1 / 3,5 / 4,5 / 6	-	-
% clinker	/ 21 / 35 / 75	-	-
Distance cimenterie/centrale(km)	150	-	=

**Tableau 59. Description de la structure mixte et formulations**

	GTLH	GB	BB
<b>Distance centrale / chantier km</b>	40	40	40
<b>Finisseur (h)</b>		17,5	17,5
Carburant ( l / h)		15	15
Distance acheminement km		40	40
<b>Niveleuse (h)</b>	12		-
Carburant ( l / h)	12		-
Distance acheminement km	40		-
<b>P1 (h)</b>		16,6	16,6
Carburant ( l / h)		12	12
Distance acheminement km		40	40
<b>P2 (h)</b>	6,3		
Carburant ( l / h)	12		
Eau	40		
Distance acheminement km		40	40
<b>VT2 (h)</b>	5,3	8,2	8,2
Carburant ( l / h)	12	12	12
Eau		210	210
Distance acheminement km	0	0	0
<b>Transport outils / personnel (h)</b>	1	1	1
Carburant ( l / h)	8	8	8
Distance acheminement km	40	40	40
<b>Epandeuse liant (h)</b>	1	1	1
Carburant ( l / h)	12	12	12
Distance acheminement km	50	50	50

*Tableau 60. Mise en œuvre de la structure mixte*

## 1.8 Structure, formules et mise en œuvre d'une structure semi-rigide (page 82)

	GTLH	BB
<b>épaisseur cm</b>	32	8
<b>Longueur m</b>	1000	1000
<b>Largeur m</b>	8,1	7,5
<b>Distance Chantier /centrale</b>	40	40
<b>MVA</b>	2350	2350
<b>Granulats %</b>	94 / 91,5 / 90,5 / 89	93,7
distance carrière/centrale( km )	10	100
<b>Bitume %</b>		5,3
Distance raffinerie /centrale ( km)		200
<b>Filler %</b>		1
Distance carrière/centrale ( km)	-	200
<b>Eau %</b>	5	-
distance eau km	0	-
<b>LH %</b>	1 / 3,5 / 4,5 / 6	-
% clinker	/ 21 / 35 / 75	-
Distance cimenterie/centrale(km)	150	=

*Tableau 61. Description de la structure semi-rigide et formulations*

	<b>GTLH</b>	<b>BB</b>
<b>Distance centrale / chantier km</b>	40	40
<b>Finisseur (h)</b>		17,5
Carburant ( l/h)		15
Distance acheminement km		40
<b>Niveleuse (h)</b>	12H	-
Carburant ( l/h)	12	-
Distance acheminement km	40	-
<b>P1 (h)</b>	-	16,6
Carburant ( l/h)	-	12
Distance acheminement km	-	40
<b>P2 (h)</b>	10	
Carburant ( l/h)	12	
Eau	0	
Distance acheminement km	40	
<b>VT2 (h)</b>	8	8,2
Carburant ( l/h)	12	12
Eau		210
Distance acheminement km	20	20
<b>Transport outils / personnel (h)</b>	1	1
Carburant ( l/h)	8	8
Distance acheminement km	40	40
<b>Epandeuse liant</b>	1	1
Carburant ( l/h)	12	12
Distance acheminement km	50	50

*Tableau 62. Mise en œuvre de la structure semi-rigide*

## 1.9 Structure, formules et mise en œuvre d'une structure souple (page 82)

	<b>GB</b>	<b>BB</b>
<b>épaisseur cm</b>	21	8
<b>Longueur m</b>	1000	1000
<b>Largeur m</b>	8,1	7,5
<b>Distance Chantier /centrale</b>	40	40
<b>MVA</b>	2400	2350
<b>Granulats %</b>	95,7	93,7
distance carrière/centrale( km )	50	100
<b>Bitume %</b>	4,3	5,3
Distance raffinerie /centrale (km)	200	200
<b>Filler %</b>	0	1
Distance carrière/centrale ( km)	-	200

*Tableau 63. Description de la structure bitumineuse et formulations*

	<b>GB</b>	<b>BB</b>
<b>Distance centrale / chantier km</b>	40	40
<b>Finisseur (h)</b>	35	17,5
Carburant ( l/h)	15	15
Distance acheminement km	40	40
<b>Niveleuse</b>		-
Carburant ( l/h)		-
Distance acheminement km		-
<b>P1 (2)</b>	33,2	16,6
Carburant ( l/h)	12	12
Distance acheminement km	40	40
<b>P2 (1)</b>		
Carburant ( l/h)		
Eau		
Distance acheminement km	40	40
<b>VT2 (1)</b>	16,4	8,2
Carburant ( l/h)	12	12
Eau	210	210
Distance acheminement km	0	0
<b>Transport outils / personnel (2)</b>	2	1
Carburant ( l/h)	8	8
Distance acheminement km	40	40
<b>Epandeuse liant</b>	1	1
Carburant ( l/h)	12	12
Distance acheminement km	50	50

**Tableau 64. Mise en œuvre de la structure bitumineuse**

## 2 Descriptif détaillé des résultats (« chapitre VII Exemples d'applications : études de cas »)

### 2.1 Résultats pour les couches de surface (page 72)

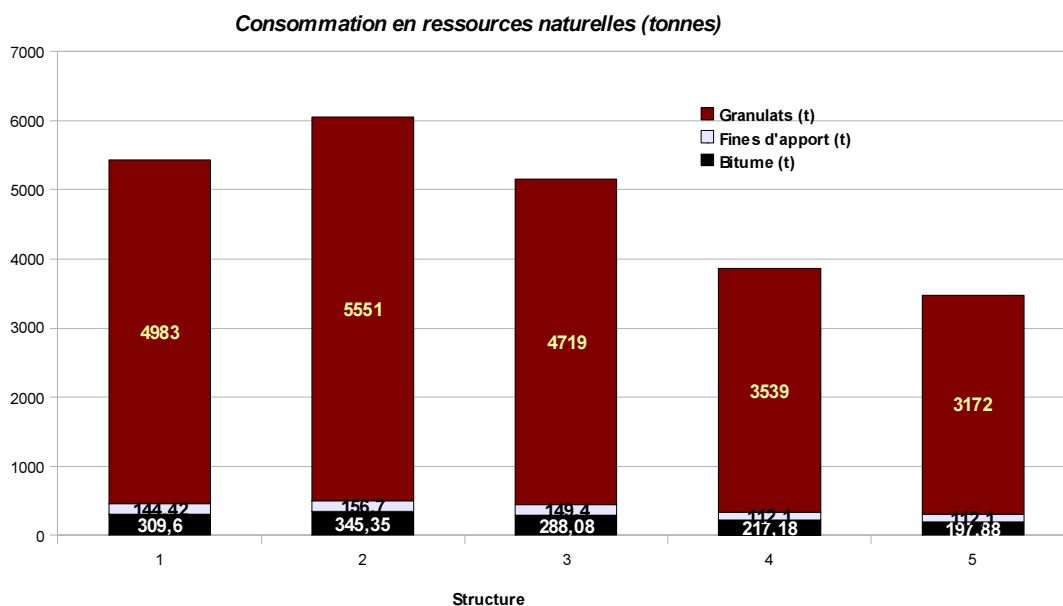


Figure 20. Consommations en ressources naturelles par couche de roulement

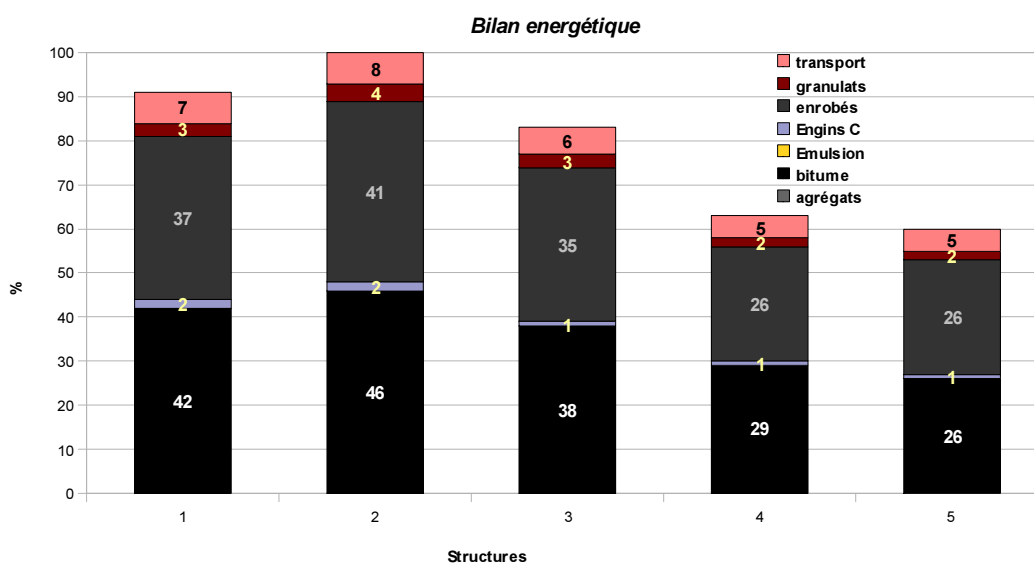
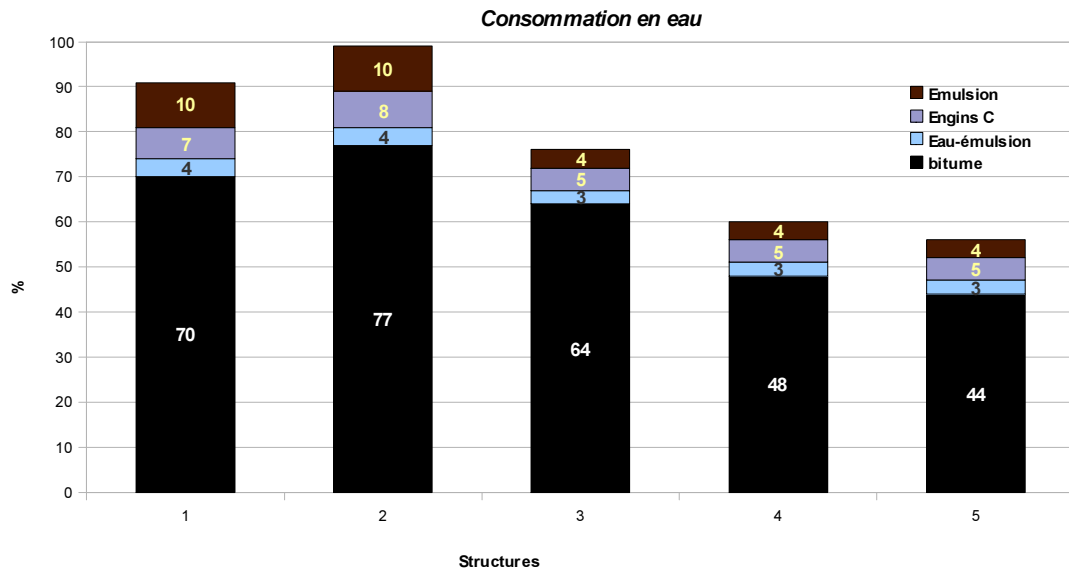
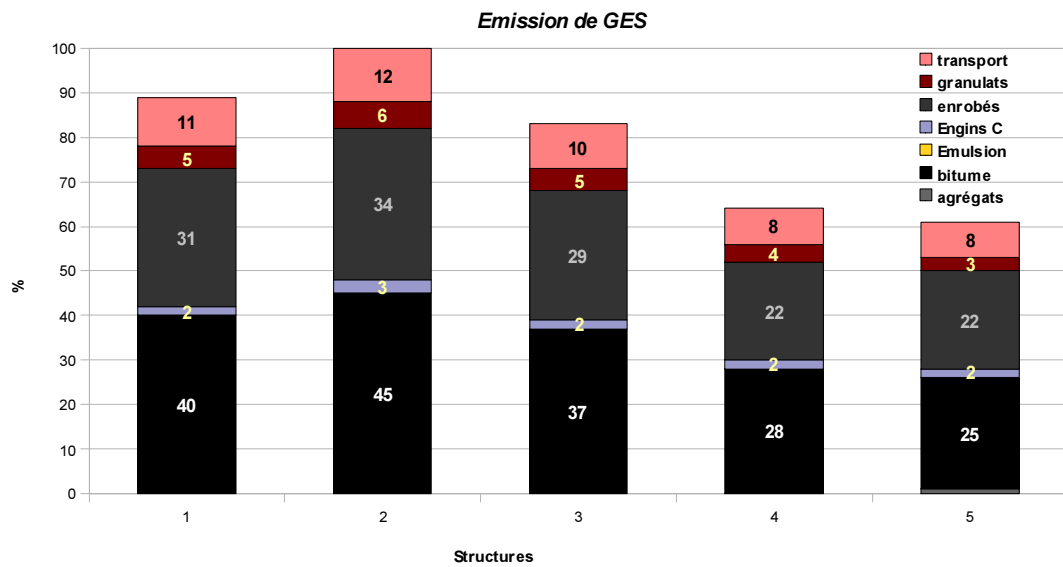


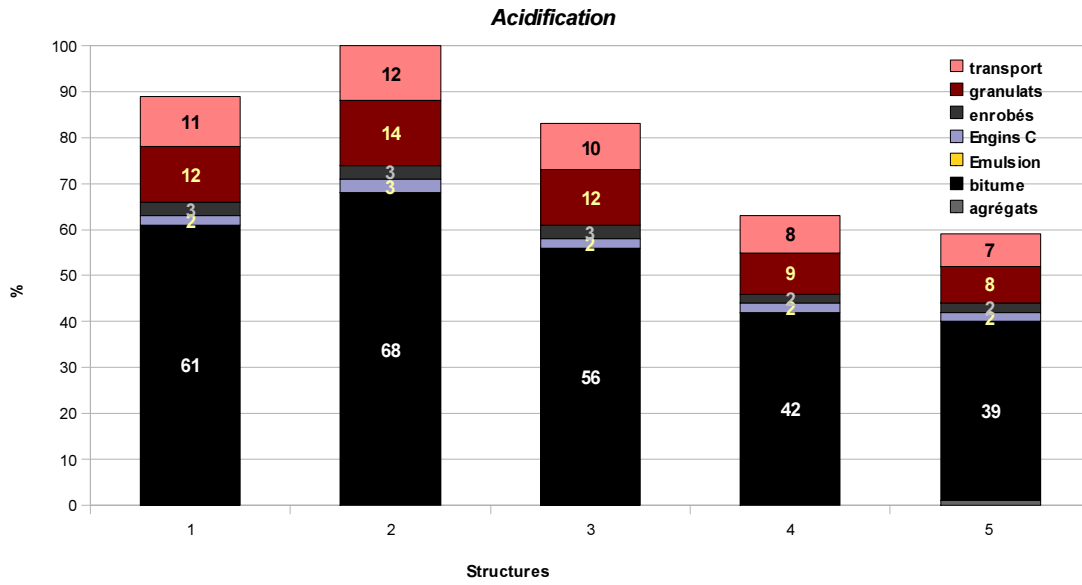
Figure 21. Bilan énergétique par couche de roulement  
(100% = 3 704 304 MJ)



