



HAL
open science

L'EMPREINTE ECOLOGIQUE: Proposition d'un modèle synthétique de représentation des empreintes à l'échelle " Micro " d'une organisation ou d'un projet

Ibtissam El Bouazzaoui

► To cite this version:

Ibtissam El Bouazzaoui. L'EMPREINTE ECOLOGIQUE: Proposition d'un modèle synthétique de représentation des empreintes à l'échelle " Micro " d'une organisation ou d'un projet. Sciences de l'environnement. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2008. Français. NNT: 2008EMSE0023 . tel-00776465

HAL Id: tel-00776465

<https://theses.hal.science/tel-00776465>

Submitted on 15 Jan 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.



N° d'ordre : 488 SGE

THESE
présentée par

Ibtissam EL BOUAZZAOU

Pour obtenir le grade de Docteur
de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne

Spécialité : Sciences et Génie de l'Environnement

L'EMPREINTE ECOLOGIQUE :
Proposition d'un modèle synthétique de représentation des
empreintes à l'échelle « Micro » d'une organisation
ou d'un projet

Soutenue à Saint Etienne le 03 juillet 2008

Membres du jury

Président

Monsieur Yves PERRODIN

Professeur, ENTPE de Lyon

Rapporteurs

Monsieur Denis ABLITZER

Professeur, Ecole des Mines de Nancy

Madame Agnès JULLIEN

Directrice de Recherche, LCPC de Nantes

Directeurs

Monsieur Christian BRODHAG

Directeur de Recherche, ENSM-SE

Monsieur Jacques BOURGOIS

Professeur, ENSM-SE

Co-directrice

Mademoiselle Natacha GONDRAN

Maître-assistante, ENSM-SE

Invité

Monsieur Olivier FREROT

Directeur de l'Agence d'Urbanisme de Lyon

■ **Spécialités doctorales :**

SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX
 MECANIQUE ET INGENIERIE
 GENIE DES PROCEDES
 SCIENCES DE LA TERRE
 SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT
 MATHEMATIQUES APPLIQUEES
 INFORMATIQUE
 IMAGE, VISION, SIGNAL
 GENIE INDUSTRIEL
 MICROELECTRONIQUE

Responsables :

J. DRIVER Directeur de recherche – Centre SMS
A. VAUTRIN Professeur – Centre SMS
G. THOMAS Professeur – Centre SPIN
B. GUY Maître de recherche – Centre SPIN
J. BOURGOIS Professeur – Centre SITE
E. TOUBOUL Ingénieur – Centre G2I
O. BOISSIER Professeur – Centre G2I
JC. PINOLI Professeur – Centre CIS
P. BURLAT Professeur – Centre G2I
Ph. COLLOT Professeur – Centre CMP

■ **Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat** (titulaires d'un doctorat d'Etat ou d'une HDR)

AVRIL	Stéphane	MA	Mécanique & Ingénierie	CIS
BATTON-HUBERT	Mireille	MA	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BENABEN	Patrick	PR 2	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
BERNACHE-ASSOLANT	Didier	PR 1	Génie des Procédés	CIS
BIGOT	Jean-Pierre	MR	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaïd	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BOISSIER	Olivier	PR 2	Informatique	G2I
BOUCHER	Xavier	MA	Génie Industriel	G2I
BOUDAREL	Marie-Reine	MA	Sciences de l'inform. & com.	DF
BOURGOIS	Jacques	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BRODHAG	Christian	MR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BURLAT	Patrick	PR 2	Génie industriel	G2I
CARRARO	Laurent	PR 1	Mathématiques Appliquées	G2I
COLLOT	Philippe	PR 1	Microélectronique	CMP
COURNIL	Michel	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR 1	Génie industriel	CMP
DARRIEULAT	Michel	ICM	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DECHOMETS	Roland	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
DESRAYAUD	Christophe	MA	Mécanique & Ingénierie	SMS
DELAFOSSE	David	PR 2	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DOLGUI	Alexandre	PR 1	Génie Industriel	G2I
DRAPIER	Sylvain	PR 2	Mécanique & Ingénierie	CIS
DRIVER	Julian	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
FOREST	Bernard	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CIS
FORMISYN	Pascal	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
FORTUNIER	Roland	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CMP
FRACZKIEWICZ	Anna	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	CR	Génie des Procédés	SPIN
GIRARDOT	Jean-Jacques	MR	Informatique	G2I
GOEURIOT	Dominique	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GOEURIOT	Patrice	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
GROSSEAU	Philippe	MR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	MR	Génie des Procédés	SPIN
GUILHOT	Bernard	DR	Génie des Procédés	CIS
GUY	Bernard	MR	Sciences de la Terre	SPIN
GUYONNET	René	DR	Génie des Procédés	SPIN
HERRI	Jean-Michel	PR 2	Génie des Procédés	SPIN
KLÖCKER	Helmut	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
LAFOREST	Valérie	CR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
LI	Jean-Michel	EC (CCI MP)	Microélectronique	CMP
LONDICHE	Henry	MR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
MOLIMARD	Jérôme	MA	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
MONTHEILLET	Frank	DR 1 CNRS	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
PERIER-CAMBY	Laurent	PR1	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Christophe	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean-Charles	PR 1	Image, Vision, Signal	CIS
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
SZAFNICKI	Konrad	CR	Sciences de la Terre	SITE
THOMAS	Gérard	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
VALDIVIESO	François	MA	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
VAUTRIN	Alain	PR 1	Mécanique & Ingénierie	SMS
VIRICELLE	Jean-Paul	MR	Génie des procédés	SPIN
WOLSKI	Krzysztof	CR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR 1	Génie industriel	CIS

Glossaire :

PR 1 Professeur 1^{ère} catégorie
 PR 2 Professeur 2^{ème} catégorie
 MA(MDC)Maître assistant
 DR (DR1) Directeur de recherche
 Ing. Ingénieur
 MR(DR2) Maître de recherche
 CR Chargé de recherche
 EC Enseignant-chercheur
 ICM Ingénieur en chef des mines

Centres :

SMS Sciences des Matériaux et des Structures
 SPIN Sciences des Processus Industriels et Naturels
 SITE Sciences Information et Technologies pour l'Environnement
 G2I Génie Industriel et Informatique
 CMP Centre de Microélectronique de Provence
 CIS Centre Ingénierie et Santé

REMERCIEMENTS

Je remercie très sincèrement Madame Agnès Jullien, directrice de recherche au LCPC de Nantes ainsi que Monsieur Denis Ablitzer, Professeur à l'Ecole des Mines de Nancy, d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail. Mes remerciements vont également à Monsieur Yves Perrodin, professeur à l'ENTPE de Lyon, pour avoir accepté d'être président du jury de cette Thèse ainsi que Monsieur Olivier Frérot, directeur de l'Agence d'Urbanisme de Lyon, qui a accepté de me faire l'honneur de sa présence.

Je tiens à remercier mes directeurs de thèse Monsieur Jacques Bourgois, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne ainsi que Monsieur Christian Brodhag, directeur de recherche à l'Ecole des Mines de Saint Etienne, pour leur attention, leurs compétences et pour leurs conseils tout au long de ce travail de recherche.

Je tiens également à remercier Natacha Gondran, maître-assistante à l'Ecole des Mines de Saint Etienne, pour avoir suivi mes travaux de recherches, pour ses remarques nombreuses et pertinentes, pour ses encouragements, son soutien ainsi que pour tout le temps et l'énergie mis dans la relecture de ce rapport.

Toute ma gratitude va également à Monsieur Didier Graillet, directeur du centre SITE pour m'avoir accueilli dans son équipe.

Je souhaiterais remercier toutes les personnes qui ont participé à mes études. Notamment toutes les personnes qui ont gentiment accepté de répondre à mes questions : de la DDE de la Loire, de l'entreprise « LA FOREZIENNE », de l'entreprise « MALET » et de l'Ecole des Mines de Saint Etienne.

Un grand merci à Philippe Tournier, Gilles Carrot, Nicolas Fontaine, Wieslaw Florkow ainsi qu'à Jen-Louis Mansuy avec qui les échanges ont été particulièrement riches et stimulants. Merci pour votre aide, votre accueil, votre collaboration et les informations indispensables obtenues sur le projet routier. Merci pour vos encouragements et votre contribution à cette thèse. Merci aussi à Mathis Wackernagel pour son mémoire de thèse aimablement fourni.

En témoignage de ma profonde affection, qu'ils sachent que ce travail est en partie le fruit de leur enseignement, de l'éducation et du soutien tant matériel que moral qu'ils m'ont donné : à mes parents. Grand merci! Merci à ma sœur et à mon frère...

Merci également à tous les membres du centre Site de l'Ecole des Mines de Saint Etienne. Merci encore à mon directeur de thèse Jacques Bourgois pour m'avoir écouté lors d'une phase de ma vie.

Une pensée particulière pour Zahia ainsi qu'à mes amis thésards : Gaëlle, Anne, Florine, Morad, Loïc... pour votre aide et pour tous ces moments partagés. Merci à Mamy, Aurélien et Viet pour les petits conseils techniques fournis !

Je n'oublie pas mes amis lointains : Nadia, Zakaria, Elodie... Merci pour tous ces moments passés avec vous.

RÉSUMÉ

Aujourd'hui, face à l'épuisement des ressources naturelles et à la menace des changements climatiques, les acteurs souhaitant évaluer la pression exercée sur les ressources naturelles par nos modes de vie, ont besoin d'outils pertinents. L'empreinte écologique pourrait être l'un de ces outils.

L'analyse de l'empreinte écologique permet d'évaluer la consommation des ressources naturelles régénératives et les besoins d'absorption des déchets d'une population humaine ou d'une économie donnée, en termes de surface correspondante de sol productif. Elle veut exprimer le degré de dépassement de la capacité de charge de l'écosystème exercé par une société ou une région dans les conditions de technologie et d'organisation sociale actuelles. Si l'on utilise les termes d'offre et demande, cet indice permet de dresser un bilan écologique en comparant la demande (empreinte écologique) et l'offre (biocapacité) en ressources naturelles régénératives.

Le calcul de l'empreinte écologique est basé sur la traduction des consommations en surfaces (hectares globaux) de terre et d'eau biologiquement productives utilisées pour produire les ressources consommées et pour assimiler les déchets générés avec les technologies actuelles. Si la méthode est de plus en plus robuste au niveau des calculs d'empreintes nationales, les calculs d'empreinte de sous-systèmes locaux ne font pas encore l'objet d'une standardisation. Deux approches pour la transformation de données de consommations en unités de surfaces peuvent être utilisées pour un système donné :

- La méthode « basée sur les calculs nationaux » consiste à pondérer les différentes composantes de l'empreinte du pays dans lequel se situe le système étudié par les ratios entre consommations propres au système étudié et consommations nationales.
- L'approche par composante se base sur un inventaire direct des consommations à un niveau plus local (région, ville, etc) et par l'utilisation de facteurs de conversion spécifiques. Cette méthode nous semble plus appropriée pour des calculs d'empreinte d'une organisation, mais elle nécessite des adaptations méthodologiques pour rendre plus fiables les calculs à petite échelle (au niveau d'une organisation ou d'un projet).

Cette étude vise donc à développer une méthode de calcul d'empreinte écologique en mettant en évidence les intérêts et limites qui peuvent être tirés d'un tel calcul à un niveau 'micro'.

Dans le cadre d'une coopération entre le centre SITE et la DDE 42, nous avons choisi de travailler sur une activité de travaux publics pour laquelle nous pouvions obtenir les données, afin de montrer les intérêts de l'utilisation de cet indice dans le cadre d'une telle activité. Notre terrain d'application est le projet de mise à 2*2 voies du tronçon de la RN7-RN82 entre Cosne-Sur-Loire et Balbigny, en France.

Sur un plan méthodologique, nous avons développé une méthode pour calculer cet indice dans le cas d'un projet routier. Ce calcul nous a permis de réfléchir sur les comparaisons et les adaptations possibles des différentes méthodes possibles. D'autre part, nos résultats de calcul d'empreinte écologique pour ce chantier mettent en évidence les impacts respectifs de certaines consommations a priori négligées (exemple : les tuyaux en béton). Enfin, nous présentons également les principales limites de l'utilisation de l'empreinte à cette échelle.

Mots clés : Empreinte écologique, évaluation environnementale, approche par composantes, analyse de cycle de vie, bilan carbone®, projet routier

ABSTRACT

Ecological footprint, at a national and global level, proposes a kind of “ecological balance” that assesses and compares biologically productive area supply and demand. If the success of this index at a national level is proven (living planet reports, for example), we assume that, to help each organisation or person to apprehend its own contribution to ecological footprint, it can be helpful to develop methods of estimation of ecological footprint at organisational level.

The classical method of ecological footprint calculation is based on the calculation of equivalence and yield factors thanks to national statistics of areas and tons of productions. Then, statistics of national consumptions (taken into account production, importations and exportations of products) are translated into global hectares representing global average biologically productive areas that are necessary to produce the resources that are consumed and the wastes that are generated by each country. Thus, for a given sub national system (city or organisation, for example), two methods can be used to have an idea of its ecological footprint : (1) The national account based approach is based on the corrections of factors from the different national averages of consumptions. For an organisation whose consumptions are very different from an average household, this method does not appear to be satisfying, (2) The component-based approach that is based on an inventory of the various consumptions and wastes generated by the observed system, the calculation of standards or specific (when standards factors are not available) conversion factors based, for example on life-cycle analysis studies. This method seemed to the authors of his paper more appropriate to evaluate the ecological footprint of a productive activity. However, it requires several methodological adaptations to the classical ecological footprint methods and it presents some limitations. These adaptations and limitations will be presented in this paper.

In order to precise these adaptations requirements and limitations, we developed and experimented such a component-based approach on a real case. Our application field is a road work on the RN7 – RN 82 to turn a section into a four-lane road, between Cosne sur Loire and Balbigny, France This is a particularly complex case as it involve several participants (the Loire’s departmental service for equipment is the prime contractor, the works are done by private companies) and is constituted by various very different phases of activity (earth-works, road way construction, etc.).

The first goal of this study is to complete an ecological footprint calculation in order to identify the type of conclusions that could be learnt from such studies as well as to recognize the specificities and limits of the method that we developed. The second goal is to propose a systematic framework of identification and follow-up of the various impacts that contribute to the ecological footprint of an activity. On a methodological point of view, this ecological footprint assessment made us adapt and compare various methodologies that were possible for the calculation of conversion factors. On a user point of view, ecological footprint results emphasized some sources of consumptions and impacts that may have been neglected a priori (pipes, for example). Finally, we also present the main limits of the use of the ecological footprint to this scale.

Keywords: ecological footprint, environmental evaluation, component-based approach, life cycle assessment, carbon balance, road project.

TABLES DES MATIERES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	15
Partie I L'incidence de pratiques anthropiques sur l'environnement et les outils d'évaluation environnementale globale	25
1 Une dégradation notable de l'environnement : Une évaluation environnementale est nécessaire	25
1.1 Les impacts de l'activité anthropique	25
1.1.1 Changement climatique	28
1.1.2 Effets sur la nature et la biodiversité	32
1.1.3 Effets sur la santé humaine	33
1.1.4 Utilisation de ressources naturelles	33
1.2 Nécessité d'évaluation environnementale	36
2 Outils d'évaluation environnementale globale sur différents domaines d'application	37
2.1 Principaux outils d'évaluation de l'impact environnemental des produits ou projet	37
2.1.1 Etude d'impact	37
• Contenu de l'étude d'impact	37
• Principaux avantages et limites	38
2.1.2 Analyse de cycle de vie (ACV)	38
• Synthèse de la méthodologie	38
• Principaux Intérêts et limites de la méthode	41
2.1.3 Sac à dos écologique	42
2.1.4 MIPS (Material Input Per Unit of Service)	42
• Définition	43
• Principe de calcul	43
• Principaux Intérêts et limites de la méthode	44
2.1.5 Autres outils à dominante qualitative pour l'évaluation d'impact environnemental des produits	45
2.2 L'évaluation de l'impact environnemental au niveau des organisations	46
2.2.1 L'évaluation de la Performance Environnementale (EPE) : ISO 14031	46
• Cadre général	46
• Principaux intérêts et limites :	47
2.2.2 Bilan Carbone®	48
• Définition	48
• Périmètres possibles	49
• Principaux avantages et limites de la méthode	50
2.3 L'évaluation d'impacts environnementaux au niveau du territoire	51
2.3.1 La méthode bilan carbone® à ce niveau	51
2.3.2 L'empreinte écologique au niveau "Macro"	51
• Définition et principe	52
• Zoom sur la structure générale des calculs d'empreinte	53
• Exemples d'application : L'empreinte écologique à l'échelle mondiale	62
• Principaux intérêts et limites de l'empreinte écologique	65
• Les standards de l'empreinte écologique	66
3 Synthèse sur les outils d'évaluation environnementale globale	67
Partie II Empreinte écologique, du global au local :	81
Peut-on calculer l'empreinte écologique à l'échelle d'un établissement individuel ? Propositions méthodologiques pour le calcul d'empreinte écologique au niveau d'une activité donnée	81

1	Contexte du projet	81
1.1	Définition des objectifs de l'étude de calcul d'empreinte écologique à l'échelle d'un projet : pourquoi la méthode de l'empreinte écologique actuelle ne peut pas être utilisée à l'échelle d'une activité industrielle ?	81
	• Et l'empreinte écologique au niveau d'un projet ou organisation ?	84
2	Bases méthodologiques du calcul au niveau « Micro »	86
2.1	Principes du calcul au niveau « Micro »	86
2.2	Méthode de calcul	87
2.2.1	Définition du périmètre	87
2.2.2	Inventaire des données : nécessité d'adapter les catégories de consommation	88
2.2.3	Définition des facteurs de conversion	89
	• Adaptation des différents types de 'sols' à considérer : facteurs d'équivalence et de rendement par type de sol	89
	• Autres facteurs de conversion nécessaires	89
2.2.4	Calculs des empreintes : principales équations de base	91
	• Calcul d'empreinte écologique sur sols énergétiques	91
	• Calcul d'empreinte écologique sur sols construits (ou dégradés)	93
	• Calcul d'empreinte écologique sur sols forêts	94
	• Calcul d'empreinte écologique sur espaces marins	95
	• Calcul d'empreinte écologique sur sols aquatiques	95
	• Calcul d'empreinte écologique sur terres arables et pâturages	97
	• Somme des différents postes et analyse des résultats	97
3	Exemples de calcul: Calcul d'empreinte des principaux matériaux susceptibles d'être rencontrés au sein des principaux postes de consommation d'une activité donnée	98
3.1	Carburant	98
3.1.1	Calcul d'empreinte en sols énergétiques	98
3.2	Papier et bois	98
3.2.1	Calcul d'empreinte en sols énergétiques	98
3.2.2	Calcul d'empreinte en sols forêts : Calculs de sols de forêts pour l'extraction de la pulpe nécessaire au papier et pour autre usage en bois	99
3.3	Béton	100
3.3.1	Calcul d'empreinte en sols énergétiques	101
3.3.2	Calcul d'empreinte en sols dégradés	101
3.4	Eau	103
3.4.1	Calcul d'empreinte en sols aquatiques : Exemple des eaux non potables utilisées pour l'arrosage des pistes dans le domaine de la construction routière	103
3.4.2	Calcul d'empreinte en sols énergétiques : l'exemple des eaux potables consommées	103
3.4.3	Calcul d'empreinte des eaux potables consommées sur les sols dégradés	104
3.4.4	Calcul d'empreinte des eaux usées sur les sols dégradés	104
3.5	Electricité	105
3.5.1	L'énergie thermique : Calcul d'empreinte en sols énergétiques	106
3.5.2	L'hydroélectricité : Calcul d'empreinte en sols construits (ou dégradés)	107
3.6	Transports	107
4	L'évaluation de cette approche de calcul par rapport aux standards établies	110
5	Principales difficultés soulevées par cette adaptation méthodologique	117
5.1	Différentes sources de facteurs de conversion	117
5.2	Fiabilité des résultats	119
6	Conclusion	121

Partie III Empreinte Ecologique, du global au local : Application à un chantier routier au nord de la Loire « cas de Vendranges » _____ 125

1 Définition du système étudié pour le calcul d'empreinte écologique : la construction d'une route _____	125
1.1 Généralités sur la construction des routes _____	125
1.1.1 Conception et exécution des terrassements _____	125
1.1.2 Conception et construction de la chaussée _____	128
1.2 Présentation du site étudié _____	131
1.2.1 Le projet de mise à deux fois deux voies, des RN7 - RN82, dans son ensemble _____	131
1.2.2 L'opération prise en compte dans l'étude de calcul d'empreinte écologique _	133
1.2.3 Caractéristiques des grands travaux de construction du chantier de Vendranges _	134
1.3 Fonction du système étudié _____	138
1.4 Frontières du site étudié _____	138
2 Inventaire des données de consommation : postes pris en compte pour le calcul d'empreinte écologique _____	140
3 Les différents types de 'sols' à considérer _____	141
4 Contribution méthodologique pour l'adaptation au calcul d'empreinte du chantier routier étudié _____	142
4.1 En phase de construction : terrassement et chaussée _____	142
4.1.1 Empreinte partielle de la catégorie Consommables _____	142
• Carburant _____	142
• Explosifs _____	143
• Matériaux de construction : béton, bitume, granulats et filler d'apport _____	143
• Caniveaux à grille PVC et gaines en PEhd _____	145
• Bombes de peinture _____	145
• Papier _____	146
• Eaux potables _____	146
• Eaux non potables utilisées pour l'arrosage des pistes _____	147
• Bouteilles en plastique (bureaux) _____	147
4.1.2 Empreinte partielle de la catégorie Infrastructures _____	147
• L'emprise de la route / stockage des matériaux de construction/ surface occupée par la base de vie (bureaux) _____	147
• Bureaux installés provisoirement sur le chantier en phase de construction _____	147
• Réseau: Câbles électriques _____	148
• Electricité _____	148
4.1.3 Empreinte partielle de la catégorie Transport _____	149
4.1.4 Empreinte partielle de la catégorie 'Biens manufacturés' _____	149
• Engins utilisés sur le chantier _____	149
• Piquets d'implantation _____	151
4.1.5 Empreinte partielle de la catégorie 'Services' _____	151
• Eaux usées de la base de vie du chantier (bureaux) _____	151
• Télécommunication _____	152
4.2 Estimation de l'empreinte écologique liée à la phase 'utilisation' de la route _____	152
5 Présentation des résultats de l'étude de cas _____	153
5.1 L'empreinte écologique de la route en phase de construction _____	153
5.1.1 Empreintes écologiques partielles des catégories de consommation _____	160

• Empreinte écologique des consommables _____	160
• Empreinte écologique des infrastructures _____	160
• Empreinte écologique des transports _____	161
• Empreinte écologique des biens manufacturés _____	161
• Empreinte écologique des services _____	161
5.2 Comparaison de l’empreinte écologique totale « Construction / Utilisation » _____	162
5.3 Fiabilité des résultats chiffrés _____	162
6 L’évaluation de l’étude de calcul d’empreinte du chantier de ‘Vendranges’ par rapport aux standards de l’empreinte écologique _____	163
7 Conclusion _____	172
Partie IV Discussion sur intérêts et limites de l’empreinte écologique appliquée à un niveau ‘micro’ et Perspectives _____	175
1 Intérêts de la méthodologie de calcul d’empreinte écologique au niveau « micro » _____	175
1.1 Application à l’évaluation et au contrôle environnemental _____	175
• Scénario de diminution de la consommation en carburant fossile pour minimiser les émissions de CO ₂ : utilisation de biocarburant ? _____	176
• Diminution de la consommation en matériaux de construction nécessaires pour la construction routière _____	182
1.2 Application à la communication : un outil synthétique et souple d’utilisation pour la comparaison de différentes études _____	187
• L’empreinte écologique : un outil simple pour l’interprétation des résultats de cycle de vie des produits _____	189
2 Limites de l’application de la méthodologie de l’empreinte écologique à une activité et perspectives _____	189
2.1 Limites de l’inventaire _____	189
2.2 Question des coefficients de conversion _____	190
2.3 Empreinte écologique sur les sols énergétiques _____	192
2.4 Aspects non pris en compte _____	194
2.5 Difficulté de double comptage _____	194
2.6 Sensibilité des résultats de calcul d’empreinte écologique _____	195
2.7 Autre difficultés soulevées par l’application de la méthode à certains articles de consommation _____	195
2.7.1 Energie _____	195
2.7.2 Bureaux _____	195
2.7.3 Biens manufacturés _____	196
2.7.4 Eau : appropriation de sols aquatiques _____	196
2.8 Biocapacité _____	197
3 Conclusion _____	198
CONCLUSION GENERALE _____	199
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES _____	205
ANNEXES _____	219

LISTES DES ABREVIATIONS

ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
BCM : Bromochlorométhane
CFC : Chlorofluorocarbures
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
DDE 42 : Direction Départementale de l'Équipement de la Loire (42)
DRIRE : Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement
EE : Empreinte Ecologique
GES : Gaz à Effet de Serre
GFN : Global Footprint Network
GIEC :Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
HBFC : Hydrobromofluorocarbures
HCFC : Hydrochlorofluorocarbures
HFC : HydroFluoroCarbures
IDH : Indice de développement humain
IEA : International Energy Agency
IFEN : Institut Français de l'Environnement
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
INSEE : Institut National de la Statistique et des Études Économiques
IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change
LCPC : Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées
LSCE/IPSL : Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement de l'Institut Pierre Simon Laplace
MTD : Meilleures Techniques Disponibles
NFA : National Footprint Accounts
OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economique
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
ORSE : Observatoire sur la Responsabilité Sociale des Entreprises
RAC : Réseau Action Climat
SETRA : Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes
SITE : Sciences, Information et technologies pour l'Environnement
SME : Système de Management Environnemental
WWF : World Wildlife Fund

GLOSSAIRE

Biocapacité : Capacité biologique ou écologique (capacité naturelle) à générer des ressources et à assimiler des déchets. C'est la capacité des milieux naturels à créer des conditions globales favorables au développement de la vie organique.

Biodiversité (ou diversité biologique) : variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie; cela comprend la diversité au sein des espèces et entre espèces ainsi que celle des écosystèmes (CNUED, 1992).

Capital naturel : capacité de l'environnement à fournir les nombreux services nécessaires au maintien des espèces, à la production économique et aux activités (Glossaire environnement économie, Environnement Canada, La voie verte).

Catégorie de consommation : regroupement d'articles de consommation de même nature. Classification de ces articles en accord avec le système étudié et la nomenclature statistique officielle.

Catégorie de sols : regroupement de sols à vocation identique, rendant les mêmes services : production agricole, séquestration du CO₂, support des infrastructures humaines, etc.

Coefficient de Transfert : coefficient de conversion des consommations ou des rejets en empreinte écologique. C'est le produit des Facteurs de Conversion, de Rendement et d'Équivalence.

Énergie incorporée : énergie qui a été dépensée durant le cycle de vie complet d'un produit pour le fabriquer, le transporter et l'éliminer.

Facteur de Conversion : facteur permettant de convertir les données de consommation ou de rejet en surface simple de sols productifs, appropriée par un système pour générer les ressources consommées ou assimiler les déchets générés.

Facteur d'Équivalence (FE) : rapport entre la productivité mondiale moyenne d'une catégorie de sols bioproductifs donnée et la productivité mondiale moyenne de toutes les catégories de sols bioproductifs, indépendamment de leur nature

Facteur de Rendement (FR) : facteur qui indique dans quelle mesure une catégorie de sols est plus productive, ou moins productive que la moyenne mondiale pour cette catégorie de sols.

Facteur de séquestration du carbone : surface de forêts nécessaire pour séquestrer le carbone émis lors de la production d'un mégajoule à partir d'un combustible (fossile) donné. Il s'exprime en m² / MJ.

Hectare global : unité de mesure de l'empreinte écologique, hectare ajusté en fonction de la *bioproduktivité* moyenne mondiale.

Indicateur environnemental : unité d'information qui s'insère dans un processus spécifique de gestion, que l'on peut comparer aux objectifs de ce processus, et qui possède une signification supérieure à sa valeur première (André, 1999).

Les changements climatiques : La Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), dans son article premier, définit les changements climatiques comme « *des changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables* ».

Niveau trophique : Le niveau trophique d'un organisme est la position qu'il occupe au sein de la chaîne alimentaire. Les différents niveaux indiquent à quel point les organismes sont avancés dans la chaîne alimentaire, depuis les producteurs primaires (les végétaux) au niveau 1, en passant par les herbivores (niveau 2), les prédateurs (niveau 3), et enfin les carnivores ou grands carnivores (niveau 4 ou 5) (Evaluation des Ecosystèmes pour le Millénaire / GreenFacts).

Performances environnementales : ensemble des résultats obtenus par la direction d'un organisme concernant ses aspects environnementaux (NF EN ISO 14031).

Taux d'absorption des forêts : quantité de carbone fossile qui peut être séquestré par unité de surface de forêt. Il s'exprime en tC / ha.

Unité fonctionnelle : performance quantifiée d'un système, destinée à être utilisée comme unité de référence dans une Analyse de Cycle de Vie.

LISTES DES FIGURES

<i>Figure 1: Diminution de l’empreinte écologique avec une action globale ou avec plusieurs actions locales</i>	17
<i>Figure 2 : Démarche suivie pour la réalisation de la thèse</i>	18
<i>Figure 3 : Plan du rapport de thèse.....</i>	21
<i>Figure 4: Evolution de la consommation finale mondiale d’énergie en millions de Tonnes équivalent pétrole (1 tep = 11 600 kWh).</i>	26
<i>Figure 5 : Evolution des émissions mondiales de CO₂ , en millions de tonnes de CO₂</i>	26
<i>Figure 6 : La diminution de la biodiversité (1970-2000) : Indice des espèces forestières, d’eau douce et marines</i>	27
<i>Figure 7 : Effet de serre.</i>	29
<i>Figure 8 : Evolution de la couche d’ozone dans le monde</i>	31
<i>Figure 9 : L’épuisement des ressources en pétrole et gaz.....</i>	33
<i>Figure 10 : Relation sources / Impacts (inspiré de Maurin, 2004).....</i>	34
<i>Figure 11: Relations entre les différentes étapes du processus d’analyse du cycle de vie selon ISO 14040.....</i>	39
<i>Figure 12 : L’EPE au sein de Management Environnemental.....</i>	47
Figure 13: <i>Illustration des différents périmètres de la méthode Bilan Carbone® selon.....</i>	50
<i>Figure 14 : Représentation schématique des modalités de calcul de l’empreinte écologique et de la biocapacité d’après Wackernagel, 2005</i>	57
<i>Figure 15 : Matrice générale utilisée pour le calcul de l’empreinte écologique des Nations.....</i>	61
<i>Figure 16 : Evolution de l’empreinte écologique globale entre 1961 et 2003, GFN</i>	62
<i>Figure 17 : Empreinte écologique et le nombre d’habitants en 2002, selon les régions.</i>	63
<i>Figure 18 : Empreinte écologique selon les régions du globe.....</i>	64
<i>Figure 19 : Comparaison de l’empreinte écologique pour 128 nations</i>	65
Figure 20 : <i>Croisement impacts environnementaux majeurs et outils d’évaluation (Empreinte Ecologique, Analyse de Cycle de Vie et Bilan Carbone).....</i>	72
<i>Figure 21 : Coût d’accès aux informations dans le cadre d’une évaluation environnementale.....</i>	73
Figure 22: <i>Variation du nombre d’indicateurs en fonction du niveau de diffusion selon Personne (1998).....</i>	74
Figure 23: <i>Processus d’évaluation triangulaire, inspiré de Personne (1998).....</i>	75
<i>Figure 24 : Exemple de processus d’évaluation lié à l’impact « Augmentation de l’effet de serre» pour le cas d’une centrale d’enrobage (considérée comme ‘système’)</i>	76
<i>Figure 25 : Les consommations directes d’un territoire sur lesquelles repose le calcul d’empreinte. 82</i>	82
Figure 26 : <i>Empreinte Ecologique FRANCE, PARIS et BESANÇON par secteur de consommation, 1999.....</i>	84
Figure 27 : <i>L’empreinte écologique aux différentes échelles : nécessité de calcul d’empreinte d’une activité individuelle</i>	85
<i>Figure 28 : Principe de calcul de l’approche par composants.....</i>	87
<i>Figure 29 : Exemple des frontières prises en compte pour une filière étudiée : ‘fabrication du papier’</i>	88
Figure 30 : <i>Composition de l’empreinte écologique du papier (hag / t) en fonction du rendement..</i>	100
<i>Figure 31: Estimation des hectares dégradés pour la production d’une tonne de béton en France..</i>	102
Figure 32 : <i>Composition de l’empreinte écologique du béton (hag / t) en fonction du rendement ...</i>	103
<i>Figure 33 : Constitution du terrassement. D’après Hoang, 2005.....</i>	126
Figure 34 : <i>Opérations élémentaires pour quatre cas de chantier type</i>	127
<i>Figure 35 : Structure générale de la chaussée.....</i>	128
<i>Figure 36 : Profil en travers sur une route nationale</i>	129
<i>Figure 37 : Profil en travers d’une route à 2x2 voies.....</i>	129
<i>Figure 38 : L’opération RN7 et RN82</i>	131

<i>Figure 39 : Déviation de Vendranges</i>	133
<i>Figure 40 : Exemples de travaux de construction d'ouvrages d'art</i>	135
<i>Figure 41 : Travaux de terrassements</i>	136
<i>Figure 42 : Travaux de chaussée</i>	136
<i>Figure 43 : Structure de la chaussée du chantier de Vendranges</i>	137
<i>Figure 44 : Géométrie de la mise à 2x2 voies de l'axe RN7 - RN82 (Vendranges)</i>	138
<i>Figure 45 : Le système étudié</i>	138
<i>Figure 46 : Frontières du système étudié</i>	139
<i>Figure 47 : Estimation de l'incertitude sur l'empreinte écologique totale</i>	158
Figure 48 : Répartition de l'empreinte écologique selon les différentes catégories de consommation du chantier de Vendranges durant la phase de construction (terrassements et chaussées)	159
<i>Figure 49 : Répartition de l'empreinte écologique totale sur les catégories de sols</i>	159
<i>Figure 50 : Répartition de l'empreinte partielle de la 'catégorie consommables', du chantier en phases de construction (terrassements et chaussées), sur les catégories de sols</i>	160
<i>Figure 51 : Empreinte partielle sur sols énergétiques des activités de transport</i>	161
Figure 52 : Empreinte écologique liée à la construction (durée de deux ans de chantier) et l'utilisation (pendant deux ans), en hag.	162
<i>Figure 53 : Filière bioéthanol</i>	176
<i>Figure 54 : Filière biodiesel</i>	177
<i>Figure 55 : Transformation de la matière lignocellulosique en éthanol</i>	181
<i>Figure 56 : Processus d'évaluation par l'empreinte écologique : le cas du carburant utilisé pour l'alimentation des engins du chantier routier</i>	187
Figure 57 : Empreintes sur sols énergétiques de trois types de chaussée	188
Figure 58 : Exemple illustrant les difficultés de double comptage dans les calculs d'empreinte au niveau 'micro'	194

LISTES DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Objectif de la thèse</i>	17
<i>Tableau 2: Classification des impacts selon les quatre thèmes majeurs</i>	35
<i>Tableau 3: Exemples de MI pour certains matériaux</i>	44
<i>Tableau 4 : Facteurs d'équivalence (2001)</i>	58
<i>Tableau 5: Facteurs de rendement de la France de 2002 (GFN)</i>	59
<i>Tableau 6 : Synthèse des principaux outils d'évaluation environnementale globale</i>	70
<i>Tableau 7 : Empreinte Ecologique et Bioacapacité de la France, en hectares globaux par personne, 2003. Selon le 'Rapport planète vivante' de 2006</i>	83
<i>Tableau 8 : Empreinte Ecologique PARIS, en hectares globaux par personne, 1999</i>	84
<i>Tableau 9 : Empreinte Ecologique BESANÇON, en hectares globaux par personne, 1999</i>	84
<i>Tableau 10 : Exemples de facteurs d'émission de certains matériaux</i>	90
<i>Tableau 11 : Exemples d'énergies incorporées de certains matériaux selon certaines sources</i>	91
<i>Tableau 12 : Empreintes écologiques de certains matériaux en fonction des différents facteurs de conversion selon différentes sources</i>	91
Tableau 13 : <i>Tableur utilisé pour le calcul de l'empreinte écologique d'une activité</i>	98
<i>Tableau 14 : Répartition des empreintes écologiques du bois et papier</i>	100
<i>Tableau 15 : Répartition de l'empreinte écologique du béton</i>	102
<i>Tableau 16 : Production et consommation d'électricité en France (2006).Source : Observatoire de l'Énergie, d'après INSEE (http://www.insee.fr)</i>	106
<i>Tableau 17 : Facteurs d'émissions par km parcouru pour différents types de transport (ADEME, 2007)</i>	109
<i>Tableau 18 : Evaluation de la méthode « micro » développé par rapport aux standards de l'empreinte écologique établis par le réseau « Global Footprint Network, 2006 »</i>	116
<i>Tableau 19 : Extrait de la base de donnée : exemples de facteurs de conversion selon certaines sources</i>	118
Tableau 20 : <i>L'évaluation des données collectées selon le modèle proposé dans</i>	120
<i>Tableau 21 : Calcul d'empreinte écologique sur sols énergétiques du papier (l'exemple de la quantité consommée dans les bureaux du chantier routier de Vendranges en phase de construction)</i> ...	121
Tableau 22 : <i>Matériels utilisés pendant les travaux des terrassements</i>	128
<i>Tableau 23: Travaux et matériels de la mise en œuvre de la chaussée [Hoang, 2005]</i>	131
<i>Tableau 24: Synthèse des différents aspects et impacts environnementaux apparus comme significatifs sur l'opération de Vendranges</i>	134
Tableau 25 : <i>Catégories de consommation prises en comptes dans le calcul d'empreinte écologique du chantier de Vendranges en phase de construction (terrassement et chaussée)</i>	141
Tableau 26 : <i>Tonnages déduits du béton utilisé sur le chantier (tuyaux d'assainissement et pour installation des caniveaux). Données BMR selon « FOREZIENNE » et « MALET »</i>	143
Tableau 27 : <i>Empreintes écologiques partielles des différents tonnages de matériaux utilisés sur le chantier</i>	144
<i>Tableau 28 : Différents engins utilisés sur le chantier de Vendranges pendant la construction (Terrassement et chaussée)</i>	150
Tableau 29 : <i>Empreintes partielles des principaux matériaux incorporés dans un véhicule d'une tonne</i>	151
Tableau 30 : <i>Répartition de l'empreinte écologique du chantier de 8 km de mise à 2*2 voies de Vendranges durant la phase de construction (terrassements et chaussée), selon les différentes postes de consommation</i>	156
<i>Tableau 31: Empreintes écologiques en hag par unité de consommation pour certains articles</i>	157
Tableau 32 :	171
<i>Tableau 33: Facteurs d'émission retenus pour les biocarburants</i>	177
<i>Tableau 34 : Productivité en biocarburant</i>	178

Tableau 35 : Estimation des empreintes écologiques des biocarburants issus des différentes biomasses	179
Tableau 36 : Empreinte totale du chantier de Vendranges, en phase de construction, portant sur l'idée de remplacer le carburant issu du pétrole par le biocarburant issu du betterave.	180
Tableau 37 : Variation des quantités de matériaux (exemples de structures de la couche de surface)	183
Tableau 38 : Empreintes écologiques de quelques exemples de matériaux de construction de la couche de surface de chaussée (couche de liaison).	185
Tableau 39 : Sols dégradés considérés dans le calcul d'empreinte du béton bitumineux (à 0 % et 30 % de recyclage) et des mâchefers valorisés en technique routière.	186
Tableau 40 : Empreintes sur sols énergétiques, liées aux différentes quantités de matériaux incorporés dans trois cas de chaussée.	188
Tableau 41 : Estimation du temps de collecte des coefficients de conversion de quelques exemples de matériaux	191
Tableau 42 : Empreinte écologique d'un véhicule d'une tonne à partir de bilan carbone et bilan énergétique.	196
Tableau 43 : Biocapacité et déficit écologique (hag / personne)	197

LISTES DES ANNEXES

<i>Annexe 1: Méthodes de pondération utilisées dans la réalisation d'une ACV</i>	219
<i>Annexe 2: Méthodes de pondération utilisées dans la réalisation d'ACV (suite)</i>	222
<i>Annexe 3: Analyse de cycle de vie simplifiée</i>	223
<i>Annexe 4 : Outils à dominante qualitative pour l'évaluation d'impact</i>	224
<i>Annexe 5: Distribution mondiale de l'intensité de l'empreinte écologique</i>	225
<i>Annexe 6 : Les standards de l'empreinte écologique (GFN, 2006)</i>	226
<i>Annexe 7 : Epaisseur préconisée de couche de forme et classe de plate-forme obtenue</i>	244
<i>Annexe 8 : Déviation changy - La pacaudière</i>	244
<i>Annexe 9 : Process de production de Bioéthanol issu de la betterave</i>	245
<i>Annexe 10 : Réaction de transestérification</i>	246
<i>Annexe 11: Extrait de la base de donnée suisse "ecoinvent v1.2"</i>	246
<i>Annexe 12 : Estimation du temps de collecte des coefficients de conversion de certains matériaux</i>	247

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La littérature du domaine indique qu'au cours des cent dernières années, l'homme a modifié les écosystèmes plus rapidement et plus profondément que durant toute autre période de l'histoire de l'humanité, afin de satisfaire une demande toujours plus grande en matière de nourriture, d'eau douce, de bois, de fibre, et d'énergie. Cela a entraîné une perte substantielle et largement irréversible de la diversité de la vie sur la Terre [Walter et al, 2005].

Les activités anthropiques laissent une empreinte sur l'environnement car elles utilisent de l'énergie ou des matières premières, produisent des déchets ou des effluents que l'on retrouve ensuite dans le milieu naturel.

Selon la nature des rejets, de tels impacts survenant à l'échelle locale peuvent passer à l'échelle planétaire. Cette dégradation est de plus en plus complexe : chaque modification trouve ses causes parmi plusieurs phénomènes rentrant en synergie et chaque source participe à plusieurs types de pollutions [Gondran, 2001].

Depuis les années 1980, des changements importants ont lieu afin de mieux maîtriser les impacts des activités industrielles sur l'environnement, notamment face à l'épuisement des ressources et à la menace des changements climatiques : une législation de plus en plus stricte et mieux appliquée et une sensibilisation accrue de la population.

De même, la plupart des acteurs (entreprises, collectivités territoriales, organismes publics, etc) adoptent des systèmes de gestion de l'environnement prévoyant la surveillance et l'évaluation des émissions, la gestion intégrée des déchets, la prévention des risques. Des méthodes et instruments d'évaluation environnementale globale se développent afin de mieux cerner l'ensemble des impacts générés par un produit, un site industriel ou un territoire. C'est le cas par exemple "des études d'impact" qui constitue dans de nombreux pays une obligation réglementaire préalable à la création d'infrastructures (industrielles ou d'aménagement du territoire) en demandant au porteur de projet d'identifier l'état initial du site puis l'ensemble des impacts associés au projet. "L'Analyse de Cycle de Vie" (ACV), qui n'est pas obligatoire, mais standardisée et appliquée depuis plus de vingt ans permet d'étudier les impacts environnementaux liés à un produit ou un service.

Aujourd'hui, plusieurs acteurs (administrations, travaux publics, sites industriels, organisations diverses, etc) ont besoin d'outils plus pertinents - pour évaluer la pression exercée sur l'environnement par nos activités - synthétiques, souples d'utilisation et qui facilitent la compréhension auprès du grand public.

Considérée comme l'un de ces outils, l'empreinte écologique a été mise au point dans les années 90. C'est un indice permettant de représenter d'un côté la "demande" en capital régénératif naturel (= EE) et d'un autre côté "l'offre" (= biocapacité). Ses résultats sont faciles à comprendre, ce qui peut aider les acteurs à planifier un avenir compatible avec la réalité d'une petite planète limitée [Wackernagel, 2006]. Le président Chirac, par exemple, a fait référence à l'empreinte écologique dans sa célèbre déclaration : « Notre maison brûle et nous regardons ailleurs. La nature, mutilée, surexploitée, ne parvient plus à se reconstituer et nous refusons de l'admettre. L'humanité souffre. Elle souffre de mal-développement, au Nord comme au Sud, et nous sommes indifférents. La terre et l'humanité sont en péril et nous en sommes tous responsables. (...) Nous ne pourrions pas dire que nous ne savions pas! (...) Notre responsabilité collective est engagée. Responsabilité première des pays développés. (...) Si l'humanité entière se comportait comme les pays du Nord, il faudrait deux planètes supplémentaires pour faire face aux besoins.» [Sommet mondial du développement durable, 2002].

En effet, le succès incontestable de l'empreinte écologique auprès de nombreux acteurs (associations, collectivités locales et scientifiques) est principalement dû à ses qualités pédagogiques [Gondran, 2006]. L'agrégation de différents impacts hétérogènes en une surface exprimée en hectares, unité facilement appréhendable par tous, permet une représentation

visuelle immédiate des données. Le message transmis par un bilan carbone ® par exemple fera moins facilement appel à la sensibilité profonde de chacun qu'une surface que l'on peut se représenter comme spoliée du fait de notre mode de vie, car nous ne sommes pas habitués à manipuler des tonnes de CO₂ [Gondran, 2006].

Ainsi, la simplicité des résultats de l'empreinte écologique se distingue des approches multicritères complexes qui sont employées pour évaluer les contraintes exercées par l'homme sur l'environnement.

Face à un calcul d'empreinte mondiale qui montre qu'il faudrait deux planètes pour vivre avec le mode de vie avec lequel l'on vit [Wackernagel et Rees, 1996], la première démarche permettant d'identifier les diverses responsabilités consiste à calculer l'empreinte à un niveau national (calcul d'empreinte écologique des pays voire des territoires).

Un deuxième niveau d'action serait nécessaire : encourager l'ensemble des agents individuels à réduire leur empreinte au niveau de leur mode de vie individuel ou au niveau des organisations. Il paraît donc nécessaire d'avoir un outil permettant d'évaluer de façon la plus objective possible, les contributions de nos différentes activités et projets à l'empreinte écologique et les perspectives de réduction pouvant être induites par tel ou tel changement.

Cependant, l'application de la méthodologie de calcul d'empreinte écologique actuelle pour la traduction des empreintes des projets ou organisations, nécessite des adaptations méthodologiques. Une telle adaptation soulève évidemment des questions méthodologiques qui seront développées dans ce travail.

L'empreinte écologique est une méthode de visualisation des impacts créés par nos modes de vie. Jusqu'ici, elle n'a été appliquée qu'à l'échelle planétaire ou d'un pays. Pour que cette empreinte diminue : deux solutions sont donc possibles, réagir au niveau global (mais chaque pays rejette la responsabilité sur les autres pays) ou au niveau local avec plusieurs actions locales de sensibilisation dont l'action de diminution de l'empreinte pourrait être importante, car plusieurs actions locales pourraient être plus efficaces qu'une action globale :

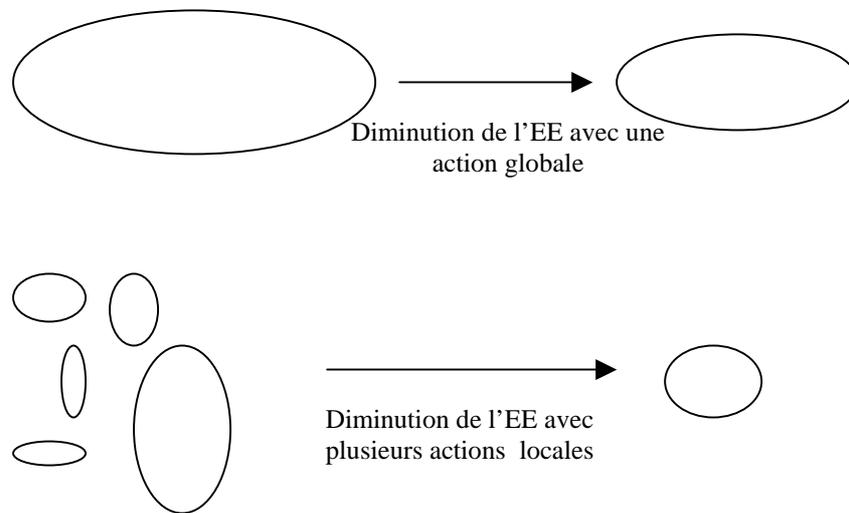


Figure 1: Diminution de l’empreinte écologique avec une action globale ou avec plusieurs actions locales

Objectif
L'évolution souhaitée de l'empreinte écologique globale « Macro » ne se fera que si chaque acteur individuel peut évaluer, au niveau « Micro », sa propre empreinte.
<p>Traduire les impacts des projets (ou organisations) sur l'environnement :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Proposer une méthode « Micro » de calcul de l'empreinte écologique associée à un projet (activité industrielle, travaux publics, etc) 2. Identifier les limites de la méthode pour estimer sa pertinence et assurer sa transparence.

Tableau 1 : Objectif de la thèse

L'hypothèse de base de notre travail est qu'il est donc pertinent d'essayer de mesurer l'empreinte écologique à l'échelle d'une organisation ou d'un projet. Il nous a donc semblé nécessaire de débiter notre travail par l'observation du terrain : enquête et analyse de données publiées sur l'empreinte écologique (principe du concept, méthode de calcul "Macro", ses avantages et limites d'après les premiers retours d'expérience).

Nous proposons ensuite un "modèle synthétique" proposant une contribution à l'application de l'empreinte écologique au niveau d'un projet (niveau "Micro"). Cet outil a été validé sur le terrain, en particulier sur un projet de travaux publics.

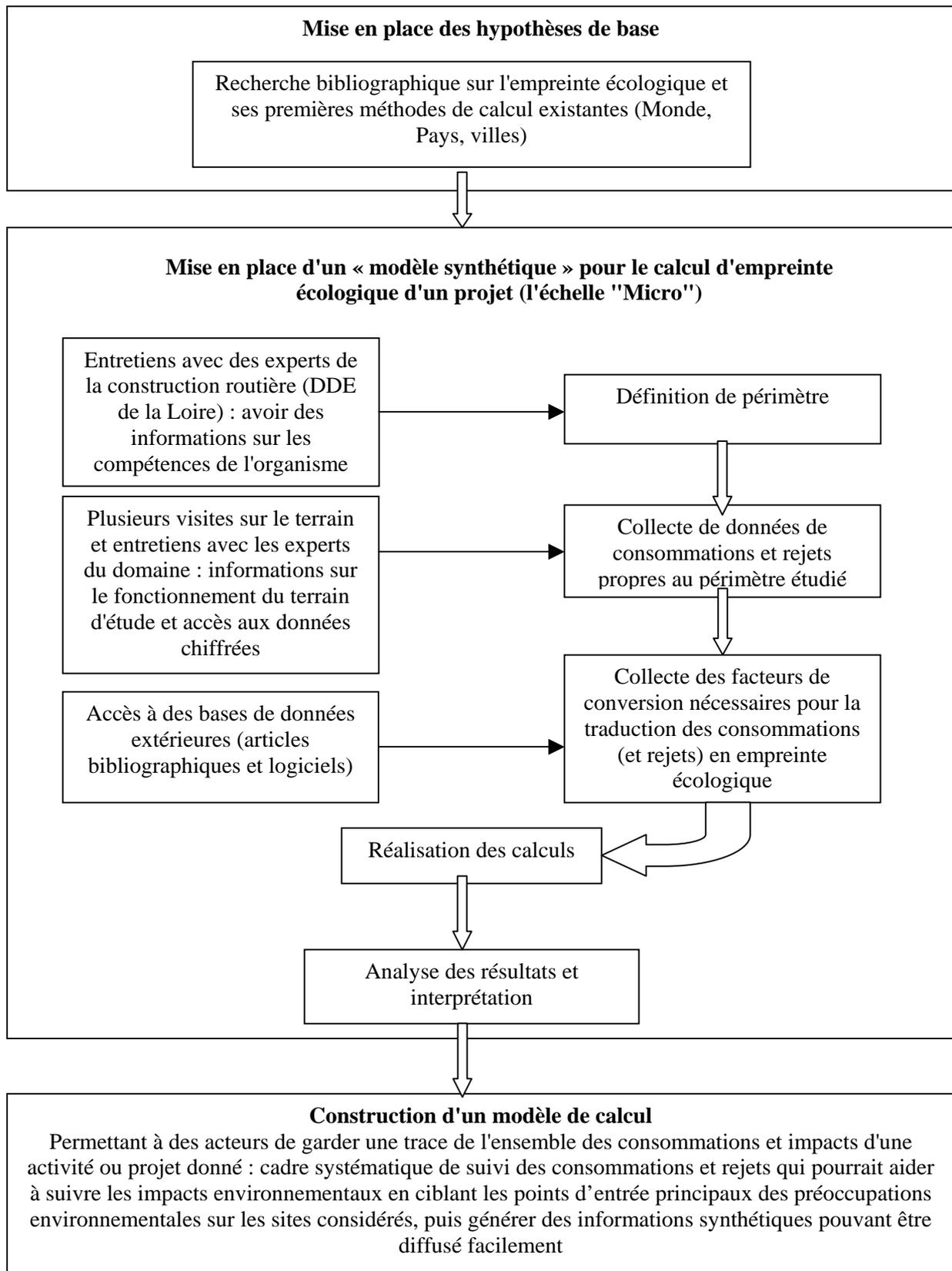


Figure 2 : Démarche suivie pour la réalisation de la thèse

La démarche que nous avons suivie est schématisée sur la figure ci-dessus.

Le plan du manuscrit de thèse est présenté sur la figure 3 :

La première partie de ce travail formalise le cadre théorique de nos travaux. Dans un premier temps, nous synthétisons les principaux impacts de l'activité industrielle puis nous décrivons les principaux outils d'évaluation environnementale globale. Nous n'approfondirons pas totalement chaque point car beaucoup a déjà été écrit à ce propos et notre but est seulement de faire un zoom sur la nécessité de faire appel aux outils plus ou moins pertinents pour déterminer l'évaluation environnementale globale des activités industrielles ainsi qu'étudier "l'interaction" qui pourrait exister entre ces outils.

C'est dans le deuxième chapitre de cette partie que nous faisons un "état des lieux" de ces principaux outils dont "l'empreinte écologique" (d'après une étude théorique sur les premiers recours d'expériences), en décrivant leur principe ainsi que leurs avantages et limites.

Dans la deuxième partie, nous mettons en place nos hypothèses de travail, objectifs de recherche et démarches. A cette fin, nous proposons une méthode de calcul d'empreinte écologique qui pourrait être appliquée à un projet donné (activité industrielle, organisation).

Dans la troisième partie, nous validons nos hypothèses de travail sur un terrain de travaux publics : le projet de mise à 2*2 voies d'un tronçon routier (la RN7-RN82 entre Cosne-Sur-Loire et Balbigny, en France).

Dans la quatrième partie, et en s'appuyant sur cette expérience, nous présentons les intérêts et limites de la méthode développée ainsi que les principales perspectives. L'objectif final étant d'essayer, à travers ces diverses recherches, d'identifier des pistes d'amélioration possibles au niveau de la méthodologie pour qu'elle soit pertinente et utilisable pour aider les différents acteurs industriels à améliorer leurs performances environnementales.

OBJET DE LA THESE

Comment représenter les empreintes d'un projet ou organisation ? Quelle méthode de calcul d'empreinte écologique pour une interprétation des données issues d'analyses de cycle de vie et analyses environnementales ?

PARTIE I

Recherche bibliographique

1. Synthèse sur les impacts des activités industrielles sur l'environnement : "Impact local versus Impact mondial"

2. Etat des lieux des principaux outils existants d'évaluation de l'ensemble des impacts (locaux et planétaire)

L'évaluation environnementale globale des :

- produits ou projet
- organisations
- territoires

L'interaction entre ces outils pourrait réduire la complexité pour l'évaluation ou l'action, pour mieux construire une compréhension des phénomènes, et des conséquences. *Mais une étape de sensibilisation* de la population est nécessaire

Besoin d'un outil pédagogique pour évaluer la pression exercée sur les ressources naturelles par nos modes de vie

L'empreinte écologique pourrait être un indice synthétique facilement communicable et appropriable par le grand public (selon les premiers retours d'expérience à l'échelle 'Macro' : pays, territoires)

PARTIE II

Objectifs, hypothèses et démarches

Des adaptations méthodologiques au niveau des calculs "d'empreinte écologique" sont nécessaires pour qu'elle soit applicable à l'échelle 'Micro'

Présentation du "modèle" de calcul d'empreinte écologique dont puissent s'inspirer les acteurs pour traduire les impacts de leurs activités

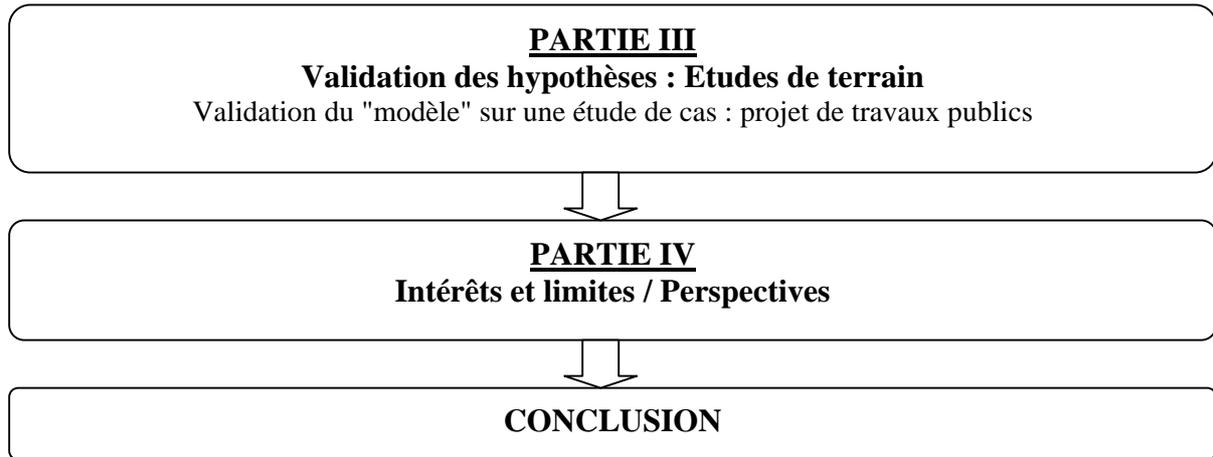


Figure 3 : Plan du rapport de thèse

PARTIE I

Partie I L'incidence de pratiques anthropiques sur l'environnement et outils d'évaluation environnementale globale

Depuis des décennies, la démarche environnementale consiste à limiter les rejets de substances nocives des sites de production dans l'air, l'eau et le sol. Cette approche est mise en œuvre sous la pression réglementaire et aussi par une démarche volontaire de nombreux industriels.

C'est à partir de 1972 qu'a lieu la mise en place des dispositions juridiques internationales de protection de l'environnement de façon générale, et des études d'impacts sur l'environnement de façon plus particulière [André, 1999]. Depuis la conférence de Rio, en 1992, certains accords et conventions sont venus enrichir ces dispositions juridiques internationales en matière d'évaluation des impacts sur l'environnement.

L'évaluation des impacts, qui tend à s'ancrer progressivement dans les pratiques administratives en France depuis le tournant des années 1980-90, se trouve élevée au rang de « modalité nécessaire » d'une « action publique durable » par les différents textes de référence définissant le champ et les principes du développement durable [Goxe et Rousseau, 2006]. En effet, l'information environnementale est multidisciplinaire et transversale, elle fait appel à tous les niveaux de complexité géographique (du local au mondial) et temporelle (du court au long terme) [Gondran, 2001].

De fait, l'essentiel des réflexions des acteurs se concentre sur les questions de méthode, *les outils d'évaluation*, pour engager des démarches locales de développement durable. Plusieurs méthodes et instruments mobilisés et expérimentés dans ce cadre général, plus particulièrement dans une perspective d'évaluation globale d'impacts environnementaux, semblent retenir l'attention de nombreux acteurs (collectivités territoriales, entreprises et organismes publics) pour l'évaluation environnementale de produits ou projets, organisations et territoires.

Dans cette partie, le but n'est pas de retracer de façon exhaustive tout ce qui a déjà été dit ou écrit sur la question de l'impact environnemental ou sur l'évaluation environnementale pour un développement durable. Nous nous proposons uniquement d'effectuer dans un premier chapitre, une synthèse du contexte général des relations entre activités anthropiques et environnement en mettant en relief les principaux effets négatifs de l'activité humaine afin de cibler les points d'entrée principaux des préoccupations environnementales sur les sites industriels en prenant en considération les principaux impacts environnementaux. Dans le deuxième chapitre, nous ferons une synthèse des principaux outils utilisés pour l'évaluation environnementale globale aux différentes échelles, en dégagant leurs intérêts et limites respectifs et en mettant en relief '*l'empreinte écologique*' qui est le coeur de sujet de ce mémoire.

1 Une dégradation notable de l'environnement : Une évaluation environnementale est nécessaire

1.1 Les impacts de l'activité anthropique

Le terme 'impact' (selon le Grand Robert, 1992) signifie 'heur'. Il peut prendre le sens figuré d'effet d'une action forte et brutale. De fait, les deux mots 'impact' et 'effet' sont utilisés couramment comme des synonymes dans la langue courante [Canter 1996 et Wathern 1988].

Un '*impact sur l'environnement*' peut donc se définir comme l'effet, pendant un temps donné et sur un espace défini, d'une activité humaine sur une composante de l'environnement, englobant les aspects biophysicochimiques et humains [André, 1999].

L'impact environnemental se caractérise, dans ce cas, par deux systèmes : un système **source** qui agit sur un système **cible** et qui entraîne sur ce deuxième des changements observables. Selon l'ISO 14001, un impact environnemental est : toute modification de l'environnement, négative ou bénéfique, résultant totalement ou partiellement des activités, produits ou services d'un organisme.

L'augmentation de l'utilisation des ressources naturelles¹ (consommation d'énergie par exemple, illustrée par la figure 4) ou encore des rejets de substances nocives dans le sol, dans l'eau et dans l'air (augmentation des gaz à effet de serre par exemple, essentiellement le CO₂ : figure 5), engendrent une dégradation marquante de l'environnement.

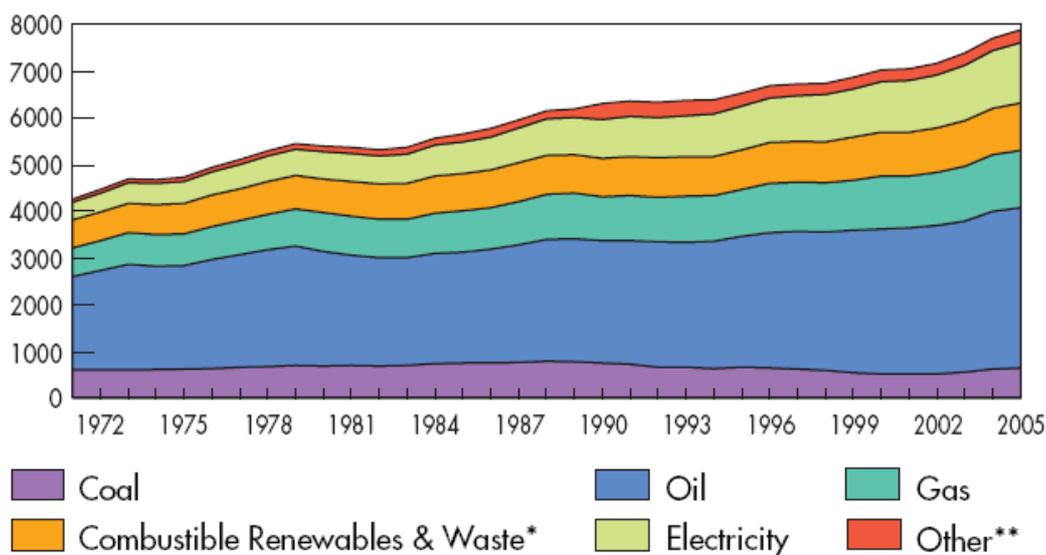


Figure 4 : Evolution de la consommation finale mondiale d'énergie en millions de Tonnes équivalent pétrole (1 tep = 11 600 kWh).

Source: Keyworld energy statistics, édition 2007, <http://www.iea.org>.

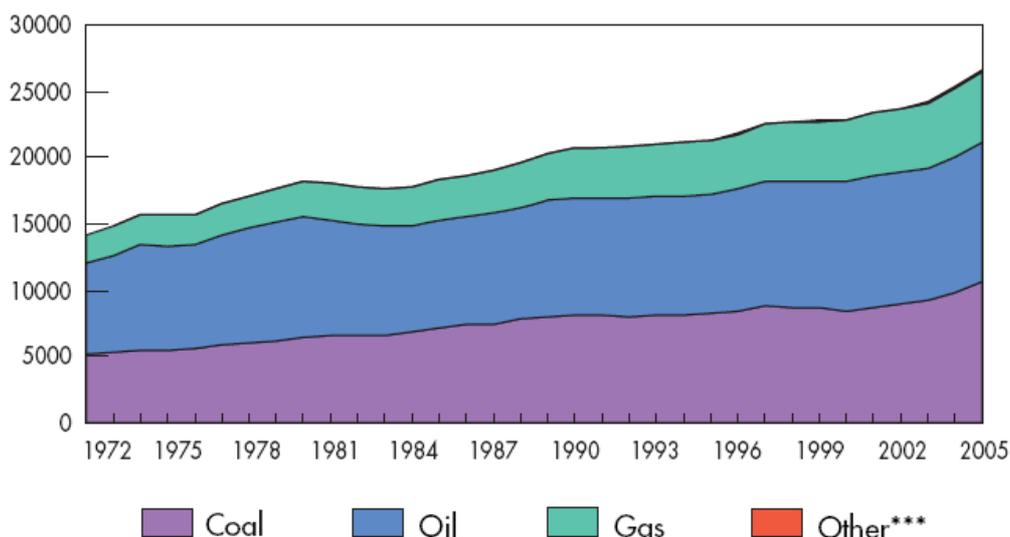


Figure 5 : Evolution des émissions mondiales de CO₂, en millions de tonnes de CO₂.

Source : Key world energy statistics, édition 2007, <http://www.iea.org>

¹ « Nous sommes clairement dans une situation de surconsommation. Nous utilisons les ressources naturelles à un rythme bien trop rapide », signale James Leape, directeur général du WWF International. The world conservation union. In : <http://www.iucn.org> (consulté le 29 février 2006).

Selon le rapport de synthèse de l'Evaluation des Ecosystèmes pour le Millénaire [Walter et al, 2005], au cours des 50 dernières années, l'homme a modifié les écosystèmes plus rapidement et plus profondément que durant toute autre période de l'histoire de l'humanité, et ce en grande partie pour satisfaire une demande toujours plus grande en matière de nourriture, d'eau douce, de bois, de fibre, et d'énergie. Cela a entraîné une perte substantielle et largement irréversible de la diversité de la vie sur la Terre : L'indice « Living Planet » du WWF² montre que la biodiversité de la planète diminue (figure 6). Le rapport sur l'Evaluation des écosystèmes pour le Millénaire publié par les Nations unies³ révèle que la dégradation des écosystèmes en Europe, du fait de l'intervention de l'homme, est plus importante que sur les autres continents. A titre d'exemple, 42 % des mammifères originaires d'Europe, 43% des oiseaux, 45% des papillons, 30% des amphibiens, 45% des reptiles et 52% des poissons d'eau douce sont menacés d'extinction. Sans parler du fait que depuis les années 50, l'Europe a perdu plus de la moitié de ses marécages ainsi que la plupart de ses terres cultivées, véritables réservoirs naturels [Commission Européenne, 2006].

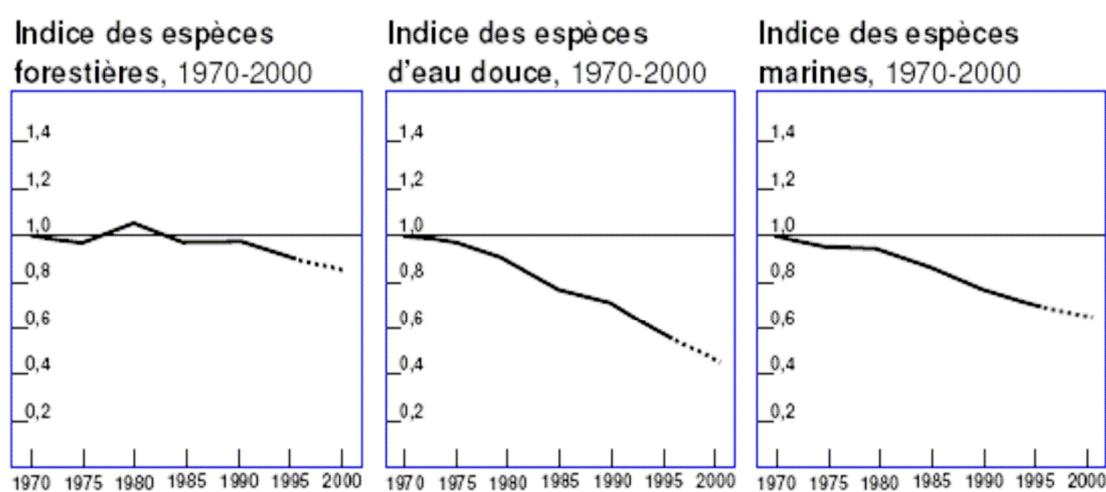


Figure 6 : La diminution de la biodiversité (1970-2000) : Indice des espèces forestières, d'eau douce et marines

Source WWF : www.panda.org

Dans la mesure où l'industrie est partie prenante de la problématique de la dégradation environnementale, elle est confrontée aux répercussions de cette problématique sur son existence et ses activités [Drechsler, 2002]. Les activités industrielles, mais également les travaux publics, les activités agricoles et divers services, peuvent être à l'origine de pollutions, de nuisances ou de risques pour l'environnement. Les activités industrielles sont ainsi responsables de plus de la moitié de la pollution organique de l'eau, de la plus grande partie des rejets toxiques dans l'eau et, d'une partie de la pollution de l'air. Ainsi, en France, la DRIRE estime que l'industrie est responsable à environ 62 % des rejets de dioxyde de soufre (combustion du fioul et du charbon), 16 % des rejets d'oxydes d'azote (installations de combustion, voitures), 26 % des rejets de composés organiques volatils (vapeurs d'hydrocarbures, de peintures et de solvants), 4 % des rejets de monoxyde de carbone et 32 % des rejets de dioxyde de carbone [DRIRE, 2004].

Ainsi, pour des objectifs de prévention de la pollution, une notion de "Meilleures Techniques Disponibles" (MTD) a été définie. Ce concept de MTD est défini par la directive européenne IPPC⁴ (prévention et contrôle intégré de la pollution) comme étant « le stade de

² <http://www.panda.org>

³ <http://www.millenniumassessment.org>

⁴ Article 2 de la directive européenne IPPC n°96/61EC

développement le plus efficace et avancé des activités et de leurs modes d'exploitation, démontrant l'aptitude pratique de techniques particulières à constituer, en principe, la base des valeurs limites d'émission visant à éviter et, lorsque cela s'avère impossible, à réduire de manière générale les émissions et l'impact sur l'environnement dans son ensemble ». Le terme « *meilleures* » souligne que ce sont les techniques les plus efficaces pour atteindre un niveau général élevé de protection de l'environnement dans son ensemble. Le terme « *disponibles* » concerne les techniques mises au point sur une échelle permettant de les appliquer dans le contexte du secteur industriel concerné, dans des conditions économiquement et techniquement viables, en prenant en considération les coûts et les avantages. En effet, technologies propres et meilleures techniques disponibles sont des notions très liées [Laforest, 2004].

La notion de 'protection de l'environnement' est généralement perçue comme un tout alors que plusieurs impacts qui lui sont associés sont extrêmement hétérogènes et enchaînés ('une chaîne d'effets'). Au premier niveau de classement, quatre thèmes majeurs sont distingués par la Commission Européenne (2002) :

- Changement climatique,
- Effets sur la nature et la biodiversité,
- Effets sur la santé humaine,
- Utilisation de ressources naturelles

Ces quatre thèmes sont repris dans le « sixième programme d'action pour l'environnement » de la Commission Européenne et couvrent l'ensemble des problématiques environnementales traitées dans les publications officielles (OCDE⁵ par exemple).

Dans la suite de ce chapitre, seront brièvement décrits les différents impacts environnementaux, en précisant pour chacun d'eux les causes principales de pollution et les principales conséquences :

1.1.1 Changement climatique

Dans ce contexte, trois impacts environnementaux influencent le climat au niveau mondial et ont un effet à long terme [DE CAEVEL, 2005]:

***a* L'augmentation de l'effet de serre**

Les gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O, etc) permettent de retenir une partie de la chaleur apportée à la terre par le soleil en absorbant le rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre, par l'atmosphère elle-même et par les nuages. Une partie de ce rayonnement absorbé est ensuite réémis en direction du sol, contribuant ainsi au réchauffement des basses couches de l'atmosphère: C'est l'effet de serre naturel.

Ces dernières années, l'augmentation importante de la concentration de gaz à effet de serre a entraîné une hausse de la température des basses couches de l'atmosphère. C'est ce qui est appelé l'effet de serre renforcé, qui est selon les scientifiques, responsable d'une hausse de température moyenne de 0,6°C ± 0,2°C depuis la fin de XIXe siècle (figure 7).

⁵ Organisation de Coopération et Développement Economique (<http://www.oecd.org>).

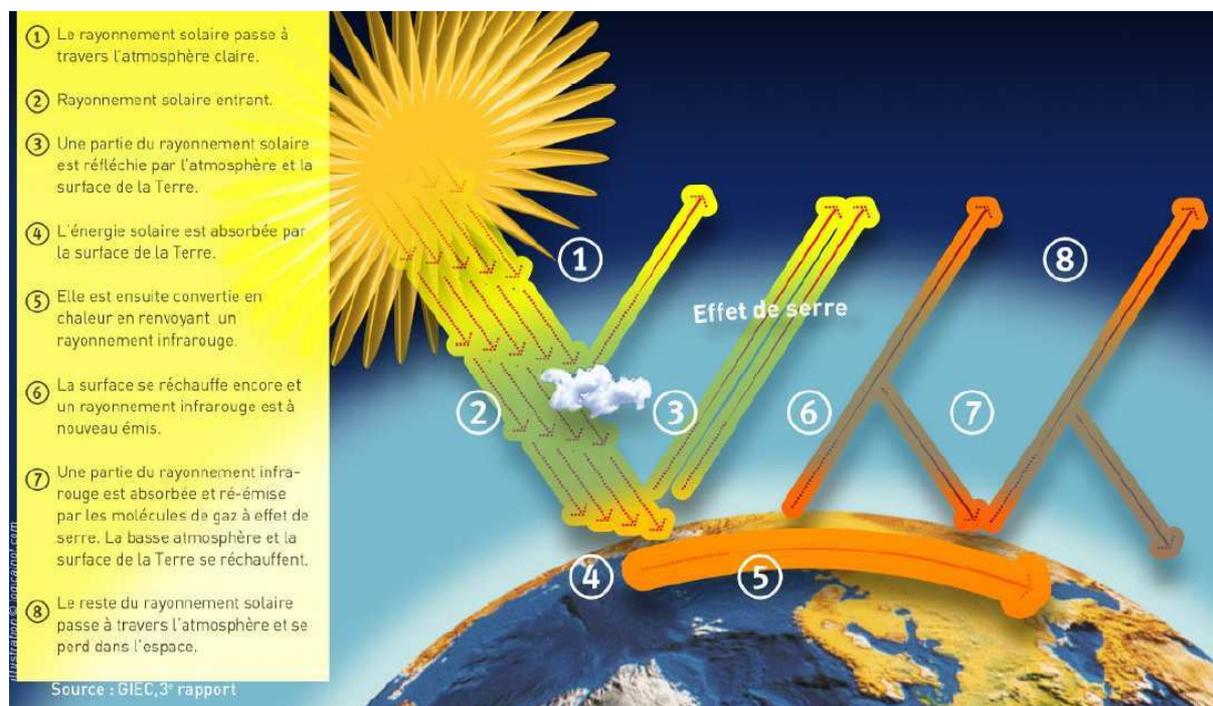


Figure 7 : Effet de serre.
 Source: 3^{ème} rapport du GIEC

Les augmentations des émissions de gaz à effet de serre sont principalement dues aux émissions de CO₂ lors de la combustion des combustibles fossiles. Parmi les autres gaz à effet de serre, on trouve les émissions de méthane (CH₄), de protoxyde d'azote (N₂O), de gaz fluorés et chlorés (CFC, HFC, HCFC, PFC et SF₆). Plusieurs gaz chimiquement réactifs, notamment les oxydes d'azote (NO_x), le monoxyde de carbone (CO) et les composés organiques volatils (COV) jouent également le rôle de gaz à effet de serre indirect en raison de l'influence qu'ils exercent non seulement sur la production d'ozone, mais aussi sur la destruction du CH₄ et d'autres gaz à effet de serre [DE CAEVEL, 2005].

L'augmentation de la température moyenne à la surface du globe provoque, selon les modèles utilisés, des perturbations observées du système climatique qui sont reprises et détaillées dans les rapport de l'IPCC (2007) et GIEC (2007):

- Augmentation des précipitations et de l'humidité atmosphérique
- Diminution de l'enneigement et de l'étendue des glaces terrestres
- Elévation du niveau de la mer
- Changement de la circulation atmosphérique et de la circulation des courants marins
- Variabilité du climat et des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes.

Le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) est une organisation qui a été mise en place en 1988, à la demande de 7 pays (USA, Japon, Allemagne, France, Grande Bretagne, Canada, Italie), par l'Organisation Météorologique Mondiale et par le Programme pour l'Environnement des Nations Unies. Son rôle est d'expertiser l'information scientifique, technique et socio-économique qui concerne le risque de changement climatique provoqué par l'homme.

Par conséquent, l'équilibre des écosystèmes peut être déstabilisé en provoquant des modifications de milieu de vie pour des milliers d'espèces qui ne seront plus adaptées aux nouvelles conditions. De plus, dans certaines régions du monde, les sécheresses accrues et les maladies tropicales et subtropicales se propagent dans des régions, qui au départ étaient moins chaudes.

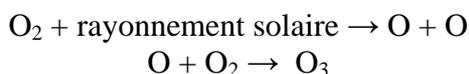
Il faut signaler qu'à l'échelle de l'humanité, une moyenne de 200 millions de personnes est touchée chaque année par les catastrophes naturelles dont 80000 périssent [DE CAEVEL, 2005]. L'OMS⁶ a estimé qu'actuellement, 150 000 décès dans le monde sont liés au changement climatique⁷. Ce chiffre risque de doubler d'ici 2030 [IFEN, 2006b].

Dans ce cadre, plusieurs études scientifiques publiées [Canadell, 2007 et IPCC⁸] ont mis en évidence un taux préoccupant de CO₂ dans l'atmosphère. Ce taux est le résultat de deux phénomènes : les émissions de CO₂ et son absorption par des puits de carbone comme les forêts ou les océans. Or, selon une collaboration internationale impliquant le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement de l'Institut Pierre Simon Laplace⁹ (LSCE/IPSL), les émissions du CO₂ des combustibles fossiles ont augmenté plus rapidement que prévu. Ces analyses sont le résultat d'une collaboration rassemblant des économistes et des experts en matière d'émissions, rassemblés autour du Global Carbon Project¹⁰. En se basant sur la consommation d'énergie dans le monde, les scientifiques révèlent que les émissions du CO₂ issues de l'utilisation des combustibles fossiles, cause principale du réchauffement climatique, se sont accélérées¹¹ passant de 1,1 % par an dans les années 90 à 3% par an pour la période 2000 à 2005¹².

Depuis le début de la révolution industrielle, les États-Unis et l'Europe totalisent plus de 50 % du total des émissions globales accumulées depuis plus de deux siècles. Le plus inquiétant, c'est que cette augmentation des émissions de CO₂ est plus alarmante que le pire scénario retenu par le groupe international d'experts sur l'évolution du climat (GIEC¹³), ce qui laisse entrevoir de graves conséquences pour le climat et ses impacts sur les écosystèmes.

b Destruction de la couche d'ozone

L'ozone est produit à partir du dioxygène. Aux altitudes supérieures à 30 km, le rayonnement solaire possède une énergie suffisante pour casser une partie des molécules de dioxygène et libérer les atomes. Un atome d'oxygène doit se recombinaison à un autre élément, il interagit donc avec une autre molécule d'oxygène (O₂) présente pour former une nouvelle molécule, composée de trois atomes d'oxygène, l'ozone (O₃) :



⁶ l'Organisation mondiale de la santé.

⁷ http://www.ifen.fr/publications/syntheses/PDF/climat_ree2006.pdf

⁸ <http://www.ipcc.ch/>

⁹ <http://www-lsce.cea.fr/>

¹⁰ <http://www.globalcarbonproject.org/>

¹¹ <http://www2.cnrs.fr/presse/communique/1106.htm>

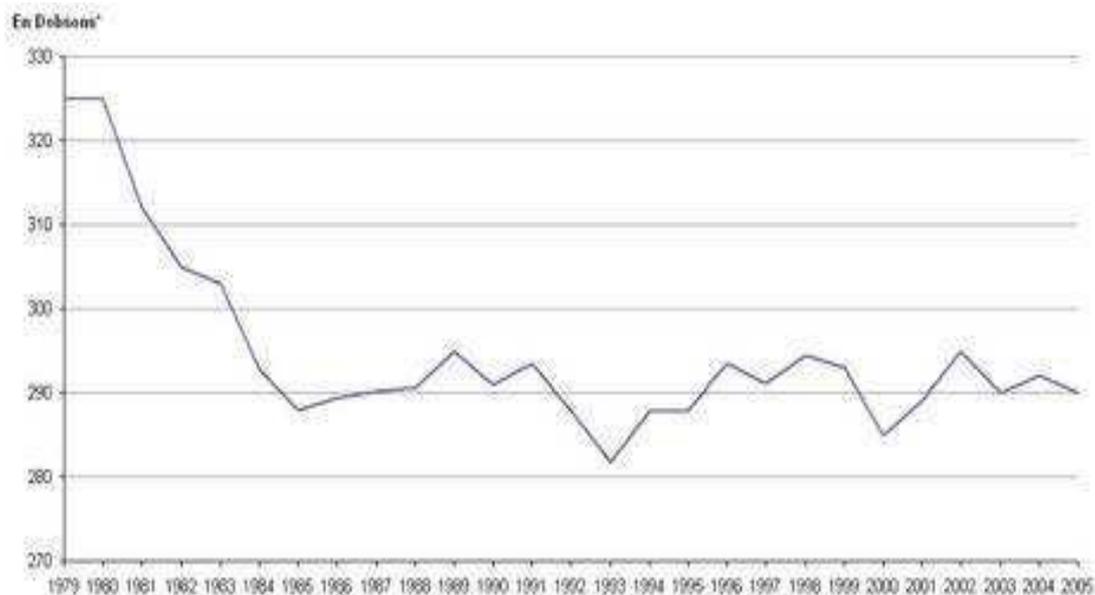
¹² Au total, 7,9 milliards de tonnes de carbone ont été émis globalement dans l'atmosphère en 2005, comparé à seulement 6 milliards de tonnes en 1995. Chaque personne en Australie et aux États-Unis émet maintenant plus de 5 tonnes de carbone par an, pour 1,9 tonne en France, alors qu'en Chine, ce chiffre est seulement de 1 tonne par an.

¹³ Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (<http://www.ipcc.ch>)

La couche d'ozone est essentielle à la vie sur terre car elle la protège des rayonnements ultraviolets nocifs émis par le soleil [IFEN, 2004].

En effet, les UV dont la longueur d'onde est inférieure à 0,4 μm sont absorbés par l'ozone entre 0,24 et 0,3 μm .

Il existe différents types de rayons UV regroupés en trois grandes classes : les rayons UV-A, les rayons UV-B et les rayons UV-C. L'impact des UV sur les organismes vivants dépend de la longueur d'onde de ces rayons : plus cette longueur d'onde est courte, plus le danger est grand. Les rayons UV-C sont ainsi les plus dangereux de la gamme. Heureusement, ils sont arrêtés presque en totalité par la couche d'ozone. Or, Depuis les années quatre-vingt, les observations montrent des diminutions saisonnières importantes de l'ozone stratosphérique au-dessus de l'Arctique et du continent Antarctique [IFEN, 2004].



Dobsons : une unité Dobson est définie comme une couche d'ozone de 0,01 mm d'épaisseur à la température et la pression de l'atmosphère standard. La colonne d'ozone standard est de 300 unités Dobson.

Source : Service météorologique de Canada, Environnement Canada; National Aeronautics and Space Administration, Etats-Unis, 2006.

Figure 8 : Evolution de la couche d'ozone dans le monde

La dégradation de la couche d'ozone implique une moindre protection des rayons ultraviolets les plus nocifs et une élévation des risques pour la vie terrestre [IFEN, 2004]:

- brûlures superficielles, conjonctivites, cataractes
- augmentation des cancers et vieillissement de la peau
- maladies du système immunitaire
- réduction de la photosynthèse: diminution des rendements et de la qualité des cultures, disparition du plancton, premier maillon des chaînes alimentaires aquatiques...

Du fait de la présence, dans la stratosphère, de molécules de synthèse, l'équilibre entre la production et la destruction d'ozone se déstabilise. Ces dernières années, l'activité humaine a participé à la modification de cet équilibre dynamique en rejetant de nombreuses substances appauvrissant la couche d'ozone. Ces substances contiennent principalement dans diverses combinaisons du chlore, du fluor, du brome, du carbone et d'hydrogène (CFC¹⁴, BCM¹⁵, HBFC¹⁶, HCFC¹⁷, etc [IFEN, 2004]).

¹⁴ Chlorofluorocarbures

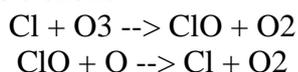
¹⁵ Bromochlorométhane

¹⁶ Hydrobromofluorocarbures

¹⁷ Hydrochlorofluorocarbures

Exemple :

Les chlorofluorocarbones (CFC) sont des composés contenant du carbone et des composés comme le fluor ou le chlore (par exemple CFCl_3 ou CF_2Cl_2). Ils sont aussi connus sous le nom commercial de Fréons. Ils ont été beaucoup utilisés, notamment comme réfrigérants, comme solvants dans les industries électroniques, dans les bombes aérosols ou les extincteurs, pour le nettoyage à sec et pour les mousses d'isolation dans les maisons. Sous l'effet des ultraviolets du soleil, les molécules de ces composés peuvent se casser et donner à la suite des espèces fluorées et chlorées. Le chlore peut réagir donc avec l'ozone uniquement pour le détruire. Il agit comme un catalyseur, c'est à dire que tout en détruisant l'ozone il se recycle et ne disparaît pas au cours de la réaction, ce qui rend son action extrêmement efficace. Ainsi, un seul atome de chlore peut détruire plusieurs centaines de milliers de molécules d'ozone¹⁸ :

**c Augmentation de la teneur en aérosols**

Les aérosols sont constitués de particules très fines en suspension dans l'atmosphère.

Les aérosols dits primaires sont émis directement sous forme de particules. Leur taille est généralement supérieure au micron lorsqu'ils sont produits mécaniquement et inférieure au micron lorsqu'ils sont issus de processus de combustion. Les aérosols secondaires, de taille généralement sub-micronique, sont issus de la transformation en particules de substances émises dans l'atmosphère sous forme gazeuse, soit par transformation directe gaz-solide, soit par l'intermédiaire des gouttes d'eau nuageuses.

Les activités humaines sont responsables d'environ 10 % de la quantité d'aérosols présents dans l'atmosphère (combustions, poussières industrielles, émissions agricoles, etc). Le reste est émis dans l'air naturellement par les volcans, les feux de forêts et les tempêtes de sable [CNRS, 1997].

Selon le CNRS, un conflit nucléaire étendu pourrait envoyer dans la stratosphère des quantités d'aérosols considérables masquant le rayonnement solaire, et provoquant ainsi un hiver persistant, dit hiver nucléaire [CNRS, 1997]. Les panaches d'aérosols injectés dans la stratosphère provoquent effectivement des petites diminutions de température au sol, mesurables sur une durée de l'ordre de l'année, temps de séjour des aérosols dans la stratosphère. Mais ils provoquent en même temps un réchauffement de plusieurs degrés de la stratosphère par absorption du rayonnement [CNRS, 1997].

1.1.2 Effets sur la nature et la biodiversité

En général, les effets néfastes sur la nature et la biodiversité sont provoqués principalement par le dérèglement climatique causé par l'activité humaine.

Les types de pollution ayant des effets sur la nature et la biodiversité sont multiples, en fonction des compartiments de l'environnement qui assurent la transmission des polluants vers les différentes espèces (eau, air, sol) :

la pollution par les matières organiques (provenant des déchets domestiques, agricoles ou industriels), la pollution microbiologique par les déchets organiques contenant des germes pathogènes (virus, bactéries ou parasites), la pollution par les hydrocarbures, la pollution par pesticides, la pollution par les nitrates des eaux souterraines, l'eutrophisation des eaux de

¹⁸ <http://www.atmosphere.mpg.de/enid/27c.html>

surface (apport excessif en nitrates et en phosphates), la pollution par les métaux, la modification des paramètres physico-chimique de l'eau (température, PH, salinité), etc.

1.1.3 Effets sur la santé humaine

De plus en plus, la santé humaine est affectée par les problèmes écologiques¹⁹ liés à la pollution atmosphérique et aquatique, à l'exposition aux substances chimiques dangereuses et aux nuisances sonores. Généralement, les effets les plus connus sont les problèmes d'affection des voies respiratoires, d'allergies, certains types de cancer, des effets neurotoxiques et la déficience du système immunitaire. Ainsi, on peut citer comme principales catégories de risques pour la santé humaine :

- Toxicité humaine par polluant direct : inhalation, ingestion, etc.
- Smog photochimique: production excessive d'ozone troposphérique et accumulation de particules en suspension [OMS, 2004].
- Destruction de la couche d'ozone : exposition accrue aux ultraviolets solaires
- Exposition au bruit et aux odeurs...

1.1.4 Utilisation de ressources naturelles

Le développement économique actuel consomme beaucoup trop de ressources naturelles et va conduire à un épuisement de ces ressources à plus ou moins long terme [Meadows et al, 1972]. Selon le WWF, chaque année, l'utilisation des ressources naturelles dépasse en effet de 20 %²⁰ la capacité de la planète à les régénérer et ce chiffre ne fait que croître. D'autre part, l'augmentation de la consommation d'énergies par exemple (combustibles fossiles) entraîne un épuisement certain des ressources énergétiques: Il est apparu que les gisements de ressources fossiles commencent à s'épuiser (figure 9).

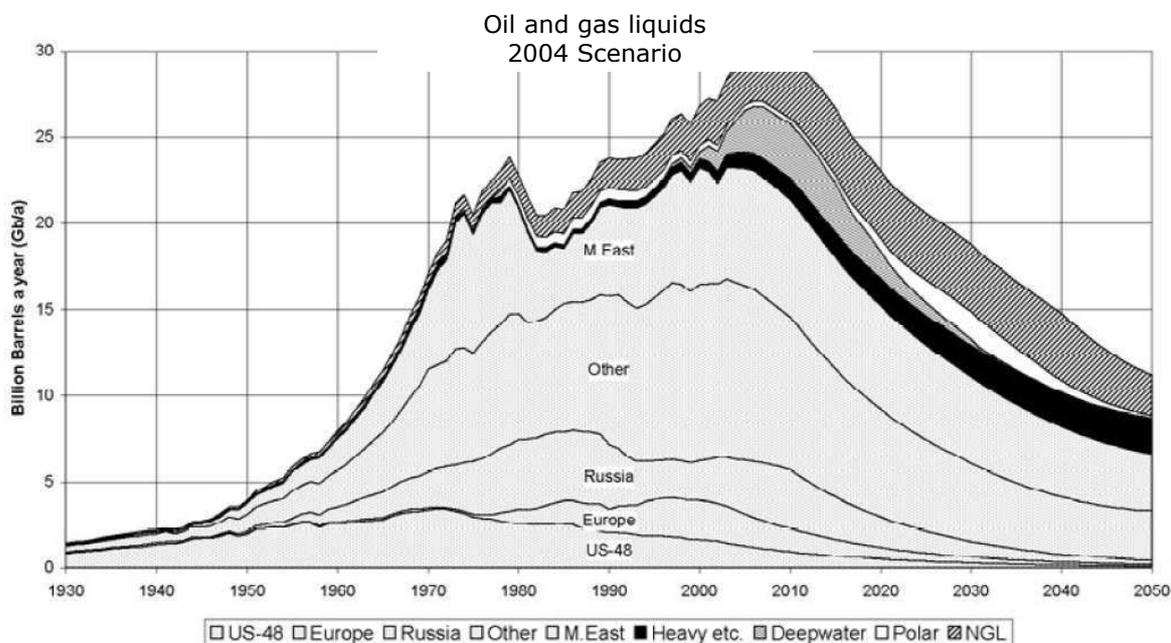


Figure 9 : L'épuisement des ressources en pétrole et gaz.
Source : <http://www.peakoil.net/Newsletter/NL40/newsletter40.pdf>

¹⁹ <http://www.who.int/fr>

²⁰ le rapport « planète vivante 2002 » du WWF

En résumé, les impacts de l'homme sur l'environnement sont multiples et de nature diverse : impacts locaux et impacts planétaires (figure 10).

Les *impacts locaux* sont localisés dans l'espace et souvent dans le temps, tels que l'eutrophisation des milieux, les impacts toxiques et écotoxiques.

Les impacts à l'échelle planétaire que l'on appelle également "*impact mondial*" (traduit en anglais sous le terme "global impact") sont peu localisés et susceptibles de perturber les équilibres de la planète "terre" entière, tels que l'effet de serre, la destruction de la couche d'ozone, etc. L'ensemble de ces impacts peut encore interagir ou se combiner en provoquant des effets beaucoup plus globaux.

Le tableau n° 2 synthétise les différents types de substances impliquées dans les différents impacts au niveau des différentes échelles.