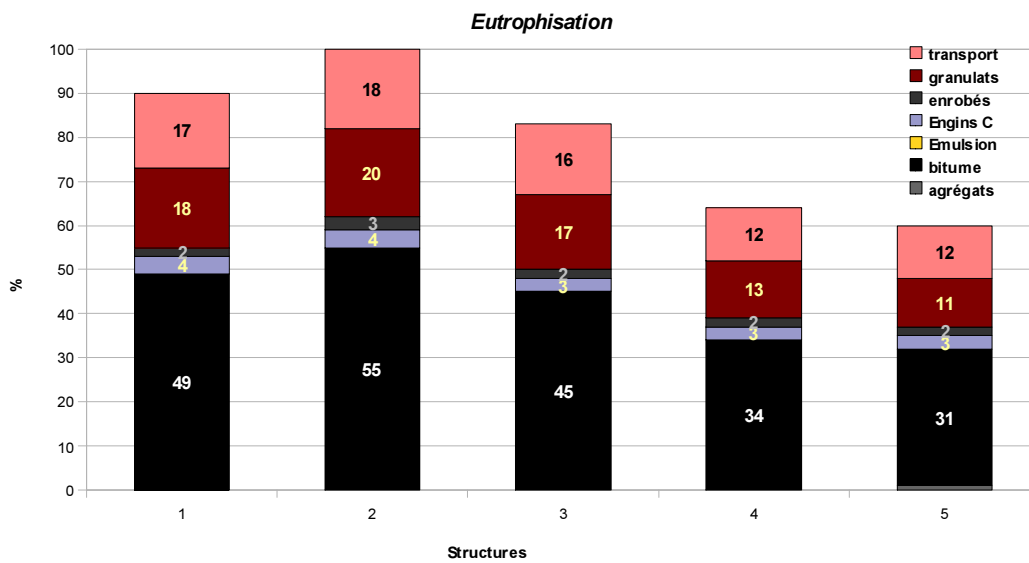
**Figure 22. Consommation en eau par couche de roulement  
(100% = 84,4 m<sup>3</sup>)**



**Figure 23. Emissions de gaz à effet de serre par couche de roulement  
(100% = 172 812 kg éq. CO<sub>2</sub>)**

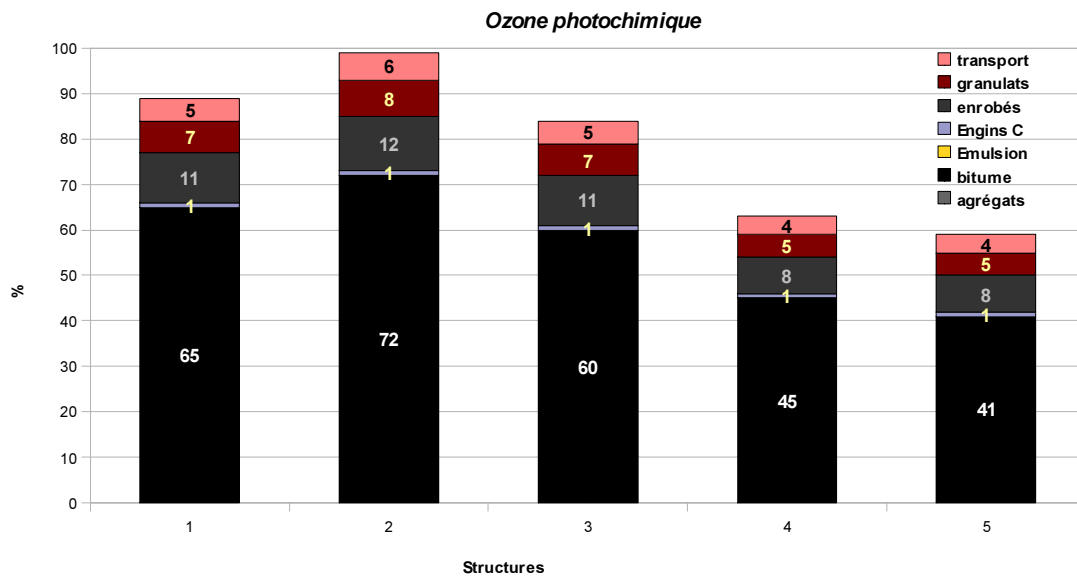


**Figure 24. Acidification par couche de roulement  
(100% = 489,6 kg éq. SO<sub>2</sub>)**

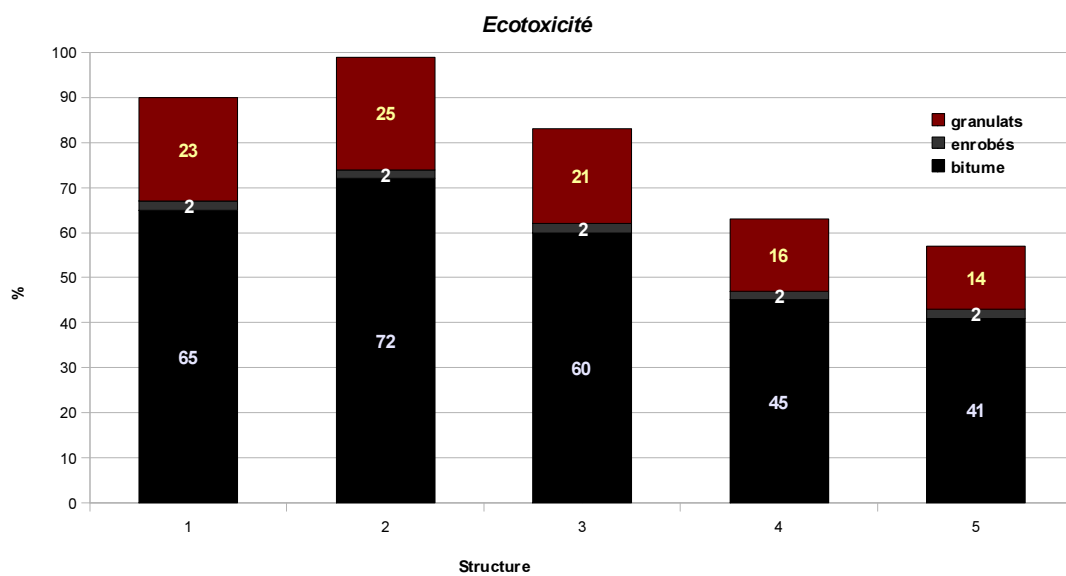


**Figure 25. Eutrophisation par couche de roulement  
(100% = 30,3 kg éq. PO<sub>4</sub>)**

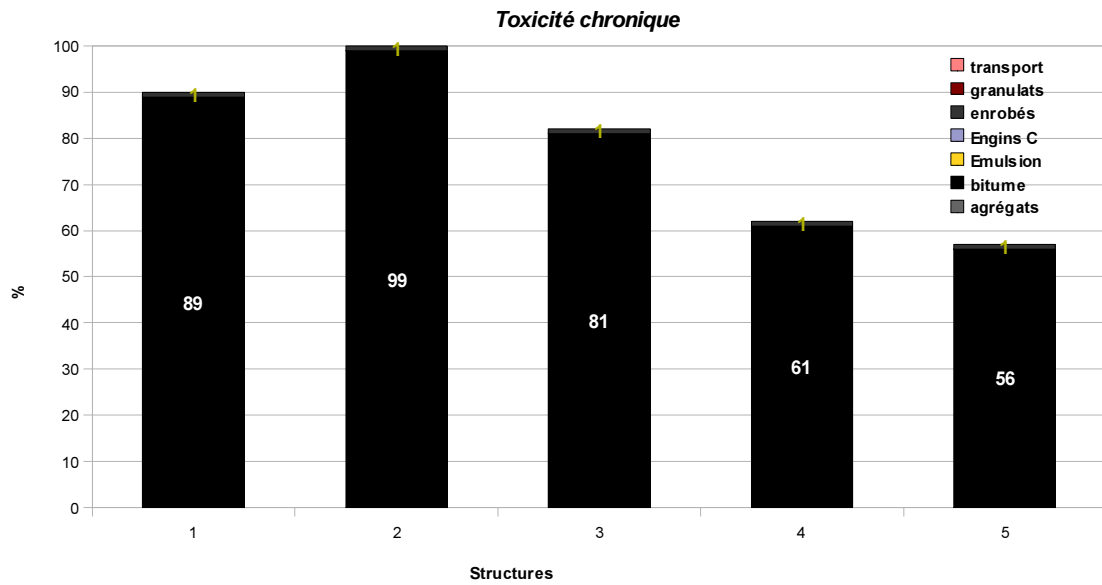




**Figure 26. Ozone photochimique par couche de roulement  
(100% = 251 kg éq. éthylène)**

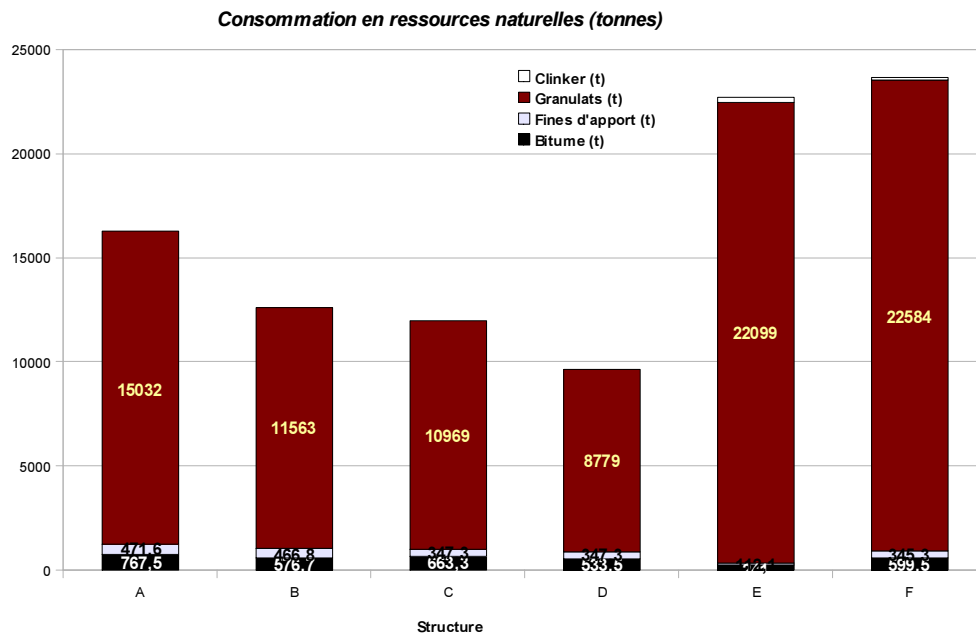


**Figure 27. Potentiel écotoxique par couche de roulement  
(100% = 31 775 kg éq. 1,4DCB)**

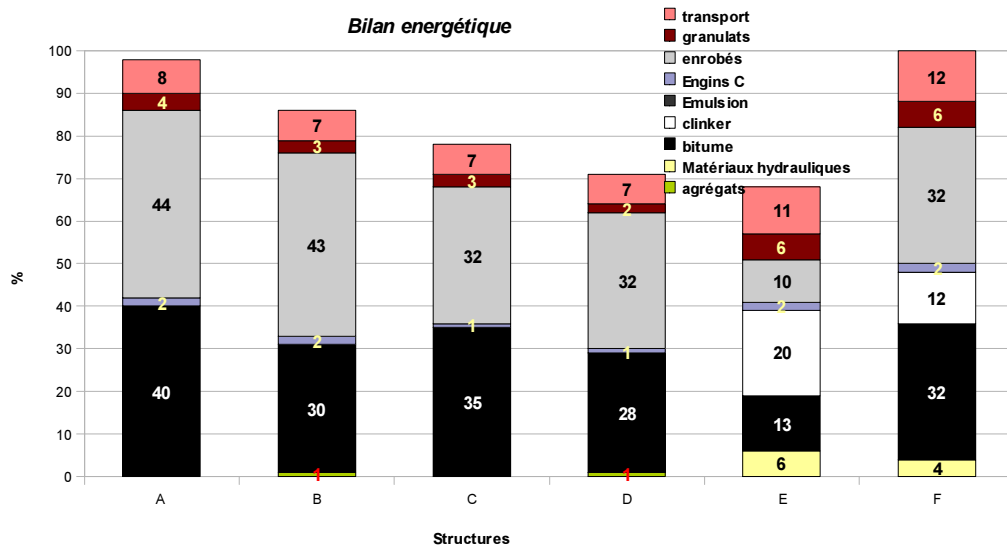


**Figure 28. Potentiel Toxique par couche de roulement  
(100% = 1 761 712 kg éq. 1,4DCB)**

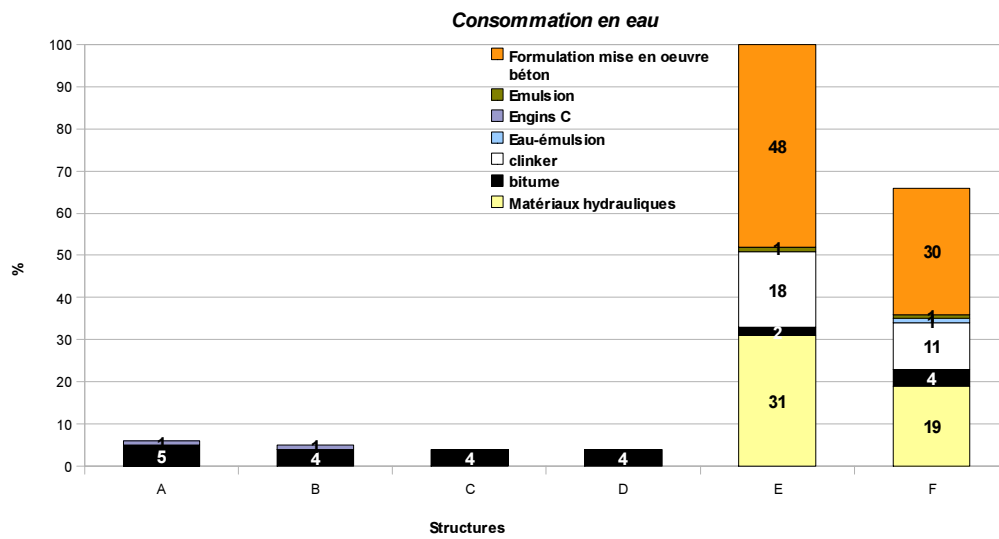
## 2.2 Résultats pour les couches d'assises (page 73)