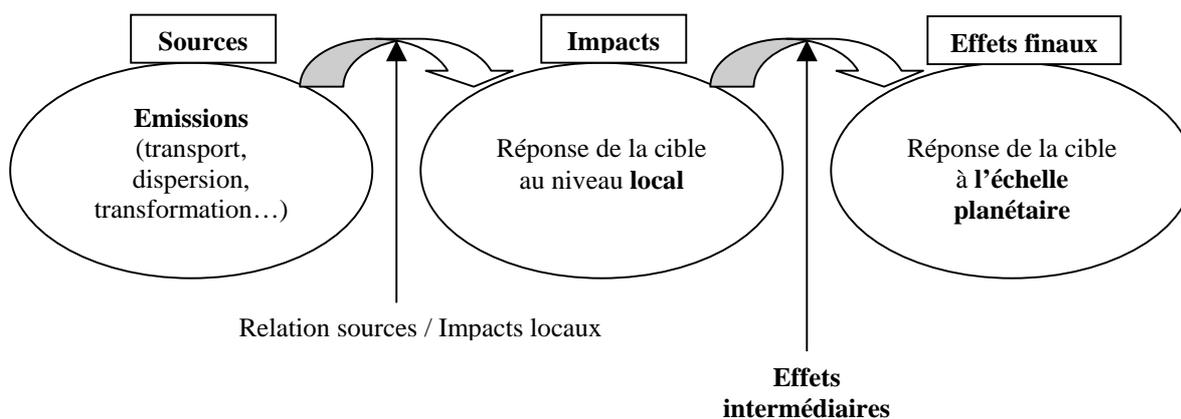


Figure 10 : Relation sources / Impacts (inspiré de Maurin, 2004)

Sources	Impacts		
Types de substances impliquées	Classification des impacts	Echelle géographique	Thèmes majeurs
- CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂ O, O ₃ , CFC, SF ₆ , COV, CO, CFC, HCFC... - CFC11 et 12, composés chlorés, bromes, CH ₄ , NO ₂	- Augmentation de l'effet de serre - Destruction de la couche d'ozone stratosphérique	Globale Globale	Changement climatique
- Combustion des combustibles fossiles et de biomasse, tempêtes de sable...	- Augmentation de la teneur en aérosols	Globale	
- SO ₂ , HCl, NO _x , NH ₃ , HF... - Polluants organiques et inorganiques - Polluants organiques et inorganiques - Nitrate et phosphate	- Acidification - Ecotoxicité aquatique - Ecotoxicité terrestre - Eutrophisation	Locale Locale Locale Locale	
- Tous les polluants organiques et inorganiques - Ozone - Il n'existe pas encore de classification des substances odorantes - Engins, machines...	- Toxicité humaine - Pollution photochimique - Odeurs - Bruit	Locale Régionale Locale Locale	Effets sur la santé humaine
- Eaux de sous-sols, bois... - Combustibles fossiles, sédiments, nappes...	- Consommation des ressources renouvelables - Consommation des ressources non renouvelables - Consommation de l'espace	Globale Globale Locale	

Tableau 2: Classification des impacts selon les quatre thèmes majeurs

1.2 Nécessité d'évaluation environnementale

La conférence des Nations Unies sur l'environnement humain de Stockholm, tenue en 1972 avec la participation de 113 pays, est le point de départ de l'action environnementale à l'échelle mondiale. Il a émergé la nécessité de mettre en place une stratégie, fondée sur l'utilisation judicieuse des ressources humaines et naturelles aux échelles locale et régionale, qui donnera naissance au concept d'écodéveloppement [André, 1999 et Sachs, 1981]. L'Assemblée Générale des Nations Unies du 28 octobre 1982 adopta la charte mondiale de la nature. Le principe 11 de cette dernière stipule que « *les activités pouvant avoir un impact sur la nature seront contrôlées et les meilleures techniques disponibles, seront employées...* ». Suite aux pressions des pays de sud, l'assemblée créa la commission mondiale sur l'environnement et le développement présidé par Madame Gro Harlem Brundtland (chef du Parti travailliste norvégien). Le rapport Brundtland publié en 1987 [CMED, 1988] définit les principaux problèmes environnementaux qui menacent le développement de nombreux pays du sud en soulignant la nécessité de réduire la consommation des ressources en particulier les ressources énergétiques dans les pays industrialisés. Ce rapport insiste sur l'importance de la prise en compte des impacts environnementaux. Dans ce sens, la Commission définit le concept de développement durable [André, 1999]. Ce concept fait de la protection de l'environnement une priorité internationale qui met en jeu une redistribution des ressources financières, scientifiques et techniques à l'échelle planétaire.

Ensuite, c'est à Rio (1992) qu'est tenu le 'Sommet de la Terre' qui a pour objectif de placer l'environnement au cœur du processus de décision [André, 1999]. C'est à ce moment là que « l'Evaluation des impacts sur l'Environnement (EIE) » est élevée au rang d'instrument national. Selon la déclaration de Rio : « *une étude d'impact, en tant qu'instrument national, doit être entreprise dans le cas des activités envisagées qui risquent d'avoir des effets nocifs importants sur l'environnement et dépendent de la décision d'une autorité nationale compétente* ».

L'Evaluation des Impacts sur l'Environnement (EIE) ou l'évaluation environnementale est définie, selon l'Organisation de Coopération et de Développement Economique, comme suit : « ***Procédure qui permet d'examiner les conséquences, tant bénéfiques que néfastes, qu'un projet ou programme de développement envisagé aura sur l'environnement et de s'assurer que ses conséquences sont dûment prises en compte dans la conception du projet ou programme*** » [OCDE, 1991].

Selon André (1999) : « *Evaluer les impacts apparaît comme un acte essentiellement subjectif qui consiste à porter un jugement de valeur sur le degré d'influence qu'aura une activité sur une composante de l'environnement et sur l'importance des conséquences de l'ensemble du projet sur l'environnement. Ce jugement en "Evaluation Environnementale" doit cependant s'appuyer sur une connaissance du milieu (observations, mesures, etc) et des connaissances scientifiques* »

En effet, l'évaluation environnementale est une étude qui consiste à déterminer les impacts de nos activités sur l'environnement ainsi qu'à recommander des méthodes d'éviter ou de réduire ceux qui sont néfastes.

L'évaluation de l'ensemble des impacts, à la fois locaux et planétaire, est définie sous le terme « ***Evaluation environnementale globale*** ». Cette évaluation globale donne des renseignements complémentaires et son intégration pour l'aide à la décision nécessite des outils et méthodologies adéquats aux différents domaines d'application (produit ou service, organisation, territoire). Nous en présentons une liste synthétique dans le chapitre suivant.

2 Outils d'évaluation environnementale globale sur différents domaines d'application

2.1 Principaux outils d'évaluation de l'impact environnemental des produits ou projet

Pour mieux connaître les impacts environnementaux dus à un site industriel, un projet, un produit ou un procédé, il est nécessaire de conduire des études visant à quantifier au mieux ces impacts, en se basant sur les données et les connaissances scientifiques disponibles. La connaissance des impacts environnementaux permet d'identifier des actions afin de les prévenir ou de les limiter, tout en évitant les déplacements de pollution entre les différentes étapes du cycle de vie du produit ou projet.

Dans le domaine de l'évaluation d'impact environnemental global, nous citons dans ce chapitre les outils les plus aboutis qui sont destinés à établir un profil environnemental du produit en vue d'améliorer ses performances écologiques et qui consistent dans la majorité des cas en une analyse globale des impacts environnementaux dus à un produit tout au long ou une partie de son cycle de vie.

Dans cette catégorie, on cite principalement : l'Etude d'impact, l'Analyse de Cycle de Vie, le sac à dos écologique et le MIPS.

Dans le cadre d'une évaluation d'impacts du produit, on peut citer également certains outils qui fournissent un diagnostic sur la base de critères qualitatifs identifiant les principaux problèmes à résoudre : l'exemple de l'approche matricielle, l'indice écologique, et la check-lists.

2.1.1 Etude d'impact

• Contenu de l'étude d'impact

La prise de conscience dans les années 1970 de l'urgente nécessité (rapport du club de Rome [Meadows et al, 1972] par exemple) de protéger la nature et ses diverses ressources s'est concrétisée dans la plupart des pays par des lois obligeant à réduire les nuisances et pollutions, et à atténuer les impacts des grands projets. Pour ce faire, une « étude d'impact environnemental » est devenue obligatoire préalablement à la réalisation d'aménagements ou d'ouvrages qui, par l'importance de leurs dimensions ou leurs incidences sur le milieu naturel, pourraient porter atteinte à ce dernier. Cette étude d'impact vise à apprécier les conséquences des projets sur l'environnement pour en limiter les impacts négatifs.

En France, le décret du 12 octobre 1977 mentionne que l'étude d'impact doit présenter successivement :

1- Une analyse de l'état initial du site et de son environnement, portant notamment sur les richesses naturelles et les espaces naturels agricoles, forestiers, maritimes ou de loisirs, affectés par les aménagements ;

2- L'étude des modifications que le projet y engendrerait : les effets directs et indirects, temporaires ou permanents du projet sur l'environnement et la santé et en particulier sur la faune et la flore, le sol, l'eau l'air, le climat, etc.

3- Les raisons pour lesquelles le projet présenté a été retenu (notamment du point de vue des préoccupations d'environnement).

4- Les mesures envisagées par le maître d'ouvrage pour supprimer, réduire et compenser les conséquences dommageables du projet sur l'environnement.

5- Une analyse des méthodes utilisées pour évaluer les effets du projet sur l'environnement en indiquant, éventuellement, les difficultés techniques ou scientifiques rencontrées pour établir cette évaluation.

• Principaux avantages et limites

Dans l'étude d'impact d'un projet, les cibles de l'environnement local sont bien identifiées. C'est une étude exhaustive qui aborde même l'aspect financier en estimant les dépenses correspondantes liées aux mesures envisagées. De plus, elle fait l'objet d'un résumé non technique afin de faciliter la communication des résultats au public pour la prise de connaissance des informations contenues dans l'étude.

Cependant, cette étude prend en compte seulement l'aspect "impact local". L'ensemble du cycle de vie et les impacts à l'échelle planétaire ne sont pas abordés.

2.1.2 Analyse de cycle de vie (ACV)

• Synthèse de la méthodologie

Selon l'ISO 14040, « le cycle de vie d'un système de produits est l'ensemble des phases consécutives et liées d'un système de produits, de l'acquisition des matières premières ou de la génération des ressources naturelles à l'élimination » [ISO, 1997].

L'analyse du cycle de vie consiste à une analyse globale des impacts environnementaux d'un système comprenant l'ensemble des activités associées à un produit, ou à un service, depuis l'extraction des matières premières jusqu'au traitement final des déchets [Rousseaux, 1993 et Grisel, 2004]. Cette approche quantifie les flux de matières et énergies entrants et sortants à chaque étape du cycle de vie.

Qualifiable d'expérimental voire partial au début des années 90, la pratique de l'ACV, sa diffusion et, surtout, sa normalisation au niveau international, en font aujourd'hui un outil performant et reconnu. La normalisation internationale ISO (14040 à 14044)²¹, développée à partir de 1994 (normes établies entre 1997 et 2000), a fixé les bases méthodologiques de ce type d'évaluation.

L'analyse du cycle de vie est l'une des méthodes couramment employées dans l'industrie pour intégrer la problématique environnementale dans la conception des produits [Lenzen, 2001]. A partir d'éléments quantifiés, elle étudie, dans ses rapports avec l'environnement, un système industriel impliquant un produit remplissant une ou plusieurs fonctions du point de vue de l'utilisateur.

Elle est un processus itératif constitué de 4 étapes principales (figure 11) :

- la définition des objectifs et champs de l'étude;
- l'inventaire;
- l'évaluation des impacts;
- interprétation

²¹ La norme [ISO 14040](#) sert de cadre général à la méthode. Elle fournit des prescriptions pour l'analyse du cycle de vie en terme de transparence des méthodes et des données utilisées. La norme [ISO 14041](#) couvre les deux premières phases de l'ACV : objectifs, champs de l'étude et inventaire. La norme [ISO 14042](#) décrit les lignes directrices de la phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie et la norme [ISO 14043](#) spécifie les exigences et recommandations pour analyser les résultats de l'inventaire et de l'évaluation de l'impact du cycle de vie. La norme [ISO 14044](#) spécifie les exigences et fournit les lignes directrices pour la réalisation d'analyses du cycle de vie (ACV). Elle traite des études d'analyse du cycle de vie et des études d'inventaire du cycle de vie.

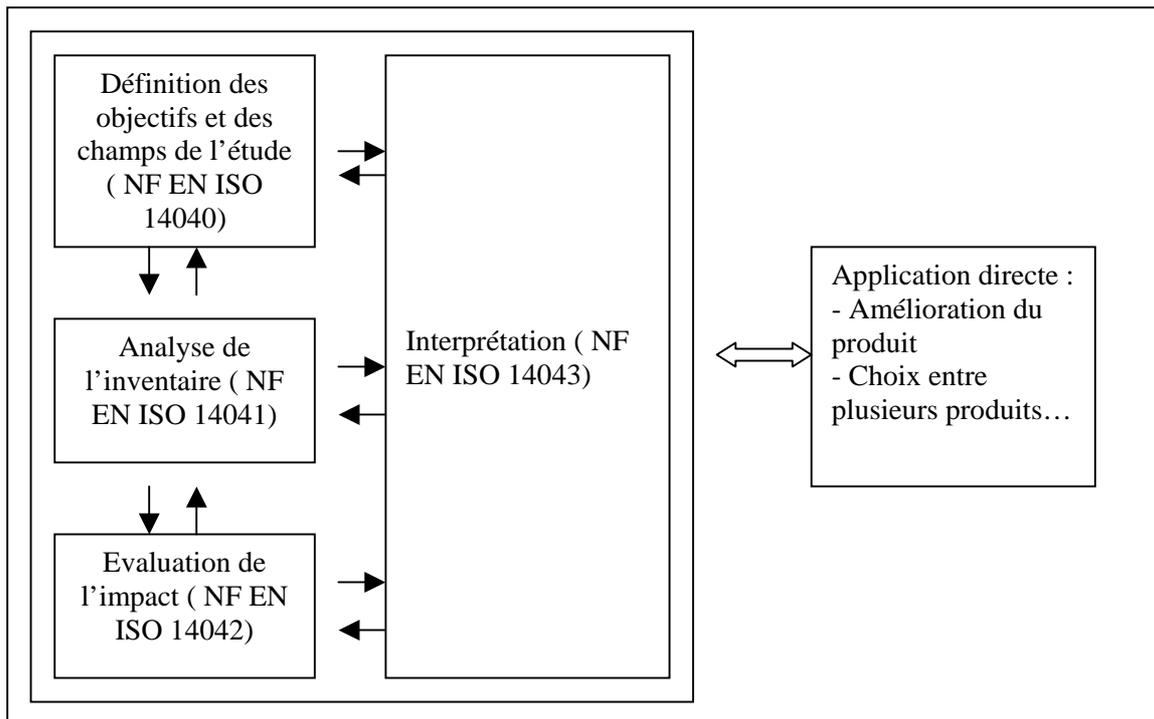


Figure 11: Relations entre les différentes étapes du processus d'analyse du cycle de vie selon ISO 14040

a Objectif et champ d'application

Au cours de cette étape, le but de l'étude, les frontières du système étudié, les hypothèses de travail et les utilisations envisagées des résultats de l'étude sont définis.

Il s'agit de préciser la problématique du sujet, l'application couverte par l'analyse, le commanditaire et le destinataire de l'étude. C'est une étape primordiale pour toute ACV puisque c'est elle qui fixe la finalité de l'étude dont vont dépendre les choix faits par la suite [Khalifa, 2000].

Quant au champ de l'étude, il doit rendre compte de certaines informations telles que :

- La fonction du système ou des systèmes à analyser
- L'unité fonctionnelle : « C'est la mesure de la performance des sortants fonctionnels du système de produits. L'objectif d'une unité fonctionnelle est de fournir une référence à laquelle les entrants et les sortants sont liés. Une référence qui est nécessaire pour assurer la comparabilité des résultats d'une analyse du cycle de vie » selon la norme ISO 14040.

L'unité fonctionnelle est donc une valeur définie et mesurable, permettant de comparer les différents résultats obtenus.

- Les frontières du système : choix des différents processus élémentaires qui doivent être inclus dans l'ACV et des types d'intrants et sortants que l'on veut prendre en compte (accessibilité des données, pertinence, précision,...). mais à ce stade de l'étude, il est parfois difficile de savoir ce qui sera le plus judicieux et le plus cohérent par rapport à l'objectif de l'étude

- Les types de données et leur collecte car les données peuvent être obtenues de différentes façons : estimation, mesure, calcul ou bibliographie. Il apparaît aussi important d'avoir une idée sur la qualité des données que l'on veut récolter (âge, zone géographique, représentativité, reproductibilité....)
- Le type de revue critique (facultative) quand il y a comparaison de différents procédés ou quand l'étude doit être rendue publique (satisfaction aux exigences de la norme pour la méthodologie et la présentation du rapport).

L'ACV est un outil itératif : à mesure de l'avancement de l'analyse, il est possible et recommandé de revenir sur les objectifs et le champ de l'étude s'ils ne sont pas satisfaits.

C'est aussi une analyse qui s'effectue en régime stationnaire. En d'autres termes, les accidents, susceptibles de se produire tout au long de la chaîne de la fabrication utilisation puis élimination du produit, ne sont pas pris en compte.

b Inventaire

La détermination des impacts environnementaux nécessite de procéder à l'inventaire des flux de matières et d'énergies au sein et aux frontières du système étudié. L'inventaire de ces flux élémentaires est la description quantitative des flux de matière, énergie et polluants ainsi que des nuisances émanant du système [Wanida, 2006]. Ces flux qui sont autant de facteurs d'impacts, sont ramenés à l'unité fonctionnelle, c'est-à-dire que l'on convertit l'ensemble du système en un système équivalent à un seul procédé.

c Evaluation des impacts sur l'environnement

La première partie de cette troisième étape de l'ACV est la classification des impacts potentiels. Les flux élémentaires²² sont classés dans une ou plusieurs des catégories d'impacts environnementaux standards (consommation de ressources non renouvelables, consommation de ressources énergétiques, potentiel de réchauffement climatique, etc). Les facteurs de caractérisation définissent ensuite la contribution relative des flux élémentaires à la catégorie d'impact, en les convertissant dans des unités communes.

Il existe plusieurs méthodes de classification et de caractérisation des impacts, dont nous listons quelques-unes:

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change);
- CML (Centre of Environmental Science – NL (Leiden University));
- EPA (Environmental Protection Agency, USA)...

Les différents impacts potentiels du système sont listés par rapport aux résultats obtenus par l'inventaire. Il faut veiller à représenter « tous » les impacts environnementaux potentiels, veiller à leur non-redondance et à leur faisabilité. Notons qu'une substance peut avoir différents impacts. Puis suit l'affectation des données de l'inventaire aux catégories d'impacts retenues. Ensuite se fait le choix des indicateurs d'impacts correspondant qui permettent le calcul, c'est la caractérisation [Khalifa, 2000].

Le calcul est effectué sur la base de données propres à chaque logiciel d'ACV et un écoprofil (histogramme des flux) est tracé pour les différents impacts et processus. On obtient donc la comparaison entre différents processus selon une dizaine d'impacts. Cette présentation des résultats permet de mettre en évidence la complexité des relations entre processus et environnement. Il existe rarement un processus qui soit meilleur à tout point de vue qu'un autre : chacun présentera des avantages selon certains impacts et des inconvénients selon d'autres. Cependant, cette multiplicité de composantes à prendre en compte rend difficile la

²² Les flux élémentaires sont les flux engendrés par le ou les procédés(s) de traitement ou d'utilisation de la matière.

prise de décision : Le choix entre différents processus ou simplement la représentation de l'impact total de l'ensemble du système étudié.

En effet, il est difficile de dire quel impact est plus acceptable qu'un autre si l'on se contente d'agrèger les différents résultats selon les différents impacts. Se pose alors le problème des compensations entre impacts (un très bon compense un très mauvais). Alors que, dans le réel, les différents éléments naturels ne sont pas substituables : un faible impact sur l'air ne compensera pas un fort impact sur l'eau ! La pondération des impacts est souvent proposée (en partie par certains logiciels) comme une solution à ce problème. La pondération est alors décidée par le praticien et est donc subjective puisqu'elle dépend uniquement de la vision et des priorités du praticien vis à vis de l'environnement [Grisel et Duranthon, 2001]. Plusieurs méthodes de pondération peuvent être utilisées dans la réalisation d'une ACV (annexes 1 et 2).

L'agrégation permet ensuite à un système d'avoir une seule valeur pour chaque impact potentiel, l'analyse est alors sous une forme suffisamment synthétique pour expliquer les résultats. Il y a différentes méthodes d'agrégation : l'agrégation partielle (comparaison des systèmes deux à deux) ou globale (obtention d'une note pour chaque système).

d Interprétation des résultats

Cette dernière étape est destinée à interpréter les résultats obtenus en comparaison avec les objectifs fixés en début d'étude, pour permettre ensuite d'identifier des options de réduction des impacts environnementaux du produit analysé: la recherche d'amélioration.

Cette interprétation peut être sous la forme de conclusions ou de préconisations et se doit d'être cohérente avec les objectifs et le champ de l'étude.

Si les résultats ne sont pas cohérents alors il est possible de mettre en place un processus itératif qui permet de revoir le champ de l'étude, la qualité des données et les objectifs fixés.

Les actions qui font suite à ces résultats sont indépendantes de l'ACV et d'autres facteurs entrent en ligne de compte tels que le facteur économique et le facteur social [Janin, 2000].

• Principaux Intérêts et limites de la méthode

L'analyse de cycle de vie est une étude complète et chiffrée qui quantifie les impacts. C'est un outil standardisé selon des normes ISO. Une démarche globalisante où divers éléments habituellement isolés sont regroupés afin d'obtenir plus efficacement un résultat visé.

Avec cette analyse, il est possible d'effectuer des comparaisons pertinentes entre produits : l'ACV multicritère s'applique sur un produit ou procédé. Elle constitue un outil comparatif avec un système de référence nécessaire puisque ses résultats n'ont aucune signification dans l'absolu.

Néanmoins, c'est une analyse longue, qui nécessite beaucoup d'informations parfois difficiles à obtenir, souvent peu précise mais coûteuse en terme de temps. Elle peut être simplifiée²³ (annexe 3) mais laborieuse en ce qui concerne la collecte des données (besoin de ressources humaines et donc financières et de temps).

L'ACV est rationnellement un outil pour la mise au point de stratégies de développement durable mais elle ne s'intègre pas totalement dans la logique du développement durable puisque ne sont pas pris en compte les critères sociaux et économiques. C'est par définition

²³ L'exemple de L'ESQCV qui est une méthode d'éco-conception basée sur une évaluation réduite à certaines phases du cycle de vie. Concrètement, l'entreprise renseigne un questionnaire balayant différents critères préalablement sélectionnés. Les réponses apportées positionnent le produit à un niveau "bon", "moyen" ou "faible". Cette démarche présente l'avantage d'être facilement appropriatif par les PME-PMI. Cette méthode vise à rechercher de façon simple des pistes d'améliorations écologiques tout au long du cycle de vie d'un produit, sur la base d'un nombre restreint d'informations environnementales.

un outil basé sur l'évaluation des performances environnementales. Pour combler ce manque, d'autres outils peuvent intégrer les critères sociaux économiques tels que la méthode MASIT : Multicriterial Analysis for Sustainable Technologies [Benoit, 2002].

Il faut rajouter que les choix de l'unité fonctionnelle (UF), des règles d'imputation et des frontières du système ne sont pas faciles à appliquer à un cas réel. Il est important d'avoir bien fixé les objectifs et le champ de l'étude pour définir l'UF. En effet, elle doit être cohérente avec la finalité de l'étude et répondre aux objectifs.

Une autre limite à soulever est la difficulté d'évaluation précise de certains impacts comme l'écotoxicité et la toxicité. En effet, la connaissance des milieux et écosystèmes susceptibles d'être contaminés par le système de produits est nécessaire et l'ACV ne prend généralement pas en compte la localisation géographique des émissions d'impacts ni la sensibilisation des milieux touchés (zone protégée ou à protéger, zone ne présentant peu ou pas de risque). L'ACV ne considère pas non plus l'évolution dans le temps de l'état de ces milieux, cependant, n'oublions pas que l'ACV est un outil global d'évaluation environnementale et donc si elle s'efforce de prendre en compte l'ensemble des impacts, elle évalue de façon approximative chacun de ces impacts sur l'environnement. Par ailleurs, les impacts évalués sont potentiels et non réels en d'autres termes il s'agit d'impacts réels maximalisés²⁴. Si l'on veut évaluer les impacts réels plus finement, une étude d'impacts sera menée [Aissani, 2005]. Il est donc difficile d'appréhender les effets au niveau local sur une population ou un écosystème déterminé. En plus, la part de subjectivité dans l'ACV est le choix des coefficients de pondération puisque chaque praticien à sa propre perception de l'environnement et de ses priorités.

L'évaluation des impacts est basée sur, d'une part, les données de consommation collectées dans l'inventaire et propre à chaque système, plus des données propres à chaque logiciel d'ACV (énergie incorporée, émissions de CO₂ par unité de matériau, etc). Ces données ne sont pas universelles. Le résultat de l'ACV est donc sensible aux hypothèses faites sur les impacts de la production de chaque matériau utilisé.

Le fait que l'ACV soit un outil global n'empêche en aucun cas qu'il soit valide. Ce n'est pas la précision qui fait la validité d'une méthode mais la rigueur avec laquelle elle a été menée si dès le départ la précision des résultats obtenus est connue [Janin, 2000].

L'ACV permet de savoir où agir mais ne permet pas de savoir comment, elle ne donne pas de réponses techniques mais des pistes stratégiques.

2.1.3 Sac à dos écologique

Le sac à dos écologique est un nouveau concept développé en 1994 par M. Schmidt Bleek de l'Institut Wuppertal (Allemagne) [Janin, 2000]. Il vise à connaître la «consommation de matière» totale d'un produit [Schiesser, 1999]. Il mesure le poids de ressources et d'énergies utilisées pour un produit, par unité de fonction ou de service.

F. Schmidt Bleek a introduit le concept de « sac à dos écologique » dans le sens où la consommation de ressources et d'énergie d'un produit est invisible au niveau de la fabrication et de la distribution en particulier. On ne perçoit le plus souvent que les ponctions et rejets au niveau de l'utilisation d'un produit.

Le concept de 'sac à dos écologique' se base sur l'outil MIPS (Material Intensity per Unit Service ou Consommation de Matière par Unité de Service ou intensité matérielle par unité de service) qui a été développé par Schmidt Bleek et est présenté ci-dessous.

2.1.4 MIPS (Material Input Per Unit of Service)

²⁴ http://www.systemes-durables.com/spip/article.php?id_article=5

• Définition

Il s'agit d'un outil d'aide à la décision qui ressemble à l'analyse de cycle de vie [Haake, 2000].

L'objectif de cet outil est de connaître pour un produit, la masse des ressources consommées. Cette consommation correspond à l'ensemble des transformations opérées à partir des ressources naturelles sur le cycle de vie d'un produit d'un certain poids. Ces transformations se traduisent par un certain nombre de ponctions et rejets représentant un « poids d'environnement » : le poids de la consommation de :

- Ressources abiotiques non renouvelables : ce sont les matières premières minérales (minerai, sable, gravier...), les combustibles énergétiques fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel), la terre déplacée (creusement...).
- Ressources biotiques renouvelables : ce sont les différentes formes de la biomasse (agriculture, forêts, ramassage,..)
- La consommation de tout volume d'eau détourné de son flux naturel (eaux de surfaces et nappes phréatiques).
- La consommation d'air.
- Et des déplacements de terre occasionnés par l'extraction des ressources des processus de production (agricoles, par exemple, ou dans la construction).

L'unité de Référence :

L'unité de référence est l'unité de service qui correspond à l'unité fonctionnelle dans une ACV.

La notion de service (le « S » dans MIPS) auquel l'intensité matérielle « MI » est comparée une fois calculée.

Cette démarche sert à rendre comparables différents produits qui ont la même fonction, comme par exemple deux types de voitures ; on obtiendrait dans ce cas un chiffre « tonnes de MI par kilomètre parcouru et par personne transportée » pour chacune des deux voitures.

On peut distinguer trois catégories de service différentes qui peuvent être fournies par un bien: l'utilisation, la durée d'utilisation et une combinaison des deux.

En termes 'd'*utilisation*', une unité de service peut être un kilomètre de transport pour une personne ou un kilogramme de linge lavé.

Pour certains produits, les unités de service peuvent être mesurées en termes de '*durée d'utilisation*', comme par exemple les réfrigérateurs qui sont utilisés sans interruption. Dans ce cas, l'indicateur MIPS donnerait un chiffre indiquant des tonnes de MI par heure de fonctionnement.

La notion de MIPS lie le poids du produit et son unité fonctionnelle au poids environnemental ou « intensité de matière » [Janin, 2000]. Cet outil a donc la particularité d'allier la consommation de ressources avec le service rendu par le produit. A titre d'exemple : une automobile d'une tonne en moyenne représente un poids d'environnement de 70 tonnes (qui est le poids de la consommation de ressources et d'énergies).

La différence cruciale entre le MIPS et l'ACV réside dans le fait que, dans le MIPS, on ne prend en compte que l'input matériel (l'intensité matérielle). Le MIPS n'inclut que les matières entrant dans le cycle de vie d'un produit. Ces dernières constituent donc une sorte de potentiel d'impact sur l'environnement.

En principe, le MIPS ressemble à la deuxième étape d'une ACV, à savoir l'inventaire des flux entrants.

• Principe de calcul

Le calcul de MIPS pour un produit donné se résume de la façon suivante [FANI, 2002 et Wuppertal Institut, 2005]:

- Définir le service principal que fournit le produit et qui servira d'unité principale à laquelle seront comparés les inputs matériels dans le cycle de vie du produit.
- Etablir un schéma du processus de production au sens large.
- Inventorier les données d'intensité matérielle pour chaque étape de processus et pour les cinq catégories de matières, citées au-dessus, prises en comptes dans les MIPS.
- Calculer l'intensité matérielle totale « MI » pour le produit. Pour simplifier l'étude, cette étape se fait généralement à partir de la base de données du Wuppertal Institute²⁵ qui fait correspondre pour chaque matériau, des valeurs types d'intensité matérielle pour cinq types de ressources considérées (tableau 3). Cette base de données contient donc des quantités précalculées de l'intensité matérielle pour un certain nombre de matériaux, le tableau 3 en donne un extrait.
- Comparer « MI » (l'intensité matérielle) au « S » (service), c'est à dire établir l'indicateur MIPS : la notion de services, auxquels l'input matériel est comparé une fois calculé, est la caractéristique la plus importante du MIPS. Cette démarche sert à rendre comparables différents produits qui ont la même fonction, comme par exemple deux types de voitures ; on obtiendrait dans ce cas un chiffre « tonnes de MI par kilomètre parcouru et par personne transportée » pour chacune des deux voitures. Il est donc nécessaire de définir les services de base pour chaque produit analysé. On peut distinguer trois catégories de service différentes qui peuvent être fournies par un bien : l'utilisation, la durée d'utilisation et une combinaison des deux.

Matériaux	MI ressources abiotiques (t/t)	MI ressources biotiques (t/t)	MI eau (t/t)	MI air (t/t)	MI terre (t/t)
Aluminium	8,45	0	24,6	0	0
Béton	1,22	0	1,4	0,03	0,02
Bois de pin	0,33	5,51	0,5	0,06	0
Bois de sapin	0,17	4,72	0,3	0,09	0
Gaz naturel	1,20	0	0,2	0	0
Linoléum	1,99	0,35	6,6	1,99	0
Pétrole	1,17	0	3,5	0,003	0
Platine	320300	0	193000	13800	
Verre	2,33	0	4,5	0,69	0,13

Tableau 3: Exemples de MI pour certains matériaux

Source : <http://www.wupperinst.org/projekte/mipsonline/index.html> (consulté le 27 janvier 2005)

• Principaux Intérêts et limites de la méthode

L'indicateur MIPS représente une façon de calculer et d'illustrer l'impact potentiel d'un produit sur l'environnement en évaluant sa consommation de ressources en liaison avec le service rendu [Edith et Weterings, 1999]. Il est facilement communiquant et pédagogique. Il présente également l'intérêt d'amener un questionnement sur le service (et par la même l'utilité) rendu par le produit étudié. Une de ses variantes, réalisée par le Wuppertal Institute est la quantification du nombre de kilomètre effectué par les différentes composantes d'un produit (l'exemple le plus connu étant le yaourt aux fraises dont les composantes ont effectué plus de 8000 km [Wuppertal Institute, 2004]. Cet outil peut être utilisé par les décideurs d'une

²⁵ http://www.wupperinst.org/en/the_wuppertal_institute/index.html

entreprise, afin de connaître la masse de flux de matières employées dans la fabrication de leurs produits. De telles études ont déjà été réalisées par plusieurs grandes entreprises allemandes, notamment BMW, en collaboration avec l'Institut Wuppertal (les résultats de ces études n'ont pas été publiés pour des raisons de confidentialité).

Néanmoins, il prend en compte uniquement des consommations de ressources sans tenir compte des pollutions :

* D'après la définition du MIPS, l'impact environnemental est lié au 'poids' de la consommation de ressources : dans le cas où l'on prendrait deux produits « x » et « y » et que l'un des produits a un 'poids' de consommation de ressources moins important que l'autre, cela ne signifie pas automatiquement que ce produit est meilleur, car la toxicité de leurs rejets n'est pas prise en compte.

* Si on prend l'exemple du processus de production schématisé d'une voiture : on peut se demander si l'on inclut dans l'analyse du MI d'un produit aussi le MI des machines nécessaires à sa fabrication. Ainsi, quelles sont les limites du calcul ? Une question qui se pose souvent pour la plupart des méthodes d'évaluation.

2.1.5 Autres outils à dominante qualitative pour l'évaluation d'impact environnemental des produits

Pour faciliter l'évaluation des différentes options de conception ou d'amélioration des produits, il existe des outils d'évaluation synthétiques dont l'intérêt réside dans leur commodité d'emploi. Ces outils sont plus rapides et simples que les outils d'évaluation à dominante quantitative. Ils fournissent un bref diagnostic sur la base de critères qualitatifs identifiant les principaux problèmes à résoudre.

Cette catégorie va concerner des outils notamment focalisés sur la fin de vie des produits, sur des critères comme les substances toxiques ou la recyclabilité du produit. Dans cette catégorie, on peut citer l'exemple de l'approche matricielle, l'indice écologique et la check-lists qui sont brièvement décrites dans l'annexe 4.

Cette démarche de procéder, est simplifiée, plus rapide et plus simple que l'ACV complète. Mais il ne faut pas ignorer ses limites :

Le danger de la simplification, car le fait de s'intéresser à un seul critère sans prendre en considération les autres critères est assez critiquable. En plus, avec les approches monocritères, il est bien délicat d'apprécier le comportement environnemental d'un produit évalué pour un seul critère et surtout de conclure sur les résultats de la comparaison de deux produits.

En outre, en prenant en considération le cas d'une approche énergétique par exemple, une corrélation entre le contenu énergétique global d'un produit et l'ensemble de ses externalités environnementales (déchets, rejets dans l'air et rejets dans l'eau) reste faible et ne permet pas au concepteur d'en déduire les bons choix d'amélioration.

A la différence de l'analyse du cycle de vie complète, l'ESQCV²⁶ [AFNOR, 1998] par exemple ne vise pas à dresser le bilan des impacts d'un produit sur l'environnement. Ainsi, elle ne permet pas de comparer des produits qui diffèrent par leur composition ou par les technologies mises en œuvre.

De surcroît, les analyses simplifiées se basent généralement sur des connaissances, *a priori*, des différents impacts environnementaux et de leurs importances relatives. Cela implique donc souvent des hypothèses, nécessitant une expertise (pouvant manquer d'objectivité), et une connaissance *a priori* des impacts (nécessitant l'accès par ailleurs à des analyses plus

²⁶ Evaluation Simplifiée et Quantitative du Cycle de Vie : Extraite du fascicule documentaire de l'AFNOR, FD X30-310 sur « la prise en compte de l'environnement dans la conception et le développement des produits » publié en mai 1998.

complètes). Ces outils simplifiés sont donc complémentaires et non substituables à des analyses plus approfondies.

2.2 L'évaluation de l'impact environnemental au niveau des organisations

2.2.1 L'évaluation de la Performance Environnementale (EPE) : ISO 14031

• Cadre général

La performance environnementale d'une entreprise demeure un concept difficile à mesurer. En l'absence de méthode universelle d'évaluation et de comparaison des impacts environnementaux, toute évaluation globale de la performance environnementale ne produit que des résultats contestables. En effet, les questions environnementales sont souvent complexes et difficiles à quantifier²⁷. Afin de normaliser le processus d'évaluation des performances environnementales des entreprises, la norme ISO 14031 a été publiée [ISO, 1999].

C'est un processus interne continu et l'évaluation est ici perçue comme un outil de management (figure 12) qui donne des lignes directrices concernant la conception et l'utilisation de l'EPE au sein d'un organisme. Il est applicable à tout organisme, indépendamment de sa catégorie, sa taille, sa situation géographique et sa complexité. C'est un processus conçu pour fournir en permanence à la direction d'une entreprise des informations fiables et vérifiables lui permettant de déterminer si sa performance environnementale remplit bien les objectifs qu'elle a définis. L'EPE est un processus de recueil et d'évaluation. L'objectif de performance doit conduire l'entreprise à identifier ses principaux enjeux internes et externes, qu'il s'agisse de mieux évaluer ses impacts environnementaux, de développer les aspirations et capacités de chacun à s'épanouir dans l'entreprise ou d'accompagner les projets et évolutions de la société.

D'autre part, la norme ISO 14031 fait appel à des indicateurs²⁸, elle peut être considérée comme une boîte à outil qui donne des conseils pertinents pour le choix de ces indicateurs à retenir pour l'EPE avec les IPE (Indicateur de Performance Environnementale) et les ICE (Indicateur de Condition Environnementale). Les IPE sont eux-mêmes subdivisés en deux types d'indicateurs :

- Les IPM²⁹ (Indicateur de Performance de Management) qui fournissent des informations sur les efforts accomplis par la direction pour influencer la performance environnementale. Ceux-ci témoignent de la mise en oeuvre de politique et de programmes, de la conformité, des performances financières, ou des relations de l'organisme avec la société.
- Les IPO (Indicateur de Performance Opérationnelle) qui fournissent des informations sur la performance des opérations de l'organisme. On trouve ainsi des indicateurs relatifs aux matériaux ou aux énergies utilisées, des indicateurs relatifs aux produits, des indicateurs

²⁷ http://www.ecopass.fr/telecharge/JCVictor_Indicateurs_environnementaux.pdf.

²⁸ * Un indicateur est une représentation simplifiée d'une réalité complexe. Il répond à trois grandes fonctions :

- scientifique: évaluer l'état de l'environnement ;
- politique: identifier les priorités et évaluer les performances de l'action publique ;
- sociétale: faciliter la communication, inciter l'action dans le bon sens.

Il quantifie, en agrégeant des données parfois multiples et disparates et il simplifie l'information, surtout lorsqu'il illustre des phénomènes complexes. In : <http://www.ifen.fr> (consulté le 20 août 2007).

* Un indicateur se définit comme une grandeur établie à partir de quantités observables ou calculables reflétant de diverses façons possibles l'impact sur l'environnement occasionné par une activité donnée. Les quantités en question peuvent être des quantités physiques de matière entrant dans un processus de production ou provenant de ce processus comme les produits de consommation ou les rejets de substances polluantes. Un indicateur peut comprendre aussi, un grand nombre d'autres éléments sur la gestion de la performance environnementale de l'organisme. L'indicateur doit renvoyer une image fidèle du phénomène à étudier pour permettre une évaluation rapide et simple des données à surveiller. In : <http://www.ecopass.fr>. (consulté le 02 Février 2005).

²⁹ Exemples : • nombre d'heures de formation environnementale du personnel

- % des objectifs environnementaux atteints.

relatifs au service utile au fonctionnement de l'organisme, des indicateurs relatifs aux émissions ou relatifs aux services fournis par l'organisme, des indicateurs relatifs aux approvisionnements et aux livraisons.

Parmi les ICE³⁰, l'organisme a le choix entre des indicateurs mondiaux, régionaux, nationaux ou locaux relatifs à la qualité de l'air, à l'eau, au sol, à la flore, à la faune, aux êtres humains, à l'esthétique, au patrimoine et à la culture. Par conséquent, chaque entreprise peut choisir les indicateurs les plus pertinents parmi les ICE ou les IPM proposés dans la norme ou en choisir d'autres.

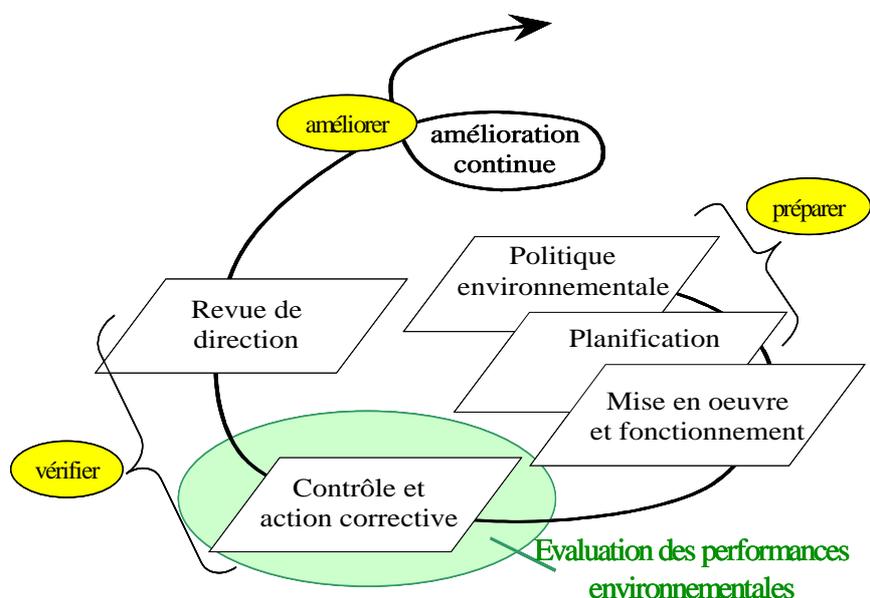


Figure 12 : L'EPE au sein de Management Environnemental

• **Principaux intérêts et limites :**

Au sein du ‘‘Système de Management Environnemental, l'intérêt de l'EPE (qui est un processus continu de recueil et d'évaluation des données) repose sur l'existence d'un lien entre les indicateurs de performance et la prise de décision car ces indicateurs servent au suivi des actions : l'évolution des performances dans le temps (indicateurs de performances) et l'état du milieu récepteur (indicateurs de conditions environnementales) sont pris en compte.

Le concept de la norme ISO 14001 repose sur l'amélioration continue des performances environnementales mais elle n'établit pas d'exigences en matière de niveau des performances. D'après Olivier Boiral [Boiral, 2005], il serait facile de dire que le développement de l'ISO 14001 reflète une responsabilisation écologique puisque la norme connaît une croissance exponentielle depuis son lancement mais on ne peut malheureusement pas l'affirmer de façon globale parce que c'est un système de gestion peu contraignant qui appelle une obligation de moyens et non de résultats. Ce n'est pas une norme qui fixe des objectifs de performance environnementale : les entreprises doivent mettre en place elles-mêmes une politique environnementale et définir leurs objectifs. De plus, la motivation principale des entreprises, qui installent ce système de gestion, est souvent parce que les clients ou/et le siège social le demandent ou que c'est bien pour l'image de l'entreprise, mais rarement l'amélioration des performances environnementales [Boiral, 2004]. En général, c'est surtout une norme grâce à

³⁰ Exemples : • mg métaux lourds/m³ d'eau
• Kilos de CO₂ émis/heure de travail.

laquelle les entreprises affichent leur responsabilité environnementale en obtenant un certificat qui est une sorte de ‘diplôme’ organisationnel, certification qui est délivrée par des consultants choisis et payés par l’entreprise même [Boiral, 2005].

Comme il n’y a pas d’objectifs de performance, il n’y a pas d’indicateurs ‘obligés’ qui pourraient être comparés entre les entreprises : donc chaque entreprise suit ses propres indicateurs et donc on ne peut pas comparer facilement les impacts entre les entreprises. Les entreprises certifiées ISO 14001 utilisent rarement le référentiel ISO 14031 pour le suivi et l’évaluation de leurs impacts environnementaux.

Aussi, il n’y a pas d’engouement très fort pour ce référentiel ISO 14031, d’autant qu’il n’y a pas d’obligation de diffusion d’informations environnementales en France sauf pour les entreprises françaises cotées en bourse et soumises à la loi NRE, 2001 (Nouvelles Régulations Economiques). A ce propos, l’Observatoire sur la Responsabilité Sociale des Entreprises (l’ORSE³¹) a remis un rapport de mission au gouvernement concernant l’application de l’article 116 de la loi NRE. Cet article concerne environ 700 entreprises françaises cotées sur le marché français qui doivent préciser, dans leur rapport d’activité annuel, la manière dont elles prennent en compte les conséquences sociales et environnementales de leurs activités. [ORSE, 2004].

2.2.2 Bilan Carbone®

• Définition

La méthode³² a pour objectif de permettre à une entreprise d’évaluer son impact global en matière d’émissions de gaz à effet de serre.

Cette méthode propose de prendre en considération tous les flux physiques qui concernent l’activité et de leur faire correspondre les émissions de gaz à effet de serre qu’ils engendrent [ADEME, 2007]. Si la méthodologie et les facteurs d’émission sont disponibles publiquement, un organisme ne peut communiquer sur son bilan carbone que s’il a fait appel pour cela à un prestataire ayant suivi la formation (payante) proposée par l’ADEME et disposant ainsi du logiciel (sous Excel©) de calcul.

Il n’est pas envisageable de mesurer directement les émissions de gaz à effet de serre résultant d’une action donnée, car la plupart des émissions sont des émissions induites (par exemple pour la fabrication et le transport utilisé) et non des émissions directes. Aussi, la méthode « Bilan Carbone® » a été mise au point pour estimer ces émissions, grâce à un mélange de calculs à partir de coefficients ‘standards’ et d’observations directes.

Les facteurs d’émission (exprimés en équivalent carbone) sont les coefficients ou facteurs qui permettent de convertir les données observables dans l’entreprise en émissions de gaz à effet de serre.

Toute activité humaine conduit directement ou indirectement à des émissions de gaz à effet de serre. En effet, le CO₂ est le principal gaz à effet de serre émis par l’homme. Il est dégagé dans l’atmosphère dès que l’on brûle un produit contenant du carbone (charbon, pétrole, gaz naturel, ...).

Or, partout où il y a consommation d’énergie fossile, il y a émissions de gaz à effet de serre, que ce soit pour se déplacer, se chauffer ou pour produire de l’électricité et des matières premières.

D’autres processus peuvent également engendrer des émissions de gaz à effet de serre, comme par exemple l’incinération des déchets contenant du plastique ou la décomposition des déchets organiques en centre d’enfouissement.

³¹ <http://www.orse.org/>

³² La méthode a été élaborée par l’ADEME en partenariat avec le bureau d’études Manicore (Jean –Marc Jancovici). In : <http://www2.ademe.fr>.

La méthode « Bilan Carbone® » a pour objet d'estimer et de compter les émissions de gaz à effet de serre correspondantes. Il se pose donc la question de savoir où l'on s'arrête pour les calculs. De ce fait, il faut définir un ou plusieurs périmètres qui regrouperont les postes pris en compte.

• Périmètres possibles

Trois périmètres qui correspondent chacun à une certaine manière de voir les choses, sont proposés par la méthode Bilan Carbone® de l'ADEME [ADEME, 2007]. Cependant, la méthode permet de définir son propre périmètre, selon l'usage que l'on veut faire des chiffres obtenus :

a périmètre interne :

Dans le cas de ce périmètre « interne », on ne comptabilise que les émissions que l'on engendre directement sur le site même avec ses installations fixes :

- Les émissions résultant de l'utilisation de combustible dans les locaux de l'entreprise ou de l'activité (procédés industriels et chauffage des locaux).
- Les émissions non liées à une combustion (autres réactions chimiques, évaporations et fuites) qui ont lieu dans les locaux de l'entreprise.

La vocation essentielle de ce périmètre interne est de fournir des chiffres utilisables pour les obligations réglementaires européennes, mais il ne permet pas d'obtenir toute la hauteur de vue souhaitable pour des actions éclairées en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

b périmètre intermédiaire :

Dans le cas de cette approche, on cherche à obtenir de la visibilité sur un périmètre plus large que le périmètre « interne » et calculer ce qu'on appelle les émissions du périmètre intermédiaire. Ce périmètre ne permet pas d'appréhender toutes les émissions qui sont faites en amont ou en aval d'une activité, mais il prend notamment en compte les transports, qui sont très significatifs dans le total des émissions de gaz à effet de serre.

Il consiste à prendre en compte :

- L'utilisation de l'énergie de combustion en interne (chauffage des locaux, procédés industriels, etc.).
- Les émissions non liées à une combustion (autres réactions chimiques, évaporations et fuites). Ces deux premiers éléments sont pris en compte dans le périmètre interne.
- Les émissions liées aux achats d'électricité ou de vapeur.
- Les transports de marchandises internes au site
- Les émissions liées aux déplacements des salariés pendant les horaires de travail.
- Les déplacements domicile-travail des salariés.
- Le fret vers les clients, ou les déplacements des clients jusqu'à l'entreprise.

c périmètre global :

Dans le périmètre global, on prend en considération tous les flux entrants ou sortants : tout processus physique qui permet l'exercice d'une activité est pris en compte.

On tient alors compte des postes suivants :

- L'utilisation de l'énergie dans l'entreprise, y compris l'électricité et la vapeur achetées.
- Les émissions non liées à une combustion (autres réactions chimiques, évaporations et fuites).
- Les déplacements des salariés dans le cadre du travail, ainsi que leur déplacement domicile-travail.
- Les transports internes de marchandises.

- Le fret vers les clients, ou les déplacements des clients jusque chez l'entreprise.
- Le fret depuis les fournisseurs jusque chez l'entreprise.
- La fabrication des produits et matériaux incorporés dans la production.
- La construction du bâtiment occupé.
- La construction des machines utilisées.
- Le traitement des déchets générés.

Le graphique ci-dessous (figure 13) récapitule visuellement les différents périmètres de consolidation.

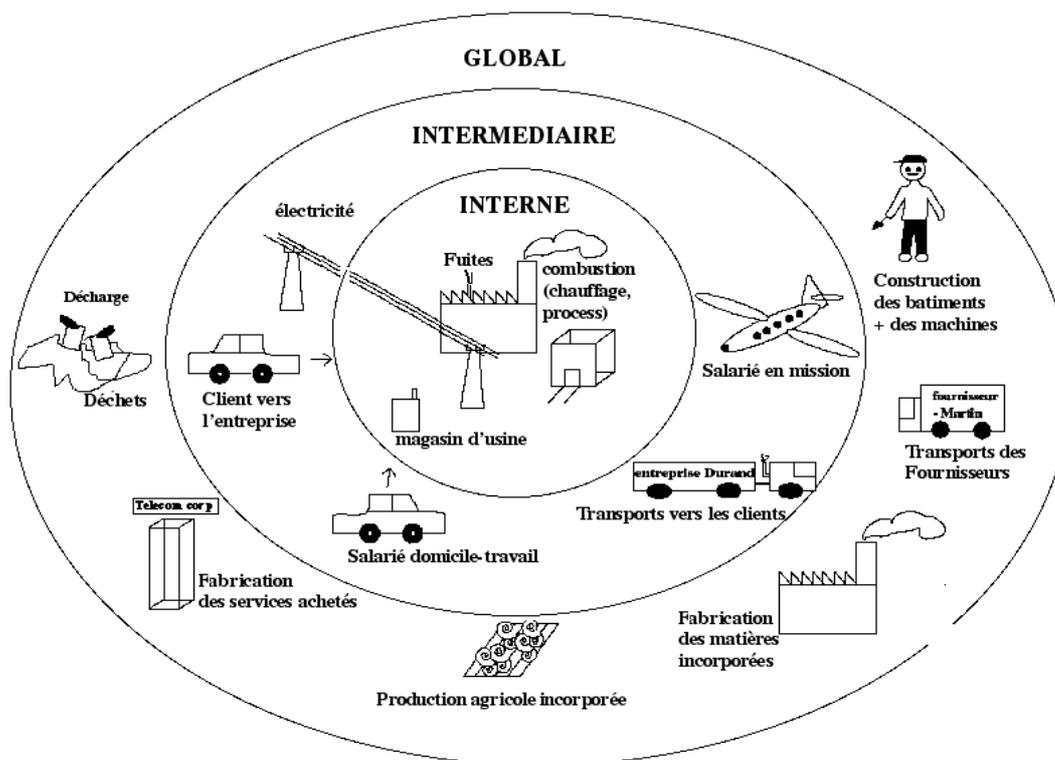


Figure 13: Illustration des différents périmètres de la méthode Bilan Carbone® selon l'ADEME (2007)

• Principaux avantages et limites de la méthode

Les périmètres intermédiaire et surtout global sont des approches “globales” au sens où l’on prend en compte les impacts d’activités induites par le système étudié et pas seulement les impacts directs du système [Boutaud et al, 2006].

La méthode Bilan Carbone® permet de comptabiliser les émissions de gaz à effet de serre, d’une entité, à partir des données facilement disponibles pour parvenir à une bonne évaluation des émissions directes ou induites dont elle est à l’origine. Les autres avantages de cette manière de procéder sont la rapidité et une certaine commodité d’emploi en matière de sensibilisation au problème du renforcement de l’effet de serre.

Les résultats sont exprimés en tonne équivalent de carbone (t équ. C), indicateur qui permet les comparaisons entre différentes activités et qui présente l’avantage de pouvoir être comparé à l’objectif « facteur 4 » à atteindre : 0,5 t équ. C/ an / personne³³.

³³ Valeur qui correspond à la capacité d’absorption de carbone des océans (environ 3 Gt équ. C/an) divisé par la population mondiale actuelle (6,3 milliards d’habitants).

Cependant, ce bilan carbone®, qui ne concerne que les émissions de gaz à effet de serre et non les autres impacts d'une entité sur l'environnement. De plus, dans certains cas, mais en nombre restreint, la minimisation des émissions de gaz à effet de serre peut conduire à l'augmentation d'autres émissions polluantes :

Si on prend l'exemple des carburants, le fait de supprimer les pots catalytiques, voire les pots d'échappement, permet de gagner en rendement sur le moteur et donc d'économiser du carburant à énergie mécanique obtenue égale.

Supprimer le pot catalytique est une bonne affaire pour les émissions de gaz à effet de serre, mais cela augmente d'autres nuisances : les polluants locaux ou le bruit si l'on supprime le pot [ADEME, 2007].

En outre, le périmètre « global » nécessite de prendre en compte de nombreux processus peu ou mal documentés pour le moment : dans une activité manufacturière de 2^{ième} transformation, la méthode ne permet pas une prise en compte fine des produits ou services nécessaires à l'activité, de même une difficulté est souvent rencontrée pour trouver des informations de type « durée », « déplacement en km » et dans ce cas, souvent des hypothèses sont faites pour le calcul. Il faut signaler que les facteurs d'émission sont des approximations qui reflètent une situation en perpétuel changement et qu'ils ont vocation à changer en permanence [ADEME, 2007].

2.3 L'évaluation d'impacts environnementaux au niveau du territoire

2.3.1 La méthode bilan carbone® à ce niveau

Définie dans le chapitre précédent, la méthode Bilan Carbone® dédiée aux collectivités, a la particularité de se composer de deux modules [ADEME, 2007] :

1. un module « patrimoine et services » qui s'attache aux émissions engendrées par l'activité de la collectivité ou par les services qu'elle rend ;
2. un module « territoire » qui concerne plus largement les émissions générées par l'ensemble des activités situées sur le territoire de la collectivité considérée.

Chacun de ces modules peut s'utiliser indépendamment ou en parallèle selon la problématique ou le périmètre que souhaite analyser la collectivité ou le territoire concerné. Les deux modules se basent sur les mêmes fonctionnalités et applications de base de la méthode bilan carbone® nécessaires à la mise en oeuvre d'une démarche de quantification et de diagnostic effet de serre.

2.3.2 L'empreinte écologique au niveau "Macro"

Selon Daly (2002), la soutenabilité forte souligne qu'il est nécessaire de ne pas consommer plus que les ressources renouvelables. Ainsi, les tenants de cette durabilité forte considèrent que les transformations provoquées par l'utilisation des ressources naturelles peuvent conduire à des irréversibilités graves du fait que le système naturel est instable [Brodhag et al, 2004]. Dans la mesure où les équilibres des systèmes naturels sont fragiles et instables, le principe de précaution est préconisé [Marechal, 1996]. Il peut être défini comme étant un principe selon lequel: « *Pour protéger l'environnement, des mesures de précaution doivent être largement appliquées par les Etats selon leurs capacités* » [CNUED, 1992].

Pour cela, des outils efficaces et sûrs doivent être élaborés pour mesurer à quel degré les activités humaines compromettent la capacité de la biosphère à se régénérer [Walter et al, 2005]. Cette mesure de la pression exercée par l'homme sur la planète Terre n'est pas seulement nécessaire pour évaluer la capacité et la surexploitation de cette planète, mais aussi

pour les preneurs de décision qui désirent fixer des objectifs de soutenabilité à leurs politiques, ou mesurer l'impact écologique de leur choix [Walter et al, 2005].

Dans ce cadre, parmi les méthodes et instruments mobilisés et expérimentés, l'empreinte écologique semble retenir l'attention de nombreux acteurs (notamment de certaines collectivités territoriales en France) [Boutaud, 2003].

L'empreinte écologique cherche à mesurer la superficie nécessaire à une population sur un territoire pour fournir de façon soutenable les ressources dont elle a besoin pour son mode de vie et assimiler les déchets qu'elle génère. Il s'agit d'un concept placé dès l'origine dans un cadre universitaire. En effet, cet indice est issu de la thèse de doctorat de Mathis Wackernagel à l'université de Vancouver au Canada, sous la responsabilité de William Rees, soutenue en 1994 [Wackernagel, 1994]. Le concept est repris ensuite par des organisations non gouvernementales comme le WWF³⁴ et l'organisation Redefining Progress qui lui ont assuré une diffusion large au sein de différents espaces sociaux : militants, politiques, scientifiques et professionnels. Puis une communauté de scientifiques et d'associations diverses s'est créée autour des premiers concepteurs de l'empreinte écologique, dans le but de le promouvoir : le Global Footprint Network [GFN, 2006a]. Le GFN est une organisation à but non lucratif créée en 2003. Il travaille aujourd'hui en collaboration avec 78 organisations partenaires. Des partenariats sont également en cours avec 5 pays (Suisse, Japon, Emirats Arabes Unis, Equateur, Belgique) et la France serait le 6ème. L'un des objectifs du GFN est que 10 pays adoptent « officiellement » l'empreinte écologique de la même manière que le PIB d'ici 2015.

La première publication scientifique sur l'empreinte date de 1996 sous le titre "Urban ecological footprints: Why cities cannot be sustainable, and why they are a key to sustainability", par William Rees et Mathis Wackernagel. Entre 1996 et 2007, il y a eu environ 114 articles publiés sur l'empreinte écologique dans les revues « Elsevier » sur Science Direct³⁵.

Vu que ce travail de thèse s'est concentré sur l'empreinte écologique, l'objectif de cette partie (cf. 2.3.2) est de rappeler le contexte global de cette méthodologie en définissant son principe général de calcul et en faisant un zoom sur quelques exemples de son application à l'évaluation environnementale à l'échelle "Macro". Nous synthétisons ensuite ses principaux intérêts et limites.

• Définition et principe

Par la production et l'utilisation ou la consommation de produits et de services, l'homme a un impact sur l'environnement. La nature a la possibilité de se régénérer, elle est donc capable, en théorie, de satisfaire nos besoins, aussi longtemps que ces derniers ne sont pas supérieurs à sa capacité de régénération [Wackernagel et Monfreda, 2003].

La comptabilité de l'empreinte écologique évalue dans quelle mesure un groupe humain s'inscrit, ou non, dans les limites de cette capacité de régénération de la nature, et comment sont réparties les consommations de ce capital naturel [Wackernagel et Rees, 1996; Barrett et Scott, 2001]. Une telle comptabilité des ressources biophysiques n'est possible qu'à condition de pouvoir connaître ou estimer les flux de ressources et de déchets, et qu'un lien puisse être établi entre la plupart de ces flux et les superficies biologiquement productives nécessaires pour les produire ou les assimiler.

Indicateur environnemental ou outil d'évaluation environnementale [Wackernagel et Yount, 1998], l'empreinte écologique constitue la superficie théorique de sols et d'eau biologiquement productive

³⁴ World Wide Fund For Nature

³⁵ <http://www.sciencedirect.com>

qui serait nécessaire pour produire de façon soutenable les ressources visant à satisfaire ses besoins et pour assimiler ses déchets, compte tenu des technologies utilisées.

Les définitions de l'empreinte écologique ont été nombreuses depuis sa création. Selon Chambers et ses collaborateurs [Chambers et al, 2000], « L'empreinte écologique est un outil simple qui donne un compte rendu des impacts humains (ou l'utilisation des services écologiques) en les additionnant d'une façon cohérente avec les principes écologiques et de la thermodynamique » [Barrett et al, 1999].

Quelques auteurs le considèrent comme un indicateur de durabilité : « l'empreinte écologique est un indicateur de durabilité qui exprime la relation entre la consommation d'une société et l'environnement naturel » [Barrett et al, 2004]. Une empreinte écologique inférieure à la biocapacité disponible est une condition nécessaire pour un développement écologiquement durable afin de maintenir le bien-être de l'humanité [Boutaud, 2003].

L'empreinte écologique veut exprimer en quelque sorte le degré de dépassement de la capacité de charge de l'écosystème d'une société ou région dans les conditions de technologie et d'organisation sociale actuelles. Pour définir l'empreinte écologique, on pourrait utiliser les termes d'offre et demande : elle dresse un bilan écologique en comparant la demande et l'offre en ressources naturelles [Wackernagel et al, 2005].

Un territoire déterminé a une certaine quantité de surface disponible et une population qui consomme une certaine quantité de ressources. Ces ressources proviennent de différents types de sols (le "sol forêt", par exemple, pour la production du bois) et la consommation peut donc être exprimée en quantités de chaque type de sol à l'aide de coefficients de conversion.

L'addition des surfaces de consommation donnera la valeur de l'empreinte écologique totale en hectare global. Si cette surface de consommation (empreinte écologique) est plus grande que la surface biologique disponible (capacité biologique totale), ou, autrement dit, si la demande est plus grande que l'offre, il existe un déficit et la capacité de charge est dépassée. Ce déficit écologique s'exprime par la formule :

$$\text{Déficit écologique (hag)} = \text{Biocapacité (hag)} - \text{Empreinte Ecologique (hag)}$$

$$\text{Biocapacité (hag)} = \text{Superficie d'une catégorie de terre bioproductive physique réelle (ha)} * \text{Facteur d'équivalence(hag/ha)} * \text{Facteur de rendement}$$

Exemple :

$$\begin{aligned} \text{Déficit écologique mondiale (hag/personne)} &= \text{Biocapacité mondiale} - \text{EE mondiale} \\ &= 1,78 - 2,23 \\ &= - 0,45 \text{ hag} \end{aligned}$$

• **Zoom sur la structure générale des calculs d'empreinte**

a Deux démarches de calcul pour deux approches

Deux approches de calcul se distinguent selon le système étudié et les sources de données disponibles :

✦ L'approche utilisée pour les calculs des empreintes des pays est l'approche « macro » ; « approche composée » ; « compound-based approach » [Simmons et al, 2000] ; « top-down » ou encore « national account » [Wackernagel et al, 2005]. Elle se base sur des données statistiques nationales issues d'organismes internationaux tels que la FAO, par exemple, puis pour les données manquantes, de statistiques issues d'organismes gouvernementaux ou associatifs ou universitaires. Cette méthode peut être utilisée pour des calculs d'empreinte au

niveau national. Si on l'utilise pour un territoire plus petit (région, ville par exemple), on déduit les empreintes propres au territoire étudié, à partir des données nationales, par le biais de facteurs d'ajustement, sur la base des proportions liées aux consommations effectives du territoire étudié, par rapport à la moyenne nationale de consommations du bien en question.

✦ L'approche « par composants » ; « component-based approach » ou « bottom - up »³⁶ [Lewan et Simmons, 2001], dresse un inventaire spécifique des articles consommés et rejetés, par un système donné, puis évalue l'empreinte pour chacun d'entre eux en se fondant sur des facteurs de conversion calculés à partir d'Analyses de cycle de vie (ACV). Cela permet d'évaluer la quantité de ressources mobilisées pour un système donné, partant de l'extraction des matières premières jusqu'à l'entreposage des déchets, en passant par la phase d'utilisation (cycle « du berceau à la tombe »).

b Principe général de calcul de la méthode « macro »

Hypothèses de calcul

Le système national de comptabilité d'empreinte écologique est basé sur six hypothèses [Wackernagel et al, 2005] :

1- Il est possible de conserver la trace de la plupart des ressources consommées par la population étudiée et des déchets qu'elle génère.

Ainsi, les quantités annuelles de ressources consommées et des déchets générés par chaque pays sont comptabilisées par des organisations nationales et internationales. Ces quantités annuelles peuvent être mesurées sous la forme d'unités physiques telles que les tonnes, les joules ou encore des mètres cubes.

La consommation finale d'un pays est calculée en prenant en compte sa production nationale et ses échanges internationaux :

Consommation = production + importations - exportations

En général, les données économiques et biophysiques sont publiées par des agences internationales statistiques et scientifiques, par exemple des agences de Nations Unies (telle la FAO³⁷). Ces agences rassemblent chaque année l'essentiel des données statistiques concernant l'utilisation de ressources, particulièrement dans les domaines de l'énergie, des produits forestiers et agricoles. Une banque de données standardisées de la FAO regroupe les informations concernant la production, l'importation et l'exportation de ressources sur un support de diffusion identique. D'autres banques de données statistiques existent également dans les domaines des ressources forestières, de l'énergie et de la productivité des terres : le *Forest Resource Assessment 2000* [FAO, 2000a], le *Temperate and Boreal Forest Resource Assessment* [FAO et UNECE, 2000], le *Global Fibre Supply Model* [FAO, 2000b], *FISHSTAT* (FAO, 2002), le *Statistical Review of World Energy 2004* [British Petroleum, 2004], *Livestock Environment Interactions* [Steinfeld et De Haan, 1997], le *CORINE Lande Cover Database* [EEA, 2000], *CO2 emissions from fossil fuel combustion* [IEA, 2004], le *Global Agro-Ecological Zones 2000* [IIASA et FAO, 2000], le *UN Commodity Trade Statistic Database* [UN Comtrade, 2005], etc.

Les données manquantes sont recherchées auprès de sources gouvernementales, associatives et académiques.

2- La quantité de ressources biologiques nécessaires à l'homme est proportionnelle à la quantité de terre bioproductive nécessaire pour régénérer les ressources utilisées et assimiler

³⁶ Développée par exemple au Royaume-Uni par Best Foot Forward (www.bestfoodforward.com) et Stockholm Environment Institute.

³⁷ Food and Agriculture Organization

les déchets. Cela veut dire que ces flux de ressources et de déchets peuvent être convertis en surfaces biologiquement productives nécessaires au maintien de ces flux.

3- Ces surfaces bioproductives, associées à des milieux naturels divers présentant des productivités variables, peuvent être exprimées en hectare standard ayant une productivité mondiale moyenne (hectares globaux), une fois chaque surface pondérée selon sa productivité. Chaque hectare d'un milieu naturel donné peut ainsi être converti en une surface équivalente générique présentant une productivité utile³⁸ moyenne à l'échelle mondiale, quelle que soit sa situation géographique. Les empreintes écologiques des différentes nations sont donc comparables entre elles.

4- En faisant l'hypothèse qu'un hectare global de terre bioproductive ne peut rendre qu'un seul service écologique à la fois, on s'assure que cet hectare n'est comptabilisé qu'une seule fois dans le bilan (sans cela, des phénomènes de double comptage amèneraient à une surestimation de la demande globale). Cet hectare peut en réalité souvent assurer plusieurs services sur une année (si un sol a divers usages), mais on ne considère dans ce cas que le flux de ressources associé à la fonction dite « primaire » du terrain étudié tandis que les fonctions « secondaires » sont ignorées afin d'éviter les phénomènes de double comptage évoqués précédemment [Monfreda et al, 2003] (si par exemple une surface de sols produit des ressources forestières, mais également sert à capter de l'eau destinée à l'irrigation de cultures, le système de comptabilité de l'empreinte écologique ne va prendre en compte que la fonction primaire de production de bois, et pas la fonction secondaire de captage de l'eau).

Le fait que ces surfaces ont des usages exclusifs et qu'elles sont toutes exprimées en « hectares globaux », sachant que chaque hectare global représente la même proportion de production potentielle de biomasse pour une année donnée, on peut les additionner et leur total représente la demande humaine mondiale agrégée en surface bioproductive [Wackernagel et Yount, 1998].

5- La demande humaine agrégée (qui est l'empreinte écologique, calculée à partir des données de consommations (production + importation - exportation) et des rendements globaux mondiaux) et la capacité de la nature à fournir des ressources (ou encore la biocapacité, calculée à partir des données de surfaces exploitées, production recensée et rendements nationaux) peuvent être directement comparées l'une de l'autre.

Les services fournis par la nature peuvent être exprimés en hectares globaux d'espace biologiquement productif.

6- La demande en surface peut dépasser la capacité de la nature à fournir des ressources.

Ce dépassement peut être expliqué, d'une part, par le fait que les ressources sont surexploitées (par exemple : une forêt qui est exploitée au double de son taux de régénération est représentée, dans les chiffres de l'empreinte, par le double de sa surface). D'autre part, la demande dépasse encore la capacité de régénération du capital naturel existant si le déficit est compensé par des imports et par la surutilisation de ressources fossiles « non renouvelées ».

Nous signalons que l'un des principes de base des calculs d'empreinte écologique, lorsque plusieurs hypothèses se présentent, est de choisir, l'option qui donne le résultat d'empreinte le plus faible afin de donner plus de force au message de Wackernagel : « on estime l'empreinte écologique minimale de l'organisation en question ».

Méthode de calcul de l'empreinte écologique des Nations

Comme c'est déjà mentionné dans l'introduction de ce chapitre, l'empreinte écologique est une méthode qui représente la nature et l'intensité de la charge exercée par l'être humain sur l'environnement. Cette méthode convertit l'intensité des consommations et des charges

³⁸ Productivité utile à l'homme, distincte de la productivité primaire nette d'un écosystème.

Exemple : une forêt produit des arbres, mais aussi toute une végétation de sous-bois. Cependant, seuls les premiers seront exploités pour le bois.

exercées sur la nature, telles que la culture des champs, la consommation d'énergie et de bois, en équivalent de superficie qui seraient nécessaire pour produire ces ressources par des moyens renouvelables.

L'empreinte écologique repose donc sur l'idée que, pour chaque article de consommation matérielle et énergétique, une certaine quantité de sols bioproductifs est requise pour produire ces ressources et absorber les déchets liés à cette consommation.

La comptabilité de *l'empreinte écologique* évalue donc dans quelle mesure un groupe humain s'inscrit, ou non, dans les limites de cette capacité de régénération de la nature, et comment sont réparties les consommations de ce capital naturel [Wackernagel et Ress, 1996].

Une telle comptabilité des ressources biophysiques n'est possible qu'à condition de pouvoir connaître ou estimer les flux de ressources et de déchets, et qu'un lien puisse être établi entre la plupart de ces flux et les superficies biologiquement productives nécessaires pour les produire ou les assimiler.

Pour simplifier la collecte des données et détailler l'empreinte écologique, cet indicateur répartit les différentes surfaces nécessaires selon deux axes : les catégories de consommation et les types de 'sols' à considérer.

✓ **Les catégories de consommations**

Les consommations sont d'ordinaire distribuées selon cinq catégories : alimentation, logement, transport, biens et services.

Cette répartition permet de visualiser la contribution de chaque catégorie à l'empreinte écologique totale.

Pour le calcul d'empreinte nationale, les données de consommations (productions + imports - exports) de céréales, de fourrage, de produits forestiers, de ressources halieutiques et de surfaces urbanisées, par exemple, mobilisent une part mutuellement exclusive de biosphère. Ces données sont converties directement, par plusieurs facteurs de conversion, en surface de sols productifs et en hectares globaux.

Les facteurs de rendement et d'équivalence sont spécifiques à chaque article de consommation et de rejet (Figure 14) :

$$\text{Surface (ha)} = [\text{Production} + \text{Importations} - \text{Exportations (tonnes)}] / \text{Rendement global (tonnes/ha)}$$

$$\text{Empreinte écologique (hag)} = \text{surface (ha)} * \text{facteur d'équivalence (hag/ha)}$$

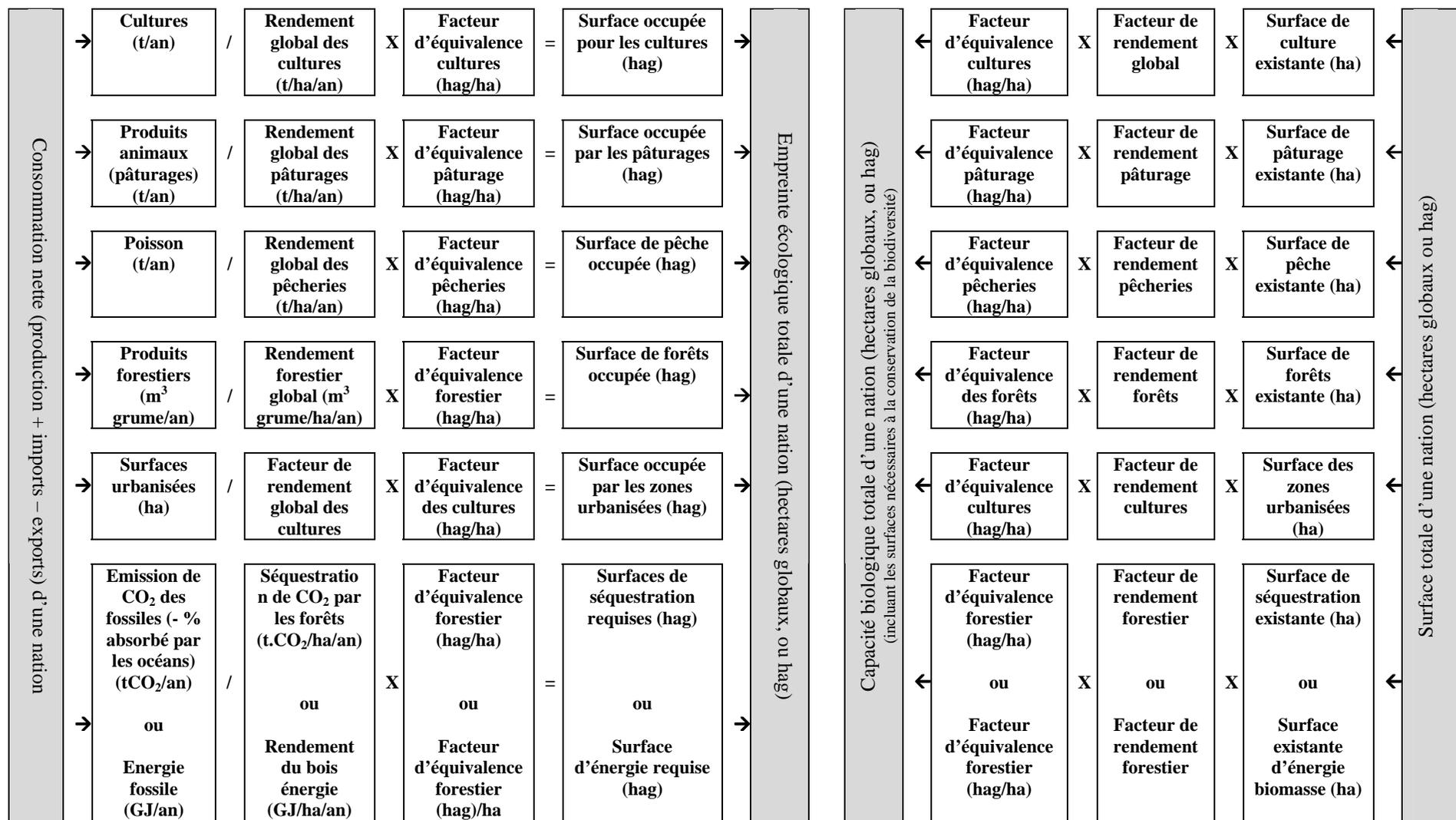


Figure 14 : Représentation schématique des modalités de calcul de l'empreinte écologique et de la biocapacité d'après Wackernagel, 2005

Afin de pouvoir comparer les données entre les différents pays, les biocapacités ("offre" en ressources naturelles régénératives) et les empreintes écologiques ("demande" en ressources naturelles régénératives) sont exprimées en hectare global, hectare ajusté afin de correspondre à une bioproduktivité moyenne mondiale [Wiedmann et Lenzen, 2006].

Afin de transformer un hectare "physique" en hectare global, deux facteurs sont utilisés [Wiedmann et Lenzen, 2006] :

- les facteurs d'équivalence, qui mettent en évidence les différentes productivités selon les types de sol;
- les facteurs de rendement (ou de récoltes) qui prennent en compte les différentes productivités selon le pays étudié.

Facteur d'Équivalence : Associées à des milieux naturels divers présentant des productivités intrinsèques variables, les surfaces bioproductives doivent être exprimées dans la même unité (hectares globaux) pour pouvoir être sommées entre elles. Pour ce faire, elles sont pondérées selon leur productivité [Wackernagel et al, 2005]. Une pondération fait intervenir des « facteurs d'équivalence ». Un facteur d'équivalence permet donc de comparer différents types de surfaces selon les biens qu'elles produisent (production végétale, pour le bois, etc.). C'est le rapport entre la productivité mondiale moyenne d'une catégorie de sols bioproductifs donnée (forêt ou pâturage par exemple) et la productivité mondiale moyenne de toutes les catégories de sols bioproductifs, indépendamment de leur nature. Il s'exprime en hectare global par hectare hag/ha.

Les facteurs d'équivalence sont constants pour tous les pays pour une année déterminée (tableau 4) :

Surface bioproductive	Hectare global/hectare
Champs cultivés	
Primaires	= 2,2
Marginales	= 1,8
Pâturage	= 0,5
Forêts (notamment la production du bois)	= 1,4
Pêcherie (espace maritime)	= 0,4
Eaux douces	= 0,4
Espaces construits - urbanisés	= 2,2
Hydroélectricité	= 1,0
Sols énergétiques (émissions CO ₂)	= 1,4

Tableau 4 : Facteurs d'équivalence (2001).

Source : Wackernagel et al, 2005

Facteur de Rendement : Certains territoires sont mieux pourvus en terme de biocapacité, soit parce qu'ils disposent de plus d'espace, soit parce qu'ils possèdent des écosystèmes plus productifs par unité de surface. Pour cette raison, le nombre d'hectares physiquement disponibles au sein du territoire est multiplié par un facteur traduisant l'écart, pour chaque catégorie de sols, entre la productivité locale et la productivité moyenne mondiale. Ce facteur est appelé « facteur de rendement », spécifique à chaque pays. Il correspond au rapport entre la superficie exploitée par un pays pour produire les biens du type de sol considéré (par exemple le bois à partir des forêts, le fourrage à partir des pâturages) et la superficie qui serait requise pour produire les mêmes biens à partir de terres présentant un rendement moyen mondial [Wackernagel et al, 2005].

Les facteurs de rendement sont propres à chaque pays pour chaque année (tableau 5). Normalement, ils sont établis pour chaque pays annuellement. Ils reflètent donc la différence avec la moyenne mondiale en ce qui concerne la fertilité des sols, l'avancement technologique et la productivité inhérente au pays.

Surface bioproductive	Facteur d'équivalence (hag/ha)	Facteur de rendement
Champs cultivés – cultures primaires	2,2	2,36
Champs cultivés– cultures marginales	1,8	
Sols énergétiques (émissions CO ₂)	1,4	0,64
Forêts (production du bois)	1,4	3,58
Pâturage	0,5	2,10
Mer	0,4	0,99
Eaux douces	0,4	0,92
Espaces construits - urbanisés	2,2	2,36

Tableau 5: Facteurs de rendement de la France de 2002 (GFN).

✓ **Les types ou catégories de ‘sol’ à considérer dites « surfaces bioproductives »**

La méthode de calcul d’empreinte écologique pour les nations répartit l’empreinte écologique selon six catégories de surface [Wackernagel et al, 2005] :

- **Terres arables ou sol cultivable** : surface nécessaire aux récoltes, comprenant les céréales, les fruits et légumes, les racines et les tubercules, les noix, le thé, le café, le sucre, etc. Les calculs nationaux d’empreinte prennent en compte plus de 70 cultures et 15 produits secondaires³⁹; ils précisent la quantité de chacun de ces produits destinée à la nourriture animale, à la semence, à la nourriture humaine, à la production de déchets, à la transformation et aux utilisations non alimentaires. La FAO estime qu’environ 1,3 milliards d’hectares sont effectivement cultivés et récoltés [FAO, 1997].

Les champs cultivés regroupent les cultures ‘primaires’ et ‘marginales’, auxquels sont attribués des facteurs d’équivalence différents (tableau 3) pour refléter les différences de qualité de terres et de cultures. Les cultures marginales incluent le sorgho, le millet, les olives et différents fourrages comme la luzerne et le trèfle destiné à l’ensilage. Cette catégorie de production « marginale » est introduite car on constate que certaines productions peuvent avoir une productivité inhérente plus faible (sans que pour autant le type de technologie disponible ne soit en cause). Sans introduire cette notion de production « marginale » à faible rendement, un hectare d’olive, par exemple, ayant un rendement moyen serait alors comptabilisé de la même manière qu’un hectare de pommes de terre. D’où la nécessité de choisir le facteur d’équivalence qui est spécifique à une culture bien définie (primaire ou marginale).

- **Pâturages** : surface nécessaire à la production de produits laitiers, de viande, de laine et de cuir issus du bétail qui occupe les pâturages de façon permanente. Au niveau mondial, la FAO (2001) estime qu’il existe 3,5 milliards d’hectares de pâturages et de prairies naturelles ou semi-naturelles.

- **Sols Forêts** : Destinés notamment à la production de bois, l’empreinte forêt est la surface requise pour élaborer les produits forestiers qu’une population consomme. Cette activité inclut tous les produits composés de bois (le bois de chauffage, charbon de bois, sciure, panneaux en bois ou en fibres, pâte à papier, papier et carton). Selon la FAO (2000a), le monde compte 3,8 milliards d’hectares de forêts.

- **Espaces marins (Pêcheries)** : C’est la surface marine nécessaire pour produire les poissons et les fruits de mer consommés par une population. Elle comprend tous les poissons marins et poissons d’eau douce, les crustacés, les céphalopodes, tout comme la farine et les huiles de poisson qui sont utilisés pour alimenter le bétail et les poissons élevés en pisciculture.

La plus grande partie des pêches sont réalisées sur les côtes continentales. Si on excepte les eaux non productives ou inaccessibles, cela représente au total une surface de 2 milliards d’hectares. Bien que ne représentant qu’une faible partie des 36,3 milliards d’hectares

³⁹ Les productions secondaires regroupent l’ensemble des produits dérivés de produits primaires (l’exemple du bois utilisé pour la fabrication de papier ou le maïs nécessaire pour la fabrication de l’Huile de germes de maïs).

d'océans, ces 2 milliards d'hectares fournissent plus de 95 % des prises mondiales de poisson [Pauly et Christensen, 1995; Sharp, 1998; WRI, 2000]. Les eaux douces représentent à leur tour 0,3 milliards d'hectares, ce qui donne au total 2,3 milliards d'hectares de zones de pêche potentielle parmi les 36,6 milliards d'hectares d'océans et autres surfaces d'eaux intérieures de la planète [FAO, 1997].

- **Sols construits (Infrastructures)** : l'empreinte infrastructure d'une population est la surface requise par les équipements privés et publics dépendant de cette population : les infrastructures dédiées à l'habitat, au transport, à la production industrielle ou à la production hydroélectrique occupant une certaine surface de sols. Cette surface réfère donc à l'espace devenu biologiquement improductif à la suite de constructions humaines, érosion ou toute autre dégradation. Elle est la moins bien documentée au niveau mondial, du fait notamment du manque de précision des images satellites qui ne permettent pas d'identifier distinctement les infrastructures dispersées. Les données d'Eurostat (2000) et SEI (1998) annoncent un total de 0,3 milliard d'hectares de sols construits. Le système de calcul d'empreinte écologique national part du principe que ces espaces construits prennent la place de terres arables, comme c'est le cas de la plupart des établissements humains, qui se situent dans des zones fertiles. Les consommations d'hydroélectricité sont par ailleurs fournies par British Petroleum (2004). L'empreinte de l'hydroélectricité est la surface occupée par les barrages hydroélectriques. Les terres inondées par les réservoirs de barrages peuvent avoir des productivités très variables. Du fait de cette variabilité et du manque de données disponibles concernant leur répartition géographique, ces surfaces font l'objet d'un facteur d'équivalence correspondant à la productivité moyenne mondiale de 1,0 (avec un facteur de récolte de 1,0). Puisque les consommations d'hydroélectricité sont mieux identifiées que les surfaces des réservoirs, un facteur de conversion constant a été retenu pour convertir l'utilisation de l'énergie en surfaces :

$$\text{Empreinte}_{\text{hydro}} (\text{hag}) = \text{Energie (GJ)} / \text{facteur de conversion constant (GJ/ha)} * \text{facteur d'équivalence}_{\text{hydro}} (\text{hag/ha})$$

- **Sols énergétiques** : Pour ce type de sol, l'empreinte écologique générée par la consommation d'énergie prend en compte la consommation d'énergie fossile et nucléaire. Il existe différentes hypothèses pour calculer l'empreinte écologique des énergies fossiles [Wackernagel et al, 2005] :

1- Une première approche qui cherche à évaluer la capacité additionnelle dont la biosphère aurait besoin afin "d'assimiler les déchets" produits.

L'empreinte de séquestration du CO₂ évalue la surface bioproductive nécessaire pour séquestrer le CO₂ atmosphérique par le biais de la plantation d'espaces forestiers. La surface de séquestration est calculée en déduisant la partie de CO₂ anthropogénique qui est absorbée par les océans, ce qui représente environ 29 % du total de ces émissions [IPCC, 2001].

$$\text{Surface (ha)} = \text{Emissions de CO}_2 (\text{tonnes}) * (1 - \text{fraction absorbée par l'océan}) / \text{ratio de séquestration (tC/ha)}$$

(Le taux de conversion utilisé est de 1tC /ha /an, selon IPCC, 2001)

On cherche avec cette méthode à définir la surface de sol nécessaire à la séquestration du CO₂ anthropogénique, sachant que ce potentiel de séquestration biologique est limité à la fois dans l'espace (surfaces disponibles pour la plantation de forêts) et dans le temps (les forêts plantées sont des puits nets de CO₂ durant quelques décennies, puis elles perdent leur capacité d'absorption [House et al, 2002]. Les données d'émissions de CO₂ sont obtenues à partir de plusieurs sources (notamment CDIAC, 1999 et IEA 2004).

2- La deuxième approche "de substitution par la biomasse" cherche plutôt à évaluer la surface bioproductive nécessaire à la production de biomasse (bois-énergie) nécessaire pour remplacer l'énergie fossile. Le bois-énergie est retenu comme énergie de substitution parce

qu'il s'agit de l'énergie issue de la biomasse ayant été la plus utilisée par les sociétés humaines et aussi parce qu'il s'agit d'une production primaire qui peut être produite sans intervention humaine (D'autres agrocarburants alternatifs comme l'éthanol, peuvent également être considérés, mais ils nécessitent une intervention humaine pour leur production et leur transformation). Le niveau de production de bois énergie équivaut au niveau de croissance du bois de récolte (grumes) multiplié par un facteur d'expansion qui permet d'inclure la biomasse additionnelle qui est également utilisée pour le bois de chauffage (arbustes, branches, etc) :

$$\text{Surface (ha)} = \text{Energie (GJ)} / [\text{rendement de grumes (GJ/ha)} * \text{facteur d'expansion}]$$

L'énergie nucléaire : Cette énergie ne devrait pas être prise en compte dans le calcul d'empreinte écologique (comme c'est le cas des produits toxiques), étant donné que ces éléments radioactifs demeurent en dehors du champ d'application de l'empreinte écologique (du fait de l'impossibilité d'assimilation par les écosystèmes des déchets générés). Cette exclusion ne signifierait pas pour autant que l'énergie nucléaire est sans impact environnemental. Cela voudrait dire que les déchets nucléaires ont une nature fondamentalement différente d'autres déchets comme le CO₂, qui peuvent être plus ou moins assimilés par des processus biologiques. Dans le système national de comptabilité de l'empreinte écologique, le choix a donc été fait pour l'instant d'inclure le nucléaire comme s'il s'agissait d'une autre forme d'énergie fossile, en prenant en compte les émissions de carbone liées aux activités de production de l'électricité nucléaire.

Mais à long terme, il est évident que l'utilisation des substances toxiques ou radioactives devrait être progressivement supprimée [Wackernagel et al, 2005] si l'humanité ne veut pas courir le risque de subir les conséquences d'une concentration grandissante de ces éléments toxiques et radioactifs dans la biosphère.

Une fois que toutes les principales catégories de consommations et d'utilisations du sol sont définies, les calculs sont effectués pour chaque type de sols. On additionne leurs empreintes respectives pour obtenir l'empreinte écologique totale dans une matrice qui relie les consommations et les catégories de 'sols' à considérer, comme indiqué dans la figure 15 :

	Sol énergétique	Sol dégradé	Terres arables	Pâturages	Forêts	Espace marin
Aliments	X		X	X		X
- fruits, légumes, céréales	X		X			
- viandes, poisson, produits laitiers	X		X	X		X
Logement	X	X			X	
Transport	X	X			X	
Biens de conso						
+ services	X	X	X	X	X	?
- papier	X				X	
- vêtements	X		X	X		
- tabac	X		X			
- autres	X		X			

Figure 15 : Matrice générale utilisée pour le calcul de l'empreinte écologique des Nations

• Exemples d'application : L'empreinte écologique à l'échelle mondiale

Notre empreinte écologique est plus importante que ce que la Terre peut supporter.

Un quart à peine de la superficie de notre planète, soit 11,2 milliards d'hectares, peut être considéré comme surface terrestre ou maritime productive. Le reste consiste en déserts de glace ou de sable, ou en océans que nous ne pouvons pour l'heure exploiter. Chacun des 6,3 milliards d'êtres humains que compte la planète a ainsi à sa disposition 1,78 hectare de surface productive. Or notre empreinte écologique moyenne dépasse largement ce chiffre: en 2001, elle atteignait 2,23 hectares [WWF, 2006].

Selon le « rapport planète vivante 2006 » du WWF, l'empreinte écologique de l'humanité a doublé au cours des 40 dernières années (Figure 16). Notre consommation actuelle dépasse la capacité de la Terre à renouveler ses ressources naturelles. L'empreinte de l'humanité a dépassé la biocapacité globale dans les années 80; ce dépassement a depuis augmenté chaque année, avec une demande excédant l'offre d'environ 25 % en 2003 [LPR, 2006].

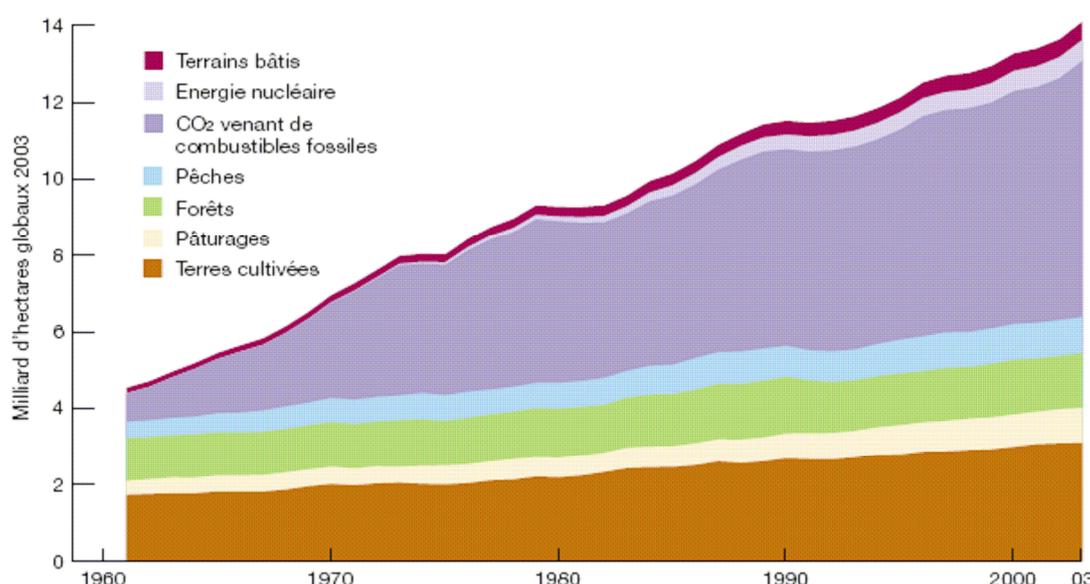


Figure 16 : Evolution de l'empreinte écologique globale entre 1961 et 2003, GFN

On constate notamment sur l'illustration présentée par le GFN⁴⁰ (annexe 5) que généralement l'empreinte écologique des pays augmente globalement avec leur niveau de vie.

Souvent tourné vers des bilans agrégés, cet indice propose une image synthétique de l'impact des activités humaines sur l'écosystème mondial, qui peut ensuite être relié aux différents modes de vie et de consommation des habitants de la planète.

Des grandes disparités d'empreinte existent entre les pays, les Etats-Unis d'Amérique ont une empreinte de 9,7 hectares globaux. A l'autre extrémité de la liste, l'Afghanistan et la Somalie qui ont une empreinte de 0,1 et 0,2 hectare global sont les pays dont l'empreinte écologique est la plus faible [OFS, 2006]

L'empreinte écologique traduit en quelque sorte le mode de vie d'une population, le gaspillage, la surproduction, la surconsommation engendre une empreinte importante (Figure 17). Dans les pays du nord, la consommation de ressources est jusqu'à trois fois supérieure aux 1,8 hag/habitant de biocapacité disponible. Atteignant 9,5 hectares globaux par personne, l'empreinte écologique de l'Amérique du nord dépasse largement toutes les autres régions du globe. L'empreinte par habitant est par exemple neuf fois supérieure à celle de l'Afrique. L'empreinte écologique occidentale est aussi nettement plus importante que la moyenne

⁴⁰ Global Footprint Network, 2005

globale, alors que dans les pays de sud, en particulier dans les pays d’Afrique et du sud-ouest asiatique, l’utilisation moyenne de biocapacité par personne est nettement inférieure à celle qui est disponible.