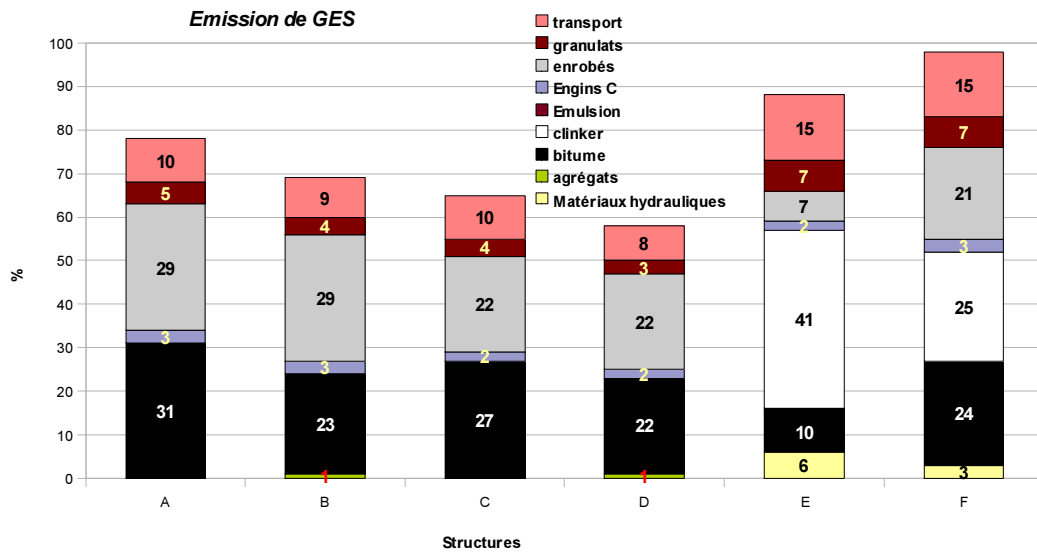
**Figure 29. Consommations en ressources naturelles sur structure globale avec couche d'assise**



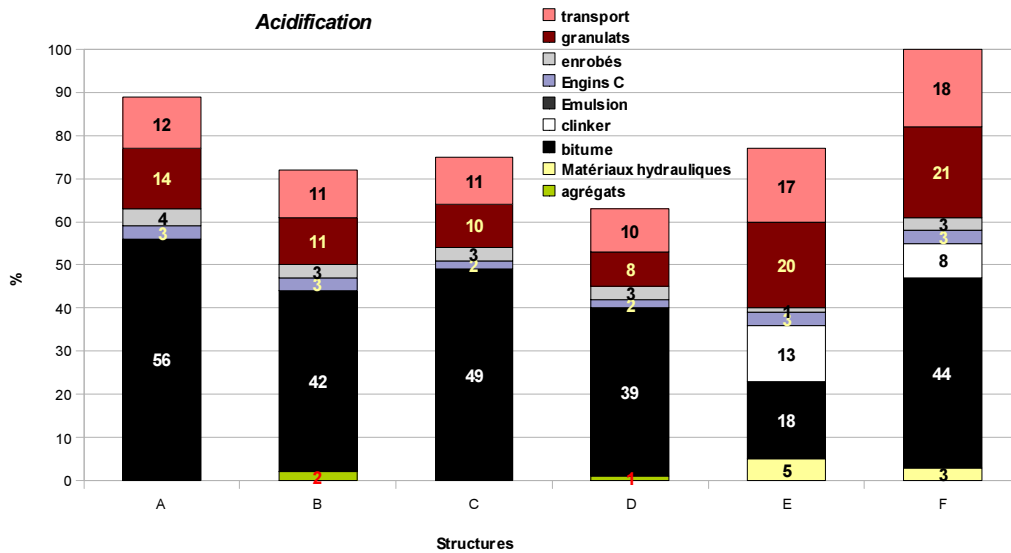
**Figure 30. Bilan énergétique sur structure globale avec couche d'assise  
(100% = 9 298 476 MJ)**



**Figure 31. Consommation en eau sur structure globale avec couche d'assise  
(100% = 2 794 m<sup>3</sup>)**



**Figure 32. Emissions de gaz à effet de serre sur structure globale avec couche d'assise  
(100% = 545 718 kg éq. CO<sub>2</sub>)**



**Figure 33. Acidification sur structure globale avec couche d'assise  
(100% = 1 326,4 kg éq. SO<sub>2</sub>)**

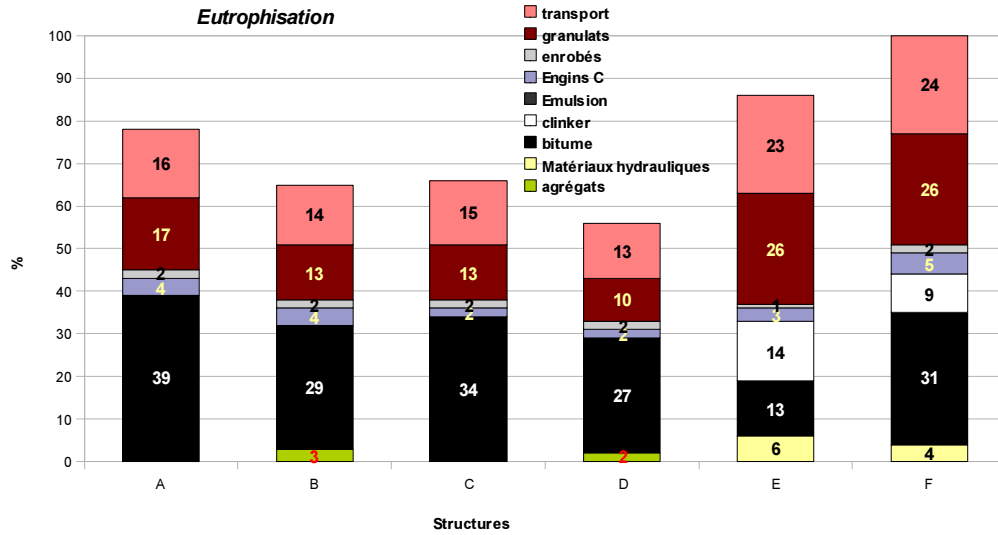


Figure 34. Eutrophisation sur structure globale avec couche d'assise  
(100% = 93,4 kg éq. PO<sub>4</sub>)

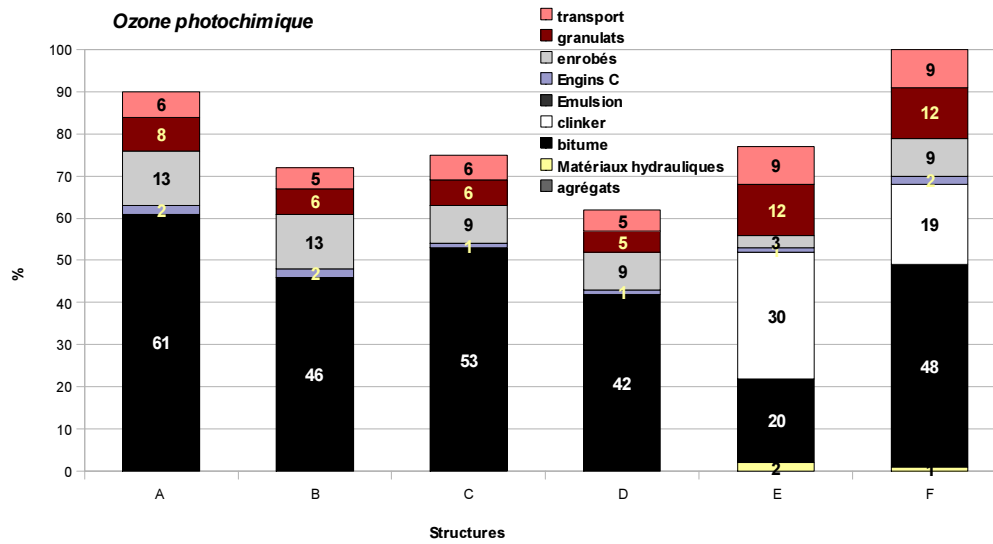
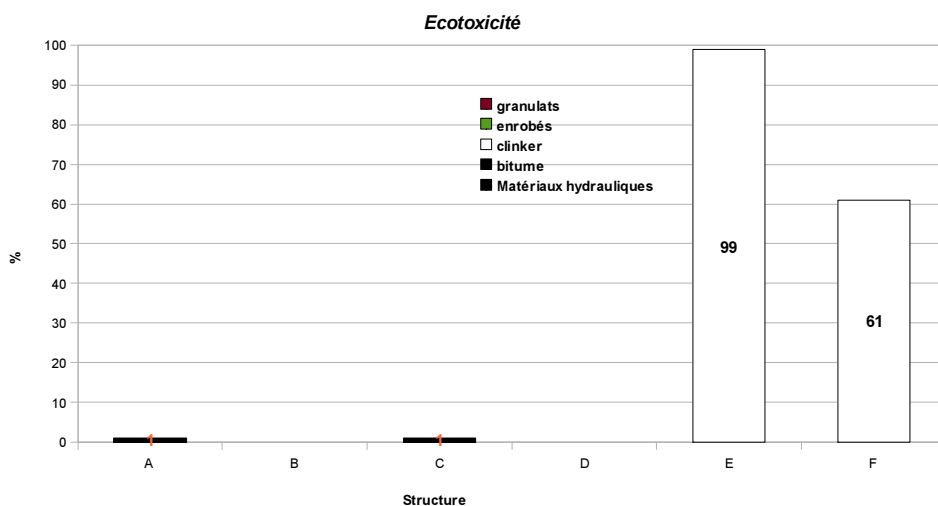
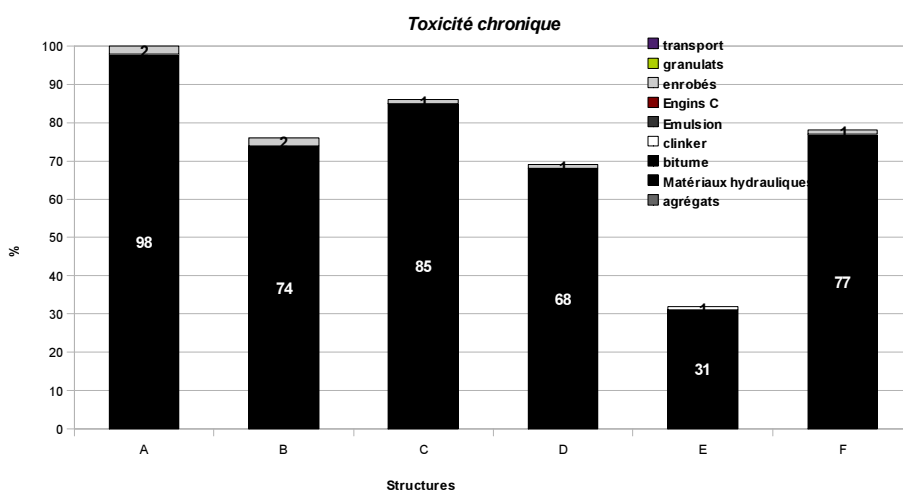


Figure 35. Ozone photochimique sur structure globale avec couche d'assise  
(100% = 653,1 kg éq. éthylène)



**Figure 36. Potentiel écotoxique sur structure globale avec couche d'assise (100% = 7 922 152 kg éq. 1,4DCB)**



**Figure 37. Potentiel Toxique sur structure globale avec couche d'assise (100% = 2 925 399 kg éq. 1,4DCB)**

## 2.3 Résultats pour la grave émulsion de reprofilage (page 78)

Nom matériau	Consommation	Unité
GE (fabrication centrale)	258	tonnes
Bitume	25	tonnes
Emulsion	36	tonnes
Eau d'apport	17	m <sup>3</sup>
granulats	367	tonnes

**Tableau 65. GE de reprofilage – consommation de matériaux**

Nom matériau	Consommation d'énergie (MJ)	Consommation en eau (m3)
GE reprofilage	106 869	48
Enduit	86 291	16
Accrochage	10 279	2
<b>Total</b>	<b>205 847</b>	<b>66</b>

**Tableau 66. GE de reprofilage – consommation en énergie et en eau**

Nom matériau	GWP (kg eq. CO <sub>2</sub> )	AP (kg eq. SO <sub>2</sub> )	EI (kg eq. PO <sub>4</sub> )	POCP (kg eq. éthylène)	EP (kg eq. 1,4DCB)	TP (kg eq. 1,4DCB)
GE reprofilage	6 073	22	1.6	8.8	1 082	57 396
Enduit	4 923	19	1.3	8.0	968	57 576
Accrochage	542	2	0.1	0.9	102	7 675
Total	11 538	43	3.0	17.7	2 152	122 647

**Tableau 67. GE de reprofilage – indicateurs environnementaux**

## 2.4 Résultats pour le retraitement à l'émulsion (page 78)

Nom matériau	Consommation	Unité
Bitume	20	tonnes
Emulsion	36	tonnes
Eau d'apport	34	m <sup>3</sup>
granulats	102	tonnes

**Tableau 68. Retraitement à l'émulsion – consommation de matériaux**

Nom matériau	Consommation d'énergie (MJ)	Consommation en eau (m3)
Retraitement	32 886	60
Enduit	68 229	15
Total	102 000	75

**Tableau 69. Retraitement à l'émulsion – consommation en énergie et en eau**

Nom matériau	GWP (kg eq. CO <sub>2</sub> )	AP (kg eq. SO <sub>2</sub> )	EI (kg eq. PO <sub>4</sub> )	POCP (kg eq. éthylène)	EP (kg eq. 1,4DCB)	TP (kg eq. 1,4DCB)
Retraitement	4 585	16	1,1	6,5	606	45 730
Enduit	3 590	14	0,9	6,6	845	52 771
Total	8 175	30	2,0	13,1	1 451	98 502

**Tableau 70. Retraitement à l'émulsion – indicateurs environnementaux**

## 2.5 Résultats pour le rechargement GB (page 80)

Nom matériau	Consommation	Unité
Bitume	730	tonnes
Ciment	-	tonnes
Emulsion	31	tonnes
Eau (formule)	141	m3
Granulats	15306	tonnes

**Tableau 71. Rechargement GB – consommation de matériaux**

Nom matériau	Consommation d'énergie (MJ)	Consommation en eau (m3)
GB 0/14	2 894 617	62
BBSG 0/10	5 195 707	117
Accrochage	123 832	39
GNT	229 584	266

Total	8 443 740	484
-------	-----------	-----

**Tableau 72.Rechargement GB – consommation en énergie et en eau**

Nom matériau	GWP	AP	EI	POCP	EP	TP
	(kg eq. CO <sub>2</sub> )	(kg eq. SO <sub>2</sub> )	(kg eq. PO <sub>4</sub> )	(kg eq. Ethylène)	(kg eq. 1,4DCB)	(kg eq. 1,4DCB)
GB 0/14	136 092	373	24	185	23 449	1 204 425
BBSG 0/10	244 246	696	43	346	43 729	2 367 846
Accrochage	6 080	24	1	12	1 414	106 740
GNT	14 982	56	5	14	3 178	239
<b>Total</b>	<b>401 400</b>	<b>1 150</b>	<b>73</b>	<b>557</b>	<b>71 770</b>	<b>3 679 249</b>

**Tableau 73.Rechargement GB – indicateurs environnementaux**

## 2.6 Résultats pour le retraitement en place au liant hydraulique (page 80)

Nom matériau	Consommation	Unité
Bitume	285	t
Ciment	574	t
Emulsion	39	t
Eau (formule)	850	m <sup>3</sup>
Granulats	5 997	t

**Tableau 74.Retraitement en place au liant hydraulique – consommation de matériaux**

Nom matériau	Consommation d'énergie (MJ)	Consommation en eau (m <sup>3</sup> )
Retraitement	5 643 238	2 076
Enduit de cure	132 343	25
Couche d'accrochage	76 515	18
BBSG 0/10	2 829 405	81
GNT	121 762	139
<b>Total</b>	<b>8 772 545</b>	<b>2 339</b>

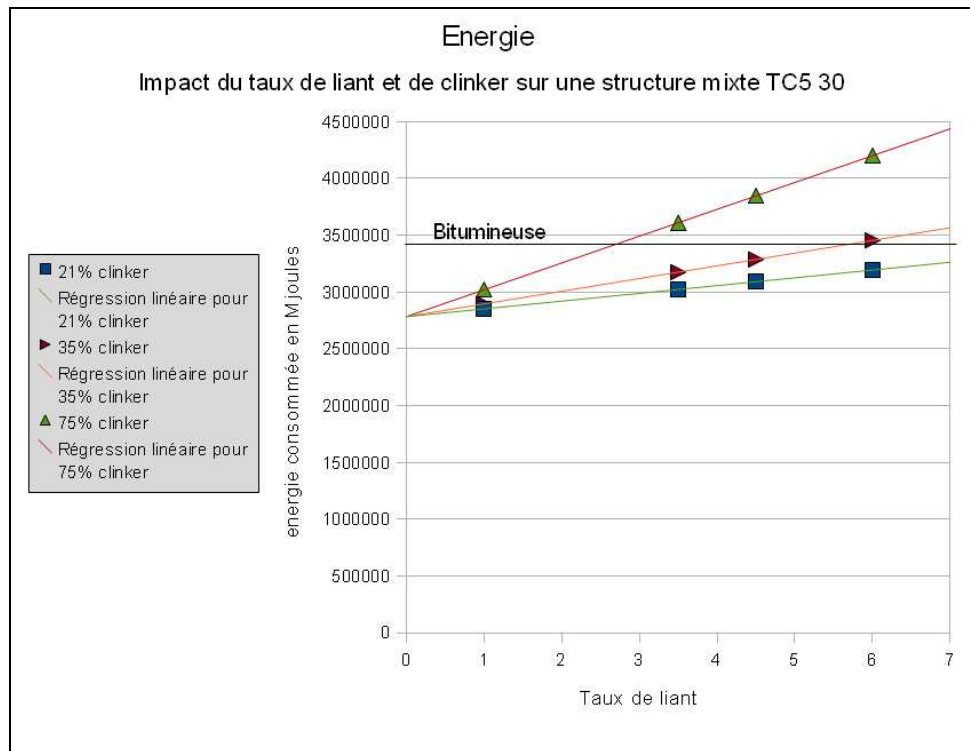
**Tableau 75.Retraitement en place au liant hydraulique – consommation en énergie et en eau**

Nom matériau	GWP (kg eq. CO <sub>2</sub> )	AP (kg eq. SO <sub>2</sub> )	EI (kg eq. PO <sub>4</sub> )	POCP (kg eq. éthylène)	EP (kg eq. 1,4DCB)	TP (kg eq. 1,4DCB)
Retraitement	632 215	668	55	547	19 479 067	55 970
Enduit de cure	7 090	30	2	13	1 950	92 551
couche d'accrochage	2 326	9	1	4	490	37 002
BBSG 0/10	134 353	384	24	188	23 472	1 274 383
GNT	7 975	30	3	8	1 649	125
<b>Total</b>	<b>785 436</b>	<b>1 127</b>	<b>85</b>	<b>763</b>	<b>19 506 991</b>	<b>1 487 483</b>

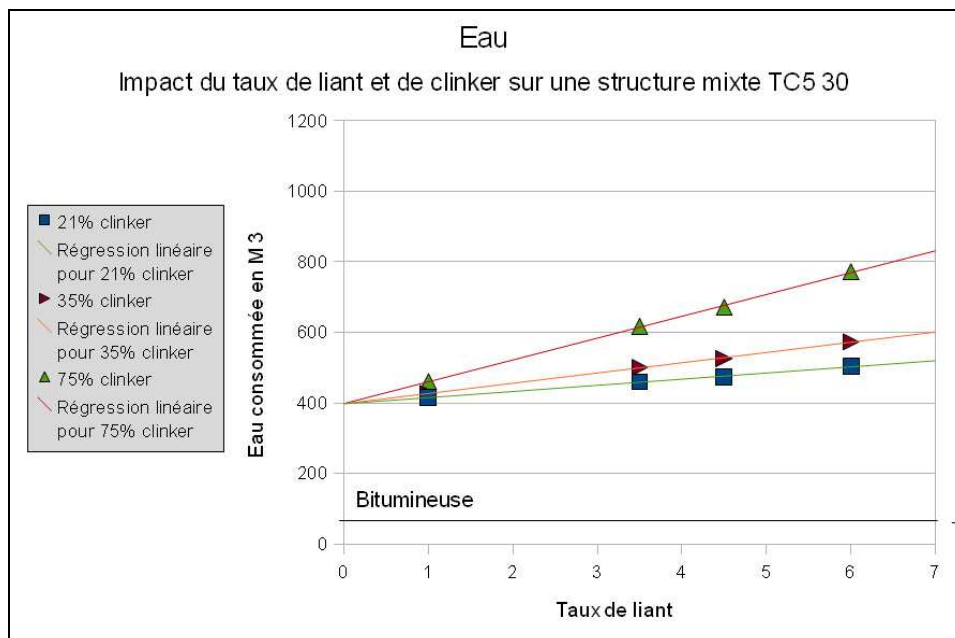
**Tableau 76.Retraitement en place au liant hydraulique – indicateurs environnementaux**



## 2.7 Résultats pour la structure mixte (page 82)



**Figure 38. Consommation en énergie pour la structure mixte à différents taux de clinker (structure bitumineuse : 3 424 309 MJ)**



**Figure 39. Consommation en eau pour la structure mixte à différents taux de clinker (structure bitumineuse : 52 m³)**

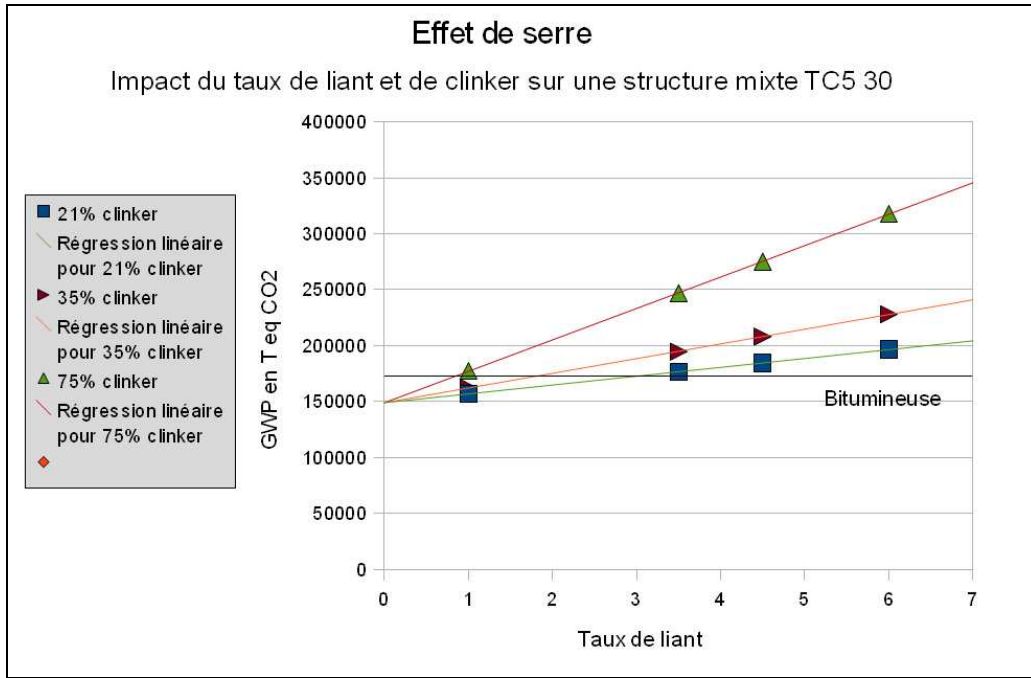


Figure 40. Indicateur d'effet de serre pour la structure mixte à différents taux de clinker (structure bitumineuse : 171 761 kg éq. CO<sub>2</sub>)

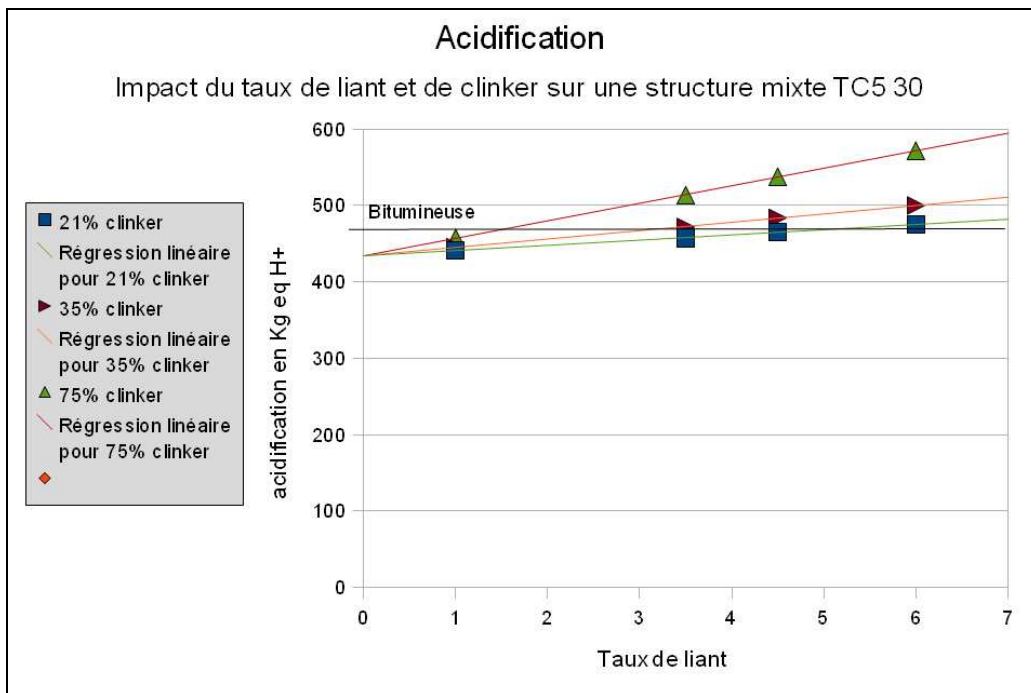
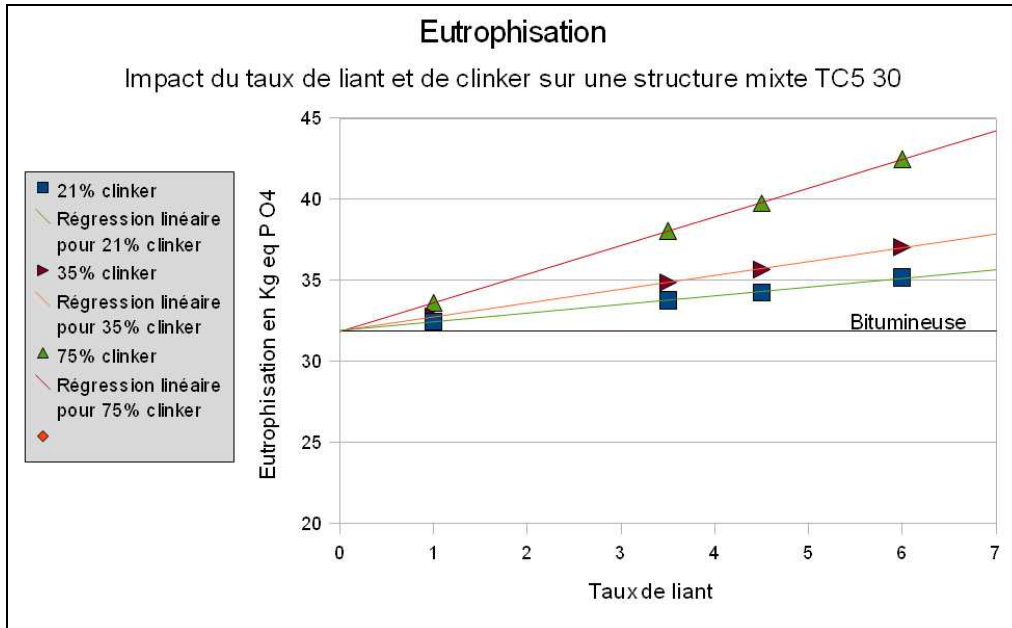
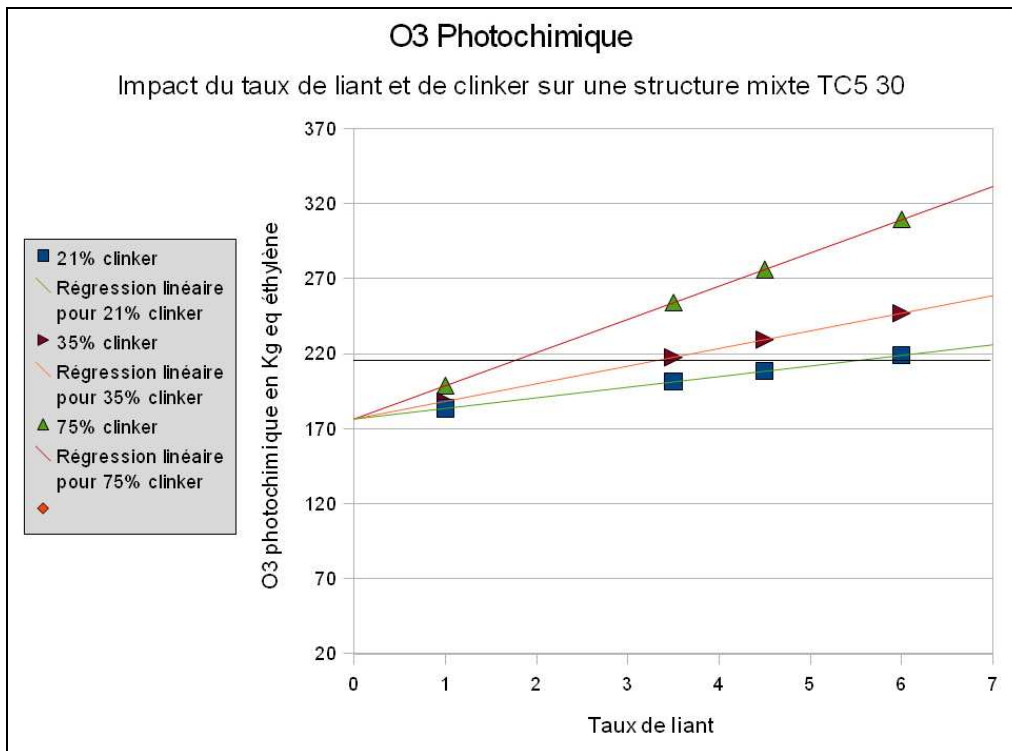