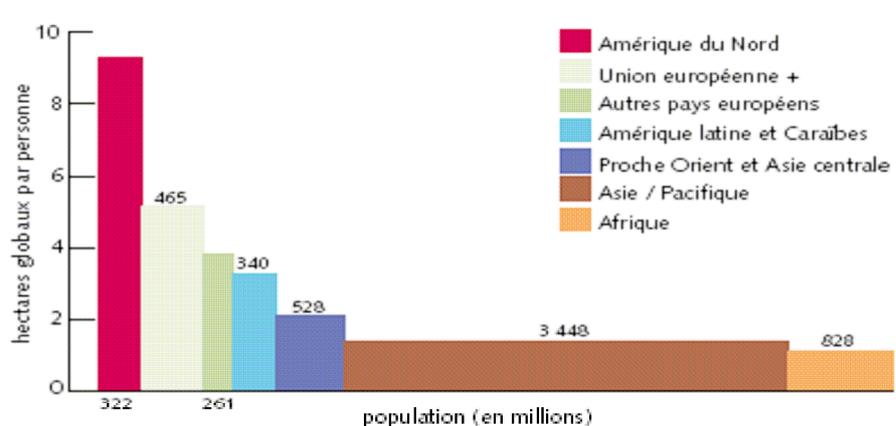


Figure 17 : Empreinte écologique et le nombre d’habitants en 2002, selon les régions.

Source : GFN et OFS (La hauteur de la colonne correspond à l’empreinte écologique par personne, sa largeur à la population de la région concernée).

Des disparités régionales considérables existent non seulement au niveau quantitatif de l’empreinte écologique, mais aussi au niveau qualitatif de sa composition. Les différences d’empreinte selon les continents sont particulièrement frappantes en ce qui concerne l’alimentation et l’énergie: en Afrique, l’empreinte due à l’alimentation et au bois est de 0,7 hectare global par personne, alors qu’elle est quatre fois supérieure en Amérique du Nord, où elle atteint près de 3 hectares globaux par personne. Simultanément, la part de l’alimentation et du bois dans l’empreinte écologique totale de l’Amérique du Nord est deux fois moins grande, parce que l’empreinte totale est beaucoup plus grande qu’en Afrique. La différence la plus marquée entre le Nord et le Sud réside toutefois au niveau de l’empreinte due à la consommation d’énergie: en Amérique du Nord, les besoins énergétiques sont plus de 23 fois supérieurs à ceux de l’Afrique. Dans le calcul global, les surfaces urbanisées ne pèsent guère sur l’empreinte écologique. Cependant, en Amérique du Nord, les surfaces urbanisées sont considérables; elles se montent à plus de 0,4 hectare global par personne.

L’importance de l’empreinte écologique est en étroite relation avec le revenu national [OFS, 2006]: Plus ce revenu est élevé, plus l’empreinte écologique est forte et plus la part de l’énergie dans l’empreinte est élevée. Les économies riches ont des besoins énergétiques importants. Les pays à revenu national faible ont des économies moins développées, dominées par l’agriculture et ils consomment nettement moins d’énergie (Figure 18).

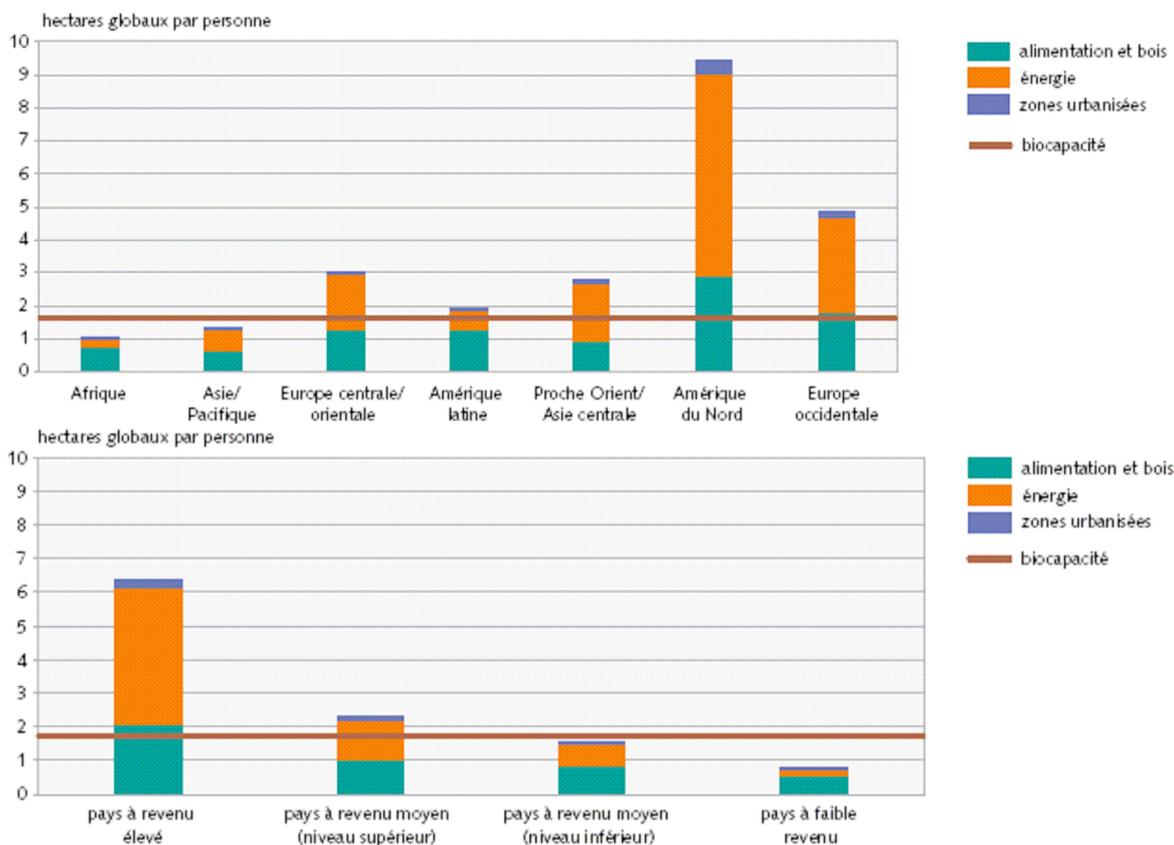


Figure 18 : Empreinte écologique selon les régions du globe et les catégories de revenu des pays (2002).
Source : GFN

Il semble donc que l’empreinte écologique mesure le changement du style de vie d’une population. Plus une population accède au progrès technologique et plus elle consomme, plus elle gaspille et plus son empreinte croit.

Cet outil a suscité de sérieuses discussions sur la question communément évitée des limites écologiques. Il a permis de faire comprendre que le « sur-régime » est une réalité hautement indésirable comme a annoncé Mathis Wackernagel.

Dans la thèse d’Aurélien Boutaud, il a mis en évidence une corrélation forte entre l’empreinte écologique des différents pays et leur IDH⁴¹. Cette corrélation s’explique principalement par le lien fort entre l’empreinte écologique et la composante PIB de l’IDH. La figure 19 montre bien que la majorité du développement économique se fait aujourd’hui au détriment de l’environnement.

⁴¹ L’Indicateur de développement humain (IDH) a pour objectif de répondre aux insuffisances du Produit Intérieur Brut (PIB) par habitant comme indicateur du développement d’un pays. L’IDH est calculé depuis 1990 par le "Projet des Nations Unies pour le Développement" (PNUD) afin de classer les pays selon leur développement qualitatif et pas uniquement économique. Le PNUD définit ainsi l’IDH : "L’indicateur de développement humain mesure le niveau moyen auquel se trouve un pays donné selon trois critères essentiels du développement humain : longévité, instruction et conditions de vie."

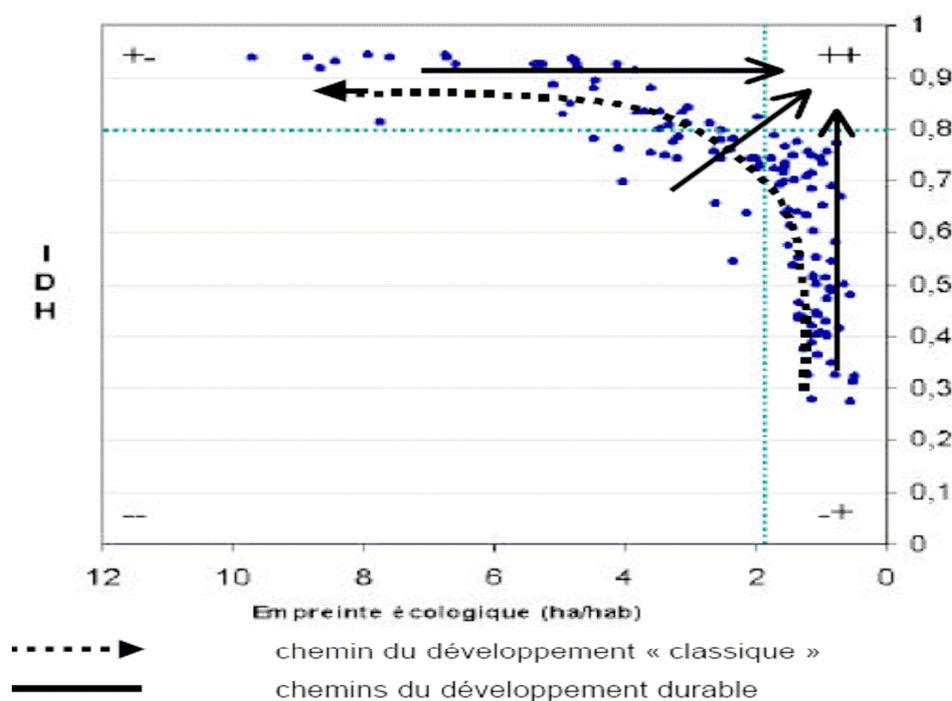


Figure 19 : Comparaison de l’empreinte écologique pour 128 nations
(D’après Aurélien Boutaud, 2004)

Ce graphique met en évidence trois phénomènes :

- Les pays qui sont situés au dessus du seuil de développement humain acceptable (IDH > 0,8) ont des empreintes écologiques très variables (environ 9 hectares par habitant pour les USA, par exemple, contre 5,6 pour la France).
- Les pays “émergents” qui ont des empreintes écologiques encore inférieures au seuil de durabilité écologique.
- Aucun pays n’a un niveau de développement humain et une empreinte écologique viables (le coin du graphique de la figure 5, en haut et à droite).

• Principaux intérêts et limites de l’empreinte écologique

L’empreinte écologique est un outil de simulation et de communication unique [Monfreda et al, 2004], très parlant, facile d’appropriation par le grand public, simple, ce qui ne veut pas dire simpliste. C’est l’un des rares indicateurs qui permettent de consolider de manière rigoureuse des impacts sur l’environnement de natures différentes, par exemple la consommation d’énergie et la production de déchets [Wackernagel et Yount, 2000].

Un bilan de toutes les ressources consommées par un système anthropique donné permet de calculer une surface de terre totale appropriée (qui est l’empreinte écologique) pour générer ou régénérer ces ressources, et assimiler les déchets libérés. Finalement, ce résultat peut être comparé à la surface de terres bioproductives effectivement disponibles sur un territoire donné, selon l’échelle d’étude [Wackernagel et al, 2002]. L’empreinte écologique exprime ainsi la possibilité qu’un niveau de consommation d’une population donnée soit soutenu durablement (impératif socio-économique), dans les limites de la capacité écologique d’un territoire donné (impératif écologique) [Wackernagel et Yount, 2000]. Elle est exprimée en hectares, ce qui facilite la communication relative au développement durable en direction de non-spécialistes. L’empreinte écologique est donc un indicateur qui exprime la relation entre la consommation d’une société et l’environnement naturel » [Barrett et al, 2004] et [Barrett, 2006]. Cette méthode présente de nombreux avantages en rendant plus objectives les perceptions de la durabilité et de l’état du capital naturel de la planète. On comprend facilement que si l’objectif est d’assurer des conditions de vie correctes sur Terre, il faut développer des outils robustes qui

indiquent dans quelle mesure les activités humaines compromettent la capacité de la biosphère à se régénérer [Wackernagel et al, 2005] : c'est tout à fait le rôle de l'empreinte écologique.

Cependant, il existe quelques inconvénients :

Si le concept de l'empreinte écologique est 'simple', les calculs et la méthodologie par contre peuvent être longs et complexes. C'est le nombre élevé de données nécessaires qui rend le calcul très long. Ainsi, quelques statistiques disponibles contiennent des valeurs manquantes [Schaefer et al, 2006].

En effet, la ligne qui sépare espaces forestiers et prairies, par exemple, est parfois floue. La FAO inclut les surfaces ayant plus de 10% d'arbres dans la catégorie des forêts, alors qu'en fait elles peuvent parfois correspondre à des surfaces partiellement pâturées. Bien que la répartition relative de ces deux types de zones ne soit pas très précise, le système de comptabilité est construit afin de s'assurer qu'aucune surface ne soit comptabilisée deux fois. Un autre problème est l'utilisation, sans doute non négligeable, de résidus des cultures, ou d'autres espèces de cultures qui ne sont pas recensées dans les statistiques de la FAO. Cela peut inclure notamment les produits issus des jardins particuliers, certains sous-produits maraîchers, ou encore des plantes poussant le long des chemins ou dans les terrains vagues. On notera au final que la faiblesse des statistiques concernant la production des pâturages et des prairies est particulièrement handicapante dans la perspective d'une mesure et d'une gestion plus efficace des ressources naturelles d'un pays [Wackernagel et al, 2005].

De plus, le système de comptabilité de l'empreinte écologique mesure la surface occupée par les cultures sans tenir compte d'autres utilisations potentielles de la terre, mais ne fournit aucune information sur la dégradation due à certaines pratiques agricoles, comme l'érosion à long terme des sols, la salinisation ou encore l'épuisement des nappes phréatiques [Wackernagel et al, 2005]. Plusieurs substances qui fragilisent la capacité de la nature à se régénérer ne peuvent pas être couvertes par cet indicateur [Piguet et al, 2007] : le plutonium, les polychlorobiphényles (PCB), les dioxines, les métaux lourds et les chlorofluorocarbones (CFC).

Les résultats d'empreinte écologique sont, à l'heure actuelle, fournis sans aucune indication quant à leur niveau d'incertitude. Ceci s'explique, pour les calculs au niveau national, par le fait que les statistiques nationales, données d'entrée des calculs, sont elles mêmes diffusées sans indication d'incertitude [Wackernagel et al 2005].

De plus, des aspects environnementaux comme les aspects toxicologiques ou l'utilisation de l'énergie nucléaire ne sont pas encore pris en compte de façon satisfaisante (nous abordons cette limite en détail dans la partie IV).

• Les standards de l'empreinte écologique

La méthode de calcul de l'empreinte écologique s'est améliorée au cours du temps, en rendant plus fiables ses calculs à grande et petite échelle. Des standards⁴² ont été récemment établis, par le GFN (2006b), pour pouvoir comparer entre elles les différentes études réalisées avec une qualité acceptable.

Ces Standards ont l'objectif d'obtenir une meilleure qualité des résultats des nombreuses études d'empreinte écologique qui se réalisent dans le monde entier à différentes échelles. Ils comportent 18 points (annexe 6) et se réfèrent à deux aspects de l'empreinte : l'application ou le calcul et la communication des résultats. Dorénavant les études d'empreinte sur les différentes échelles pourront être certifiées à l'aide de cet outil.

⁴² Global Footprint Network (2006b) Ecological Footprint Standards 1.0 (Released on 16th of June 2006): www.footprintstandards.org

3 Synthèse sur les outils d'évaluation environnementale globale

A mesure que la société devient plus riche et toujours plus productive (notamment les pays industrialisés), la demande de produits (les consommations d'énergie et autres ressources naturelles) et l'emprise sur les sols augmentent. Si l'on ajoute à cela l'accroissement de la population, on obtient des quantités croissantes de déchets et à la suite le rejet de nombreux polluants dans l'air, l'eau et le sol. L'activité humaine est souvent considérée comme un système source qui agit négativement sur l'environnement en participant à la naissance des problèmes de pollutions locales (impacts locaux) qui donnent suite à des problèmes beaucoup plus graves au niveau global (impacts globaux): La perte de la diversité biologique, la désertification et les changements climatiques à l'échelle mondiale ne cessent pas d'augmenter.

Etant donné les dommages graves et irréversibles que peut causer l'activité humaine, l'évaluation, qui tend à s'ancrer progressivement dans nos pratiques, a pour but de fournir aux décideurs l'information judicieuse nécessaire à l'approbation des projets qui sont compatibles avec un environnement et une économie sains et durables.

Cette évaluation doit considérer à la fois les impacts locaux et les impacts planétaires susceptibles de perturber les équilibres de la planète. L'évaluation de ces différents types d'impacts donne des renseignements complémentaires et leur intégration, pour l'aide à la décision, nécessite des méthodologies adéquates aux différents niveaux.

Ainsi, pour être la plus complète possible, l'évaluation devrait couvrir un large spectre d'impacts en terme :

- de cibles et milieux touchés (eau, air, faune et flore, êtres humains),
- de type d'effet (mécanique, physique, chimique, génétique, etc),
- de niveau géographique,
- de prise en compte des impacts directs, mais également des impacts "indirects", ne relevant pas directement de l'activité étudiée, mais d'activités induites par celle-ci (par exemple : fabrication et élimination des biens utilisés, transports, etc.).

Nous utiliserons le terme "d'évaluation environnementale globale" pour des outils visant à prendre en compte ces différents aspects.

Ont été décrits précédemment, plusieurs outils d'évaluation environnementale globale existants. Evidemment, aucun d'entre eux ne peut englober la totalité des impacts et de leurs interactions. Nous présentons ci-dessous, sur la base des descriptions méthodologiques disponibles dans la littérature scientifique, les principales caractéristiques, les impacts environnementaux pris en compte, les principaux domaines d'application ainsi que les intérêts et limites des outils cités dans ce travail bibliographique (tableau 6). Cette synthèse devrait pouvoir être une sorte de « guide » pour orienter le choix de l'évaluateur.

Outils d'évaluation	Principales caractéristiques	Impacts environnementaux pris en compte	Principaux Avantages	Limites principales	Domaines d'application	Disponibilités (exemples de références)
Etude d'impact réglementaire	Etude de l'interaction entre un sous-système localisé et l'environnement	Impacts locaux : Bruit, odeur, toxicité...	-Cibles identifiées (environnement local), analyse de son état initial - Aspect financier abordé - Mesures compensatoires explicitées - Communication des résultats au public (enquête publique)	-Non prise en compte de l'ensemble du cycle de vie -Non prise en compte des impacts à l'échelle planétaire	Système ou projet	Loi 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux ICPE (obligatoire dans les dossiers d'autorisation d'installation d'une ICPE) Et décret d'application du 12 octobre 1977
Analyse de cycle de vie	Evaluation d'un système comprenant l'ensemble des activités associées à un produit, ou à un service, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination des déchets.	- Augmentation de l'effet de serre - Prélèvement des ressources - Destruction de la couche d'ozone stratosphérique - Acidification - Eutrophisation - Pollution photochimique -Ecotoxicité aquatique terrestre - Toxicité humaine - Odeur - Bruit	- Prise en compte de l'ensemble du cycle de vie - Recherche d'impacts environnementaux pris en compte - Exhaustivité en terme d'impact	- Difficulté de généraliser les résultats - Difficulté d'accès aux données (bases de données assez coûteuses) - Difficulté d'interprétation des résultats	Produit ou procédé	- Normes ISO 14040-14043 - [Marc Janin, 2000] - [Rousseaux, 1993]
MIPS (Material Input Per Unit of Service)	Evaluation de la consommation de matière d'un produit par unité de service : un bilan de matières	Prélèvement des ressources	-Evaluation de la consommation de ressources d'un produit en liaison avec le service rendu. -Présentation des résultats sous la forme d'un score unique ce qui facilite les comparaisons et la communication.	- Prise en compte uniquement des consommations de ressources sans tenir compte des pollutions. - Simplification des impacts (un seul critère final) qui peut occulter la complexité des écosystèmes étudiés et de leurs impacts.	Produit ou service.	- Wuppertal Institut (2005). MIPS ⁴³ - [Marc Janin, 2000] ⁴⁴

⁴³ Disponible sur <<http://www.wupperinst.org/projekte/mipsonline/index.html>> (consulté le 27.01.2005).

<p>EPE (Evaluation de la Performance Environnementale)</p>	<p>Elle donne des lignes directives concernant la conception et l'utilisation de l'évaluation de la performance environnementale au sein d'un organisme.</p>	<p>Au choix de l'entreprise mettant en place l'évaluation</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Explicite comment identifier des indicateurs environnementaux qui renseignent clairement sur la performance d'un SME, sur celle des activités de production ainsi que sur l'état de l'environnement avec lequel l'entreprise est en interaction. - Lien entre l'évaluation et action de réduction des impacts -Le processus inclut un dialogue avec toutes les parties intéressées et une communication transparente. 	<ul style="list-style-type: none"> - La norme n'établit aucun niveau de performance environnementale. - Elle n'est pas destinée à être utilisée comme norme de spécification à des fins de certification ou d'enregistrements ni pour définir toute autre exigence de conformité d'un système de management environnemental. 	<p>Organisation</p>	<p>- Norme ISO 14031</p>
<p>Bilan carbone</p>	<p>Estimation des émissions de gaz à effet de serre d'une activité, directes et indirectes.</p>	<p>Augmentation de l'effet de serre</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluation globale en matière d'émissions de gaz à effet de serre. - Prise en compte à la fois de l'ensemble des activités de l'organisation étudiée et des activités induites par cette organisation 	<ul style="list-style-type: none"> - Il s'agit d'un bilan carbone, qui ne concerne que les émissions de gaz à effet de serre et non les autres impacts d'une entité sur l'environnement. - Les facteurs d'émission sont des approximations et reflètent une situation en perpétuel changement, ils ont vocation à changer en permanence. 	<ul style="list-style-type: none"> - Organisation - Territoire 	<p>Bilan Carbone [ADEME, 2007]</p>

⁴⁴ Disponible sur < <http://pastel.rilk.com/archive/00000182/00/these%20full.pdf> > (consulté le 17.11.2004).

<p>Empreinte Ecologique</p>	<p>Mesurer la superficie nécessaire à une population sur un territoire pour fournir de façon soutenable les ressources dont elle a besoin pour son mode de vie : Représentation de la surface de terre et d'eau biologiquement productive nécessaire pour produire les ressources consommées et assimiler les déchets générés par une population donnée.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de l'effet de serre - Prélèvement des ressources naturelles principalement biologiques - Consommation de l'espace, notamment l'occupation des sols par les infrastructures... 	<ul style="list-style-type: none"> - Excellent outil de communication et de sensibilisation. - Prise en compte de l'ensemble des cycles de vie. - Prise en compte des principaux impacts environnementaux - présentation des résultats sous la forme d'un score unique ce qui facilite les comparaisons et la communication. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les coefficients de transfert n'ont pas été déterminés pour les aspects environnementaux suivants : la toxicité des rejets et l'énergie nucléaire. - Inexistence d'une base de données officielle sur les données d'énergie incorporée des différents matériaux considérés ce qui rend difficile la comparaison entre des études différentes (l'un des objectifs de ce travail de thèse). - Simplification des impacts (un seul critère final) qui peut occulter la complexité des écosystèmes étudiés et de leurs impacts. 	<ul style="list-style-type: none"> - Territoire - Organisation (méthode en cours de stabilisation) 	<ul style="list-style-type: none"> - Les standards : Ecological Footprint Standards 2006⁴⁵ - Global Footprint Network⁴⁶ - Ecological Footprint⁴⁷ - Sharing nature's interest [Chambers et al, 2000] - Notre empreinte écologique [Wackernagel et Rees, 1996]
------------------------------------	--	--	--	---	--	--

Tableau 6 : Synthèse des principaux outils d'évaluation environnementale globale

⁴⁵ Global Footprint Network (2006). Ecological Footprint Standards 1.0 (Released on 16th of June 2006). In: www.footprintstandards.org [GFN, 2006b].

⁴⁶ <http://www.footprintnetwork.org> [GFN, 2006a].

⁴⁷ http://www.brass.cf.ac.uk/events/International_Ecological_Footprint_Conference--Conference_Papers.html

Selon le destinataire (techniciens, professionnels, etc) et la fonction attribuée (suivi et contrôle de l'efficacité des programmes et des politiques, éclairages des citoyens...), les systèmes d'indicateurs sont différents, dans leur nombre, leur contenu, les dimensions privilégiées et les méthodologies utilisées. On peut par ailleurs s'interroger sur la diffusion des outils d'évaluation ? Comment construire des indicateurs ou outils visibles et appropriables par le grand public ? [Lazzeri, 2006]

Des outils plus ou moins techniques ou d'autres beaucoup plus synthétiques et appropriables par le grand public, en pratique il est difficile de ne construire qu'une seule méthode pour l'évaluation de l'ensemble des impacts environnementaux :

Partant de l'hypothèse que le choix de ces méthodes d'évaluation « à l'échelle locale ou planétaire » dépend des objectifs fixés et liés aux impacts environnementaux à évaluer (en prenant en compte la hiérarchisation « *impacts locaux versus impacts planétaires* ») et de l'idée que leur conception doit être adaptée à ces objectifs recherchés pour agir localement en pensant globalement [Boutaud, 2004], l'interaction entre ces outils, applicables aux différents domaines, pourra donner une force à l'évaluation environnementale à l'échelle globale.

On peut dire que cette 'interaction' permet de réduire la complexité, pour l'évaluation ou l'action ("mieux" construire une compréhension des phénomènes, des conséquences, des enjeux) et de communiquer, aider les décideurs à se faire une opinion plus précise des impacts [Wackernagel, 2006] et de leur hiérarchisation d'un produit, un projet, une organisation ou un territoire).

A la base des descriptions méthodologiques disponibles dans la littérature scientifique cités précédemment, nous avons retracé dans la figure 20 le croisement de ces principales méthodes d'évaluation environnementale globale, les plus utilisées et '*suggérées les plus pertinentes*', avec les impacts environnementaux globaux.

Le choix de ces méthodes dépend des objectifs fixés par l'acteur en fonction des enjeux environnementaux qu'il considère être les plus importants mais aussi, et certainement, du coût d'accès aux informations (figure 21) en terme de *temps pour la réalisation d'évaluation* environnementale d'un projet donné (pour définir les objectifs et frontières du système, collecter les données de base de consommations et émissions liées au système étudié, évaluer et analyser les résultats) et en terme de *financement pour accéder aux bases de données* nécessaires pour le transfert des données de base collectées (par exemple, les 'coefficients de conversion' dans le cas de l'empreinte écologique).

En principe, on rencontre souvent certains problèmes relatifs à la collecte de données de consommation et émissions pour les trois outils. De plus, le coût des logiciels d'ACV pour l'accès aux bases de données est souvent élevé. Mais la méthode empreinte écologique (à l'échelle micro), nécessite elle-même la création d'une base de données complète de coefficients de transfert (que nous expliquons en détail dans la deuxième partie). Ces derniers sont souvent inspirés des bases de données d'Analyse de cycle de vie (ACV) et bilan carbone® (BC).

Il ne s'agit pas pour nous d'entrer ici d'emblée dans le vif du sujet, sur la méthode de calcul de l'empreinte écologique au niveau "micro", mais simplement d'illustrer notre propos en identifiant le lien entre ces principales méthodes d'évaluation environnementale globale.

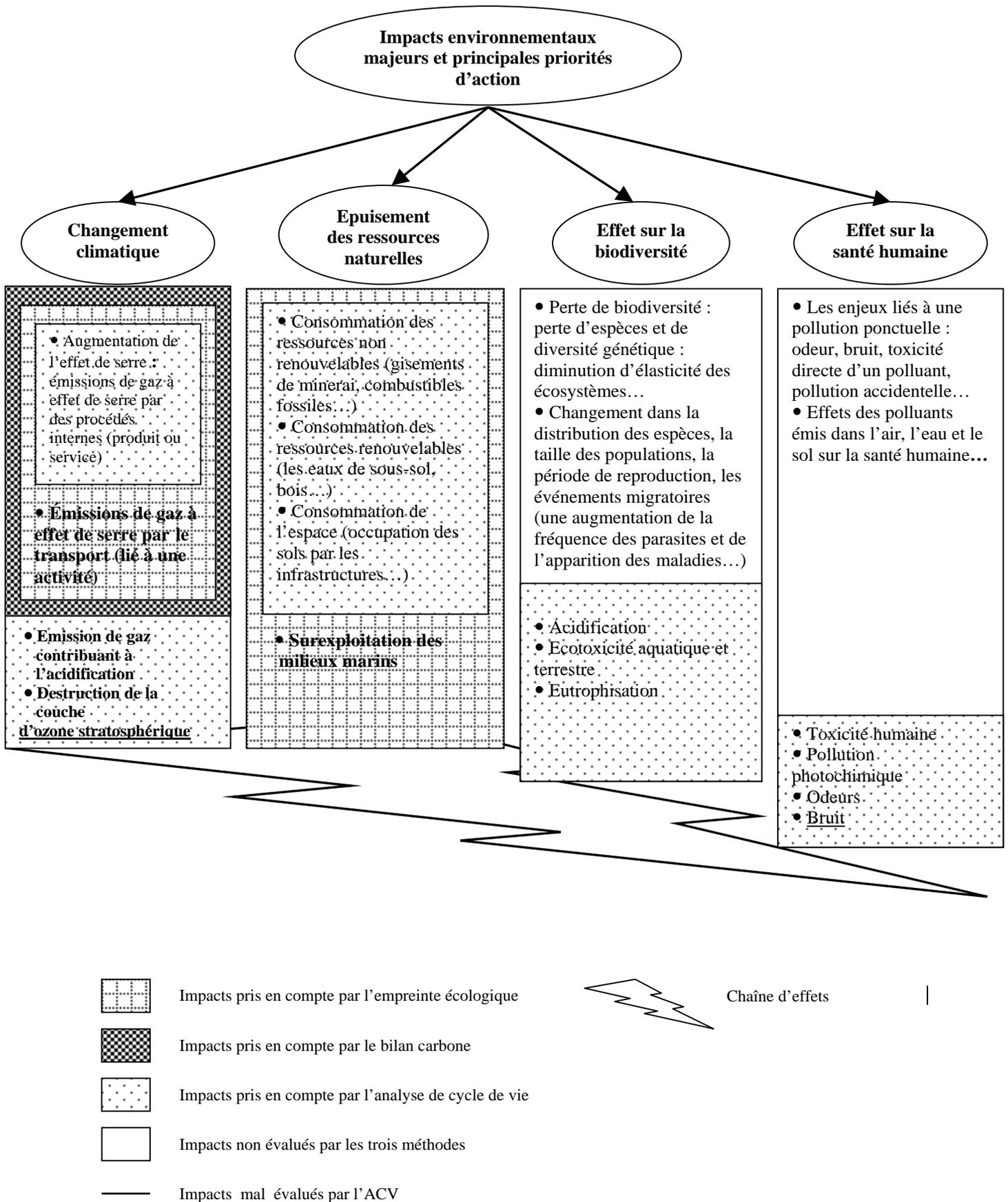


Figure 20 : Croisement impacts environnementaux majeurs et outils d'évaluation (Empreinte Ecologique, Analyse de Cycle de Vie et Bilan Carbone).

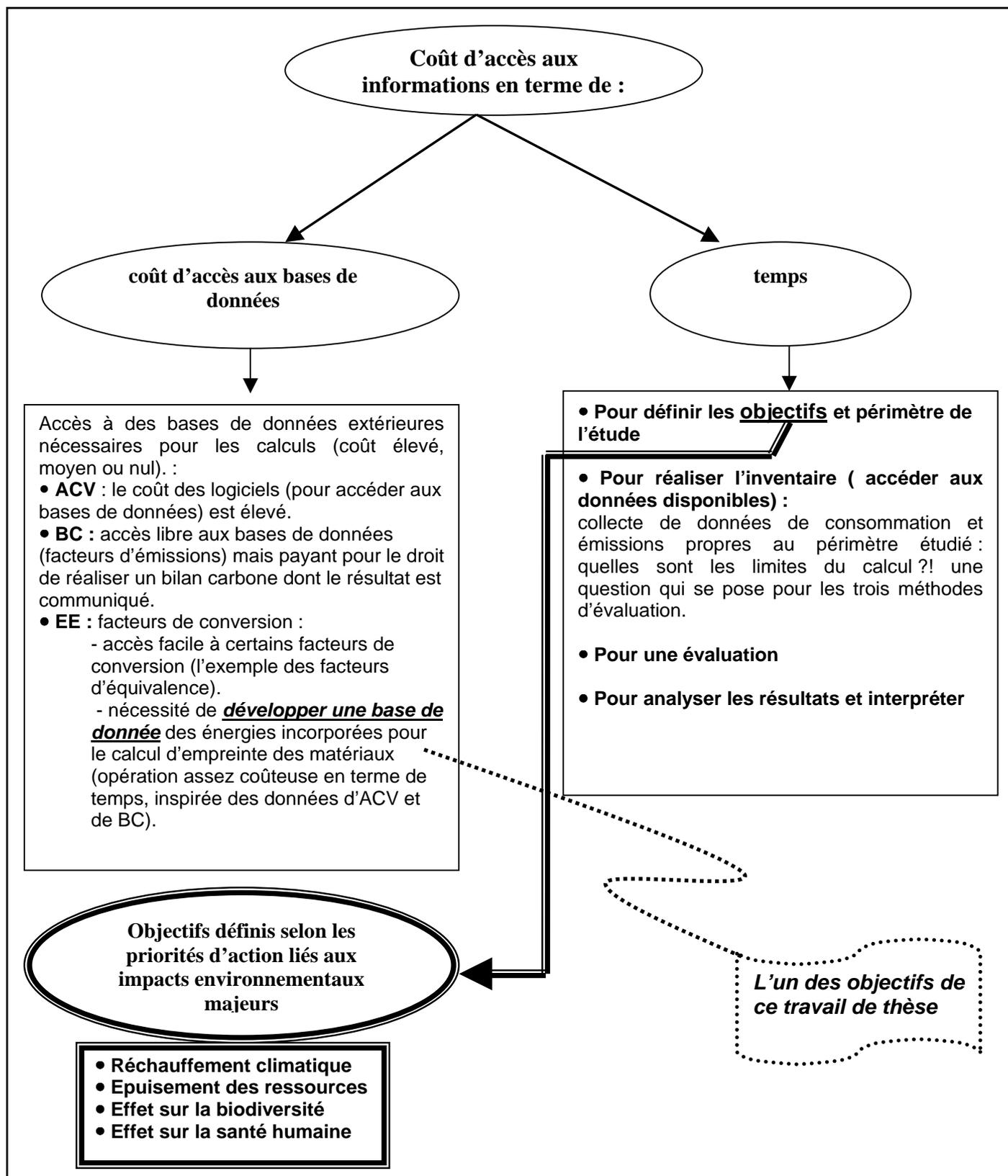


Figure 21 : Coût d'accès aux informations dans le cadre d'une évaluation environnementale

Les méthodes d'évaluation analysées ne sont donc pas opposables mais au contraire complémentaires. Elles peuvent construire ensemble un processus d'évaluation triangulaire pour chaque catégorie d'impact. Selon le degré d'agrégation de l'information, Marion Personne (1998) nous fournit un exemple synthétique de « triangle d'agrégation des

données » en distinguant quatre catégories de données dans le cadre de l'entreprise (figure 22) :

- les *données de base* (premier niveau), qui sont l'ensemble des données collectées au niveau opérationnel. Ces données ne sont généralement connues que des « spécialistes » du système étudié;
- les *indicateurs* (second niveau), qui représentent des informations synthétiques et qui sont obtenus par traitement des données de bases. Ces indicateurs ont pour vocation de servir les décideurs (la direction de l'entreprise);
- les *indices* (troisième niveau), qui sont obtenus par traitement des données de base et/ou des indicateurs et qui consistent en une information encore plus synthétisée à renseigner les différentes parties intéressées (actionnaires, partenaires, etc) sur les résultats globaux de l'entreprise ;
- Les *indices globaux* (quatrième niveau = sommet du triangle), qui sont mieux adaptés à la communication vers le grand public.

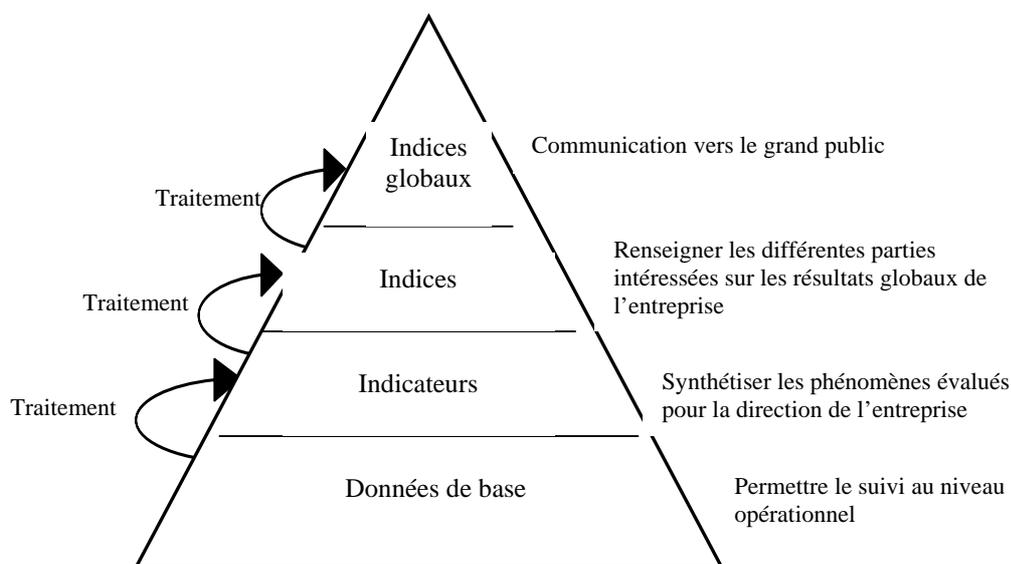


Figure 22: Variation du nombre d'indicateurs en fonction du niveau de diffusion selon Personne (1998)

Dans un *processus d'évaluation triangulaire*, inspiré donc du triangle d'agrégation de Marion Personne, nous distinguons également quatre catégories de données qui sont complémentaires l'une de l'autre (Figure 23):

- les données de base (le niveau « Inventaire : Entrants/Sortants ») représentent l'ensemble des données de consommation et rejet du système collectées et retenues pour alimenter le modèle qui sert de base à l'évaluation, c'est-à-dire les données que l'on choisit de prendre en compte dans l'évaluation. Ces données de base sont obtenues par des « techniciens et spécialistes » de chaque système étudié.
- les indicateurs (le premier niveau d'agrégation), qui représentent des informations synthétiques, liées aux principaux impacts environnementaux, élaborés à partir des bases de données et qui ont pour vocation d'agréger les données de l'inventaire en les ramenant à des unités connues (exemple : kWh/m², m³ carburant/ km construit, etc).
- les coefficients de transfert (le deuxième niveau d'agrégation), qui consistent encore à mieux synthétiser et simplifier.
- le score global et unique (ou indice global), qui est beaucoup plus simplifié, et adapté à la communication vers l'extérieur et le grand public (la qualité principale de l'empreinte écologique que nous abordons en détail dans la deuxième partie de ce travail de thèse).

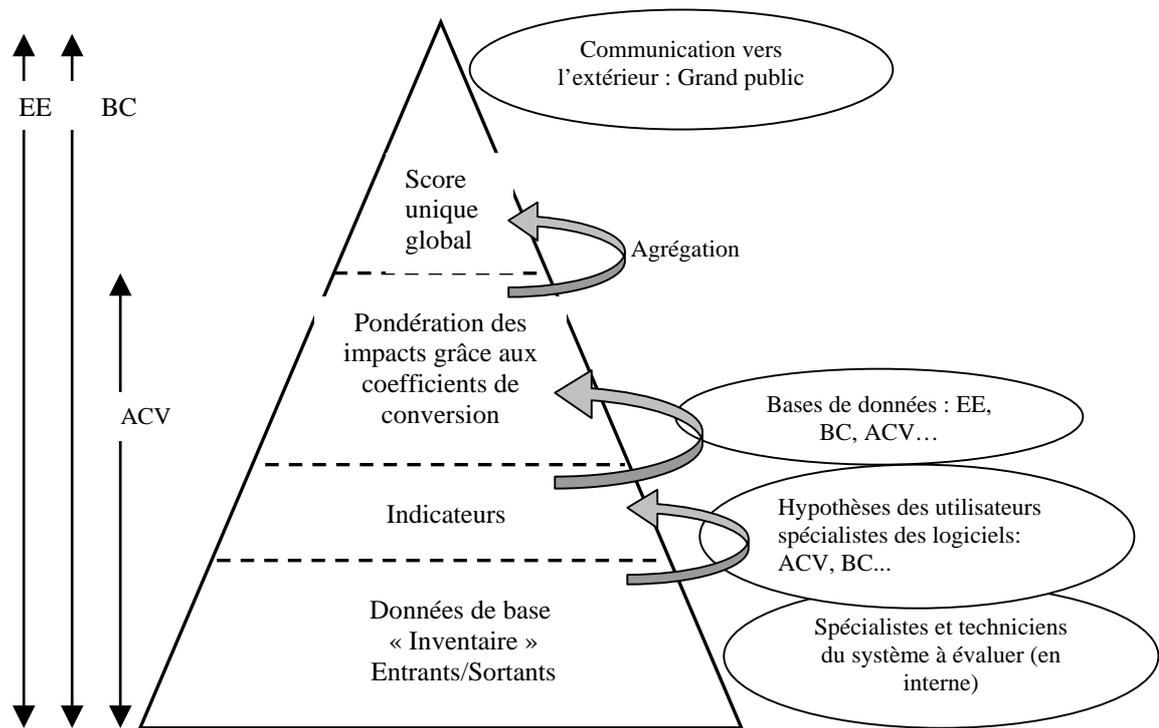


Figure 23: Processus d'évaluation triangulaire, inspiré de Personne (1998)

Pour chaque impact environnemental, par exemple lié à un système donné, il convient de choisir les indicateurs pour cette catégorie d'impact. Ces indicateurs vont permettre d'évaluer la contribution à chaque catégorie d'impact, de chaque flux du bilan du système (entrants et sortants). *Par exemple, pour le cas d'effet de serre, l'indicateur reconnu est le forçage radiatif de rayonnement infrarouge qui peut finalement se traduire en « émission de CO₂ ». La contribution de plusieurs types de gaz à effet de serre est définie en « équivalent CO₂ ».* Une fois que l'ensemble des indicateurs est identifié, les résultats de l'inventaire doivent donc être « traduits » et agrégés grâce à ces indicateurs et l'évaluation globale des impacts du système peut être effectuée en sommant ces « résultats traduits » et en les convertissant à l'aide des coefficients de transfert pour obtenir à la fin un résultat beaucoup plus synthétique, pour chacun des flux (figure 23) : un 'score unique' (les "t équ. C" pour le bilan carbone® dans l'exemple illustré par la figure n° 24).

Cependant, si l'agrégation des données facilite la communication et la compréhension des phénomènes, elle risque également de simplifier à outrance les phénomènes complexes, tant en termes environnementaux qu'en termes de décisions politiques à prendre pour réduire les impacts. Par exemple, l'agrégation des émissions de GES en utilisant le pouvoir de réchauffement global (PRG)⁴⁸, méthode classiquement utilisée actuellement, a été récemment remise en cause [Dessus et al, 2008].

⁴⁸ Les gaz à effet de serre (GES) ne contribuent pas tous de la même façon à l'effet de serre. Leur contribution relative peut être estimée grâce à un indice appelé « pouvoir de réchauffement global » (PRG). Il définit la capacité d'un gaz à absorber les rayons infrarouges émis par la Terre, sur une durée de 100 ans. Le PRG d'un gaz se mesure par rapport à celui du CO₂, gaz de référence : combien de fois plus, ou combien de fois moins, un gaz « fait » d'effet de serre sur 100 ans, par rapport à la même quantité de CO₂ émise au même moment. On parle donc de "PRG relatif". La notion de PRG est cependant approximative. En effet, la vitesse d'élimination d'un GES n'est pas stable sur 100 ans, car son séjour dans l'atmosphère dépend des conditions du moment. Or, ces conditions évoluent avec les changements climatiques

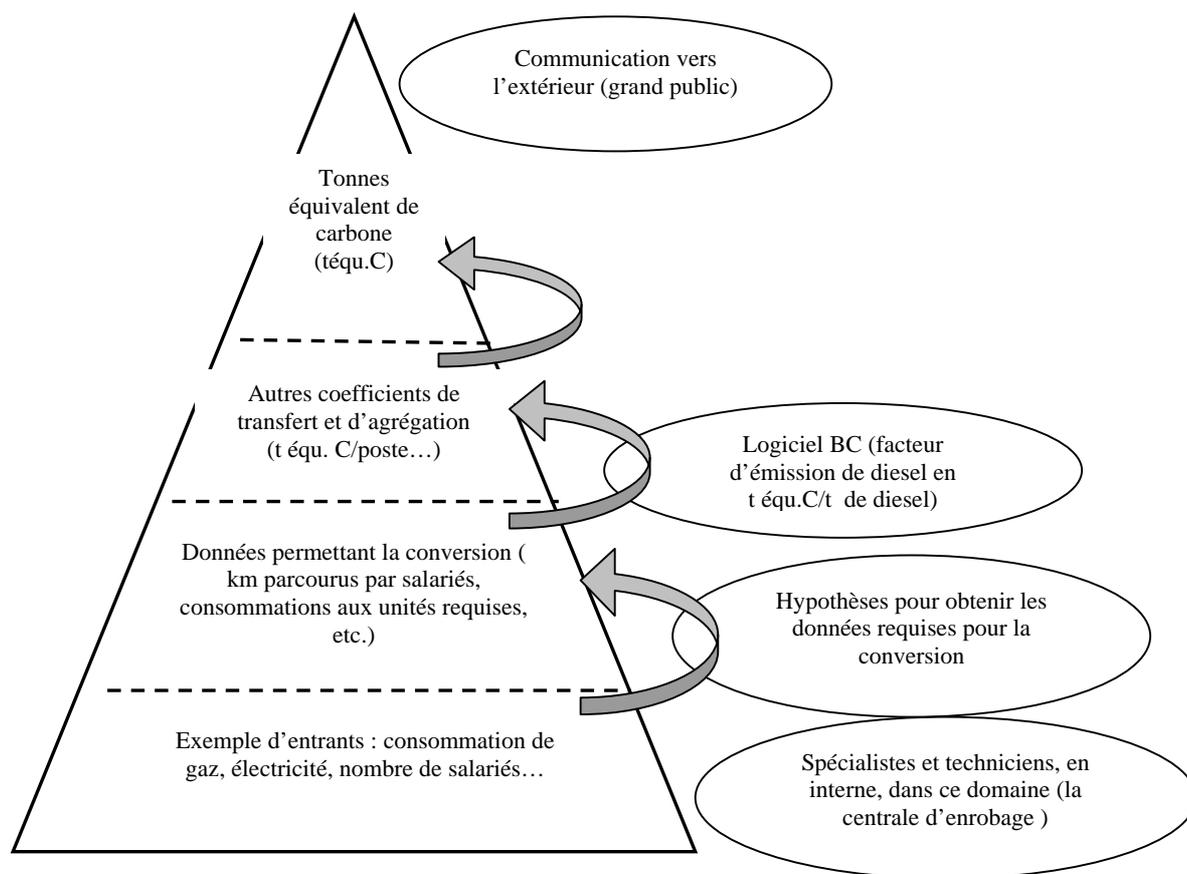


Figure 24 : Exemple de processus d'évaluation lié à l'impact « Augmentation de l'effet de serre » pour le cas d'une centrale d'enrobage (considérée comme 'système')

Cette identification d'indicateurs fait la plupart du temps appel à des bases de données 'BC' « plus ou moins simples » ou d'ACV « beaucoup plus complexes » :

De nombreux logiciels d'ACV développés dans le monde sont basés sur des différentes voies d'évaluation, comme par exemple : TEAM (Ecobilan, France), EIME, SIMAPRO (Pays-Bas) et GABI (Allemagne). L'objectif de ces démarches est de permettre une évaluation des impacts potentiellement générés sur l'ensemble du cycle de vie d'un produit ou service et l'identification d'alternatives technologiques plus favorables à l'environnement [Iosif, 2006] et [Iosif et al, 2007].