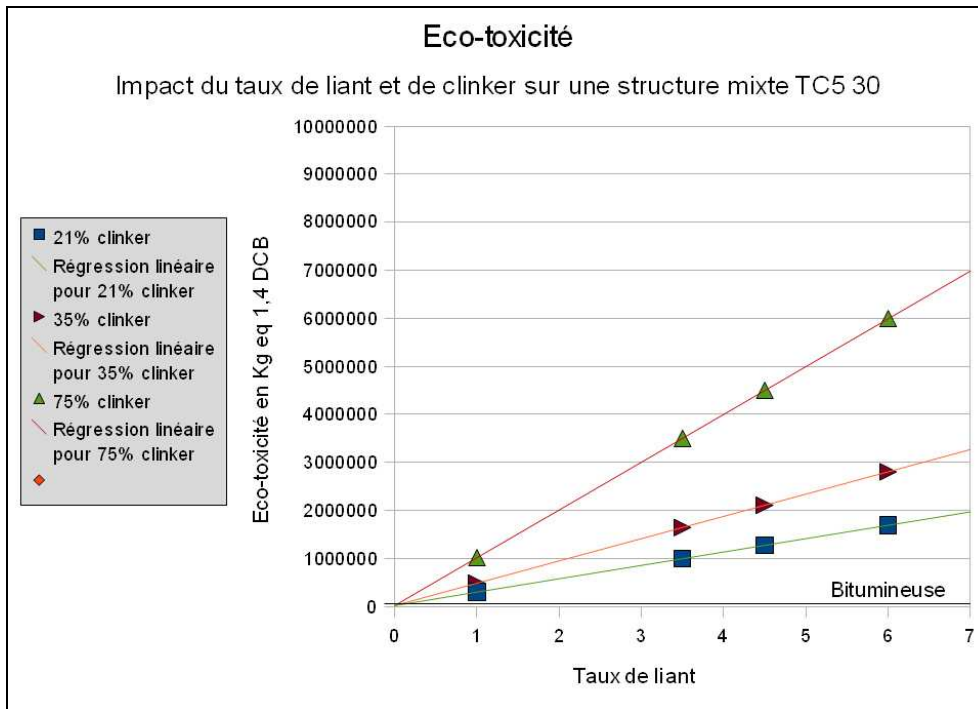
Figure 41. Indicateur d'acidification pour la structure mixte à différents taux de clinker (structure bitumineuse : 472 kg éq. SO<sub>2</sub>)



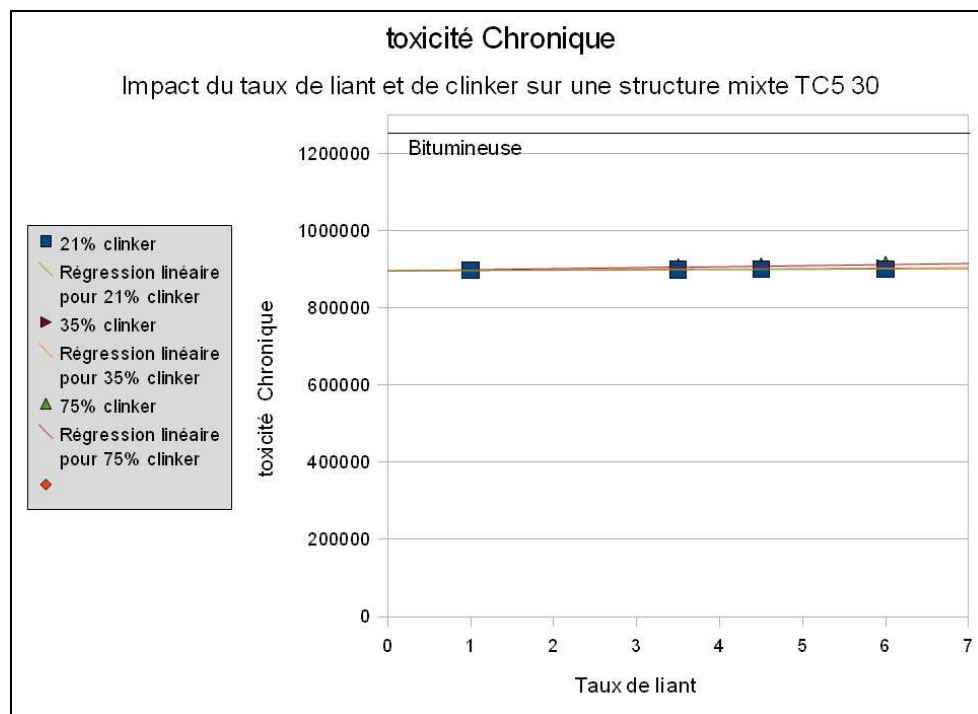
**Figure 42. Indicateur d'eutrophisation pour la structure mixte à différents taux de clinker (structure bitumineuse : 32,2 kg éq. PO<sub>4</sub>)**



**Figure 43. Indicateur d'ozone photochimique pour la structure mixte à différents taux de clinker (structure bitumineuse : 214 kg éq. éthylène)**



**Figure 44. Indicateur d'écotoxicité pour la structure mixte à différents taux de clinker (structure bitumineuse : 24 671 kg éq. 1,4DCB)**



**Figure 45. Indicateur de toxicité pour la structure mixte à différents taux de clinker (structure bitumineuse : 1 263 789 kg éq. 1,4DCB)**

## 2.8 Résultats pour la structure semi-rigide (page 82)

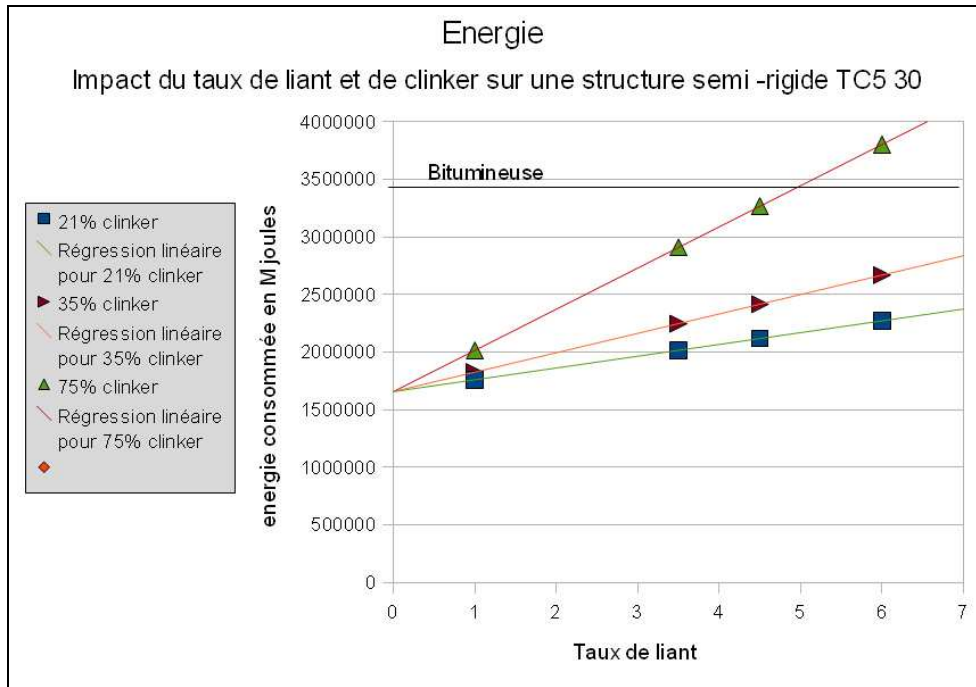


Figure 46. Consommation en énergie pour la structure semi-rigide à différents taux de clinker (structure bitumineuse : 3 424 309 MJ)

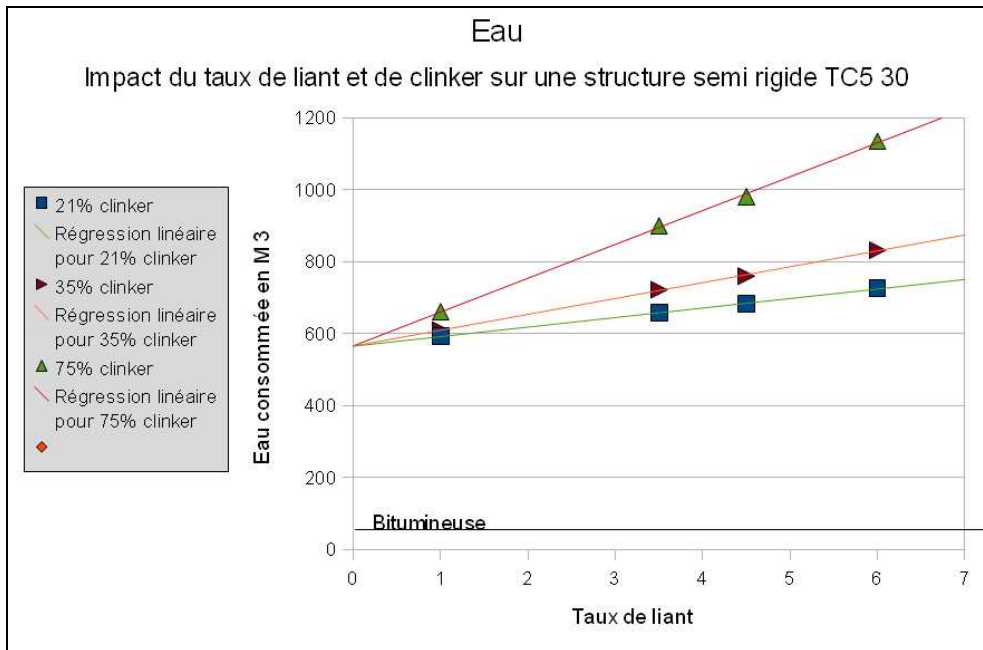
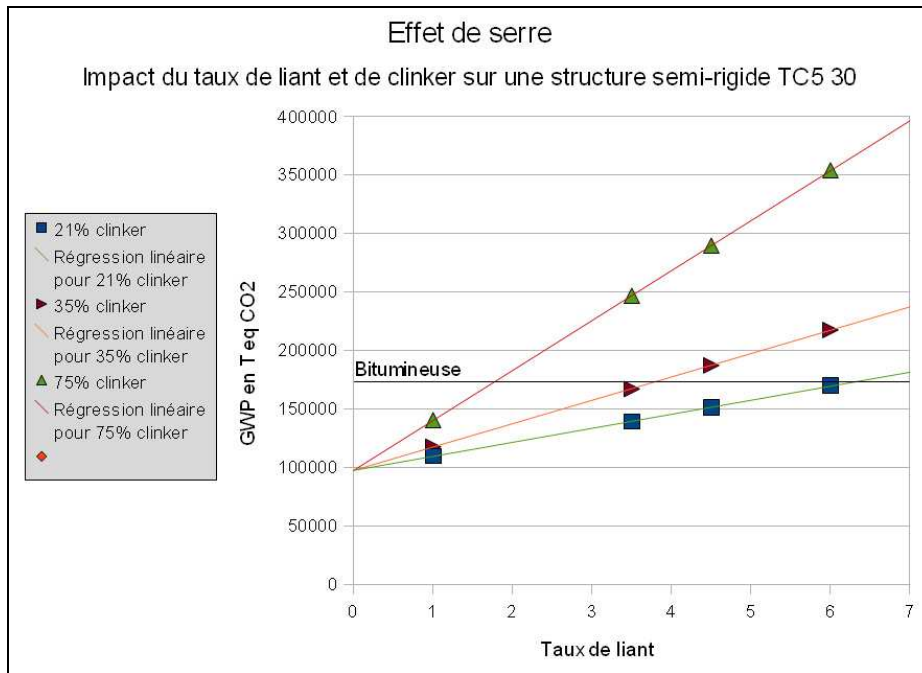
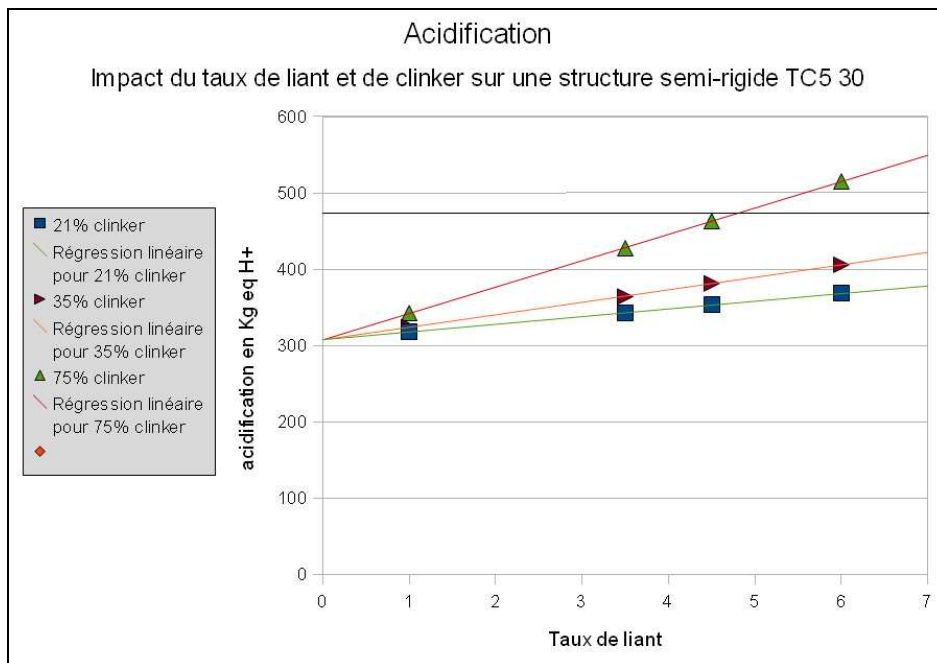


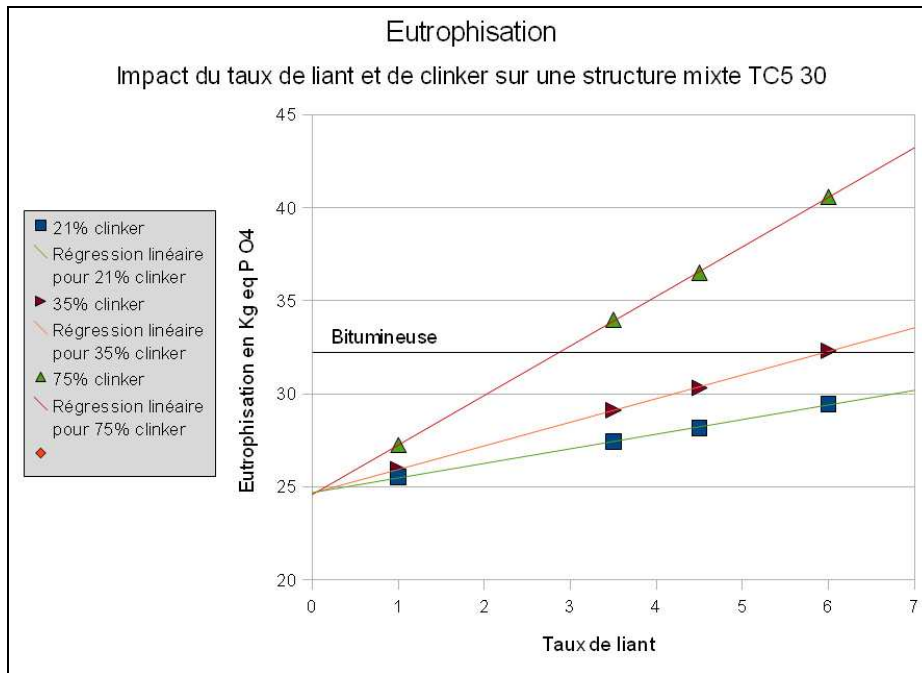
Figure 47. Consommation en eau pour la structure semi-rigide à différents taux de clinker (structure bitumineuse : 52 m³)



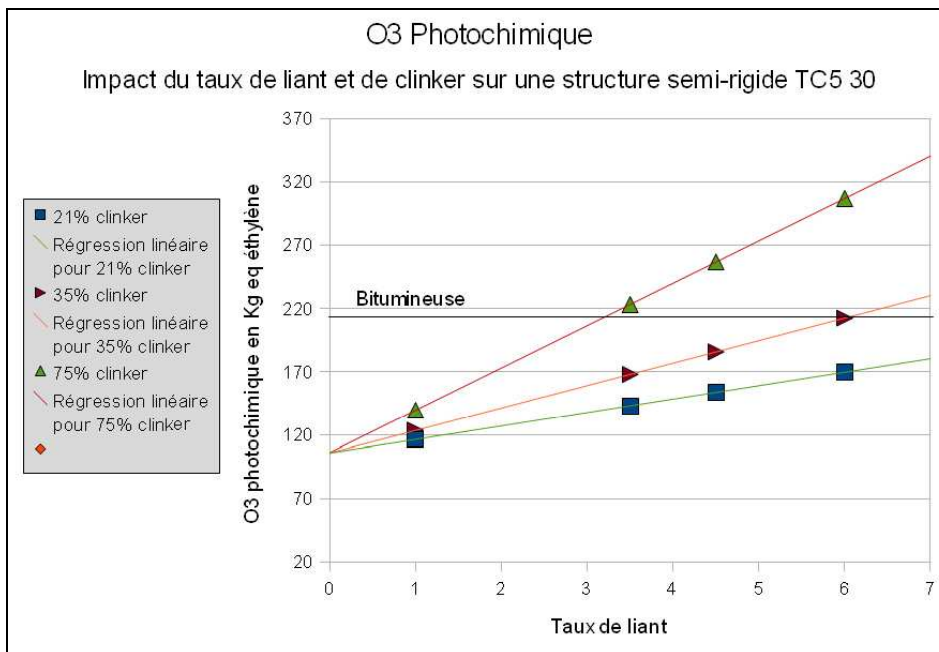
**Figure 48. Indicateur d'effet de serre pour la structure semi-rigide à différents taux de clinker (structure bitumineuse : 171 761 kg eq. CO<sub>2</sub>)**



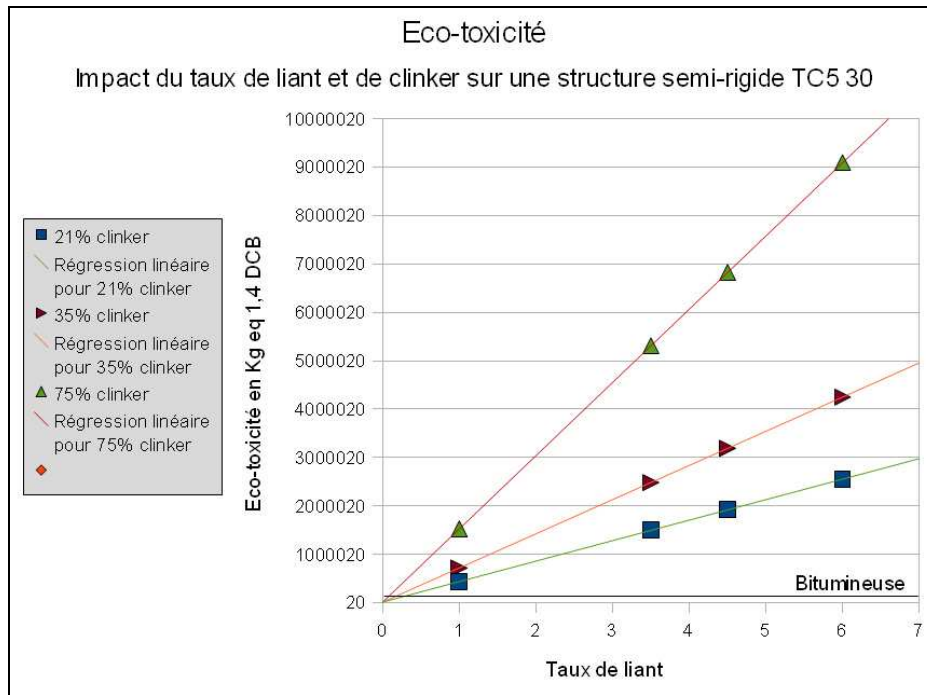
**Figure 49. Indicateur d'acidification pour la structure semi-rigide à différents taux de clinker (structure bitumineuse : 472 kg eq. SO<sub>2</sub>)**



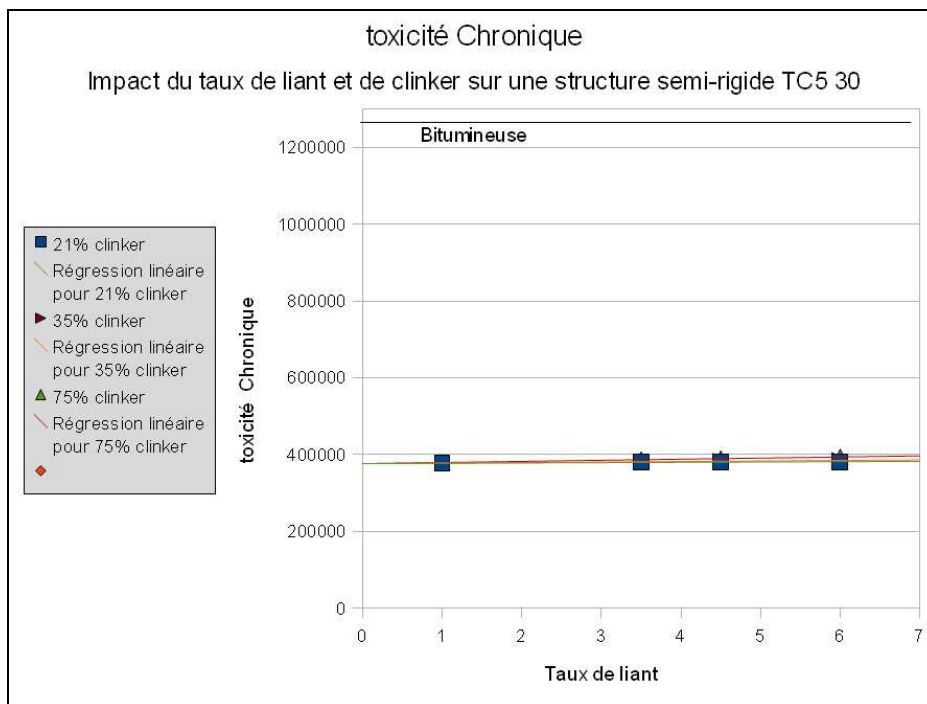
**Figure 50. Indicateur d'eutrophisation pour la structure semi-rigide à différents taux de clinker (structure bitumineuse : 32,2 kg eq. PO<sub>4</sub>)**



**Figure 51. Indicateur d'ozone photochimique pour la structure semi-rigide à différents taux de clinker (structure bitumineuse : 214 kg eq. éthylène)**



**Figure 52. Indicateur d'écotoxicité pour la structure semi-rigide à différents taux de clinker (structure bitumineuse : 24 671 kg éq. 1,4DCB)**



**Figure 53. Indicateur de toxicité pour la structure semi-rigide à différents taux de clinker (structure bitumineuse : 1 263 789 kg éq. 1,4DCB)**



### 3 Descriptif détaillé des valeurs de référence, de variation et des résultats par indicateur (chapitre VIII Etude de sensibilité page 86)

#### 3.1 Couche en GB 0/14 EB 14

Paramètres		$i_{réf}$	$i_{var}$
Nom	Unité	valeur de référence	valeur de variation
Longueur	m	1000	1100
Epaisseur	cm	12	13
Largeur	m	7,5	8
Distance centrale-chantier	km	20	30
Distance carrière-centrale	km	40	50
Distance liant-centrale	km	150	200
Masse volumique en place	kg/m <sup>3</sup>	2350	2400
Teneur/dosage en liant	%	5	4,8
Teneur en agrégats**	%	10	20
Consommation d'un engin	Lgasoil/h	15	30
Durée totale chantier	h	100%	110%
Distance acheminement	km	20	30

Tableau 77. Valeurs de références et de variation des paramètres pour le cas GB 0/14 EB 14 assise

$r_{réf}$						
énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP
1 267 357	60 817	10,9	170,3	82,1	533 205	10 112

Tableau 78. Résultats du cas de référence GB 0/14 EB 14 assise sans agrégats recyclés

$r_{réf}$						
énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP
1 207 077	57 844	10,1	157,0	75,7	480 701	9 127

Tableau 79. Résultats du cas de référence GB 0/14 EB 14 assise avec 10% d'agrégats recyclés

Paramètres		$r_{var}$						
Nom	Unité	énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP
Longueur	m	1 393 284	66 837	12,0	187,0	90,3	586 526	11 123
Epaisseur	cm	1 370 552	65 701	11,9	183,9	88,9	577 639	10 954
Largeur	m	1 349 913	64 725	11,6	181,2	87,9	568 752	10 785
Distance centrale-chantier	km	1 289 028	62 466	11,4	174,9	83,3	533 205	10 112
Distance carrière-centrale	km	1 287 944	62 384	11,3	174,7	83,2	533 205	10 112
Distance liant-centrale	km	1 272 775	61 229	11,0	171,4	82,4	533 205	10 112
Masse volumique en place	kg/m <sup>3</sup>	1 293 704	62 064	11,1	173,7	83,8	544 551	10 327
Teneur/dosage en liant	%	1 246 261	59 852	10,7	166,1	79,9	512 204	9 839
Teneur en agrégats**	%	1 146 796	54 870	9,3	143,7	69,1	428 196	8 143
Consommation d'un engin	Lgasoil/h	1 276 795	61 535	11,1	172,3	82,6	533 205	10 112
Durée totale chantier	h	1 269 507	60 981	11,0	170,7	82,2	533 205	10 112
Distance acheminement	km	1 271 292	61 116	11,0	171,1	82,3	533 205	10 112

**Tableau 80. Résultats en fonction des valeurs de variation pour le cas GB 0/14 EB 14**

Paramètres		Ei (%)						
Nom	Unité	énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP
Longueur	m	99%	99%	101%	98%	100%	100%	100%
Epaisseur	cm	98%	96%	110%	96%	99%	100%	100%
Largeur	m	98%	96%	96%	96%	106%	100%	100%
Distance centrale-chantier	km	3%	5%	9%	5%	3%	0%	0%
Distance carrière-centrale	km	6%	10%	15%	10%	5%	0%	0%
Distance liant-centrale	km	1%	2%	3%	2%	1%	0%	0%
Masse volumique en place	kg/m <sup>3</sup>	98%	96%	86%	94%	97%	100%	100%
Teneur/dosage en liant	%	42%	40%	46%	62%	67%	98%	67%
Teneur en agrégats**	%	-5%	-5%	-8%	-8%	-9%	-11%	-11%
Consommation d'un engin	Lgasoil/h	1%	1%	2%	1%	1%	0%	0%
Durée totale chantier	h	2%	3%	9%	2%	1%	0%	0%
Distance acheminement	km	1%	1%	2%	1%	0%	0%	0%

**Tableau 81. Effet relatif de la de la variation pour le cas GB 0/14 EB 14**

**Orange :  $Ei > 55\%$ , jaune :  $0\% < Ei \leq 55\%$  ; vert :  $Ei \leq 0\%$**

### 3.2 Couche en Grave émulsion

Paramètres		$i_{réf}$	$i_{var}$	$V_i$
Nom	Unité	valeur de référence	valeur de variation	variabilité relative du paramètre
Longueur	m	1000	1100	0,10
Epaisseur	cm	3	3,3	0,10
Distance centrale-chantier	km	25	27,5	0,10
Distance carrière-centrale	km	15	16,5	0,10
Distance raffinerie-	km	150	165	0,10
Distance liant-centrale	km	150	165	0,10
Masse volumique en place	kg/m <sup>3</sup>	2000	1900	-0,05
Teneur/dosage en liant	%	4,12	4,532	0,10
Teneur en bitume émulsion	%	69	62	-0,10
Durée totale chantier	h	8,3	9,2	0,11
Distance acheminement	km	30	33	0,10