Malheureusement, ces informations sont souvent dispersées entre les centres de recherche, les entreprises privées et les universités. De plus, leur **coût** et leur **complexité** les rendent difficilement utilisables pour la plupart des utilisateurs.

L'information du citoyen sur les problématiques environnementales est devenue une exigence dans toute démocratie affirmée au niveau de l'Union Européenne, et d'autant plus cruciale si l'on vise à transformer nos démocraties déléгатives en démocraties participatives [Bergossi, 2006]. Cette information environnementale ne sera assimilée par le citoyen que s'il y prête une attention particulière, parmi le flot continu d'informations de toutes sortes dont il bénéficie chaque jour [Bergossi, 2006]. Un tel effort passe premièrement, par une étape d'évaluation

d'impact environnemental de nos activités et ensuite par une étape de sensibilisation massive de la population.

Pour qui n'est pas spécialiste, il est de ce fait extrêmement difficile d'avoir une vue globale des pressions exercées par nos activités sur l'environnement. Il est donc pertinent et nécessaire de définir un outil capable d'intégrer tous les impacts de ces activités. Cette agrégation de toutes les données disponibles en un seul chiffre possède alors une énorme force de communication par rapport « au grand public », dans le sens qu'il permet de connaître globalement la pression exercée par l'activité humaine. *L'empreinte écologique* fournit, par sa simplicité, la clarté de son unité de mesure et la mise en évidence immédiate d'un déséquilibre environnemental grave, un outil idéal de sensibilisation du grand public [Wiedmann, 2007].

Par conséquent, l'idée de présenter les résultats sous la forme d'une unité unique facilement compréhensible, qui est 'l'hectare', peut être appliquée à d'autres méthodes d'évaluation pour faciliter l'interprétation des données de ces dernières qui sont beaucoup plus complexes. L'empreinte écologique est donc, selon la majorité d'acteurs, un bon « complice » des autres méthodes: un instrument d'évaluation synthétique et rapide, compréhensible, facilement communicable et appropriable pour la sensibilisation.

Les premiers développements de cet indicateur écologique se focalisent sur une échelle géographique globale [Wackernagel et Yount, 1998] et [Lewan et Simmons, 2001] en considérant l'organisation humaine en nations. D'autres développements ont suivi qui précisent cette vision en réduisant l'échelle au niveau des villes et régions.

Dans l'intérêt de pouvoir estimer les pressions environnementales exercées par une activité donnée, cet indicateur pourrait aussi être employé pour traduire les impacts d'une activité industrielle. En revanche, l'approche « national account » n'est pas satisfaisante pour mesurer les empreintes des activités industrielles, vu qu'elle se base sur des facteurs d'ajustement à partir de moyennes nationales de consommation par habitant.

L'approche « par composants » quant à elle, ne peut pas être appliquée directement au niveau des activités industrielles ou des travaux publics, parce que les données utilisées dans ses calculs, soit elles sont des données réelles propres à la ville considérée par exemple (dont on calcule l'empreinte) ou soit elles sont des données extrapolées de statistiques nationales.

Par conséquent, cette dernière approche nécessite avant tout des adaptations méthodologiques pour rendre plus fiables les calculs au niveau d'une activité individuelle. Un consensus scientifique sur l'utilisation de l'empreinte écologique nécessite que les calculs et les résultats soient reproductibles. **L'hypothèse de base de notre travail est donc qu'il est pertinent de chercher à adapter la méthode d'empreinte écologique, développée à l'échelle des Nations, à l'échelle d'une activité, une organisation ou un projet.** Notre intérêt est donc d'adapter la méthode de calcul d'empreinte écologique dont puissent s'inspirer les acteurs des secteurs industriels.

PARTIE II

Partie II Empreinte écologique, du global au local :

Peut-on calculer l'empreinte écologique à l'échelle d'un établissement individuel ? Propositions méthodologiques pour le calcul d'empreinte écologique au niveau d'une activité donnée

Comme cela a été évoqué précédemment, l'empreinte écologique peut être décrite comme un outil de synthèse permettant d'estimer les pressions qu'exercent les activités humaines sur les milieux naturels ainsi que la capacité de régénération des écosystèmes (eau, air, sol, gisements et matériaux du sous sol...) situés à l'intérieur et à l'extérieur des limites administratives d'un pays [Nascimento, 2006]. C'est un outil d'évaluation environnementale récent [Wackernagel, 2006], développé pour estimer l'appropriation des ressources naturelles par l'Homme. L'empreinte écologique constitue la superficie théorique de sols et d'eau qui serait requise pour soutenir indéfiniment une population humaine et des niveaux de vie donnés. Elle a été développée initialement pour quantifier l'impact global de l'Homme tel qu'il s'organise en sociétés et non celui d'une filière industrielle. Notre hypothèse est qu'il est légitime de chercher à adapter cette méthode au secteur industriel ou des travaux publics, qui participe de manière sensible et marquante aux contraintes exercées sur notre environnement. Cette étude vise précisément à établir une méthodologie de calcul d'empreinte appliquée à une activité donnée.

Dans cette partie, nous définirons les objectifs de l'étude de calcul d'empreinte écologique à l'échelle d'un projet. Ensuite, nous accorderons une attention particulière aux possibilités d'adaptation méthodologique de calcul d'empreinte écologique à ce niveau (micro).

1 Contexte du projet

1.1 Définition des objectifs de l'étude de calcul d'empreinte écologique à l'échelle d'un projet : pourquoi la méthode de l'empreinte écologique actuelle ne peut pas être utilisée à l'échelle d'une activité industrielle ?

L'empreinte écologique présente des intérêts pédagogiques et de communication importants. Facilement comprise par le grand public, elle présente un intérêt en terme de sensibilisation ainsi qu'un attrait incontestable de la part de nombreux acteurs tel que le WWF qui participe tous les deux ans à la publication des rapports sur l'empreinte écologique à l'échelle des pays du monde entier.

Dans la partie précédente, nous avons abordé les deux grandes façons connues de calcul d'empreinte écologique : par ajustement (national account) et par composants (component-based approach).

La première méthode des comptes nationaux s'applique essentiellement à des territoires. Les données d'entrée, qui sont locales (d'un territoire ou ville), basées sur un inventaire direct des consommations (figure 25), sont issues de travaux statistiques territoriaux. Cependant, par manque de ces données réelles, les empreintes propres au territoire étudié sont déduites à partir de données nationales, par le biais de facteurs d'ajustement, comme cela a été expliqué dans le chapitre 2.3.2 de la partie I.

La deuxième méthode quant à elle, consiste à modéliser de manière systémique l'objet dont on cherche à calculer l'empreinte écologique, en mettant en évidence les flux, entrants et sortants, de matière et d'énergie.

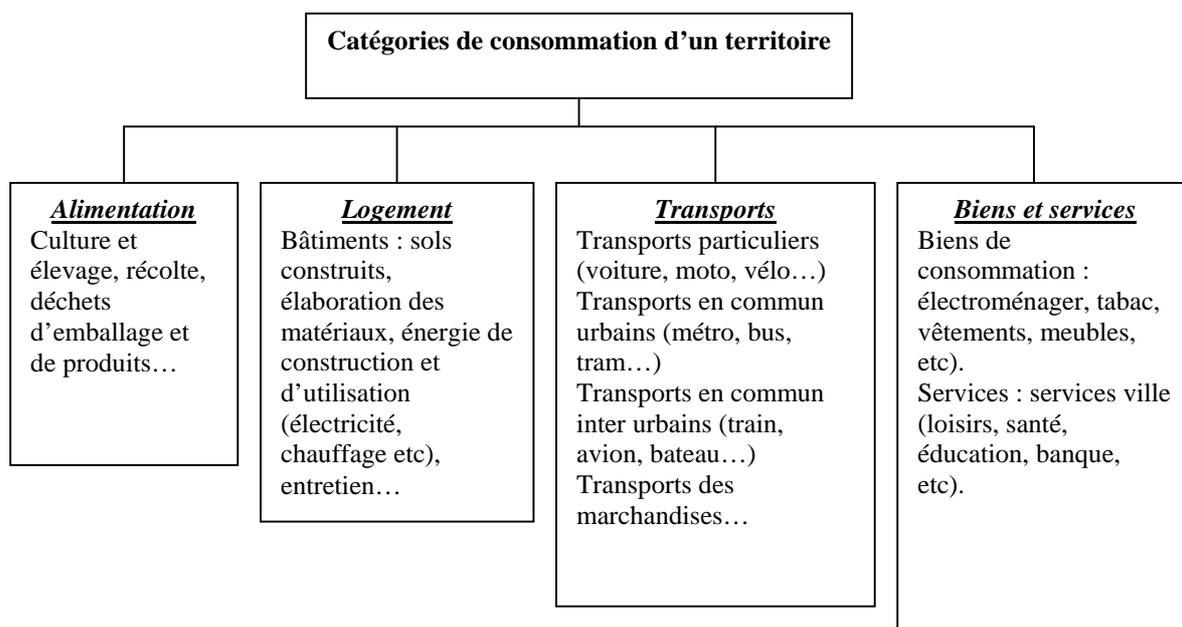


Figure 25 : Les consommations directes d'un territoire sur lesquelles repose le calcul d'empreinte.

Plus de 100 villes et municipalités ont calculé leur empreinte écologique [Wackernagel, 2006]. Par exemple, Londres l'a fait trois fois dont la dernière faisait suite à la demande du conseil du développement économique. En Australie, une agence pour la protection de l'environnement construit son programme éducatif autour de l'empreinte écologique. En plus, le gouvernement du Pays de Galles choisit l'empreinte comme indicateur de durabilité et diverses villes et régions françaises ont relevé le défi [Wackernagel, 2006].

En 2003, l'empreinte écologique en France était de 5,6 hectares par habitant [WWF, 2006] (tableau 7), pour une moyenne mondiale de 2,2 hectares. La biocapacité, quant à elle, était de 3 hectares par habitant (pour une moyenne mondiale d'environ 1,8 hectares). Malgré des capacités de production supérieures aux moyennes mondiales, la France utilise donc plus de ressources qu'elle ne peut en produire : si le pays devait vivre de façon autonome, il faudrait quasiment une « France » supplémentaire pour répondre aux besoins des Français. Si le monde entier avait le même impact écologique que la France, il faudrait près de trois planètes pour espérer vivre de façon durable [WWF, 2006].

Empreinte écologique par personne (hag)	EE totale	Terres cultivées	Pâturages (herbages)	Forêts : Bois, pulpe et papier	Forêts : Bois de chauffage	Pêche	CO ₂ de combustibles fossiles	Nucléaire	Terrains bâtis
Monde	2,23	0,49	0,14	0,17	0,06	0,15	1,06	0,08	0,08
France	5,6	0,80	0,33	0,46	0,01	0,33	2,02	1,50	0,17

Biocapacité par personne (hag)	Biocapacité totale	Terres cultivées	Pâturages (herbages)	Forêts	Pêche	CO ₂ de combustibles fossiles	Nucléaire	Terrains bâtis
Monde	1,78	0,53	0,27	0,77	0,14	?	?	0,08
France	3	1,42	0,14	1,17	0,10	?	?	0,17

Tableau 7 : Empreinte Ecologique et Biocapacité de la France, en hectares globaux par personne, 2003. Selon le 'Rapport planète vivante' de 2006

De nombreuses villes françaises ont également calculé leur empreinte écologique : Paris, Besançon, Grand Lyon, région Nord Pas de Calais, Chalon sur Saône.

➤ **L'exemple de Paris et Besançon :**

Les empreintes écologiques de Paris et de Besançon ont été estimées par le WWF-France et Redefining Progress, avec le soutien du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable et la collaboration des municipalités de Paris et de Besançon⁴⁹, à partir de la méthode « par composants » en récoltant leurs données clés liées au logement, à l'alimentation, à la consommation de biens et de services et aux transports. Les différentes empreintes étaient comparées aux moyennes nationales, pour l'année 1999 (figure 26).

En l'absence de données aussi précises et complètes que celles qui existent au niveau national, cette méthode permet une évaluation relativement fiable de l'empreinte municipale.

La ville de Paris occupe une superficie intra-muros de 10539 hectares, pour une population totale de 2,125 millions d'habitants. L'empreinte écologique d'un Parisien est de 6,0 hectares par personne (tableau 8), soit 16 % de plus que la moyenne nationale. L'empreinte écologique totale de Paris s'élève à 12 838 000 hectares globaux, soit 313 fois plus que sa biocapacité (41 000 hag, soit 0,02 hag par personne). Ce résultat met bien en évidence le poids écologique de Paris sur son environnement, puisque la ville dépend quasi entièrement de l'extérieur pour son approvisionnement en ressources et pour l'absorption de ses déchets.

La ville de Besançon, quant à elle, occupe une superficie de 6 505 hectares, pour une population totale de 122 308 habitants. L'empreinte écologique bisontine est de 5,2 hectares par personne (tableau 9), soit 1% de moins que la moyenne nationale. L'empreinte écologique totale de Besançon s'élève à 640 000 hectares globaux, soit 26 fois plus que sa biocapacité (24 000 hag, soit 0,2 hag par personne). Comme pour la France, si chaque personne dans le monde vivait comme à Besançon, il faudrait trois planètes pour vivre de façon durable.

Les écarts entre les deux villes et la moyenne française s'expliquent par les modes de vie : à Paris, les transports ont moins d'impact écologique (grâce aux transports en commun), mais la consommation de biens et services est plus importante. A Paris et surtout à Besançon, les logements sont plus optimaux et permettent de réduire l'empreinte écologique de la ville. Les données sur la nourriture sont insuffisantes pour évaluer les écarts entre la France et les deux villes (figure 26).

⁴⁹ In: www.wwf.fr/content/download/129/596/version/1/file/EmpreinteFrance4p.pdf

	Energie	Terres cultivées	Pâturages	Forêts	Terrains construits	Pêche	Total
Nourriture	0,3	0,8	0,2	0	0	0,4	1,6
Logement	0,8	0	0	0,1	0	0	0,8
Transport	0,7	0	0	0	0	0	0,7
Biens et services	1,9	0,2	0	0,7	0,2	0	2,9
Total	3,6	1	0,2	0,7	0,2	0,4	6

Tableau 8 : Empreinte Ecologique PARIS, en hectares globaux par personne, 1999

	Energie	Terres cultivées	Pâturages	Forêts	Terrains construits	Pêche	Total
Nourriture	0,3	0,8	0,2	0	0	0,4	1,6
Logement	0,5	0	0	0,1	0	0	0,5
Transport	0,9	0	0	0	0	0	0,9
Biens et services	1,4	0,1	0	0,5	0,1	0	2,2
Total	3	0,9	0,2	0,5	0,2	0,4	5,2

Tableau 9 : Empreinte Ecologique BESANÇON, en hectares globaux par personne, 1999

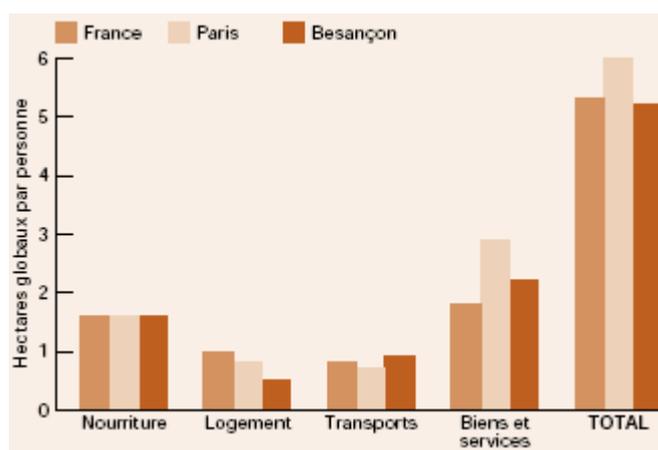


Figure 26 : Empreinte Ecologique FRANCE, PARIS et BESANÇON par secteur de consommation, 1999

• Et l’empreinte écologique au niveau d’un projet ou organisation ?

Après les calculs d’empreinte aux niveaux national et régional (ville, région, etc), un autre niveau d’action complémentaire se révèle encore nécessaire: encourager l’ensemble des agents individuels à réduire leur empreinte au niveau de leur mode de vie individuel. Après avoir calculé l’empreinte totale de la France, par exemple, il serait possible d’estimer les empreintes des différents territoires du pays, et de calculer également les empreintes écologiques des activités industrielles et de travaux publics propres à chaque territoire (figure 27).

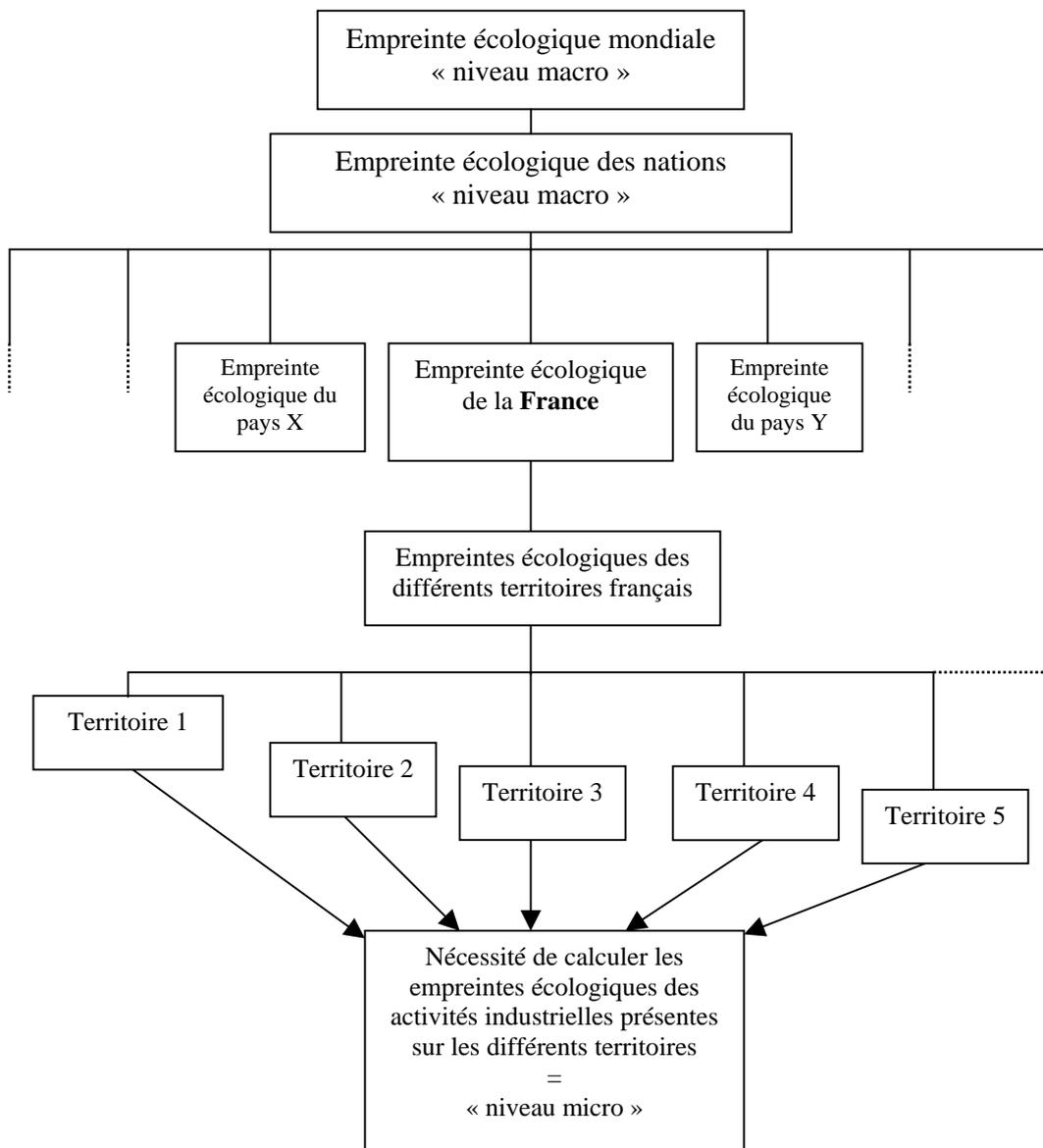


Figure 27 : L'empreinte écologique aux différentes échelles : nécessité de calcul d'empreinte d'une activité individuelle

Ce niveau d'action sera facilité si chaque acteur individuel sait évaluer, au niveau de son organisation ou projet (entreprise, foyer, activité industrielle, etc.) sa propre empreinte. Ainsi, des entreprises pourraient employer l'empreinte écologique pour traduire les impacts de leurs activités industrielles sur le capital naturel. En effet, cet indicateur pourrait permettre à une organisation :

- de suivre l'évolution sur plusieurs années de la pression exercée par un site donné sur le capital naturel et de mesurer ainsi l'efficacité des investissements qui y sont effectués au titre de la protection de l'environnement [Wiedmann, 2007],
- d'identifier, pour un produit ou une activité donnés, la répartition des différentes pressions exercées sur le capital naturel,
- d'identifier des pistes de diminution des consommations d'énergie, d'eau, et d'autres

ressources,

- de comparer les impacts environnementaux entre ses différents sites industriels [Wiedmann, 2007] ou entre divers systèmes de production,
- de comparer la pression induite par son activité à celle de ses principaux concurrents dans la mesure où ceux-ci estimeraient également leur empreinte écologique sur la base de la même méthode,
- de connaître les pressions environnementales exercées sur les ressources naturelles par une activité ou un produit.

Pour le calcul d'empreinte à ce niveau, la méthode par ajustement ne peut pas être utilisée pour mesurer les empreintes des activités industrielles, car les consommations des entités étudiées diffèrent trop des consommations moyennes nationales. C'est donc la méthode « par composants » qui pourrait être appliquée dans ce cas, puisqu'elle est globalement proche d'une démarche 'analyse de cycle de vie' ce qui nous semble plus appropriée pour des calculs d'empreinte au niveau d'une organisation ou activité individuelle. Les données d'entrée, peuvent être basées sur un inventaire direct des consommations issues de tableaux de bord d'entreprise, qui seraient multipliées par des coefficients de transfert, généralement tirés d'articles scientifiques et de données d'ACV, pour finalement obtenir un résultat sous la forme d'hectares globaux.

Cependant, ceci nécessite des adaptations méthodologiques pour rendre plus fiables les calculs à petite échelle, en particulier au niveau du secteur industriel, qui participe de manière sensible aux contraintes exercées sur l'environnement. Ainsi, ce travail nécessite de développer une base de données des coefficients de transfert des activités étudiées.

Une telle adaptation pose donc des questions méthodologiques. Afin d'envisager ces questions, et les intérêts d'une utilisation de cet indicateur dans le cadre d'une activité donnée, nous avons développé une méthode que nous détaillons dans cette partie puis que nous appliquons au cas d'un chantier routier dans la 3^{ème} partie de ce mémoire.

Le premier objectif de cette étude est de mener à bien un calcul d'empreinte pour mettre en évidence les points d'achoppement de la méthode que nous développons ainsi que d'identifier les enseignements qui peuvent être tirés d'un tel calcul au niveau « micro ». Le deuxième objectif de ce travail est de proposer un cadre systématique de suivi des différents impacts sur les ressources (consommation d'énergie, de consommables, de biens équipements et de surface d'une activité donnée).

2 Bases méthodologiques du calcul au niveau « Micro »

2.1 Principes du calcul au niveau « Micro »

La méthode de calcul est basée sur de simples calculs visant à multiplier des données propres au site étudié (consommations ou rejets) par des données génériques (coefficients de transferts) comme le synthétise la figure 28 :

L'empreinte écologique se calcule à partir d'une donnée quantitative annuelle issue de l'inventaire direct des consommations effectué sur le site étudié : masse [kg ou t / an] ou volume [m³ / an] pour la matière, [kWh ou GJ / an] pour l'énergie. Ces valeurs sont converties dans un premier temps en surface physique simple⁵⁰ de sols productifs, exprimée en hectares par an, au moyen d'un Facteur de Conversion surfacique, qui s'exprime quant à lui en m² ou en hectares par unité de masse, volume ou énergie, et qui est spécifique à chaque catégorie de consommation et de sol [Wackernagel et al, 2005]. Cette grandeur est ensuite ajustée au

⁵⁰ La terminologie « surface simple » ou « physique » désigne une surface de sol d'une catégorie spécifique présentant un rendement local. Elle est par la suite convertie en surface « globale », c'est-à-dire présentant un rendement moyen mondial.

moyen des Facteurs de Rendement⁵¹ (FR) et d'Équivalence⁵² (FE), pour fournir une surface générique moyenne à l'échelle mondiale, l'empreinte écologique (en hag).

Un « coefficient de transfert » est le produit de plusieurs facteurs : le facteur de conversion surfacique et les deux facteurs de rendement et d'équivalence.

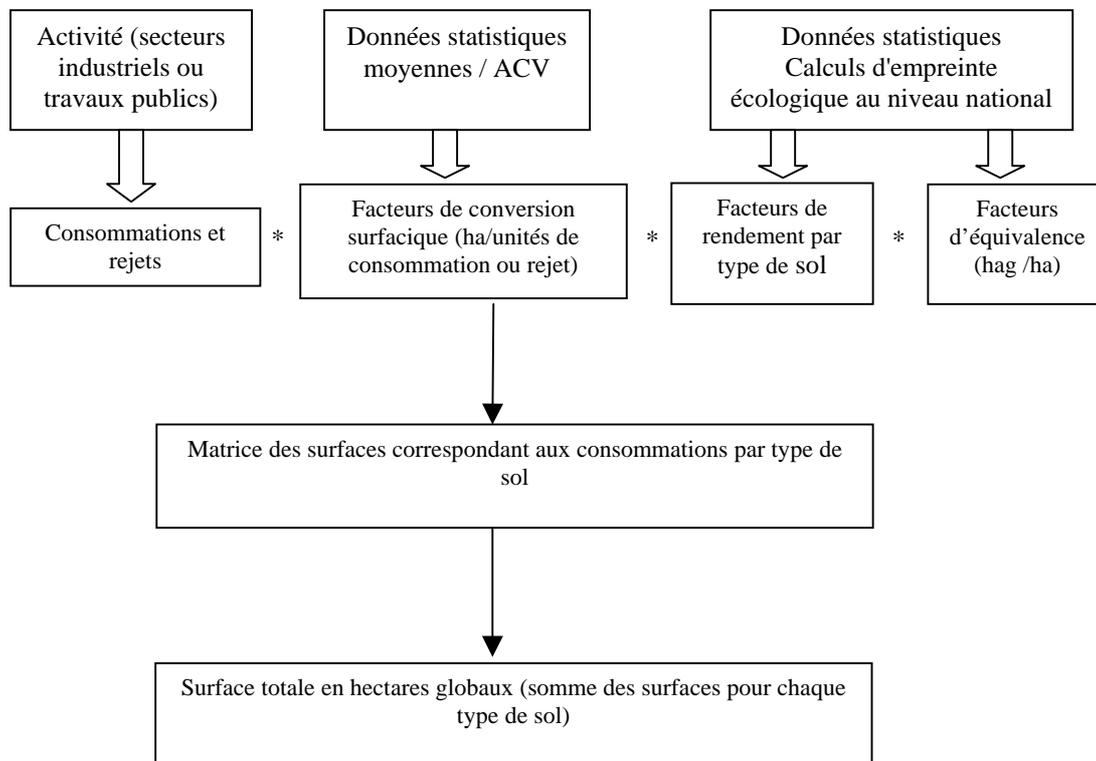


Figure 28 : Principe de calcul de l'approche par composants

2.2 Méthode de calcul

Le principe de l'approche « micro » repose sur de simples calculs matriciels mais nécessite de nombreuses recherches de données pour définir les facteurs de conversion. Les données d'entrée, basées sur un inventaire direct des consommations, sont issues de travaux statistiques territoriaux ou de tableaux de bord d'entreprise. Elles sont multipliées par des facteurs de conversion, généralement tirés d'articles scientifiques ou de données d'ACV pour finalement d'obtenir un résultat sous la forme d'hectares.

La méthodologie de calcul que nous avons suivie est composée de 5 étapes :

- Définition du périmètre du système étudié.
- Inventaire des données de consommation disponibles, de l'activité étudiée, afin de renseigner la matrice de calcul.
- Définition des facteurs de conversion correspondant aux données collectées.
- Calculs des empreintes de chaque poste de consommations.
- Somme des différents postes et analyse des résultats afin d'en vérifier la cohérence.

2.2.1 Définition du périmètre

La première phase de l'étude doit consister à en définir le périmètre, afin de préciser jusqu'où prendre en compte l'impact du système et déterminer les limites des consommations qui entrent dans le calcul de l'empreinte, c'est-à-dire les frontières du système étudié (activité

⁵¹ Cf. § 2.3.2 - b Partie I.

⁵² Cf. § 2.3.2 - b Partie I.

étudiée, période sur laquelle les données sont étudiées).

La figure suivante illustre un cas d'exemple des frontières possibles concernant la filière de « fabrication du papier » (figure 29) : accessibilité, par exemple, aux données liées au processus industriel du papier ainsi qu'à l'extraction du bois.

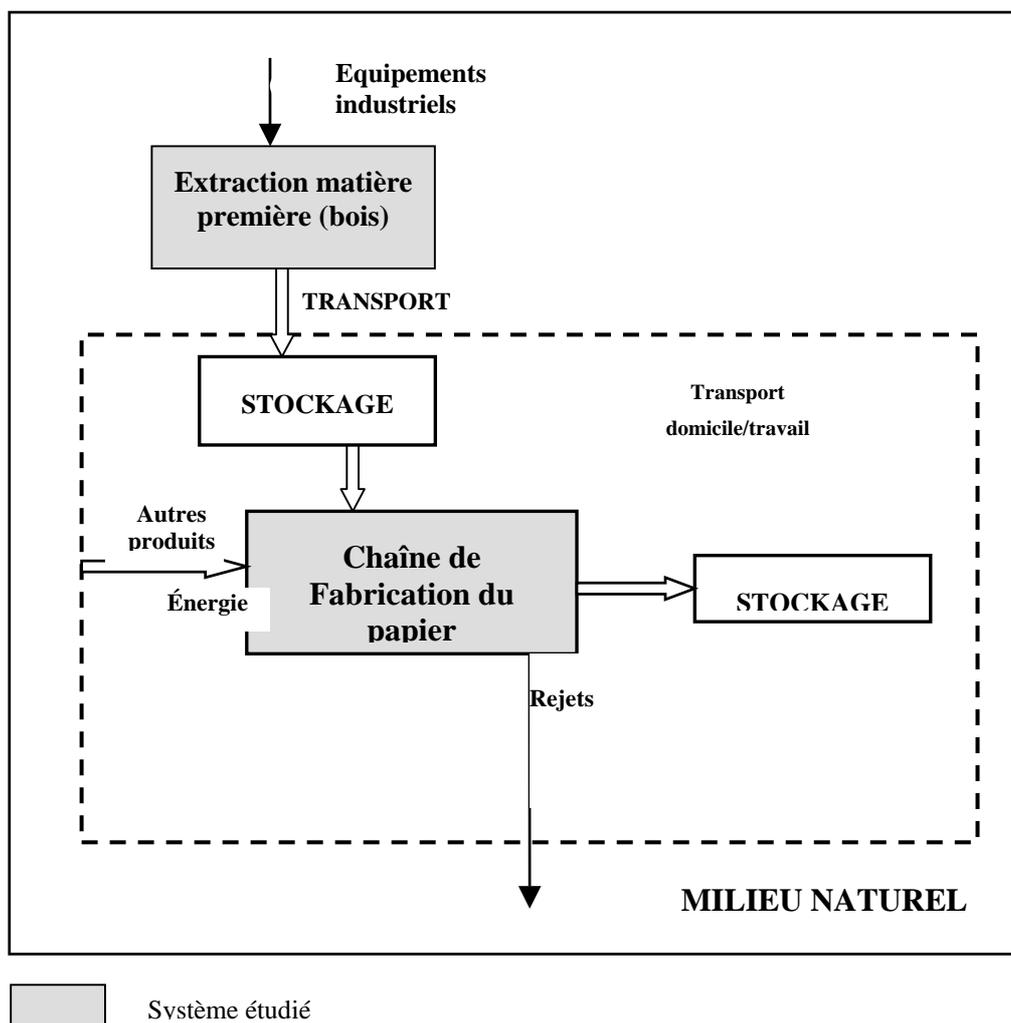


Figure 29 : Exemple des frontières prises en compte pour une filière étudiée : 'fabrication du papier'

2.2.2 Inventaire des données : nécessité d'adapter les catégories de consommation

Comme il a déjà été mentionné dans les chapitres précédents, le calcul de l'empreinte écologique dans l'approche « Macro » pour les Nations repose sur la classification des consommations en cinq catégories : alimentation, logement, transport, biens de consommations et services. Ces données sont inventoriées et quantifiées. Elles sont converties en surfaces équivalentes au moyen de facteurs de conversion déterminés.

Pour simplifier la collecte des données et détailler l'empreinte écologique au niveau d'une activité individuelle, les cinq catégories de consommations suivantes ont été définies :

- **Consommables**, qui remplace la catégorie alimentation des calculs d'empreinte des Nations. Nous citons quelques exemples liés à notre terrain d'étude que nous aborderons dans la 3^{ème} partie (le cas du chantier routier) : eaux d'arrosage, carburant utilisé pour l'alimentation des engins utilisés sur le chantier routier, béton des tuyaux d'assainissement, explosifs, etc.

- **Infrastructures**, qui remplace la catégorie logement des calculs d’empreinte des Nations. A titre d’exemple: bâtiments (bureaux), réseaux, la consommation directe d’énergie qui est intégrée dans cette catégorie sur le modèle de [HEFC RP, 2003], etc.
- **Transport**: Transport des consommables (matériaux de construction par exemple), transport domicile/travail des employés et agents.
- **Biens manufacturés**: équipements industriels (Engins de chantier par exemple).
- **Services** : Traitement des eaux usées de la base de vie du chantier et téléphone par exemple.

2.2.3 Définition des facteurs de conversion

• Adaptation des différents types de ‘sols’ à considérer : facteurs d’équivalence et de rendement par type de sol

Dans le cas de notre étude, nous avons adapté la notion de catégories de sols des calculs d’empreinte pour les nations (paragraphe « 2.3.2-b » de la première partie) :

- Les *sols énergétiques* : sols qui correspondent aux forêts qui absorbent le CO₂ émis directement par l’activité, et indirectement tout au long du cycle de vie des articles de consommation. Chaque mégajoule consommée donne lieu à une empreinte sur les sols énergétiques, égale à la surface globale de forêt équivalente.
- Les *sols construits* (ou *dégradés*) : ces sols sont biologiquement improductifs, soit parce qu’ils ont été recouverts pour les besoins de l’activité, soit parce que leur sous-sol est exploité dans des activités d’extraction (mines, carrières, etc.), soit encore parce qu’ils ont été contaminés par des polluants qui en altèrent indéfiniment la productivité [Wernert, 2004].
- Les *sols forêts* : cette catégorie de sols correspond notamment à la production de bois (pour la fabrication du papier consommé par l’activité).
- *Espaces marins* : cette catégorie peut être conservée en cas de consommation de poissons (dans le restaurant d’un site industriel par exemple). Cependant, nous avons ajouté la catégorie « *sols aquatiques* » afin de tenir compte de l’empreinte écologique associée à la consommation d’eau sur un site industriel (l’eau d’arrosage des pistes de terrassement dans le cas de construction d’une route par exemple).
- En ce qui concerne les *terres arables* (nécessaires aux récoltes) et *pâturages* : ces sols correspondent à toutes les consommations relatives aux produits issus de la biomasse (animale et végétale) susceptibles d’être consommés pendant une activité donnée. Dans le cas d’une activité industrielle ou de construction, la contribution d’empreinte écologique sur ce type de sol est prise en compte s’il existe un restaurant sur le site industriel concerné ou dans le cas d’une industrie agro-alimentaire, d’agro-carburants ou de transformation de produits végétaux ou animaux.

Les facteurs d’équivalence ainsi que les facteurs de rendement de la France liés aux sols considérés sont présentés dans le chapitre 2.3.2 de la partie I.

Il est important de signaler que pour ces différents types de sols, il faudrait effectivement utiliser les facteurs de rendement local (du pays où le bien utilisé est produit) dans le calcul d’empreinte d’une activité donnée [GFN, 2006b]. En ce qui concerne leurs facteurs d’équivalence, ils sont constants pour tous les pays pour une année déterminée.

• Autres facteurs de conversion nécessaires

Les données d’entrée du calcul d’empreinte sont des données sur les consommations. Les données de sortie sont des surfaces (en ha globaux). Des coefficients de transfert permettent donc la conversion des données collectées en surface.

En plus des facteurs d'équivalence et de rendement liés aux différentes terres bioproductives considérées, d'autres facteurs de conversion correspondant aux données collectées du site ou de l'activité étudiée sont nécessaires.

Pour le calcul d'empreinte des principaux postes de consommation sur sols énergétiques par exemple, nous avons comparé plusieurs facteurs de conversion à partir de différentes bases de données fournissant des références en terme *d'énergies incorporées* (principalement exprimées en GJ/t ou MJ/kg) des matériaux concernés et *d'émissions en CO₂* (en t équ. C/ t). L'énergie incorporée d'un produit, bien ou service, peut être définie comme l'énergie totale requise pour sa construction, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'assemblage des sous-produits, en passant par les phases intermédiaires de transformation, traitement, fabrication, conditionnement et transport des produits intermédiaires et du produit fini. Cette approche est valable par la suite pour les consommables, les infrastructures, les équipements industriels et les services.

Cette comparaison nous a donc permis de mettre en évidence des écarts pouvant aller jusqu'à 90 % entre les données fournies pour le même matériau, par les différentes bases de données. Ces écarts s'expliquent par des différences d'hypothèses faites dans les ACV, mais surtout par les différences réelles des process de fabrication de chaque matériau selon les pays. Durant ce travail, nous avons développé une base de données non exhaustive d'énergies incorporées (en MJ/kg) et de facteurs d'émission proposés par l'ADEME en tonne équivalent carbone par tonne (cf. §. 2.2.4) de certains matériaux susceptibles d'être rencontrés au sein des principaux postes de consommation d'activité de travaux publics, ainsi que leurs empreintes écologiques en fonction des différents facteurs de conversion : quelques exemples sont présentés dans les tableaux 10, 11 et 12. Les frontières de l'analyse de ces énergies incorporées des bases de données étudiées (Gabi4, Equer, Negawatt, GFN, Colas⁵³, données Charpentiers⁵⁴, données KBOB⁵⁵) ne sont pas clairement définies. Elles sont données sans aucune indication sur leur niveau d'incertitude. D'une manière générale, plus un produit subit de transformations avant de prendre sa forme définitive, et plus son énergie incorporée est élevée.

Dans nos calculs, nous choisissons les valeurs d'énergies incorporées les plus faibles pour avoir un résultat d'empreinte moins important. En principe, et selon le Global Footprint Network, les standards des calculs d'empreinte conseillent de choisir les valeurs les plus faibles [Wackernagel, 2005 et GFN, 2006b].

matière	Facteur d'émission (t équ. C/ t)
Papier	0,55
Béton	0,055
PVC	0,51
cuivre	0.80

Tableau 10 : Exemples de facteurs d'émission de certains matériaux

⁵³ Chappat et Bilal (2003).

⁵⁴ <http://www.charpentiers.fr> (consulté en mars 2007)

⁵⁵ KBOB, p.a. OFCL, Office fédéral des constructions et de la logistique, Holzikofenweg 36, 3003 Berne. In : <http://www.bbl.admin.ch/kbob/00493/00495/index.html?lang=fr> (consulté le 23 avril 2007)

Energies incorporées selon la source d'ACV choisie					
	Logiciel ACV Gabi4	Base de données Negawatt ⁵⁶	Base de données Equer ⁵⁷	Données GFN Monde	Ecart = $\frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max}}$
matière	MJ/Kg	MJ/Kg	MJ/Kg	MJ/Kg	%
Papier	16,5	36,4	-	35	55
Béton	-	-	-	1,5	-
PVC	16,7	70	75	-	77
cuivre	36,7	70,6	125	-	71

Tableau 11 : Exemples d'énergies incorporées de certains matériaux selon certaines sources

Empreintes écologiques en m ² /kg						
matière	Facteurs d'émission ADEME	Logiciel ACV Gabi4	Base de données Negawatt	Base de données Equer	Données GFN Monde	Ecart (%)
Papier	3,5	1,3	2,9	-	2,8	75
Béton	0,3	-	-	-	0,1	80
PVC	3	1,3	5,6	6	-	78
cuivre	5	2,9	5,6	10	-	71

Tableau 12 : Empreintes écologiques de certains matériaux en fonction des différents facteurs de conversion selon différentes sources

Pour simplifier la lecture de ce mémoire, nous déterminerons dans le chapitre suivant d'autres facteurs de conversion nécessaires, spécifiques à chaque catégorie de consommation et de sol bioproduit, en abordant les différentes équations de calcul possibles.

2.2.4 Calculs des empreintes : principales équations de base

• Calcul d'empreinte écologique sur sols énergétiques

L'approche développée par M. Wackernagel et W. Rees [Wackernagel et al, 2005], considère que l'empreinte associée à la consommation d'énergie, directe ou indirecte, correspond à la surface de forêt nécessaire pour absorber le CO₂ émis et qui n'est pas absorbé par les océans. Toute l'énergie produite provient principalement, par hypothèse, de la combustion de ressources fossiles, sauf cas particuliers [Wackernagel et al, 2005]. Les calculs font intervenir les valeurs caractéristiques du pétrole, considéré comme combustible « moyen » en regard de l'intensité d'émission de CO₂ vis-à-vis des autres fossiles, charbon et gaz naturel.

L'empreinte écologique qui traduit la consommation d'énergie s'exprime en surface de sols énergétiques. Le facteur de conversion entre l'énergie consommée et la surface de forêt, est appelé « facteur de séquestration du carbone ». Il s'exprime en m² de forêt par tonne CO₂. Il peut être calculé pour chaque type de source énergétique fossile en m²/MJ en fonction des émissions de carbone des différentes énergies. La formule générale pour ce calcul est la suivante :

⁵⁶ <http://www.negawatt.org> (consulté en 2004)

⁵⁷ <http://www.izuba.fr/equer.htm> (consulté en 2005)

$$\text{Facteur de séquestration du carbone [m}^2\text{/MJ]} = \frac{\text{Intensité d'émission de carbone [tC/GJ]} \cdot (1 - \text{part absorbée par les océans})}{1000 \text{ [MJ/GJ]} \cdot \text{Taux d'absorption des forêts [tC/ha]} \cdot 10\,000 \text{ [ha/m}^2\text{]}}$$

Équation 1 : Facteur de séquestration du carbone par les forêts pour la combustion de sources fossiles.

Pour une unité énergétique de 1 GJ, le pétrole présente une intensité d'émission de carbone égale à 0,02 tC/ GJ [HEFC RP, 2003]. Environ 29 % du carbone émis est capté et stocké par les océans (calculs nationaux selon le GFN). Sachant qu'un hectare de forêt moyenne peut accumuler environ 1 tonne de carbone par année [IPCC, 2001], en appliquant l'équation 1 et les données définies ci avant, on détermine le facteur de séquestration du carbone pour le pétrole : 0,14 m² / MJ.

Deux méthodes sont possibles pour déterminer une empreinte « énergétique » associée à un article de consommation en combustible fossile : à partir d'un *bilan énergétique* ou d'un *bilan carbone*.

A partir d'un bilan énergétique : Ce bilan fournit la valeur d'énergie incorporée massique, exprimée en giga joules par tonne ou en mégajoules par kilogramme de produit (cf. §. 2.2.3). Ensuite, il suffit de multiplier cette valeur par la consommation de l'article visé, puis par le facteur de séquestration du carbone pour le pétrole, pour obtenir une surface physique qu'il ne faudra pas oublier de convertir ensuite en surface globale au moyen des facteurs de rendement et d'équivalence (équation 2).

Le facteur d'équivalence de 'sols énergétiques', égal à celui de 'sols forêt', est de 1,38 m²g /m². En général, et comme il a déjà été mentionné, les facteurs d'équivalence sont constants pour tous les pays pour une année déterminée [Wackernagel et al, 2005]. Le facteur de rendement de 'sols énergétiques' utilisé est celui de la France (le facteur de rendement local).

$$EE_{\text{sols énergétiques}} \text{ [hag]} = \frac{\text{Consommation [kg]} \cdot \text{énergie incorporée (MJ/Kg)} \cdot \text{Facteur de séquestration du carbone pour le pétrole [m}^2\text{/MJ]} \cdot FE \text{ [m}^2\text{g /m}^2\text{]} \cdot FR \text{ [-]}}{10000 \text{ [m}^2\text{g/hag]}}$$

Equation 2 : Empreinte écologique 'sols énergétiques' exprimée à partir d'un bilan énergétique.

Dans ce cas, le facteur de conversion surfacique est le produit de l'énergie incorporée [MJ/Kg] du matériau considéré et le facteur de séquestration du carbone pour le pétrole [m²/MJ].

A partir d'un bilan carbone® : Ce bilan fournit la valeur d'émission massique, qui est exprimée en tonne de carbone par tonne de produit, ce qu'on appelle « facteur d'émission »

(cf. §. 2.2.3). Les facteurs d'émission de bilan carbone utilisés sont généralement issus de la méthode 'bilan carbone®' de l'ADEME⁵⁸ en France [ADEME, 2007].

Dans un premier temps, en prenant en compte le facteur d'émission par unité de matière, la fraction absorbée par les océans de 29 % et le taux d'absorption des forêts (1tC/ha), nous obtenons le facteur de conversion surfacique « A » nécessaire pour convertir la donnée de consommation en surface correspondante.

La surface de sols énergétiques obtenue est ensuite multipliée par le facteur d'équivalence de 'sols énergétiques' [m²g/m²], qui permet de transformer des hectares en hectares globaux, et le facteur de rendement de 'sols énergétiques' comme indiqué dans l'équation 3 (les facteurs d'équivalence et de rendement sont définis au chapitre 2.3.2 de la première partie de ce mémoire).

C'est cette méthode que nous avons retenue pour l'ensemble de nos calculs d'empreinte écologique sur sols énergétiques, vu qu'elle consiste à répartir des données de l'ADEME, qui tiennent compte des facteurs d'émissions de carbone liés aux processus industriels des différents matériaux en France, et qui sont donc des données propres au pays concerné dont le calcul d'empreinte a été fait.