Tableau 82. Valeurs de références et de variation des paramètres pour le cas Grave émulsion

$r_{réf}$						
énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP
102 342	5 827	1,6	21,9	8,4	50 854	1 143

Tableau 83. Résultats du cas de référence Grave émulsion

Paramètres		$r_{var}$						
Nom	Unité	énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP
Longueur	m	112 134	6 376	1,7	24,0	9,2	55 939	1 257
Epaisseur	cm	111 336	6 315	1,7	23,8	9,1	55 938	1 257
Distance centrale-chantier	km	102 844	5 897	1,6	22,1	8,4	50 854	1 143
Distance carrière-centrale	km	102 844	5 865	1,6	22,0	8,4	50 854	1 143
Distance raffinerie-	km	102 500	5 839	1,6	22,0	8,4	50 854	1 143
Distance liant-centrale	km	102 570	5 845	1,6	22,0	8,4	50 854	1 143
Masse volumique en place	kg/m <sup>3</sup>	98 465	5 614	1,5	21,0	8,0	48 311	1 086
Teneur/dosage en liant	%	107 779	6 082	1,6	23,0	8,9	55 936	1 208
Teneur en bitume émulsion	%	97 170	5 588	1,5	20,9	7,8	45 772	1 075
Durée totale chantier	h	107 779	6 225	1,7	23,0	8,6	50 856	1 143
Distance acheminement	km	107 212	6 198	1,7	23,0	8,6	50 855	1 143

Tableau 84. Résultats en fonction des valeurs de variation pour le cas Grave émulsion

Paramètres		Ei (%)						
Nom	Unité	énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP
Longueur	m	96%	94%	95%	96%	95%	100%	100%
Epaisseur	cm	88%	84%	82%	87%	83%	100%	100%
Distance centrale-chantier	km	5%	12%	13%	9%	0%	0%	0%
Distance carrière-centrale	km	5%	7%	6%	5%	0%	0%	0%
Distance raffinerie-	km	2%	2%	0%	5%	0%	0%	0%
Distance liant-centrale	km	2%	3%	0%	5%	0%	0%	0%
Masse volumique en place	kg/m <sup>3</sup>	76%	73%	76%	82%	95%	100%	99%
Teneur/dosage en liant	%	53%	44%	32%	50%	60%	100%	57%
Teneur en bitume émulsion	%	50%	40%	31%	45%	70%	99%	58%
Durée totale chantier	h	49%	63%	58%	46%	22%	0%	0%
Distance acheminement	km	48%	64%	63%	50%	24%	0%	0%

**Tableau 85. Effet relatif de la de la variation pour le cas Grave émulsion**  
Orange :  $Ei > 55\%$ , jaune :  $0\% < Ei \leq 55\%$  ; vert :  $Ei \leq 0\%$

### 3.3 Couche en enduit

Paramètres		$i_{réf}$	$i_{var}$
Nom	Unité	valeur de référence	valeur de variation
Longueur	m	1000	1100
Largeur	m	7,5	8,25
Distance carrière-chantier	km	25	27,5
Distance raffinerie-	km	100	110
Distance liant-chantier	km	150	165
Consommation d'un engin	Lgasoil/h	11,5	12,65
Durée totale chantier	h	0,5	0,55
Distance acheminement	km	20	22

**Tableau 86. Valeurs de références et de variation des paramètres pour le cas enduit**

$r_{réf}$						
énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP
46 094	2 447	0,6	9,8	4,3	33 413	563

**Tableau 87. Résultats du cas de référence enduit**

Paramètres		$r_{var}$						
Nom	Unité	énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP
Longueur	m	50 172	2 652	0,7	10,7	4,8	36 754	622
Largeur	m	50 178	2 652	0,7	10,7	4,8	36 754	620
Distance carrière-chantier	km	46 309	2 464	0,6	9,8	4,4	33 413	563
Distance raffinerie-	km	46 194	2 455	0,6	9,8	4,4	33 413	563
Distance liant-chantier	km	46 198	2 455	0,6	9,8	4,4	33 413	563
Consommation d'un engin	Lgasoil/h	46 263	2 460	0,6	9,8	4,4	33 413	563
Durée totale chantier	h	46 263	2 460	0,6	9,8	4,4	33 413	563
Distance acheminement	km	46 625	2 488	0,6	9,9	4,4	33 413	563

Tableau 88. Résultats en fonction des valeurs de variation pour le cas enduit

Paramètres		Ei (%)						
Nom	Unité	énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP
Longueur	m	88%	84%	167%	92%	116%	100%	105%
Largeur	m	89%	84%	167%	92%	116%	100%	101%
Distance carrière-chantier	km	5%	7%	0%	0%	23%	0%	0%
Distance raffinerie-	km	2%	3%	0%	0%	23%	0%	0%
Distance liant-chantier	km	2%	3%	0%	0%	23%	0%	0%
Consommation d'un engin	Lgasoil/h	4%	5%	0%	0%	23%	0%	0%
Durée totale chantier	h	4%	5%	0%	0%	23%	0%	0%
Distance acheminement	km	12%	17%	0%	10%	23%	0%	0%

Tableau 89. Effet relatif de la variation pour le cas enduit  
Orange :  $Ei > 55\%$ , jaune :  $0\% < Ei \leq 55\%$  ; vert :  $Ei \leq 0\%$

### 3.4 Couche d'accrochage

Paramètres		$i_{réf}$	$i_{var}$
Nom	Unité	valeur de référence	valeur de variation
Longueur	m	1000	1100
Largeur	m	7,5	8,25
Distance raffinerie-	km	100	110
Distance liant-chantier	km	150	165
Consommation d'un engin	Lgasoil/h	11,5	12,65
Durée totale chantier	h	0,5	0,55
Distance acheminement	km	20	22

Tableau 90. Valeurs de références et de variation des paramètres pour le cas accrochage

$r_{réf}$						
énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP
10 219	536	0,1	2,0	0,9	7 709	102

Tableau 91. Résultats du cas de référence accrochage

Paramètres		$r_{var}$						
Nom	Unité	énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP
Longueur	m	11 064	576	0,1	2,2	1,0	8 480	112
Largeur	m	11 087	578	0,1	2,2	1,0	8 480	112
Distance raffinerie-	km	10 231	537	0,1	2,0	0,9	7 709	102
Distance liant-chantier	km	10 266	540	0,1	2,1	0,9	7 709	102
Consommation d'un engin	Lgasoil/h	10 361	547	0,1	2,1	0,9	7 709	102
Durée totale chantier	h	10 361	547	0,1	2,1	0,9	7 709	102
Distance acheminement	km	10 396	550	0,1	2,1	1,0	7 709	102

Tableau 92. Résultats en fonction des valeurs de variation pour le cas accrochage

Paramètres		Ei (%)						
Nom	Unité	énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP
Longueur	m	83%	75%	73%	78%	85%	100%	100%
Largeur	m	85%	78%	81%	83%	85%	100%	100%
Distance raffinerie-	km	1%	2%	0%	0%	0%	0%	0%
Distance liant-chantier	km	5%	7%	8%	5%	0%	0%	0%
Consommation d'un engin	Lgasoil/h	14%	21%	24%	15%	0%	0%	0%
Durée totale chantier	h	14%	21%	24%	15%	0%	0%	0%
Distance acheminement	km	17%	26%	32%	20%	11%	0%	0%

Tableau 93. Effet relatif de la variation pour le cas accrochage

Orange :  $Ei > 55\%$ , jaune :  $0\% < Ei \leq 55\%$  ; vert :  $Ei \leq 0\%$

### 3.5 Couche matériau hydraulique

Paramètres		$i_{réf}$	$i_{var}$
Nom	Unité	paramètre	paramètre
Teneur/dosage en liant	%	3,5	4,5
Teneur en clinker	%	35	45
Longueur	m	1000	vno
Épaisseur	cm	15	vno
Largeur	m	7,5	vno
Distance centrale-	km	40	vno
Distance carrière-	km	10	vno
Distance liant-centrale	km	150	vno
Masse volumique en	kg/m <sup>3</sup>	2350	vno

Tableau 94. Valeurs de références et de variation des paramètres pour le cas grave hydraulique (vno : variation non observée)

$r_{réf}$						
énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP
567 963	52 301	8,6	99,3	47,0	3 422	1 103 270

Tableau 95. Résultats du cas de référence grave hydraulique

Paramètres		$r_{var}$						
Nom	Unité	énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP
Teneur/dosage en liant	%	645 200	61 447	9,1	107,8	54,4	4 317	1 417 449
Teneur en clinker	%	641 565	61 174	9,1	106,3	53,7	4 319	1 417 496

Tableau 96. Résultats en fonction des valeurs de variation pour le cas grave hydraulique

Paramètres		Ei (%)						
Nom	Unité	énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP
Teneur/dosage en liant	%	48%	61%	20%	30%	56%	92%	100%
Teneur en clinker	%	45%	59%	20%	25%	52%	92%	100%

Tableau 97. Effet relatif de la variation pour le cas grave hydraulique

Orange :  $Ei > 55\%$ , jaune :  $0\% < Ei \leq 55\%$  ; vert :  $Ei \leq 0\%$

### 3.6 Couche béton armé continu

Paramètres		$i_{réf}$	$i_{var}$
Nom	Unité	paramètre	paramètre
Longueur	m	1000	1100
Grenaille recyclée	%	95	99
Consommation en acier	kg/m <sup>2</sup>	6,8	7,8
Épaisseur	cm	15	vno
Largeur	m	7,5	vno
Consommation en grenaille	kg/m <sup>2</sup>	5	vno
Distance centrale-chantier	km	40	vno
Distance carrière-centrale	km	10	vno
Distance liant-centrale	km	150	vno
Distance acier-chantier	km	500	vno
dosage en ciment du béton	kg/m <sup>3</sup>	330	vno
dosage en eau du béton	kg/m <sup>3</sup>	150	vno
dosage en granulats du	kg/m <sup>3</sup>	1870	vno
Teneur en clinker	%	85	vno

Tableau 98. Valeurs de références et de variation des paramètres pour le cas béton armé continu

$r_{réf}$						
énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP
3 322 680	352 681	28,9	373,5	309,0	234 388	10 884 778

Tableau 99. Résultats du cas de référence grave béton armé continu

Paramètres		$r_{var}$						
Nom	Unité	énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP
Longueur	m	3 654 949	387 950	31,8	410,9	340,1	257 827	11 973 256
Grenaille recyclée	%	3 309 504	351 945	28,8	372,1	308,4	228 611	10 880 000
Consommation en acier	kg/m <sup>2</sup>	3 340 142	356 360	29,4	381,0	311,8	263 273	10 908 671

**Tableau 100. Résultats en fonction des valeurs de variation pour le cas béton armé continu**

Paramètres		Ei (%)						
Nom	Unité	énergie	GWP	EI	AP	POCP	TP	EP
Longueur	m	100%	100%	98%	100%	101%	100%	100%
Grenaille recyclée	%	-9%	-5%	-8%	-9%	-5%	-59%	-1%
Consommation en acier	kg/m <sup>2</sup>	4%	7%	10%	14%	6%	84%	1%

**Tableau 101. Effet relatif de la variation pour le cas béton armé continu**  
 Orange :  $Ei > 55\%$ , jaune :  $0\% < Ei \leq 55\%$  ; vert :  $Ei \leq 0\%$



## 4 Descriptif détaillé du cas étudié et des résultats dans la comparaison des outils ECORCE, bilan Carbone® et PaLATE (page 95)

### 4.1 Cas étudié

#### 4.1.1 Bilan Carbone méthode 1

	Grave ciment	Grave bitume	BBSG
Distance centrale-chantier	20 km	20 km	20 km
Distance d'approvisionnement du liant	150 km	300 km	300 km
Distance d'approvisionnement des granulats	75 km	75 km	75 km
Masse volumique apparente	2200 kg/m <sup>3</sup>	2250 kg/m <sup>3</sup>	2250 kg/m <sup>3</sup>
Composition simplifiée	4% de liant contenant 85% de clinker (le taux de clinker n'apparaît pas dans l'étude mais est une saisie obligatoire dans ECORCE) 91% de granulats 5% d'eau	4% de liant 96% de granulats	5.7% de liant 94.3% de granulats
Mise en œuvre (fixée arbitrairement par le LCPC)	30h de compacteur à 15l/h 15h de niveleuse à 15l/h	8h de finisseur à 25l/h 16h de compacteur à 15l/h	8h de finisseur à 25l/h 8h de compacteur à 15l/h
Distance d'acheminement des matériels de mise en œuvre	20 km	20 km	20 km

#### 4.1.2 Bilan Carbone méthode 2 : exemple de calcul pour la couche de grave ciment :

La couche fait 10 000 m<sup>2</sup> de surface et 20 cm d'épaisseur soit un volume de 2000m<sup>3</sup>. La masse volumique de la couche ayant été fixée à 2 200 kg/m<sup>3</sup>, le tonnage à transporter entre la centrale et le chantier est donc de 4 400 tonnes.

	Masse en t	CU des camions en t	Nombre de tours	Longueur du tour	Véhicules.km
Transport grave ciment	4 400	25	4400/25= 176	20km x 2 = 40 km	176 x 40 = 7 040
Transport des granulats	4 004	25	4004/25= 160.16	75km x 2 = 150 km	160.16 x 150 = 24 024
Transport du ciment	176	25	176/25 = 7.04	150km x 2 = 300 km	7.04 x 300 = 2 112
Transport des engins			3 engins donc 3 tours	20km x 2 = 40 km	3 x 40 = 120
Total des véhicules.km					33 296

Pour affiner les consommations, d'autres données peuvent être fixées dans l'onglet « FRET » : le pourcentage du trajet fait à vide et le pourcentage de la charge utile maximum utilisé lors d'un voyage en charge.