Le facteur de conversion surfacique [ha / t]:

$$A [ha / t] = \frac{\text{Facteur d'émission [tC/t]} * (1 - \text{fraction absorbée par océans})}{\text{Taux d'absorption par les forêts [tC/ha]}}$$

Équation 3-a : Facteur de conversion surfacique - Sols énergétiques (méthode bilan carbone)

$$EE_{\text{sols énergétiques}} [hag] = \text{Consommation [t]} * A [ha / t] * FE [m^2g / m^2] * FR [-]$$

Équation 3-b : Empreinte écologique 'sols énergétiques' exprimée à partir d'un bilan carbone

Exemple du pétrole :

Le facteur de conversion surfacique [ha / t]: $A = 0,76 [tC/t] * (1 - 0,29) / 1[tC/ha]$

Empreinte écologique sols énergétiques [hag/t] : $\text{une tonne de pétrole} * 0,54 [ha / t] * 1,38 [m^2g / m^2] * 0,64 [-] = 0,47 hag/t$

• Calcul d'empreinte écologique sur sols construits (ou dégradés)

En principe, l'équation 4 peut être appliquée afin de tenir compte de l'empreinte écologique sur les sols construits considérés comme sols improductifs (cf. §. 2.2.3):

Dans l'équation, « X » est une surface physique simple de sols productifs.

- Pour le calcul d'empreinte en sols construits des bâtiments et voiries, la surface recouverte (qui est la donnée de consommation⁵⁹ directe) est convertie directement en surface globale au moyen des facteurs de rendement et d'équivalence (équation 4-a).

- En ce qui concerne le calcul des empreintes des consommations de matière et d'énergie ainsi que des rejets sur sols dégradés (granulats en kg ou t, eau potable en m³ ou l, hydroélectricité

⁵⁸ Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie en France (<http://www2.ademe.fr>)

⁵⁹ Consommation d'espace.

en kWh ou GJ, eau usée en m³ ou l, déchets solides en kg ou t...), un facteur de conversion surfacique « B » est nécessaire pour convertir ces données en surface (X = consommation [t]* B[m²/t] par exemple). Cette dernière est ensuite ajustée au moyen des facteurs de rendement et d'équivalence, pour fournir une surface générique moyenne à l'échelle mondiale (équation 4-b).

Nous rappelons que ce facteur de conversion surfacique est spécifique à chaque catégorie de consommation et de sol.

$$EE_{sols\ construits} [hag] = (X [m^2] * FE_{sols\ construits} [m^2g/m^2] * FR_{sols\ construits} [-]) / 10000[m^2g/hag]$$

Équation 4-a : Empreinte écologique sur sols construits (ou dégradés) / Consommation d'espace

$$EE_{sols\ construits} [hag] = (Consommation\ ou\ rejet [unité] * B [m^2 / unité] * FE_{sols\ construits} [m^2g/m^2] * FR_{sols\ construits} [-]) / 10000[m^2g/hag]$$

Équation 4-b : Empreinte écologique sur sols construits (ou dégradés)/ Consommation de matière ou rejet

• Calcul d'empreinte écologique sur sols forêts

Le bois constitue le produit primaire de l'empreinte écologique sur sols forêts. Le calcul de cette empreinte est déterminé par l'application de l'équation suivante :

$$EE_{sols\ forêts} [hag] = (Consommation [t] * C [ha / t]) * FE_{sols\ forêts} [m^2g / m^2] * FR_{sols\ forêts} [-]$$

Équation 5 : Empreinte écologique sur 'sols forêts'

dont le facteur de conversion surfacique « C », spécifiquement lié au rendement des forêts en matière de bois, est multiplié par le facteur d'équivalence [gm²/m²] et le facteur de rendement de 'sols forêts' pour transformer des hectares en hectares globaux.

Le calcul du facteur « C », dans ce cas, repose sur le choix de deux articles de consommation considérés dans le calcul d'empreinte en sols forêts : le bois et le papier.

Pour le calcul d'empreinte des consommations en papier, deux choix méthodologiques sont possibles:

✓ Soit calculer l'empreinte du papier en fonction du rendement des forêts françaises. Ce choix est celui que l'on a adopté. Il repose sur l'hypothèse que le papier consommé dans les bureaux d'une activité donnée est produit à partir de bois issu de forêts françaises.

Pour ce calcul, on fait intervenir le rendement annuel choisi pour la France⁶⁰ de 5,33 m³ de bois pour 1 hectare de forêt, le tonnage de bois pour une tonne de papier⁶¹ d'une valeur de 1,11 et la masse volumique moyenne du bois⁶² de 0,65 t/m³ pour obtenir le facteur de conversion surfacique nécessaire pour convertir les tonnages du papier en surface (Equation 5-a).

La surface physique obtenue est ensuite multipliée par le facteur de rendement sols forêts de la France et le facteur d'équivalence (Equation 5):

⁶⁰ <http://cerig.efpg.inpg/lgc/dossiers/papiers>

⁶¹ <http://cerig.efpg.inpg/lgc/dossiers/papier>

⁶² www.bois-construction.org

Le facteur de conversion surfacique C' [ha /t papier]:

$$C' = \text{rendement [ha de forêt /m}^3 \text{ de bois]} * \frac{\text{tonnage de bois pour une tonne de papier [t bois/t papier]}}{\text{masse volumique moyenne du bois [t bois /m}^3 \text{ bois]}}$$

Equation 5-a: Facteur de conversion surfacique / Sols forêts (papier)

✓ Soit faire le calcul à partir du rendement moyen global des forêts dans le monde entier. Ce choix pourrait être adopté si l'on n'a aucune garantie quant à l'origine du papier utilisé. Le même raisonnement des équations 5 et 5-a précédentes est appliqué pour ce calcul en prenant en considération le rendement moyen global de 1,51 m³ de bois pour 1 hectare de forêt (selon le GFN) et le facteur de rendement sols Forêts du monde.

Ainsi, pour le calcul d'empreinte des consommations en bois, le facteur de conversion surfacique dans ce cas est le suivant :

Le facteur de conversion surfacique C'' [ha /t bois]:

$$C'' = (1 / \text{masse volumique moyenne du bois [t bois/m}^3 \text{ bois]}) / \text{rendement [m}^3 \text{ de bois/ ha de forêt]}$$

Equation 5-b: Facteur de conversion surfacique / Sols forêts (bois)

• Calcul d'empreinte écologique sur espaces marins

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2.3.2-b de la première partie, la surface marine comprend tous les poissons marins et poissons d'eau douce ainsi que les produits utilisés pour alimenter les poissons élevés en pisciculture.

Pour ce type de sols, nous gardons la méthode « macro » qui calcule l'empreinte des pêcheries en proportion du tonnage global prélevé de poissons (cf. figure 14. § 2.3.2-b. Partie I) :

$$EE_{\text{pêcherie}} [\text{hag}] = (\text{Consommation de poisson [t]} / \text{Rendement global des pêcheries [t/ha]}) * FE_{\text{pêcheries}} [\text{m}^2 \text{ g /m}^2]$$

Équation 6: Empreinte écologique sur 'espaces marins'

Environ neuf catégories aquatiques regroupent un total de 42 espèces (ou groupes) dont chacune se caractérise par un rendement spécifique, c'est à dire par un taux de prélèvement pour chaque niveau trophique [Wackernagel et al, 2005].

En principe, les empreintes des pêcheries sont calculées par le Global Footprint Network (GFN), mais étant donné que les résultats ne sont pas publiés, nous ne pouvons pas les intégrer dans ce mémoire.

• Calcul d'empreinte écologique sur sols aquatiques

Alors que la méthode d’empreinte pour les calculs nationaux ne prend en compte les sols aquatiques que pour leur capacité à produire des poissons (espaces marins), nous avons jugé que ce n’était pas suffisant dans le cadre d’un calcul d’empreinte pour des activités industrielles ou travaux publics. Nous avons donc ajouté la catégorie « sols aquatiques » afin de tenir compte de l’empreinte écologique associée à la consommation d’eau.

Nous proposons l’introduction dans la méthode de ce sol, qui remplit deux fonctions spécifiques:

- La collecte de l’eau à partir d’une eau de surface (une rivière par exemple):

Pour le calcul d’empreinte en sols aquatiques dans ce cas, nous avons choisi de diviser le volume d’eau pompé d’une rivière par sa profondeur afin d’obtenir une surface physique qu’il ne faudra pas oublier de convertir ensuite en surface globale au moyen des facteurs d’équivalence et rendement:

$$EE (hag) = \frac{\left[\frac{\text{Consommation [m}^3\text{]}}{\text{Profondeur [m]}} \right] * FE [m^2g/m^2] * FR [-]}{10000 [m^2g/hag]}$$

Équation 7: Empreinte écologique sur ‘Sol aquatiques’ : eaux de surface

- La collecte de l’eau à partir des précipitations, par infiltration et ruissellement, vers les sources pompées par la suite pour répondre aux besoins de l’activité industrielle (nappe aquifère) [Wernert, 2004]:

Dans ce cas d’étude, le débit total annuel d’eau nécessaire pour l’activité (m³) peut être déduit grâce aux relevés des compteurs reliés au réseau public qui fournissent la consommation en eau provenant d’une nappe aquifère locale. Ce débit de prélèvement de l’activité industrielle concernée fournit la capacité de recharge appropriée de la nappe. Nous pouvons calculer une empreinte qui représente la surface de sols nécessaire pour capter et infiltrer l’eau de pluie de manière à assurer que la nappe reçoit en une année le même volume d’eau que ce qui lui a été prélevé par le site industriel. Mais la capacité de recharge d’une nappe dépend du régime hydrique local et de la pluviométrie :

$$EE_{\text{ sols aquatiques }} [hag] = \frac{\left[\frac{\text{Débit total [m}^3\text{/an]}}{\text{Précipitations surfaciques [m}^3\text{/m}^2\text{/an]}} \right] * FE [m^2g/m^2] * FR [-]}{10000[m^2g/hag]}$$

Équation 8: Empreinte écologique sur ‘Sols aquatiques’ : eaux provenant d’une nappe aquifère

Les précipitations surfaciques tiennent compte du taux d’infiltration des eaux de pluie dans les sols et de la proportion locale de sols construits. On estime que 2/3 des précipitations sont perdues par évapotranspiration et donc inefficaces [BRGM, 2002], et que 3 % des sols locaux sont construits [TREDI, 2003].

Ainsi, il faudrait estimer un taux d’infiltration spécifique pour chaque catégorie de sol recevant les précipitations. En s’appuyant ensuite sur la répartition locale des sols, relevée par exemple par un calcul d’empreinte écologique régional, on peut envisager de déterminer un

taux d'infiltration local moyen plus précis⁶³ [Wernert, 2004]. En outre, il serait utile de déterminer la part d'eau qui ruisselle sans être infiltrée (selon la topographie et la morphologie des terrains), et participe à l'écoulement de surface. L'infiltration est conditionnée par d'autres facteurs dont il n'est pas tenu compte ici : propriétés du sol (structure, texture, porosité, compaction), couverture végétale, teneur en eau initiale, etc.

• Calcul d'empreinte écologique sur terres arables et pâturages

Le même raisonnement défini dans la méthode « macro » est conservé pour le calcul d'empreinte des produits alimentaires, d'origine végétale et animale, sur sols arables et pâturages (cf. figure 14. § 2.3.2-b. Partie I), mais en prenant en compte les rendements locaux spécifiques au pays considéré (t/ha/an).

• Somme des différents postes et analyse des résultats

Après avoir calculé toutes les empreintes écologiques partielles pour chaque article de consommation et de rejet 'i', et chaque type de sols bioproductifs 'j', au sein de chaque catégorie de consommation 'k' ($EEP_{i,j}^k$), elles sont ensuite additionnées de deux manières différentes au sein de chaque catégorie de consommation k [Wiedmann, 2007] :

- Par article de consommation ou de rejet 'i', de manière à visualiser, au sein de chaque catégorie de consommation, la surface totale de tous les sols productifs, appropriée par la consommation d'un article donné : $EEP_i^k = \sum_j EEP_{i,j}^k$.

- Par type de sols productifs 'j', de manière à faire apparaître la surface totale d'un type de sols donné, appropriée par la consommation de tous les articles d'une catégorie de consommation : $EEP_j^k = \sum_i EEP_{i,j}^k$.

La somme de ces résultats sur tous les types de sols, ou sur tous les articles de consommation ou de rejet, au sein d'une même catégorie de consommation ou de rejet, fournit l'empreinte écologique partielle de cette catégorie : $EEP^k = \sum_j EEP_j^k = \sum_i EEP_i^k$.

Ensuite, la somme des empreintes partielles associées à chaque catégorie dégage finalement l'empreinte écologique globale, notée EE, de la filière étudiée : $EE = \sum_k EEP^k$.

Ces résultats sont présentés dans un tableur Excel comme le montre le tableau 13 :

⁶³ Des données sur l'occupation du territoire et les caractéristiques des sols peuvent être obtenues auprès des Chambres Régionales de l'Agriculture (cartographie des formations pédologiques) par exemple. Dans le cadre du Programme Inventaire, Gestion et Conservation des Sols, SOL INFO RHONE ALPES référence l'ensemble des cartes et études pédologiques réalisées sur chacun des départements de Rhône-Alpes à différentes échelles.

Sols bioproductifs Catégories de consommation	Sols énergétiques (absorption CO ₂)	Sols construits ou (dégradés)	Sols forêts (bois)	Sols aquatiques (eaux consommées)	Espace marins (poissons consommés)	Terres arables	Pâturages	Total
Consommables Articles - ... - ...								
Infrastructures Articles - ... - ...								
Transport Articles - ... - ...								
Biens manufacturés Articles - ... - ...								
Services Articles - ... - ...								
Total								

Tableau 13 : Tableur utilisé pour le calcul de l’empreinte écologique d’une activité

Nous abordons des exemples concrets en explicitant notre étude de cas sur le calcul d’empreinte écologique du chantier routier de Vendranges dans la 3^{ème} partie de ce mémoire.

3 Exemples de calcul: Calcul d’empreinte des principaux matériaux susceptibles d’être rencontrés au sein des principaux postes de consommation d’une activité donnée

3.1 Carburant

3.1.1 Calcul d’empreinte en sols énergétiques

En principe, l’empreinte écologique qui traduit la consommation d’énergie des différents produits peut s’exprimer en surface de sols énergétiques par les deux méthodes possibles expliquées précédemment : la méthode bilan énergétique et la méthode bilan carbone.

En revanche, nous rappelons que nous conservons cette dernière qui se base sur des données locales (les facteurs d’émission en tonne équivalent de carbone par tonne de produit définis par l’ADEME en France).

L’empreinte écologique peut tenir compte des carburants utilisés pour une activité donnée. En repartant directement de l’intensité d’émission de 0,95 tonnes équivalent de carbone par tonne de diesel [ADEME, 2007], l’empreinte partielle en sols énergétiques du carburant est directement calculée en appliquant l’équation 3.

On obtient donc une empreinte écologique de 0,6 hag/t en prenant en considération le facteur de rendement sols énergétiques de la France (le facteur local du pays concerné dont le calcul d’empreinte a été fait):

$$\text{Empreinte écologique Carburant, Sols énergétiques} : \text{une tonne} * 0,95 [tC/t] * (1-0,29) / 1 [tC/ha] * 1,38 [m^2g/m^2] * 0,64 [-] = 0,6 \text{ hag/t.}$$

3.2 Papier et bois

3.2.1 Calcul d’empreinte en sols énergétiques

De la même manière, l’empreinte partielle en sols énergétiques du papier par la méthode bilan carbone, est calculée à partir de l’équation 3 en prenant en compte, respectivement, les facteurs d’émissions de carbone liées aux processus industriels du papier et du bois, de 0,55

tonnes équivalent de carbone par tonne de papier et de 0,50 tonnes équivalent de carbone par tonne de bois [ADEME, 2007] : soit des empreintes sur sols énergétiques de 0,34 hag/t de papier et 0,31 hag/t de bois, en prenant en considération le facteur de rendement sols énergétiques de la France:

$$\text{Empreinte écologique}_{\text{papier, Sols énergétiques}} : \text{une tonne} * 0,55 [\text{tC/t}] * (1 - 0,29) / 1 [\text{tC/ha}] * 1,38 [\text{m}^2\text{g}/\text{m}^2] * 0,64 [-] = 0,34 \text{ hag} / \text{t}$$

3.2.2 Calcul d'empreinte en sols forêts : Calculs de sols de forêts pour l'extraction de la pulpe nécessaire au papier et pour autre usage en bois

Comme nous avons déjà abordé dans le chapitre⁶⁴ 2.2.4, la surface de sols forêts est destinée notamment à la production de bois (la quantité du bois utilisée pour la production du papier et d'autres matériaux).

Par application de l'équation 5 et en prenant en considération les deux facteurs de conversion surfacique définis (équations 5-a et 5-b) nécessaires pour convertir les tonnages du papier et du bois en surface, nous obtenons respectivement les deux empreintes par tonne de papier et par tonne de bois :

- 1,58 hag / t de papier consommée, en considérant le rendement des forêts françaises (1,56 hag/t en prenant en compte le rendement moyen global des forêts dans le monde entier).
- 1,43 hag / t de bois, à partir du rendement des forêts françaises (1,4 hag/t en prenant en compte le rendement moyen global des forêts dans le monde entier).

Notons que cette empreinte ne prend pas en compte les conditions locales d'exploitation des forêts dans lesquelles pousse le bois nécessaire au papier, c'est-à-dire que seule la productivité immédiate de la forêt est prise en compte.

En ce qui concerne le calcul d'empreinte du papier en 'sols dégradés', il conviendrait de prendre en considération certains éléments comme par exemple l'utilisation des routes (*l'emprise des routes*) pour transporter le bois du lieu de coupe à la papeterie, et le papier du lieu de fabrication au lieu de distribution, les zones du stockage du bois en attente du traitement, les zones du stockage du papier en attente de distribution et la superficie occupée par la papeterie. Cependant, sur la base de calcul d'empreinte du béton en sols dégradés (cf. § 3.3.2), le résultat est peu significatif par rapport à l'appropriation de sols énergétiques. Ainsi, et par manque de données, ce calcul d'appropriation de sols dégradés nécessite des éléments d'un accès peu aisé.

Pour la plupart des matériaux, il est très difficile de calculer l'empreinte en « sols dégradés » liée à leur fabrication car les données en terme de surfaces de carrières pour l'extraction des minerais et surfaces des usines de fabrication des biens sur l'ensemble de la chaîne de production ne sont que très rarement disponibles, et ne sont assurément pas moyennées sous la forme de statistiques. En effet, le calcul d'empreinte en sols dégradés nécessite des études très poussées par filière et aussi de pouvoir accéder à des données qui ne sont pas disponibles publiquement.

Il est ensuite important de signaler qu'il pourrait être intéressant de prendre aussi en compte les émissions de carbone engendrées par les types de transports définis ci-dessus, dans le calcul d'empreinte en sols énergétiques.

Sur la base du rendement des sols français ($FR_{\text{sols énergétiques}}$ et $FR_{\text{sols forêts}}$), l'empreinte écologique totale d'une tonne de papier vierge est ainsi de 1,92 hag /t (tableau 14 et figure

⁶⁴ Cf. §. 2.2.4 « calcul d'empreinte écologique sur sols forêts »

30). Elle est d'environ 1,74 hag par tonne de bois. Ces empreintes se décomposent de la manière suivante:

		Empreinte écologique 'Papier' (hag/t)		
		Sols énergétiques (méthode BC retenue)	Sols forêts	Total
Papier	En fonction du rendement des forêts françaises	0,34	1,58	1,92
	En fonction du rendement moyen mondial	0,54	1,56	2,1
Bois	En fonction du rendement des forêts françaises	0,31	1,43	1,74
	En fonction du rendement moyen mondial	0,5	1,4	1,9

Tableau 14 : Répartition des empreintes écologiques du bois et papier

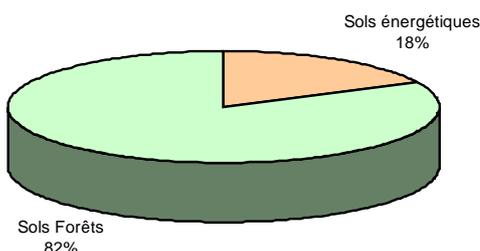


Figure 30 : Composition de l'empreinte écologique du papier (hag / t) en fonction du rendement des sols français

L'empreinte sur les sols forêts représente environ 82 % et l'empreinte partielle en sols énergétiques représente environ 18 % de l'empreinte écologique totale d'une tonne de papier.

3.3 Béton

Le terme générique "béton" désigne un matériau de construction fabriqué à partir de granulats (graves, sable) agglomérés par un liant⁶⁵. On parle de liant hydraulique, couramment appelé ciment, quand il fait prise par hydratation.

Dans le cas où les granulats sont agglomérés par un liant hydrocarboné (bitume), cela conduit à la fabrication du béton bitumineux [ADEME, 2007].

N.B : La production du ciment peut varier d'une cimenterie à l'autre en fonction de la qualité du gisement exploité, la composition du cru reste dans des proportions bien définies⁶⁶ : 77 % carbonate de calcium (CaCO₃), 13% silice (SiO₂), 2 % alumine (Al₂O₃),

⁶⁵ Selon le Grand Robert, 1992

⁶⁶ <http://www.ciments-calcia.fr>

1,5 % oxyde ferrique (Fe₂O₃) et environ 6% en gypse. La roche est échantillonnée en continu pour déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice). Le mélange est ensuite réalisé dans un hall de préhomogénéisation où la matière est disposée en couches horizontales superposées puis reprise verticalement. Après le séchage, le broyage et la cuisson du mélange, le clinker obtenu doit être à son tour broyé très finement. C'est également lors du broyage que l'on ajoute au clinker le gypse (6%) indispensable à la régulation de prise du ciment. On obtient alors le ciment "Portland". Les ciments "à ajouts" sont donc obtenus par l'addition au clinker, lors de son broyage, d'éléments minéraux supplémentaires.

3.3.1 Calcul d'empreinte en sols énergétiques

Pour le calcul d'empreinte partielle du béton sur sols énergétiques, les tonnages utilisés par une activité donnée peuvent être convertis par application de l'équation 3 en adoptant la valeur de facteur d'émission de 0,055 tonnes équivalent de carbone par tonne de béton [ADEME, 2007]:

On obtient une empreinte de 0,03 hag/t en prenant en considération le facteur de rendement_{sols énergétiques} de la France:

$$\text{Empreinte écologique Béton, Sols énergétiques} : \text{une tonne} * 0,055 [tC/t] * (1 - 0,29) / 1[tC/ha] * 1,38 [m^2g/m^2] * 0,64 [-] = 0,03 \text{ hag} / t$$

3.3.2 Calcul d'empreinte en sols dégradés

L'empreinte écologique sur sols dégradés du béton peut être déduite par application de l'équation 4-b qui nécessite d'avoir un facteur de conversion surfacique 'B' pour convertir les tonnes du béton en surface (X = consommation [t]* B[ha/t]).

Pour le calcul d'empreinte d'une tonne de béton par exemple, nous nous sommes basés sur les données de la productivité française malgré les difficultés d'accès à ces éléments.

Pour cela, nous avons pris en compte l'estimation des hectares dégradés pour produire une tonne de béton.

Environ 400 millions de tonnes de granulats sont produites en France [IFEN, 2006a et Vuillier, 2005]. En prenant en considération la moyenne de 7000 t / ha [EPD, 2002], il est possible d'estimer⁶⁷ que cela nécessite 57 143 hectares dégradés.

A la base des principales données sur les tonnages nécessaires en matière de granulats, ciment et sable pour produire une tonne de béton⁶⁸ (figure 31), et en prenant compte de la moyenne nationale de 7000 t/ha, on obtient alors un facteur de conversion surfacique d'environ 0,00013 hectares dégradés par tonne de béton. Il suffit de multiplier cette valeur par les facteurs de rendement et d'équivalence (équation 4-b) pour la convertir ensuite en surface globale. On obtient donc une empreinte, peu significative par rapport à l'appropriation de sols énergétiques, de 0,0007 hag par tonne de béton sur les sols dégradés :

$$\text{Empreinte écologique béton, Sols dégradés} : \text{une tonne} * 0,00013 [ha/t] * 2,18 [m^2g/m^2] * 2,36 [-] = 0,0007 \text{ hag}/t.$$

Notons bien que cette valeur ne prend pas en compte l'impact sur le milieu naturel, il prend seulement la « consommation de l'espace ».

⁶⁷ Estimation faite en se basant sur des anciens chiffres cités dans l'ouvrage « L'industrie des carrières et le développement durable » [EPD, 2002].

⁶⁸ <http://www.ciments-calcia.fr> et www.creargos.com

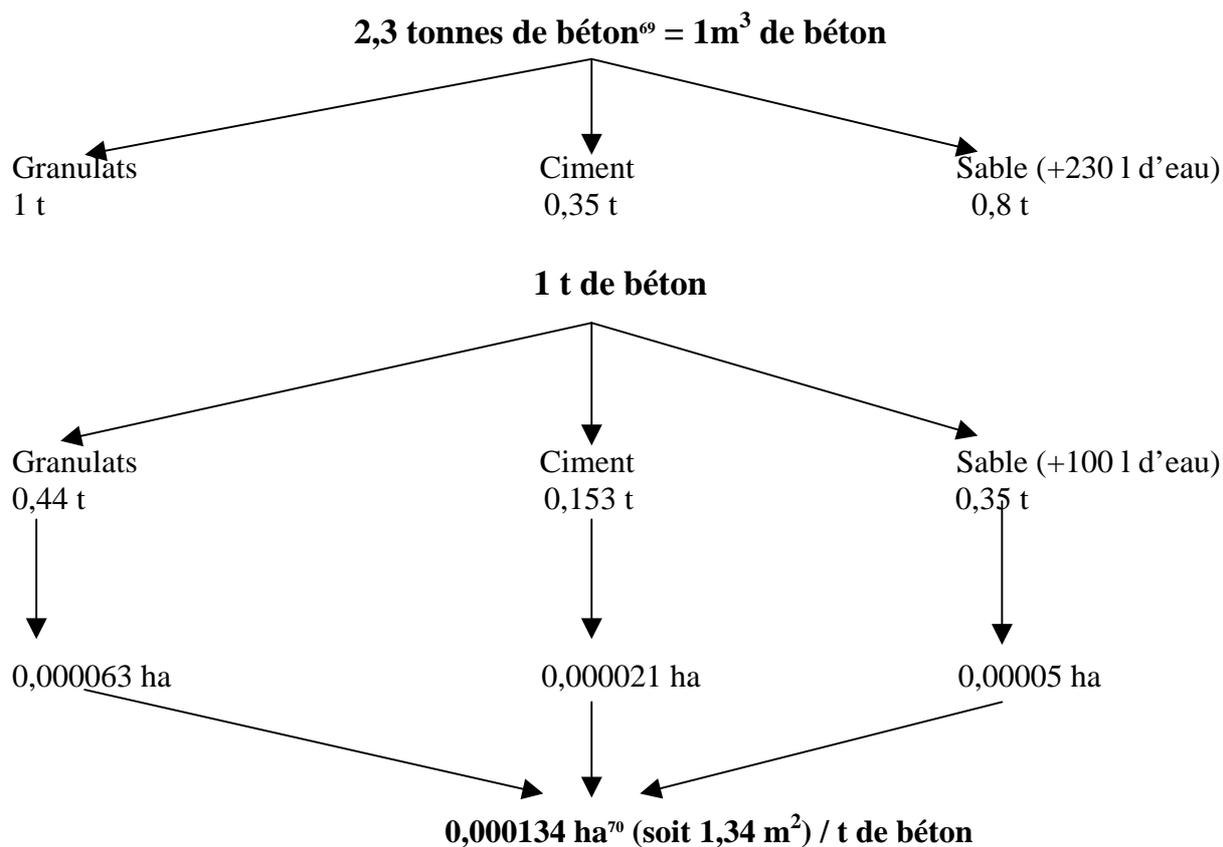


Figure 31: Estimation des hectares dégradés pour la production d'une tonne de béton en France.

En prenant en considération le rendement des sols français ($FR_{\text{sols énergétiques}}$ et $FR_{\text{sols dégradés}}$), l'empreinte écologique totale d'une tonne de béton est de 0,03 hag/t (tableau 15, figure 32). Cette empreinte se décompose de la manière suivante :

	Empreinte écologique 'Béton' (hag/t)		
	Sols énergétiques (méthode BC retenue)	Sols dégradés	Total
En fonction du rendement des sols français	0,03	0,0007	0,03

Tableau 15 : Répartition de l'empreinte écologique du béton

⁶⁹ www.creargos.com

⁷⁰ En prenant compte la moyenne de 7000 t / ha pour carrières granulats [EPD, 2002]

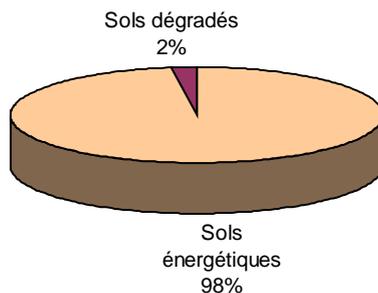


Figure 32 : Composition de l’empreinte écologique du béton (ha / t) en fonction du rendement des sols français

Tandis que l’empreinte d’une tonne de béton sur les sols énergétiques représente 98 %, l’empreinte partielle en sols dégradés représente quant à elle, seulement 2 % de l’empreinte écologique totale.

3.4 Eau

3.4.1 Calcul d’empreinte en sols aquatiques : Exemple des eaux non potables utilisées pour l’arrosage des pistes dans le domaine de la construction routière

Pendant les travaux de construction d’une route et en particulier au cours des terrassements (que nous expliquons en détails dans la partie III pour notre étude de cas), le sol est humidifié pour deux raisons : éviter les poussières et compacter le sol d’une manière optimale. Pour cela, un important pompage (m^3) est réalisé dans les cours d’eau à proximité du chantier routier considéré.

Pour cet exemple, il suffit d’appliquer l’équation 7 définie précédemment⁷¹, en prenant en compte la profondeur de la rivière dont on prélève les quantités d’eau nécessaires pour l’arrosage.

3.4.2 Calcul d’empreinte en sols énergétiques : l’exemple des eaux potables consommées

L’empreinte partielle en sols énergétiques d’eau potable consommée, par la méthode bilan carbone, pourrait être calculée à partir de l’équation 3, en prenant en considération le facteur d’émission en tonne équivalent carbone par m^3 d’eau potable traitée. Cependant, nous n’avons pas à notre disposition ce facteur.

Par conséquent, l’empreinte partielle des eaux potables dans ce cas peut prendre en considération l’énergie incorporée de l’extraction à la mise en vente de $1,3 MJ/m^3$ [Barrett et al, 2004] comprenant l’extraction, le traitement et le pompage jusqu’au consommateur. Cette valeur est multipliée par la consommation des eaux potables, puis par le facteur de séquestration du carbone pour le pétrole, pour obtenir une surface physique qu’il ne faudra pas oublier de convertir en surface au moyen des facteurs de rendement et d’équivalence (raisonnement de l’équation 2)⁷².

⁷¹ cf. §. 2.2.4 « Calcul d’empreinte écologique sur sols aquatiques »

⁷² cf. §. 2.2.4 « Calcul d’empreinte écologique en sols énergétiques »

L’empreinte partielle de ces eaux potables sur les sols énergétiques est d’environ $0,16 \text{ m}^2\text{g}/\text{m}^3$ en prenant en considération le facteur de rendement_{sols énergétiques} de la France.

En adoptant une valeur d’énergie incorporée spécifique de 10 MJ par m^3 d’eau potable en France [Chappat et Bilal, 2003], on obtient par la suite un résultat d’empreinte plus important : $1,24 \text{ m}^2\text{g}/\text{m}^3$ ($12 \cdot 10^{-5} \text{ hag}/\text{m}^3$).

La différence entre les deux valeurs d’énergie incorporée s’explique principalement par la différence réelle du process de traitement des eaux selon les pays (cf. §. 2.2.3).

Comme il a été déjà mentionné, les standards des calculs d’empreinte conseillent de choisir les valeurs d’énergie incorporée les plus faibles⁷³. En revanche, ils précisent aussi qu’il est nécessaire de conserver les facteurs de conversion locaux, pour le pays dont le calcul d’empreinte a été fait (le cas des facteurs de rendement⁷⁴ de la France et les facteurs d’émission de l’ADEME par exemple). Pour cela, nous gardons donc la valeur de $1,24 \text{ m}^2\text{g}/\text{m}^3$.

Notons que cette empreinte ne prend pas en compte la pression sur les ressources en eau.

3.4.3 Calcul d’empreinte des eaux potables consommées sur les sols dégradés

Par application de l’équation⁷⁵ 4-b, nous pouvons calculer l’empreinte en sols construits (ou dégradés) des eaux potables consommées sur un établissement donné, en estimant les hectares construits pour traiter 1 m^3 d’eau potable. Pour cela, nous pouvons considérer la capacité moyenne de la station d’alimentation en eau potable du site étudié (m^3/an) et sa surface physique pour avoir un ratio (en ha/m^3) estimant le nombre d’hectares construits (dégradés) pour traiter un m^3 d’eau potable. On peut donc obtenir une estimation d’empreinte sur les sols dégradés (en hag/m^3 d’eau potable) en multipliant cette surface par les deux facteurs d’équivalence et rendement de sols construits (ou dégradés).

Cependant, il y a très peu de données disponibles sur les surfaces nécessaires au traitement des eaux.

3.4.4 Calcul d’empreinte des eaux usées sur les sols dégradés

Le même raisonnement suivi pour l’équation⁷⁶ 4-b, pour le calcul d’empreinte partielle des eaux potables, peut être appliqué pour calculer l’empreinte en sols construits des eaux usées. Nous nous proposons d’estimer les hectares construits pour traiter 1 m^3 d’eau usée.

Deux méthodes sont possibles :

- identifier les surfaces nécessaires aux stations d’épuration classique pour amener les eaux usées à des niveaux conformes à la réglementation ainsi que pour le traitement.
- considérer que les eaux usées sont traitées en station d’épuration par lagunage (mode de traitement qui ne nécessite pas d’intrants extérieurs aux eaux usées et qui est donc moins consommateur d’énergie que les traitements physico-chimiques classiques) et c’est l’approche que nous avons retenue. Dans un premier temps, pour estimer le nombre d’hectares construits (dégradés) pour traiter un m^3 d’eau usée, nous nous référerons aux chiffres d’une station d’une capacité de $250\,000 \text{ m}^3$ par an et qui s’étend sur 7 hectares⁷⁷. On obtient donc un ratio d’environ $2,8 \cdot 10^{-4} \text{ ha}$ par m^3 d’eaux usées traitées par lagunage. Il suffit donc de multiplier ce

⁷³ cf. §. 2.2.3 « Autres facteurs de conversion nécessaires »

⁷⁴ cf. §. 2.2.3 « Adaptation des différents types de ‘sols’ à considérer: facteurs d’équivalence et de rendement par type de sol »

⁷⁵ cf. §. 2.2.4 « Calcul d’empreinte écologique sur sols construits (ou dégradés) »

⁷⁶ cf. §. 2.2.4 « Calcul d’empreinte écologique sur sols construits (ou dégradés) »

⁷⁷ www.enseeiht.fr (Exemple de la station Lagunage de "la Casie", France)

facteur de conversion surfacique par les deux facteurs d'équivalence et rendement de sols construits pour avoir une empreinte de $1,4 \cdot 10^{-4}$ hag/m³ :

$$\text{Empreinte écologique}_{\text{eaux usées, Sols construits}} [\text{hag/m}^3] = 1 \text{ m}^3 \text{ d'eau usée rejetée} * (2,8 \cdot 10^{-5} [\text{ha/m}^3]) * FE_{\text{sols construits}} [\text{m}^2 \text{g/m}^2] * FR_{\text{sols construits}} [-] = 1,4 \cdot 10^{-4}$$

3.5 Electricité

En France, l'électricité est principalement répartie sur trois modes de production : nucléaire, combustibles fossiles et hydroélectricité. En ce qui concerne l'énergie nucléaire, aucune étude sur son empreinte écologique n'a été publiée au moment de la rédaction de ce mémoire de thèse. Après quelques calculs rapides tenant compte du volume des déchets nucléaires et de leur durée de vie d'une part, de l'impact de l'accident de Tchernobyl d'autre part, Mathis Wackernagel estime que l'empreinte écologique de l'énergie nucléaire est au moins égale à celle du pétrole et que cela consiste donc à inclure l'énergie nucléaire dans les mesures de l'empreinte écologique comme si elle était obtenue à partir de pétrole [Wackernagel et al, 2005] tout en faisant apparaître une catégorie de sol spécifique dans les résultats correspondant à l'empreinte écologique ainsi obtenue par l'électricité nucléaire. Cependant, le réseau GFN reconnaît les limites de cette façon de faire, ce que nous détaillons dans la 4^{ième} partie de ce mémoire de thèse (cf. § 2.3 Partie IV).

En suivant l'hypothèse réalisée par le GFN, on considère que l'énergie nucléaire a la même empreinte que celle produite avec du pétrole.

Les calculs d'empreinte tiennent compte des pertes associées à la production et à la distribution de l'électricité en France, et qui s'élèvent à 61 %. Ce facteur de perte correspond au coefficient de transformation des consommations électriques en énergie primaire égal à 2,58 pour les consommations et les productions d'électricité. Cette valeur de 2,58 est publiée dans l'arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments.

On répartit donc l'électricité en deux sources de production :

- production thermique (fossiles et nucléaire).
- production hydraulique

En 2006, la production totale nette d'électricité en France s'élève à 549 TWh (tableau 16). Elle est assurée à 78 % par le nucléaire (429 TWh), 10 % par les énergies thermiques classiques (57 TWh) et 11 % par l'hydraulique (61 TWh) et par les énergies renouvelables (2 TWh).

	Production totale(TWh)	dont			Consommation intérieure
		production thermique nucléaire	production thermique classique	production hydraulique ⁷⁸	
2002	535,0	416,5	52,7	65,8	450,5
2003	542,3	420,7	57,2	64,5	468,6
2004	549,5	427,7	56,5	65,4	480,3
2005	550,1	430,0	62,9	57,3	483,2
2006	548,8	428,7	57,1	63,0	478,0

Tableau 16 : Production et consommation d'électricité en France (2006)⁷⁹. Source : Observatoire de l'Énergie, d'après INSEE (<http://www.insee.fr>)

3.5.1 L'énergie thermique : Calcul d'empreinte en sols énergétiques

Avec une production de 78 % par le nucléaire et 10 % par les énergies thermiques classiques (dont environ 3.8 % gaz, 3,1 % charbon, 1,3 % fioul et autre), ce sont donc 88 % dont l'empreinte écologique est égale à celle de la production thermique, en se basant sur l'estimation faite par le GFN, dont il reconnaît sa faiblesse (§ 2.3.2. Partie I et § 2.3 Partie IV).

Pour convertir les kilowattheures (KWh) consommés, on propose le facteur de conversion pour l'électricité de production thermique, qui est alors obtenu grâce au facteur de séquestration du carbone pour le pétrole, en prenant en compte les pertes associées à la production et à la distribution de l'électricité en France, comme c'est indiqué dans l'équation suivante:

Surface de sols énergétiques énergie thermique, Sols énergétiques [m²] = Consommation [MJ] / (1- pertes associées à la production et à la distribution de l'électricité en France) Facteur de séquestration du carbone pour le pétrole [m²/MJ].*

Equation 9 : Facteur de conversion surfacique nécessaire pour le calcul d'empreinte, pour l'électricité de production thermique.

La surface obtenue ainsi est traduite directement en empreinte sur sols énergétiques, par les deux facteurs d'équivalence et rendement de sols énergétiques pour avoir une empreinte de 3*10⁻⁵ hag/MJ soit 10⁻⁴ hag/kWh consommé.

Utilisation du facteur d'émission en tonne équivalent carbone par kilowattheure électrique consommé

En prenant en considération le contenu en CO₂ du kilowattheure (kWh) électrique d'origine thermique seulement, nous prenons en considération, par hypothèse, le facteur d'émission de fioul de 200 g équ. C/ kWh [ADEME, 2007] pour appliquer à la suite la méthode de calcul d'empreinte à partir du bilan carbone (équation 3). On obtient donc une empreinte de 10⁻⁴ hag/kWh.

⁷⁸ y compris le pompage. Par convention, les productions éolienne et photovoltaïque sont ajoutées à la production hydraulique.

⁷⁹ http://www.insee.fr/fr/ffc/chifcle_fiche.asp?tab_id=324

En prenant en considération le contenu en CO₂ du kilowattheure français incluant le nucléaire, nous utilisons le facteur d'émission de 100 g CO₂/kWh (pour l'éclairage des bureaux installés provisoirement) [ADEME, 2007], pour obtenir une empreinte écologique de 2*10⁻⁵ hag/kWh en appliquant la même équation 3. C'est cette valeur que nous conservons pour notre "étude de cas" étant donné que ce facteur d'émission nous semble le plus pertinent, puisqu'il prend en compte le mixte énergétique français (78 % par le nucléaire et 10 % par les énergies thermiques).

Nous rappelons que le GFN remet en cause le choix d'intégrer le nucléaire comme du thermique (§ 2.3.2 Partie I) et propose donc de ne pas compter le nucléaire du tout (§ 2.3 Partie IV). Or, cette dernière option proposée n'est pas pertinente non plus au niveau "micro".

En ce qui concerne l'empreinte de l'énergie hydroélectrique, elle est traduite en sols dégradés que nous détaillerons dans le chapitre suivant.

3.5.2 L'hydroélectricité : Calcul d'empreinte en sols construits (ou dégradés)

Avec une contribution de 11 % à la production française [INSEE, 2006], l'énergie hydroélectrique fait l'objet d'un calcul spécifique :

En principe, le calcul d'empreinte de l'énergie hydraulique sur les sols construits peut être fait en suivant le raisonnement défini par l'équation⁸⁰ 4-b. Pour cela, un facteur de conversion surfacique en ha/KWh est nécessaire pour convertir les consommations (en kWh).

Wackernagel propose en effet un facteur de conversion pour l'hydroélectricité, qui indique les GJ produits par la surface de sols dégradée par les barrages. Soit 934 GJ/ha/an (selon le GFN). L'empreinte correspondante s'exprime alors sur sols dégradés uniquement, puisque ce mode de production n'est à l'origine de quasiment aucune émission directe de CO₂ en régime stationnaire des barrages⁸¹ :

$$EE_{\text{sols dégradés}}^{\text{Hydroélectricité, Sols construits}} [\text{hag}] = \text{Consommation} [\text{GJ}] / 934 [\text{GJ/ha}] * FE_{\text{Sols construits}} [m^2 g/m^2] * FR_{\text{Sols construits}} [-]$$

Equation 10 : Empreinte écologique de l'hydroélectricité sur 'sols construits'

En prenant en considération le facteur de rendement de sols construits (dégradés) de la France, l'empreinte de l'hydroélectricité sur sols construits dégradés est de 2,5*10⁻³ hag/GJ, soit 9*10⁻⁶ hag/kWh.

3.6 Transports

En partant de l'hypothèse que le résultat d'empreinte sur sols dégradés est peu significatif par rapport à l'appropriation de sols énergétiques, la seule catégorie principalement prise en compte dans le calcul de l'empreinte écologique du transport est la catégorie « sols énergétiques ».

Pour cela, devraient être pris en compte les transports domicile/travail des employés et agents par exemple affectés au milieu du travail, les missions des différentes personnes travaillant sur l'activité étudiée et les trajets générés pour apporter les différents consommables, biens et équipements de leur lieu de production jusqu'au site concerné.

Après estimation du nombre de kilomètres parcourus pour les transports pris en compte de l'activité étudiée, le raisonnement défini par l'équation 3 est appliqué pour le calcul

⁸⁰ cf. §. 2.2.4 « Calcul d'empreinte écologique sur sols construits (ou dégradés) »

⁸¹ Au moment de la mise en eau des barrages, d'importantes émissions de méthane se produisent, ayant une forte contribution vis-à-vis du changement climatique. Cependant, les grands barrages français étant tous anciens, nous négligeons ces émissions.

d'empreinte partielle 'sols énergétiques' de cette catégorie, en prenant en considération les facteurs d'émissions cités dans le tableau 17:

Une fois les empreintes écologiques correspondant à chaque mode de transport calculées, elles sont additionnées et donnent l'empreinte écologique des trajets effectués pour une activité donnée.

Catégories	Emissions par km, en t équ. C	Incertitudes sur les facteurs %	EE en hag/km
facteur d'émission par passager.km pour les transports en voiture selon les quatre types de parcours :			
Extra- urbain	$5,8*10^{-5}$	20	$3,6*10^{-5}$
Mixte	$6,9*10^{-5}$	20	$4*10^{-5}$
Urbain	$8,7*10^{-5}$	20	$5*10^{-5}$
Urbain heures de pointe	$9,6*10^{-5}$	20	$6*10^{-5}$
facteur d'émission par passager.km pour les transports en bus selon les différentes catégories :			
Minibus	$3,4*10^{-5}$	50	$2*10^{-5}$
Autobus urbain Ile de France	$2,1*10^{-5}$	50	10^{-5}
Autobus urbain province	$2,7*10^{-5}$	50	$1,6*10^{-5}$
Autocar interurbain	$1,1*10^{-5}$	50	$7*10^{-6}$
facteur d'émission par passager.km pour les déplacements en train électrique en France	$2,6*10^{-6}$	50	$1,6*10^{-6}$
facteur d'émission par passager.km pour les transports en avion			
Pour un passager de court courrier en 2nde	$8*10^{-5}$	20	$5*10^{-5}$
Pour un passager de court courrier en classe "Affaires"	$1,8*10^{-4}$	20	10^{-4}
Pour un passager de long courrier en 2nde	$6*10^{-5}$	20	$4*10^{-5}$
Pour un passager de long courrier en classe "Affaires"	$1,4*10^{-4}$	20	$9*10^{-5}$
Pour un passager de long courrier en Première classe	$2,1*10^{-4}$	20	$1,3*10^{-4}$
facteur d'émission par passager.km pour les transports en deux-roues :			
Cyclomoteurs	$1,8*10^{-5}$	20	10^{-5}
Motocycles <125 cm ³	$2,8*10^{-5}$	20	$2*10^{-5}$
Motocycles > ou = 125cm ³	$3,3*10^{-5}$	20	$2*10^{-5}$
facteur d'émission du transport de marchandises en fonction de la classe de PTAC (t équ. C / véhicule.km):			
< 1,5 t essence	$7*10^{-5}$	9	$4*10^{-5}$
< 1,5 t diesel	$6,5*10^{-5}$	9	$4*10^{-5}$
1,5 à 2,5 t essence	$8*10^{-5}$	11	$5*10^{-5}$
1,5 à 2,5 t diesel	$7,6*10^{-5}$	10	$5*10^{-5}$
2,51 à 3,5 t essence	$1,4*10^{-4}$	11	$9*10^{-5}$
2,51 à 3,5 t diesel	10^{-4}	12	$6*10^{-5}$
3,5 t	10^{-4}	11	$6*10^{-5}$
3,51 à 5 t	$1,6*10^{-4}$	10	10^{-4}
de 5,1 t à 6 t	$1,3*10^{-4}$	12	$8*10^{-5}$
de 6,1 t à 10,9 t	$2*10^{-4}$	10	$1,3*10^{-4}$
de 11 t à 19 t	$2,6*10^{-4}$	10	$2*10^{-4}$
de 19,1 t à 21 t	$3*10^{-4}$	10	$2*10^{-4}$
21,1 à 32,6 tonnes	$3,7*10^{-4}$	9	$2,3*10^{-4}$
tracteurs routiers	$3,3*10^{-4}$	11	$2*10^{-4}$

Tableau 17 : Facteurs d'émissions par km parcouru pour différents types de transport (ADEME, 2007).