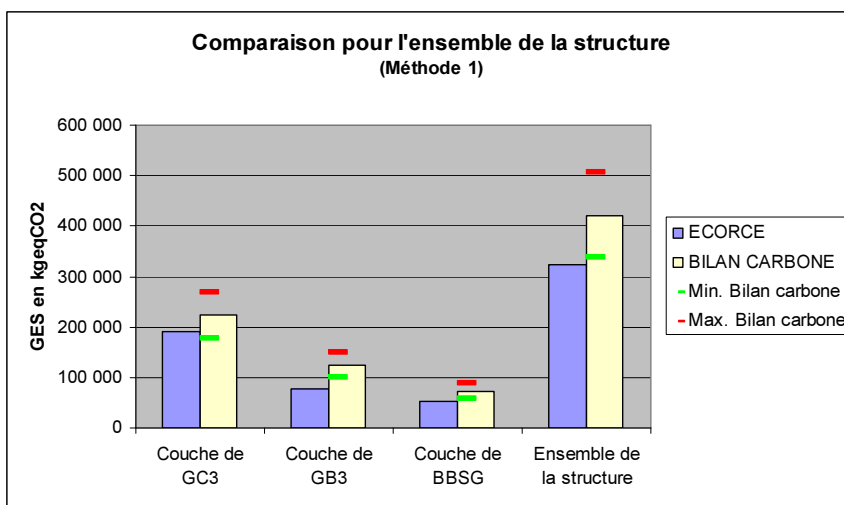
Nous avons adopté pour le premier 50% pour considérer un aller à charge et un retour à vide, et 100% pour le second car les voyages en charge se font à pleine charge.

Le résultat fait apparaître les émissions correspondant à la combustion seule mais aussi les émissions amont, ainsi que les émissions liées à l'amortissement du véhicule (si l'on considère que l'on possède les camions). Pour la comparaison avec ECORCE, seules les émissions liées à la combustion sont retenues.

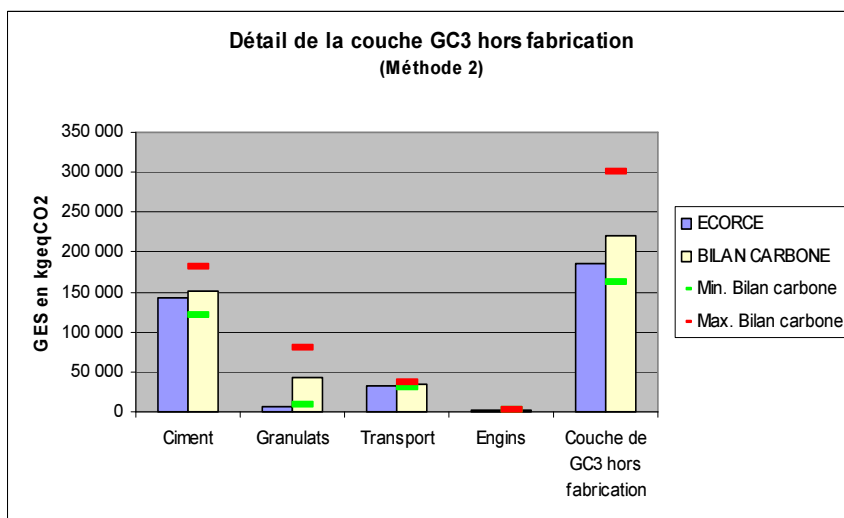
Pour les engins, les litres de carburants consommés ont été saisis comme ceux dans ECORCE. Comme pour les transports, seules les émissions liées à la combustion ont été retenues.

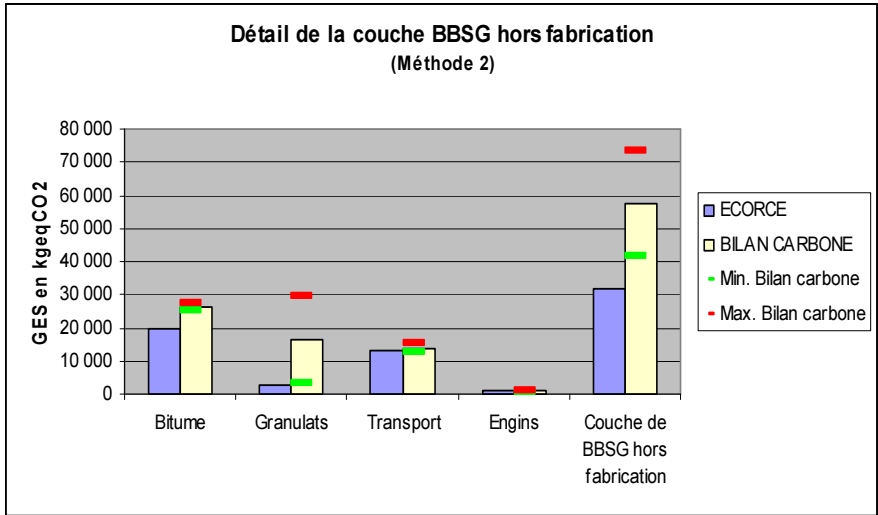
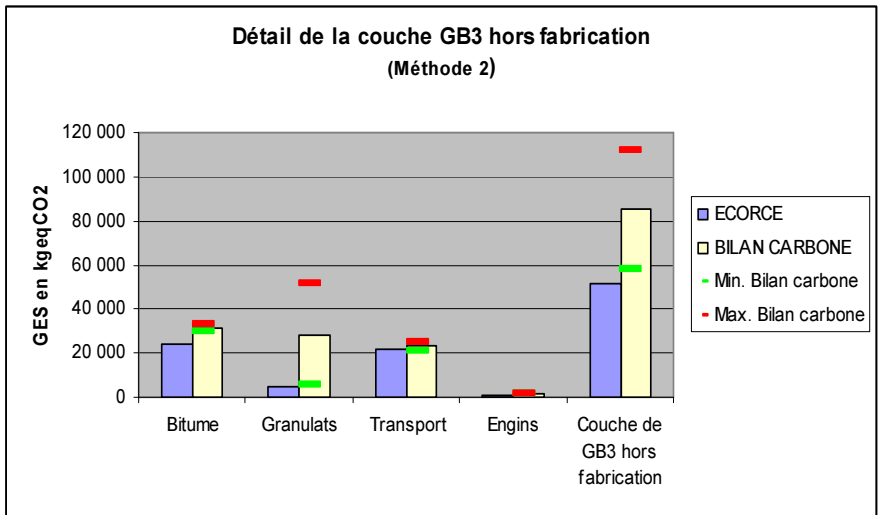
## 4.2 Résultats Bilan Carbone®

### 4.2.1 Méthode 1

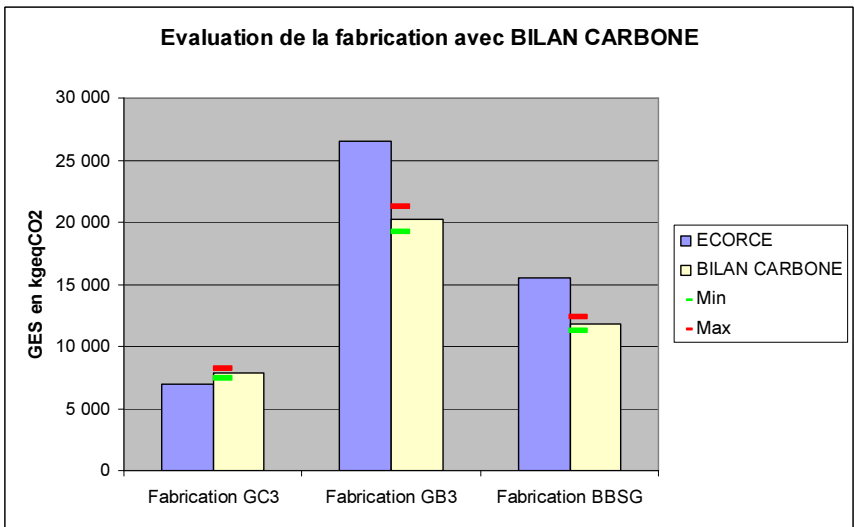


### 4.2.2 Méthode 2 hors fabrication

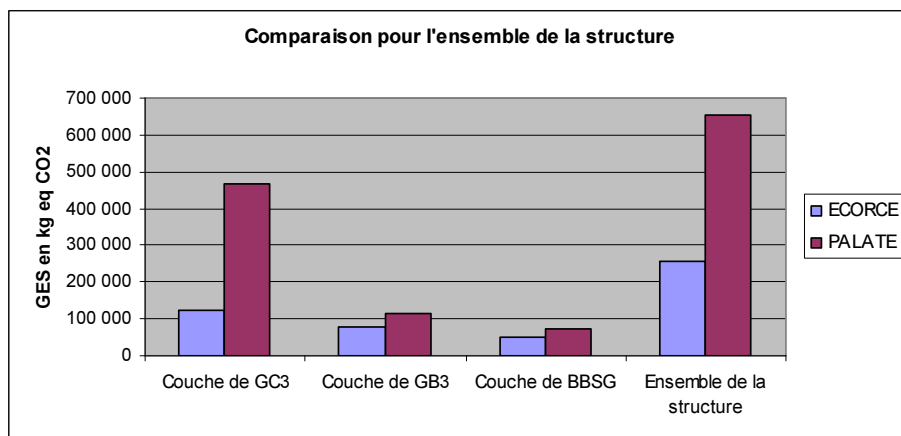
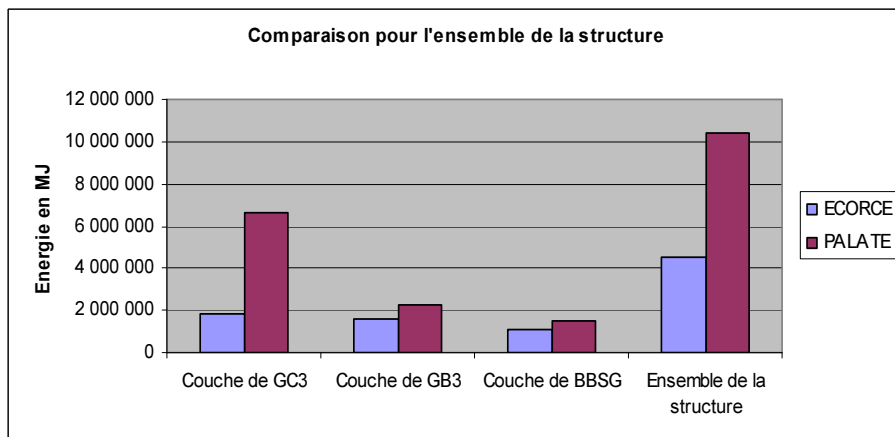




#### 4.2.3 Méthode 2 fabrication des matériaux routiers



### 4.3 Résultats PaLATE







## 1 6 Synthèse des retours utilisateurs du RST

Remarques utilisateurs	Classement des réponses à apporter			
	Ergonomie à améliorer	Fonctionnalités à améliorer	Bugs à corriger	Formation à faire
Saisies fastidieuses	X			
Saisies trop nombreuses	X			
Pas de retour en arrière possible pour modifier, il faut tout ressaisir	X			
Pas d'aide en ligne	X			
Pas de base de données pour aider l'utilisateur (consommations, engins, camions...)	X	X		
Pas de visualisation des données saisies	X	X		
Pas d'impression		X		
Pas de possibilité d'ouvrir plusieurs projets en même temps	X			
Pas de récupération des données d'un autre projet possible	X			
Perte de donnée au rechargement d'un projet sauvegardé			X	
Création de fichier intempestive			X	
Valeurs à saisir inconnues des utilisateurs				X
Validation de l'onglet « hypothèses » pas possible		X		
Onglet inventaire : on perd les têtes de colonne	X			
Pas possible de prendre en compte le retraitement en place		X		
Pas possible de décrire d'autres matériaux alternatifs		X		
Couche d'accrochage pas claire : plutôt indiquer la présence ou non d'une couche d'accrochage	X			
Erreur de calcul sur quantités de bitume des couches d'accrochage			X	
L'eau consommée par les engins n'apparaît pas			X	
Pas possible de supprimer ou dupliquer une couche	X	X		
Message d'erreur lorsqu'on sélectionne un engin dans la rubrique engins utilisés			X	
Pour saisir un deuxième cas il faut quitter le logiciel	X			
Pas possible de définir en amont le répertoire vers lequel va se stocker le cas	X	X		
Manuel utilisateur pas assez explicite	X			X
Nécessité d'une formation				X
Déconstruction pas prise en compte (probablement un loupé de l'utilisateur qui n'a pas vu l'onglet supplémentaire)				X
Le champ « Désignation ou année » n'accepte que les valeurs numériques	X			
Le bouton « valider la couche » plante l'application			X	
Incompréhension entre « formulation couche d'accrochage » et « formulation émulsion »				X
Difficultés à saisir la mise en œuvre : données indisponibles au moment de la saisie ou inconnues	X			
Proposition d'utiliser un mode débutant avec un atelier type sélectionné en fonction de certaines caractéristiques un mode expert à l'aide d'une application complémentaire		X		
Les ECF ne sont pas pris en compte		X		
Les transports maritimes ne sont pas pris en compte		X		
Simplifier la saisie des différentes distances de transport	X			

Remarques utilisateurs	Classement des réponses à apporter			
	Ergonomie à améliorer	Fonctionnalités à améliorer	Bugs à corriger	Formation à faire
Erreur de norme : remplacer NF EN 13108-211 par NF EN 13108-20			X	
Dans « formulation matériaux bitumineux », préférer : « constituants » à la place de « nom » « teneur » à la place de « valeur » « distance fournisseur-centrale » à la place de « provenance »	X			
Les enrobés « tièdes » ne sont pas pris en compte		X		
Une seule valeur pour les enrobés chauds alors que les EME sont plus chauds		X		
Prise en compte insuffisante des recyclés		X		
Pas de filler d'apport dans formulation des enrobés		X		
Rappeler sur le graphique de sortie les hypothèses retenues (structure...)		X		
Impossibilité de lire toutes les « hypothèses » car absence de défilement	X			
Accroître la lisibilité en ajoutant des lignes et des colonnes	X			
Compléter les graphiques par des valeurs (uniquement visibles au passage de la souris)	X	X		
Taille fenêtre « vecteur de référence » disproportionnée	X			
Détailler davantage les sorties comme par exemple : Pour le transport, indiquer la part des différents constituants Pour les engins, la part des différents matériels		X		
Pas possibilité de créer au fur et à mesure une base de données pour rappeler des valeurs ensuite		X		
Créer un lexique (définition des polluants, leurs impacts, choix des indicateurs...)				X
Ajouter la possibilité de définir l'épaisseur de déconstruction		X		
Après la saisie le mention « modifier » n'apparaît pas sur le bouton de la couche (pas facile de voir où on en est ! )	X			
Permettre la suppression de lignes ajoutées accidentellement ou créer une fonction « annuler » ou « historique »		X		
La barre de défilement du clavier ne fonctionne pas dans certains cas			X	
Pas de barre de défilement dans onglet « résultats »			X	
Pas de possibilités d'exporter les résultats sous forme de fichier		X		
La consommation en eau des carrières n'est pas indiquée		X		
L'affichage d'un tableau de résultat permettrait de visualiser les procédés qui ont peu d'influence		X		
Accroître la lisibilité des graphiques (choix des couleurs...)		X		
Ajouter un tableau détaillant plus finement la part des indicateurs		X		
Ajouter la possibilité de compléter la base de données pour les matériels de mise en œuvre		X		