4 L'évaluation de cette approche de calcul par rapport aux standards établies

Au vu des résultats de calcul d'empreinte d'une activité donnée, l'adaptation méthodologique définie pour ce calcul à l'échelle « micro » doit tenir compte des exigences des standards de l'empreinte écologique que nous avons déjà mentionnés dans la 'partie I'. Notre étude de cas donc, abordée dans la partie III, sera finalement évaluée sous l'angle de ces standards [GFN, 2006b].

Dans les pages suivantes (tableau 18) sont présentés les standards pour les calculs nationaux [GFN, 2006b] et leurs limites pour les calculs d'empreinte à l'échelle d'une activité.

Standards	Exigences	Modification des standards pour la méthode « micro » adaptée à une activité
<p>S 1 : Concordance avec l’empreinte nationale “National Footprint Accounts (NFA)”</p>	<p>Chaque évaluation au niveau local (pour le pays dans lequel cette évaluation est faite) doit être conforme à l’évaluation de l’empreinte écologique au niveau national :</p> <p>a- Présentation des résultats en hectares globaux en utilisant des facteurs d’équivalence et de rendement.</p> <p>b- Utilisation de facteurs de conversion utilisés par le NFA pour le pays et l’année appropriés.</p> <p>c- Les types de sol considérés doivent être les mêmes que ceux établis dans le NFA.</p> <p>d- Le sol construit est exprimé en hag (comme c’est le cas pour l’empreinte écologique de ce type de sol au niveau national).</p> <p>e- L’évaluation prend en compte l’utilisation des différentes sources d’énergie (pétrole, gaz, hydroélectricité) et la séquestration de CO₂, comme c’est le cas d’empreinte au niveau national.</p> <p>f- Les nouvelles données non considérées dans le NFA sont clairement définies.</p> <p>g- Application et comparaison de l’étude avec les standards de l’empreinte écologique. Les résultats d’empreinte sont présentés et comparés selon les deux cas : ‘si application</p>	<p>a- Conservé.</p> <p>b- Les facteurs d’équivalence sont standards pour tous les pays. Les facteurs de rendement utilisés sont pour la France, ce qui est correct. Par contre, tous les facteurs de conversion ne sont pas disponibles publiquement pour tous les pays et toutes les années. Il faut donc préciser quels sont les facteurs de conversion utilisés.</p> <p>c- La catégorie ‘espaces aquatiques’ peut être ajoutée afin de tenir compte de l’empreinte écologique associée à la consommation d’eau sur un site industriel.</p> <p>d- Conservé.</p> <p>e- Conservé.</p> <p>f- Les méthodes de calcul basées sur de nouvelles données sont bien définies (l’exemple des facteurs d’émissions de la méthode Bilan Carbone® de l’ADEME utilisés comme facteurs de conversion et l’utilisation d’une nouvelle catégorie ‘sols aquatiques’’).</p> <p>g- Comparaison avec la méthode NFA impossible lorsque le système étudié n’est pas un territoire.</p>

	des standards' ou 'non application des standards'. h- Clairement définir les énergies incorporées utilisées (expliquer pourquoi ces valeurs sont choisies).	h- Les énergies incorporées ont pu être incluses dans la méthode de calcul d'empreinte par « bilan énergétique ». Le choix de ces données est clairement argumenté. Sinon, c'est la méthode bilan carbone® qui a été utilisée.
S 2 : Définition des frontières de l'étude	a- Définition de l'activité pour laquelle l'empreinte est calculée. b- L'étude précise clairement que l'empreinte écologique mesure la demande des activités humaines spécifiques (qui peuvent être les activités de production ou de consommation) : les actions associées à une entité. c- Clairement définir les frontières du système étudié (l'activité). d- Identifier les perspectives d'empreinte. e- Evitement des doubles comptes dans le calcul d'empreinte. f- Prise en compte de tout le cycle de vie de la demande en ressources utilisées.	a- Conservé b- Conservé c- Conservé d- Conservé e- Conservé f- Les résultats des analyses de cycle de vie varient beaucoup selon leurs hypothèses. De nombreux intrants dans les activités industrielles ou travaux publics n'ont pas fait l'objet d'ACV : les hypothèses choisies doivent être formalisées.
S 3 : Calculs au niveau sub-national	a- Adaptation de la matrice de consommation et usage du sol au niveau sub-national en ajustant la matrice nationale (NFA). b- La matrice (consommations + types de sols) de la méthode utilisée doit être cohérente avec les NFA. d- Spécifier quelles méthodes ont été utilisées pour construire les comptes sub-nationaux.	a- La matrice de consommation et types de sols considérés de la méthode «par composantes» développée peut être ajustée le plus possible à la matrice nationale (NFA), mais les intrants pris en compte diffèrent largement de ceux pris en compte pour le GFN. b- Standard 3-a : Matrice cohérente au NFA. d- Un descriptif détaillé des sources et des méthodes de calcul d'empreinte des différentes sections de l'activité concernée doivent être donnés.
S 4 : (Support pour les études	A établir au cours de 2008	Le travail peut y contribuer

organisationnelles et des produits)		
S 5 : Facteurs de conversion dérivés	<p>a- Si les comptes d’empreinte nationale (NFA) ne fournissent pas les facteurs nécessaires ou si les facteurs disponibles ne sont pas suffisamment spécifiques pour l’évaluation de l’activité concernée, dans ce cas : des facteurs de conversion dites secondaires, plus détaillés, peuvent être utilisés (données des analyses de cycle de vie par exemple ou autres sources).</p> <p>b-Les méthodes de calcul des facteurs de conversion dérivés doivent être clairement documentées.</p> <p>c- Dans le cas où un facteur de conversion ne peut pas être dérivé d’un facteur de conversion primaire existant, il doit être traité comme un élément Non-Standardisé (voir Norme 7).</p>	Conservé
S 6 : Consistance des composantes	<p>a- Dans l’étude considérée, les résultats doivent être décrits selon les composantes de consommation en accord avec le NFA.</p> <p>b- L’étude assure que les composantes ne se chevauchent pas et qu’elles sont exhaustives</p> <p>c- L’étude explique ces composantes.</p> <p>d- L’étude identifie clairement les éléments de chaque composante.</p>	Conservé
S 7 : Utilisation d’éléments Non-Standardisés dans les études d’empreinte	<p>a- L’étude identifie explicitement les éléments ajoutés en comparant avec le NFA standard.</p> <p>b- L’étude fournit clairement des informations de la méthode de calcul réalisée par les éléments rajoutés.</p> <p>c- S’il y a des éléments rajoutés, l’étude présente les résultats avec et sans ces éléments.</p> <p>d- S’il y a des éléments omis, l’étude explique pourquoi ils ont été omis et comment cela affecte la comparabilité des résultats avec d’autres études.</p>	Conservé
S 8 : (Support pour les méthodes de	A établir à une date pas encore déterminée.	

calcul)		
S 9 : Estimation des Erreurs (GUIDELINE)	<p>a- Si possible les résultats finaux sont présentés avec une estimation de la marge d'erreur.</p> <p>b- Si possible, une estimation d'erreur sur les éléments suivants:</p> <ul style="list-style-type: none"> - source de données (données collectées, les coefficients utilisés, agrégation, etc). - erreurs associées à la troncation des étapes du cycle de vie <p>c- La description des estimations doivent être incluses ; références et adoptions d'autres études sont possibles.</p>	Résultats finaux (partie III) présentés avec estimation d'« incertitudes », uniquement pour les résultats de calcul d'empreinte par la méthode 'bilan carbone®' (car les facteurs d'émission de l'ADEME sont donnés avec une estimation de la marge d'erreur) + une estimation sur la qualité des données de consommation.
S 10 : Traçabilité au NFA	<p>a- L'étude fait référence à la date et version de l'édition du NFA.</p> <p>b- Au moment du commencement de l'étude, il est nécessaire de se référer à la dernière édition du NFA existante.</p> <p>c- Le rapport de l'étude contient références à des articles appropriés, en incluant la dernière version du NFA.</p>	Conservé
S 11 : Glossaire, Définitions et Versions	<p>a- L'étude doit contenir un glossaire ou des définitions des termes clé, incluant l'empreinte écologique, la biocapacité, hectares globaux, facteurs de rendement, facteurs d'équivalence...</p> <p>b- L'étude utilise ces termes de manière consistante</p> <p>c- L'étude explique les types de sol.</p> <p>d- Le glossaire de l'étude est conforme au glossaire donné par le Global Footprint Network disponible sur le site www.footprintstandards.org.</p>	Conservé
S 12 : Séparation des résultats analytiques de l'empreinte des interprétations normatives et des	<p>a- Le rapport inclut une estimation de la biocapacité globale en hag par personne.</p> <p>b- Le rapport explique la différence entre biocapacité globale et biocapacité locale ou régionale.</p> <p>c- Le rapport explique que l'empreinte écologique fait la comparaison entre la demande humaine et la biocapacité selon la technologie et la consommation actuelles.</p> <p>d- Le rapport explique que l'empreinte mesure la demande des activités.</p>	<p>a, b et c- Dans le cas de l'étude d'une activité, la notion de biocapacité est plus ambiguë que pour un territoire et une population donnée. Si elle est utilisée par l'étude, elle doit être bien définie.</p> <p>d- Conservé</p>

valeurs	e- Le rapport explique que l’empreinte ne promeut aucune politique ni stratégie à ce propos. Elle peut seulement être utilisée pour évaluer certains scénarios.	e- Pas appliqué
S 13 : Scénarios d’empreinte	a- Si des scénarios sont utilisés, le rapport fait la distinction entre l’analyse de l’empreinte et les scénarios évalués. b- Le rapport affirme que les scénarios ne sont pas des prédictions. c- Dans le cas où des scénarios sont utilisés, ils sont décrits d’une façon compatible avec ces standards.	a- c- Conservé
S 14 : Limites de l’étude d’empreinte	a- Il y a une mention explicite à la question de combien de capacité bioproductive de la biosphère (sols bioproductifs) est occupée par une activité déterminée. b- Un rapport des limitations de l’étude est complet et clair, avec les frontières bien identifiées. c- L’étude commente les éléments qui affectent l’exactitude et la précision des résultats. d- L’étude explique les estimations conservatives de l’empreinte, qui sous-estime l’empreinte e- L’étude explique que l’empreinte et la biocapacité ne prédisent pas les futures biocapacités et consommations et que l’analyse ne prend pas en compte la dégradation des sols.	a, b, c et d- Conservé e- Pas appliqué
S 15 : Explication de la relation entre durabilité et empreinte	a- Le rapport n’affirme pas que l’empreinte écologique soit une mesure complète de la durabilité b- Le rapport communique en résumé que l’empreinte veut répondre à une seule question: combien de capacité bioproductive est utilisée par l’activité humaine.	Conservé
S 16 : Citation des sources et description des méthodologies	a- Le rapport donne des références sur d’autres études pour soutenir l’analyse et les conclusions. b- Le rapport donne les références de toutes les données utilisées pour construire la matrice de consommation.	Conservé
S 17 : Référence aux	a- Le rapport confirme sa conformité avec les standards d’empreinte écologique et cite la version des standards utilisée.	

Standards et aux Organismes de Certification	<p>b- Le Rapport fait référence aux standards d’empreinte écologique et aux protocoles de certification : www.footprintstandards.org.</p> <p>c- Le Rapport fournit les coordonnées de contact, y compris le site web de l’organisme pour des informations supplémentaires.</p>	Conservé
S 18 : Style de communication.	<p>a- Évitez les abréviations. Par exemple : plutôt prononcer ‘Empreinte Ecologique’ et non seulement que ‘EE’. Et ‘le réseau d’empreinte écologique = Global Footprint Network’ au lieu de prononcer seulement que les trois lettres ‘GFN’.</p> <p>b- Choisissez des noms descriptifs : par exemple en expliquant les composantes d’empreinte écologique et des sous-composantes (par exemple, n'utilisez pas le mot "déchets" comme une catégorie, mais plutôt "la gestion des déchets").</p> <p>c- Évitez des tons moralistes ou critiques : être aussi descriptif que possible. Identifier ce qui est ‘analyse’ et ce qui est ‘interprétation’. Éviter les adjectifs inutiles (les termes comme « responsable ou la responsabilité »)</p> <p>d- Considérer comme message principal : non pas "réduire votre empreinte" mais "garantir votre bien-être et sauvegarder donc les services écologiques".</p> <p>e- La clarté des questions et réponses en communiquant sur l’empreinte.</p> <p>f- Si possible, utiliser des textes standards (www.footprintstandards.org).</p> <p>g- Évitez la critique ou le blâme ! Soulignez le sérieux du problème, mais maintenir un ton positif</p> <p>h- Laissez les lecteurs être des ‘héros’ et les laisser choisir. Évitez "devrait", "devoir," etc.</p>	Conservé

Tableau 18 : Evaluation de la méthode « micro » développé par rapport aux standards de l’empreinte écologique établis par le réseau « Global Footprint Network, 2006 »

5 Principales difficultés soulevées par cette adaptation méthodologique

Certaines limites méthodologiques se dégagent par rapport à l'utilisation de cet indicateur au niveau d'une organisation ou d'une activité donnée. Nous citons ici dans ce chapitre les principales limites rencontrées mais nous détaillons le reste dans la quatrième partie de ce mémoire.

5.1 Différentes sources de facteurs de conversion

Dans un premier temps, la lacune méthodologique due à la non disponibilité des données mérite d'être soulignée (exemple des données sur les explosifs). Dans ce sens, il semblerait intéressant de pouvoir intégrer, dans le sol énergie de l'empreinte de transport, l'ensemble des kilomètres effectués par chaque consommable et bien de l'activité étudiée (même en aval du fournisseur), mais ces données ne sont pas disponibles.

En théorie l'approche par composantes fournit des résultats plus précis et détaillés que l'approche par facteurs d'ajustement à partir des calculs nationaux, mais cette précision est limitée du fait du faible nombre de facteurs de conversion disponibles et du fait que les facteurs manquants sont calculés le plus souvent en considérant essentiellement (mais pas seulement) la composante énergétique de l'empreinte.

Dans ce sens, le problème d'inexistence de bases de données "standard" et officielles sur les facteurs de conversion et en particulier sur les données d'énergie incorporées des différents matériaux considérés (que l'on retrouve aussi pour les ACV ou le Bilan Carbone®) rend délicat la comparaison entre des études différentes et les résultats varient selon les hypothèses retenues : d'où la nécessité de créer une base de donnée des facteurs de conversion (par exemple des énergies incorporées et surfaces nécessaires (sols dégradés) pour diverses activités) de certains matériaux selon différentes sources. Un extrait de cette base de données est illustré par le tableau 19.

D'un autre côté, les énergies incorporées pour un même matériau varient selon les circuits de production possibles. Selon les pays, ces énergies incorporées et donc les facteurs de conversion peuvent fortement varier, ce qui peut rendre difficile des comparaisons entre les pays. La question peut donc se poser de savoir s'il vaut mieux avoir une base de donnée de facteurs de conversion uniforme sur tous les pays ou s'il faut des bases de données propres à chaque pays, pour prendre en compte les disparités au niveau des circuits de production.

Matière	Bilan carbone® ADEME			Bilan énergétique (énergies incorporées selon la source d'ACV choisie)												
	Facteur d'émission (t équ. C/t)	Incertitude sur le facteur (%)	EE (m ² g / kg)	Logiciel ACV Gabi4		Base de données Negawatt ⁸²		Base de données Equer ⁸³		Données GFN Monde		Données Colas ⁸⁴		Ecart = $\frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\max}}$		
				MJ/Kg	EE (m ² g / kg)	MJ/Kg	EE (m ² g / kg)	MJ/Kg	EE (m ² g / kg)	MJ/Kg	EE (m ² g / kg)	MJ/Kg	EE (m ² g / kg)	MJ/Kg	EE (m ² g / kg)	
Carburant	0,95	5	6												-	-
Pétrole	0,76	5	4,7												-	-
Explosifs	?	?	?													
Béton	0,055	20	0,3						1,5	0,19		1,2	0,15		20 %	50 %
Bitume	0,095	20	0,6			44,10	5,5	53,10	6,7						16 %	90 %
Grave non traité	0,004	20	0,025					0,36	0,07			0,11	0,01		70 %	85 %
Grave liant hydraulique (Filler d'apport)	0,006	20	0,04									1,24	0,16		-	75 %
Ciment	0,24	20	1,5			7,8	1			1,5	0,19				80 %	87 %
PVC	0,51	20	3	16,7	1,3	70	5,6	75	6			7,9	1		90 %	80 %
Cuivre	0,80	50	5	36,7	2,9	70,6	5,6	125	10						70 %	70 %
PEhd	0,50	10	3												-	-
Aluminium	2,89	30	20			191	24	247,3	31	250	31,3				23 %	36 %
Peinture	?	?	?	11	1,3	90,4	11,3	44,09	5,5	40	5				87 %	90 %
Papier	0,55	20	3,4	16,5	1,3	36,4	2,9			35	2,8				55 %	55 %
Bois	0,50	20	3,1	14,65	1,8					10	2				30 %	40 %
Eau potable	? t équ. C/m ³	?	?									10 MJ/ m ³	1,25 m ² g / m ³		-	-
Plastique qualité Bouteille	1,23	20	8					120,4	15	50	6,3	79	10		60 %	60 %
Métal (Bureaux)	0,04 t équ. C /m ²	50	0,3												-	-

Tableau 19 : Extrait de la base de donnée : exemples de facteurs de conversion selon certaines sources

⁸² <http://www.negawatt.org> (consulté le 14 décembre 2004)

⁸³ <http://www.izuba.fr/equer.htm> (consulté le 20 mai 2005)

⁸⁴ Chappat et Bilal (2003).

5.2 Fiabilité des résultats

Incertitude

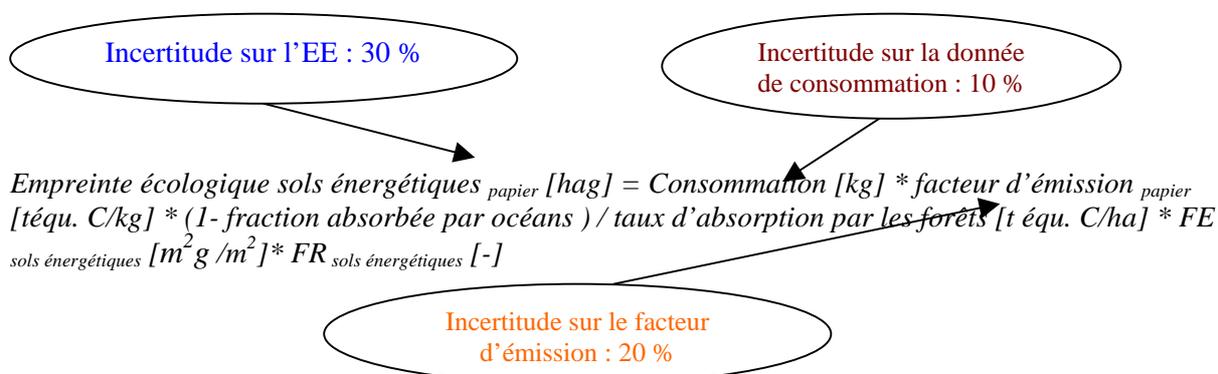
Les résultats des calculs effectués doivent être considérés avec prudence. La connaissance des incertitudes sur les données manipulées et agrégées permettra d'établir un intervalle de confiance autour des valeurs obtenues pour l'empreinte écologique.

Les données d'empreinte écologique sont, à l'heure actuelle, fournies sans aucune indication de leur niveau d'incertitude. Ceci s'explique, pour les calculs au niveau national, par le fait que les statistiques nationales, données d'entrée des calculs, sont elles mêmes diffusées sans indication d'incertitude [Wackernagel et Monfreda, 2004].

Au niveau de notre étude « micro » pour le calcul d'empreinte à l'échelle d'une activité industrielle, les frontières de l'analyse des coefficients de transfert ne sont pas clairement définies. Elles sont données sans aucune indication sur leur niveau d'incertitude (les énergies incorporées, les facteurs d'équivalence et de rendement par exemple). La connaissance des niveaux d'incertitude pesant sur les coefficients et les données collectées peut apporter une première contribution à l'estimation du niveau d'incertitude de cet indicateur qui, jusqu'à présent, est surtout utilisé de façon « qualitative » et à but communicatif, mais dont l'usage, tend à se généraliser. S'il est, à terme, utilisé comme outil d'aide à la décision, une réflexion sur sa sensibilité et incertitude s'avère nécessaire.

Dans le cas du calcul d'empreinte à partir d'un bilan énergétique (cf. §. 3.1.1), les énergies incorporées des bases de données étudiées sont fournies sans aucune indication sur leur niveau d'incertitude et cela empêche de faire une estimation d'incertitude sur le résultat d'empreinte par cette méthode. Néanmoins, une première estimation d'erreur sur le résultat d'empreinte en sols énergétiques, calculée par la méthode bilan carbone, peut être déduite à partir des incertitudes données sur les facteurs d'émission des produits concernés. Dans ce sens, et par hypothèse, l'incertitude sur le résultat d'empreinte peut donc prendre en compte l'incertitude estimée sur les données de consommations collectées ainsi que celle donnée sur les facteurs d'émission en considérant que les autres facteurs de conversion sont non variables dans l'année considérée (à savoir: la fraction absorbée par océans de 29 %, le taux d'absorption par les forêts d'une tonne équivalent de carbone par hectare, ainsi que les facteurs de rendements et d'équivalence):

Exemple du calcul d'empreinte du papier :



Nous montrons plus en détails les estimations prises en compte à ce propos dans la partie "résultats de l'étude de cas"(cf. § 5. Partie III).

Qualité des données collectées

De plus, dans une perspective de comparabilité et de reproductibilité des résultats et afin d'assurer la plus grande transparence possible sur ces résultats, les données collectées peuvent être évaluées selon le modèle proposé par [Weidema, 95] dans [Wenisch, 1999], à l'aide d'un tableau caractérisant le profil de la qualité des données. Un niveau de confiance peut ainsi être déterminé pour toutes les données qui ont été agrégées pour le calcul.

Ainsi, chaque donnée employée dans les calculs est répertoriée dans une feuille spécifique selon la catégorie de consommation concernée (consommable, infrastructure, etc). Elle est accompagnée de sa source, de son année de référence, et d'une note de 1 à 5 traduisant sa qualité (1 étant le meilleur résultat). Cette note est le résultat d'une moyenne effectuée sur les notes partielles attribuées selon quatre critères (tableau 20) : Fiabilité (F), Cohérence Temporelle (CTp), Cohérence Géographique (CG) et Cohérence Technologique (CTc).

Il arrive qu'un ou plusieurs de ces critères ne soit pas cohérent pour l'évaluation d'une donnée⁸⁵ (Wernert, 2004). Le total des notes obtenues est donc ramené au nombre de critères évalués. Le résultat peut être perçu comme un indicateur potentiel de la fidélité du modèle par rapport à la réalité. Plus les données auront une note élevée, et moins le résultat du calcul d'empreinte sera représentatif de la réalité.

De plus, la notation obtenue sur la donnée de consommation pourrait nous aider, par hypothèse, pour estimer à la suite l'incertitude sur cette dernière, qui peut être de 5 % ou 10 % selon la note.

Notation de 1 à 5	1	2	3	4	5
Fiabilité (F)	Données vérifiées issues de mesures	Données vérifiées en partie issues d'hypothèses ou sommées, non vérifiées, issues de mesures	Données non vérifiées, en partie issues d'hypothèses	Estimation de la qualité (réalisée par un expert : industriel,...)	Estimation n'ayant pas les qualités requises
Corrélation temporelle (CTp)	Moins de 3 ans de différence avec l'année de l'étude	Moins de 6 ans de différence	Moins de 10 ans de différence	Moins de 15 ans de différence	Âge de la donnée inconnue ou plus de 15 ans de différence
Corrélation géographique (CG)	Données issues de l'entreprise étudiée	Données moyennées sur une large zone contenant celle de l'étude	Données issues d'une zone ayant des conditions de production similaires à celles de l'étude	Données issues d'une zone ayant des conditions de production légèrement similaires	Données issues d'une zone inconnue ou ayant des conditions de production très différentes
Corrélation technologique (CTc)	Données issues d'entreprises, de process et de produits correspondants à l'étude	Données issues d'entreprises, de process et de produits étudiés mais d'entreprises différentes	Données issues de process et de produits étudiés mais de technologies différentes	Données en relation avec les process et les produits mais avec les mêmes technologies	Données en relation avec les process et les produits mais avec des technologies différentes

Tableau 20 : L'évaluation des données collectées selon le modèle proposé dans [Wenisch, 1999]

Comme c'est indiqué dans l'exemple de calcul d'empreinte du papier consommé dans la base de vie du chantier routier de Vendranges (terrain d'application analysé en détails dans la partie III) dans le

⁸⁵ Par exemple, le nombre annuel de jours ouvrables ne peut faire l'objet d'une notation sur la Cohérence Technologique.

tableau 21, la ‘première estimation d’incertitude’ sur le résultat d’empreinte peut être examinée pour que l’empreinte écologique trouve une application opérationnelle comme outil décisionnel pour l’élaboration de politiques industrielles.

	Facteur d'émission			Empreinte Ecologique ⁸⁶	
	Incertitude sur la donnée	t équ. C / t	Incertitude sur le facteur	hag	Incertitude sur le résultat
1,41 t de papier consommé dans les bureaux du chantier routier de Vendranges en phase de construction	10 %	0,55	20 %	0,5	30 %

Tableau 21 : Calcul d’empreinte écologique sur sols énergétiques du papier (l’exemple de la quantité consommée dans les bureaux du chantier routier de Vendranges en phase de construction)

6 Conclusion

Sur un plan méthodologique, le calcul de l’empreinte écologique à l’échelle « micro » nous a permis de réfléchir sur les comparaisons et les adaptations possibles de différentes méthodes possibles pour le calcul en soulevant les principales difficultés par cette adaptation méthodologique.

Afin d’envisager en mieux les intérêts d’une utilisation de l’empreinte écologique dans le cadre d’un établissement individuel et en particulier d’une ‘activité de travaux publics’, nous avons préféré appliquer notre méthode sur une étude de cas concrète : « l’empreinte d’un chantier routier » afin d’intégrer dans nos propositions méthodologiques les contraintes de la réalité du terrain.

⁸⁶ Empreinte écologique calculée à partir de l’approche bilan carbone.

PARTIE III

Partie III Empreinte Ecologique, du global au local : Application à un chantier routier au nord de la Loire « cas de Vendranges »

Après avoir abordé les objectifs de l'étude de calcul d'empreinte écologique à l'échelle 'micro' et les possibilités d'adaptation méthodologique de ce calcul à ce niveau, nous avons choisi d'appliquer cette méthode dans le cadre d'une 'activité de travaux publics', et plus spécialement dans le cadre d'une activité de construction routière.

Une telle étude pourrait mettre en relation l'ordre de grandeur de l'empreinte écologique liée à la construction d'un tronçon par rapport à l'empreinte écologique des véhicules, pendant un an, circulant sur ce même tronçon.

Notre terrain d'application concerne l'opération de la mise à 2x2 voies de la RN7-RN82 entre Cosne sur Loire et Balbigny. Plus particulièrement notre étude porte sur l'opération du « chantier de Vendranges », tronçon de 8 km situé entre l'hôpital sur Rhins et Neulise. Le maître d'ouvrage du chantier était la Direction Départementale de l'Equipement de la Loire (DDE 42), le maître d'œuvre était le service Transport et Infrastructure de la DDE 42 et la réalisation des travaux était confiée à des entreprises (la Forezienne et Malet).

Le choix d'un tel terrain d'étude a été effectué du fait d'une convention associant le centre SITE à la DDE 42 pour la mise en place d'un système de management environnemental (SME) sur une autre opération de mise à 2x2 voies de la RN7-RN82. Cela nous a donné des facilités pour accéder aux différentes données.

De plus, étant donné qu'il y a peu de travaux de suivi des consommations de ressources et impacts globaux des chantiers routiers, La DDE 42 souhaitait avoir un retour d'expérience sur les consommations engendrées par ce chantier.

Dans cette partie, et après une brève présentation des généralités sur la construction routière, nous traitons les considérations méthodologiques et les résultats liés au calcul de cet indicateur sur le tronçon considéré. Ensuite, nous abordons l'évaluation de cette étude de cas par rapport aux standards de l'empreinte.

1 Définition du système étudié pour le calcul d'empreinte écologique : la construction d'une route

1.1 Généralités sur la construction des routes

Cette partie « Généralités » a pour objectif de présenter les éléments nécessaires au calcul d'empreinte écologique du chantier routier et non de détailler de façon exhaustive les techniques de la construction routière. Nous proposons seulement de synthétiser les principales techniques de construction, d'après la thèse de Tung HOANG [Hoang, 2005] ainsi que d'après l'observation directe de notre terrain étudié.

La couche de forme et le sol support d'une route se déterminent sur la base des résultats des études géotechniques préalables à l'aide des méthodes expliquées dans des guides tel que celui de la réalisation des remblais et des couches de forme [SETRA et LCPC, 2000]. Quant aux structures de chaussées, les paramètres pris en compte sont : la nature de sol, l'environnement hydrogéologique, le trafic de chantier, la durée de service ainsi que les effets thermiques liés aux conditions climatiques [Hoang, 2005].

1.1.1 Conception et exécution des terrassements

Les ouvrages de terrassement se composent de déblais et remblais pour servir à supporter les structures de chaussées.

Le déblai est constitué soit d'un matériau naturel en place, soit d'un matériau extérieur si la nature du matériau en place est inadaptée (trop sensible aux variations hydrauliques par

exemple). Le remblai est construit sur un sol support appelé assise de remblai. Cette dernière doit avoir des caractéristiques mécaniques suffisantes pour supporter l'ouvrage sans se déformer [Hoang, 2005]. Le remblai est constitué (figure 33) :

- du pied de terrassement
- du corps de terrassement
- de la partie supérieure des terrassements (PST) qui est constituée par le dernier mètre supérieur du remblai [SETRA et LCPC, 2000]. La surface supérieure de la PST constitue l'arase des terrassements. Cette dernière est recouverte à la suite par une couche de forme dont la surface constitue la plate-forme support de la chaussée.

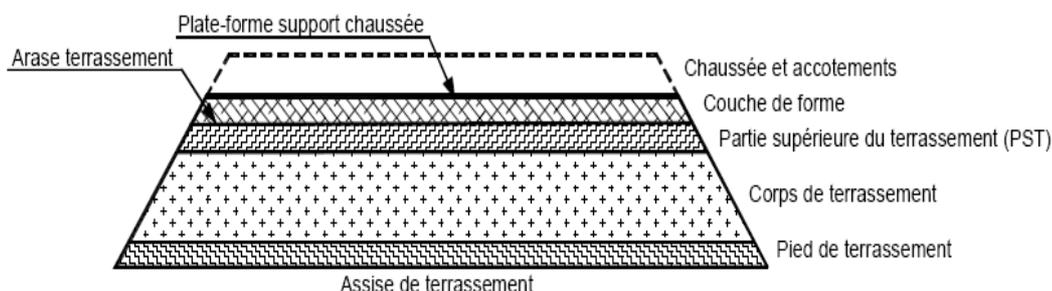


Figure 33 : Constitution du terrassement. D'après Hoang, 2005

Selon les cas de chantier, la couche de forme peut être [Hoang, 2005]:

- inexistante lorsque les matériaux constituant le remblai ou le sol en place ont eux-mêmes les qualités mécaniques requises;
- limitée à l'apport d'une seule couche d'un matériau ayant les caractéristiques nécessaires;
- constituée d'une superposition de couches de matériaux différents, répondant à des fonctions distinctes, qui permettent de former une structure d'adaptation dont la surface présente les caractéristiques requises pour une plate-forme support de chaussée. Ces matériaux sont de type géotextile, matériaux grossiers, enduit, gravillonné, etc.

Cette couche de forme répond d'une part à des objectifs de court terme, vis-à-vis de la phase de réalisation de la chaussée [Hoang, 2005] : on cherche à aplanir la plate-forme support de chaussée (permettant de réaliser la couche de fondation dans les tolérances d'épaisseurs fixées) et à permettre une circulation dans de bonnes conditions des engins approvisionnant les matériaux de la couche de fondation et éventuellement supporter le trafic généré par le chantier. D'autre part, à long terme, la couche de forme a principalement pour fonction d'homogénéiser la portance du support pour concevoir des chaussées d'épaisseur constante et le maintien dans le temps.

Selon le guide technique de la réalisation des remblais et des couches de forme [SETRA et LCPC, 2000], l'épaisseur de la couche de forme varie en fonction de 'la partie supérieure du terrassement' (PST) selon les cas de chantier (annexe 7). De même, sept types de PST sont distingués en fonction de la géotechnique et des conditions hydriques des sols. Ensuite, chaque PST est associé à une ou deux classes de 'l'arase de terrassement' (AR). Enfin, pour chaque cas de PST et pour les différents matériaux, il est préconisé une certaine épaisseur de couche de forme (annexe 7).

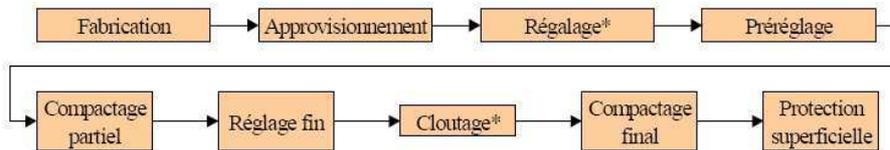
Exécution des terrassements :

L'activité des terrassements concerne la mise en œuvre des déblais, remblais et couches de formes en matériaux traités ou non [Hoang, 2005]. Après enlèvement de la terre végétale, soit les matériaux utilisés en déblai/remblai (du sol considéré) n'ont pas besoin de traitement et

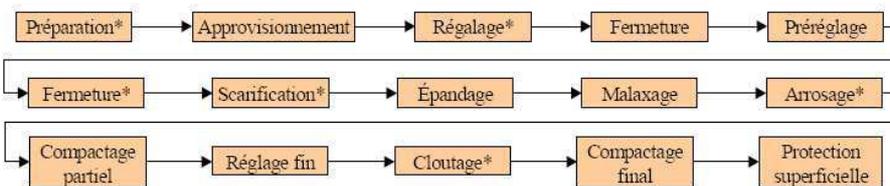
dans ce cas il faut juste régler et compacter le sol, ou soit ces matériaux sont sensibles à l'eau et dans ce cas on les enlève pour les traiter ou les remplacer.

La réalisation de la couche de forme, selon le cas du chantier considéré, fait appel à un grand nombre d'opérations élémentaires exigeant un ordonnancement précis et des matériels spécifiques variés. Quatre types de chantiers courants sont illustrés par la figure 34 [LCPC et SETRA, 2000]. Ainsi, les matériels utilisés dans ces travaux sont présentés dans le tableau 22.

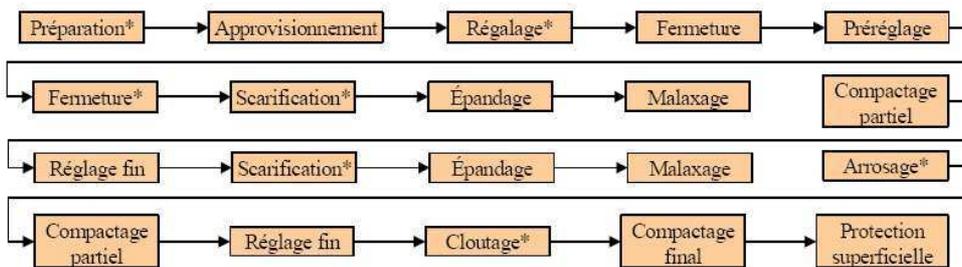
1^{er} cas : approvisionnement à l'emplacement de la couche de forme d'un sol préalablement traité en centrale ou en place



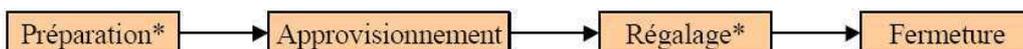
2^e cas : approvisionnement d'un sol non traité à l'emplacement de la couche de forme et traitement en place avec un liant hydraulique ou à la chaux seule



3^e cas : idem 2^e cas mais le sol est soumis à un traitement mixte chaux+liant hydraulique



4^e cas (**): traitement d'un fond de déblai (ne nécessitant pas de mouvements de terre)



(*) L'exécution de cette opération n'est pas systématique. Elle dépend des conditions de chantier ; (**) On se reporte aux cas 2 ou 3 suivant qu'il s'agit d'un traitement avec un seul produit de traitement ou d'un traitement mixte en excluant toutefois les 4 premières opérations.

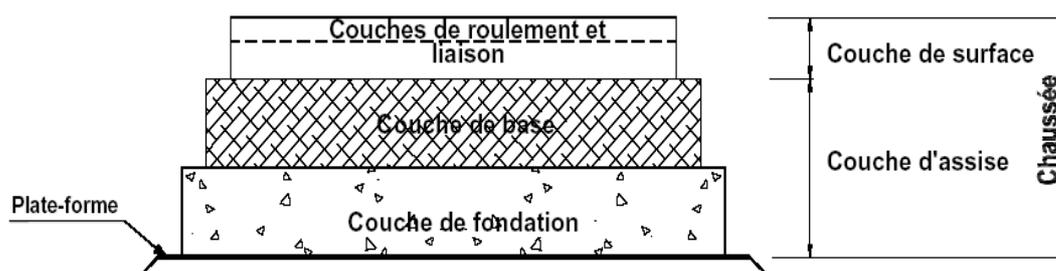
Figure 34 : Opérations élémentaires pour quatre cas de chantier type [LCPC et SETRA, 2000].

Couche	Travaux	Matériel
Sols support et couche de forme	Enlèvement de la terre végétale	Tracteur sur chenille
	Extraction du déblai	Pell mécanique, Bulldozer
	Transport du déblai	Bulldozer, motorscraper, camion
	Epandage du remblai	Bulldozer, motorscraper, niveleuse
	Réglage	Bulldozer
	Fermeture	Compacteur
	Préréglage	Niveleuse
	Epandage du produit de traitement	Epandeur
	Malaxage	Pulvérisateur
	Arrosage	Arroseuse
	Compactage partiel	Compacteur
	Réglage fin	Niveleuse
	Cloutage	Epandeur, compacteur, gravillonneur porté
	Compactage final	Compacteur
Protection superficielle	Epandeur, compacteur, gravillonneur porté	

*Tableau 22: Matériels utilisés pendant les travaux des terrassements
[LCPC et SETRA, 2000]*

1.1.2 Conception et construction de la chaussée

Précédée par la phase de terrassement, la chaussée se présente sous la forme d'une structure multicouche (figure 35). A la surface de la couche de forme (sur la plate-forme support), on trouve la couche d'assise, constituée d'une couche de fondation et d'une couche de base, qui permet une répartition des contraintes verticales sur la plate-forme support afin d'éviter des déformations trop importantes de celle-ci. Ensuite, on trouve la couche de surface, composée d'une couche de roulement et éventuellement d'une couche de liaison, qui donne à la chaussée les propriétés nécessaires pour son utilisation par les véhicules et qui assure un rôle d'étanchéité vis-à-vis du corps de la chaussée, contribuant ainsi à sa durabilité [LCPC et SETRA, 1998].



*Figure 35 : Structure générale de la chaussée
[LCPC et SETRA, 1998]*

Il existe sept types de structures de chaussée [Hoang, 2005] :

- 1- La chaussée bitumineuse épaisse qui se compose d'une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrocarbonés.
- 2- La chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques qui comprend une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques.
- 3- La structure mixte qui comporte une couche de surface et une couche de base en matériaux bitumineux sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques.

- 4- La chaussée en béton de ciment dans laquelle la couche de béton et ciment (couche de roulement) repose sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques, soit sur une couche drainante en matériaux granulaires (ce qu'on appelle "dalle épaisse"), soit sur une couche d'enrobé reposant elle-même sur une couche de forme traitée aux liants hydrauliques.
- 5- La structure souple qui comporte une couverture bitumineuse relativement mince, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités.
- 6- La structure inverse qui comporte une couche de surface et une couche de base en matériaux bitumineux, sur une couche en grave non traité de faible épaisseur, reposant elle-même sur une couche de forme traitée aux liants hydrauliques.
- 7- La structure expérimentale qui comporte une couche de surface se composant d'une couche en béton bitumineux très mince et d'un enduit superficiel. Cette couche de surface se pose sur une couche de base en BAC (couches en béton de ciment ainsi qu'en béton armé) et une couche de fondation en GB3 (trois couches en grave bitume) [DR, 2000].

Pour tous les cas, les conditions climatiques locales ainsi que les types de trafics considérés interviennent dans le dimensionnement et le choix de la structure de chaussée, selon des règles proposées par le guide [LCPC et SETRA, 1998]. Le dimensionnement de la chaussée peut être effectuée en utilisant le logiciel Alizé [Alizé-LCPC-routes] développé par LCPC [Hoang, 2005], ou le catalogue des structures types de chaussées neuves [LCPC et SETRA, 1998].

La présentation des paramètres du "profil en travers" se limite à deux catégories qu'on voit souvent pour les autoroutes et routes nationales en France [Hoang, 2005] : le profil en travers d'une route à 2 ou 3 voies (figure 36) et le profil en travers d'une route à 2x2 voies (figure 37).

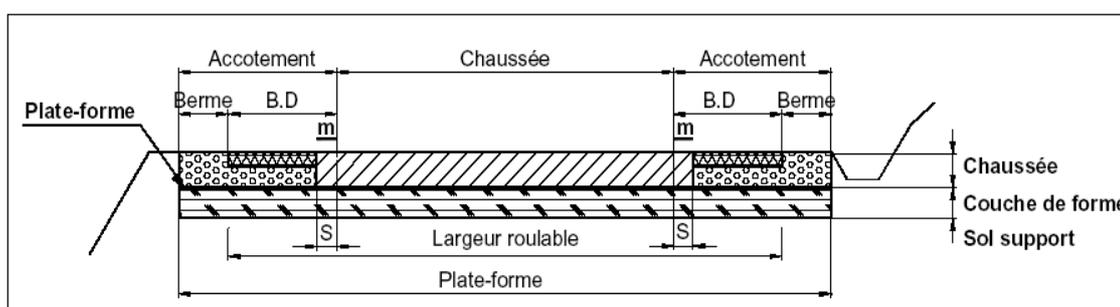


Figure 36 : Profil en travers sur une route nationale [SETRA, 1994].

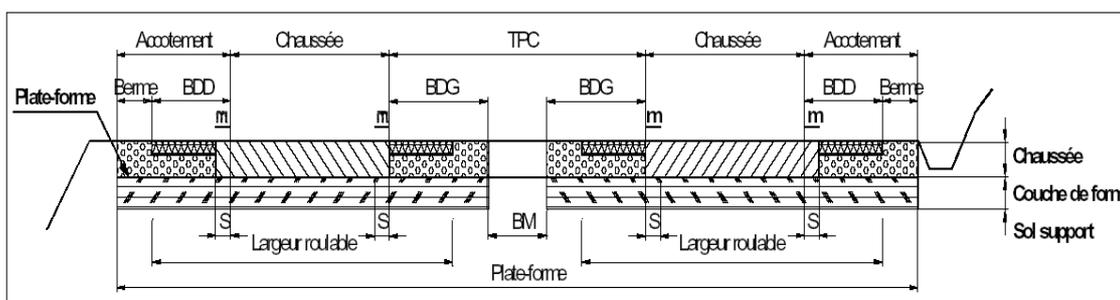


Figure 37 : Profil en travers d'une route à 2x2 voies [SETRA, 1994].

On définit ci-après, selon le Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), les éléments des deux profils en travers figurant dans les schémas ci-dessus :

- BD: Bande dérasée⁸⁷;
- S: Surlargeur structurelle de chaussée supportant le marquage de rive (m) ;
- m: marquage de rive;
- BDD: Bande dérasée de droite;
- BDG: Bande dérasée de gauche;
- BM: Bande médiane;
- Chaussée: Au sens géométrique, la chaussée est limitée par le bord interne du marquage de rive (et ne comprend pas les surlargeurs de structure de chaussée portant le marquage de rive). Les autoroutes comportent deux chaussées séparées unidirectionnelles. Chacune d'elles est divisée par une signalisation horizontale appropriée; en voies élémentaires d'une largeur de 3,5 m; le nombre de ces voies peut varier de 2 à 4 [SETRA, 1985].
- TPC (Terre-plein central): D'une largeur qui varie de 2,5 à 3,5 m [SETRA, 1985], le TPC permet la séparation des deux sens de circulation. Il se compose de deux bandes dérasées de gauche (BDG) et la bande médiane. En général, la largeur de la BDG est de 1 m pour le cas d'une autoroute. Elle peut être réduite dans le cas où il y a présence de séparateurs en béton par exemple [SETRA, 1985], concernant la bande médiane, si sa largeur est inférieure à 3 m, elle est généralement stabilisée et revêtue pour faciliter l'entretien, mais dans le cas contraire, une berme engazonnée de 1 m est maintenue en bordure de la BDG [SETRA, 1985] (une berme est une zone qui se trouve entre les structures stabilisées et les talus qui sert à participer aux dégagements visuels et à porter certains panneaux de signalisation et équipements). En cas de nécessité, des interruptions du TPC (ITPC), d'une longueur moyenne d'une trentaine de mètre (dans le cas d'une autoroute), existent pour permettre le passage de la circulation d'une chaussée sur l'autre.
- Accotement: il comprend une partie dégagée de tout obstacle appelé bande dérasée droite (BDD), bordée à l'extérieur d'une berme engazonnée. Pour l'autoroute, cette partie est appelée bande d'arrêt d'urgence (BAU). La largeur normale de BAU est de 2,50 m si le trafic poids lourds est inférieur à 1500véh/j l'année de mise en service, et de 3 m si le trafic poids lourds est supérieur à 1500véh/j l'année de mise en service.

La technique de la mise en œuvre d'une chaussée dépend principalement du type de matériaux utilisés dans la structure considérée ainsi que des matériels utilisés lors de la construction. Le tableau 23 présente les travaux de la mise en œuvre des couches de la chaussée, y compris l'accotement, pour trois principaux types de matériaux (le béton bitumineux (BB), le béton de ciment (BC) et le granulat non traité (GNT) utilisé dans l'accotement).

Couche	Travaux	Matériel	Référence
BB	Fabrication du mélange	Centrale d'enrobage	[NF P 98-150]
	Transport du mélange	Camion, semi-remorque	
	Répannage de la couche d'accrochage	Epanduse des liants hydrocarbonés	
	Répannage du mélange	Finisseur	
	Compactage	Compacteur	
BC	Fabrication du mélange	Centrale d'enrobage	[NF P 98-170]
	Transport du mélange	Véhicules à bennes métalliques	
	Répannage du mélange et installation des joints, de l'acier	Machines à coffrage glissant	
	Entretien la surface	Equipement	
GNT	Transport du GNT	Camion, gravillonneur porté, niveleuse	[LCPC et SETRA, 2000]
	Répannage du GNT		

⁸⁷ Zone dégagée de tout obstacle, appartenant à l'accotement si elle est à droite de la chaussée (BDD) appelée parfois bande d'arrêt. Elle est constituée à partir du bord géométrique de la chaussée.

Compactage du GNT	Compacteur
-------------------	------------

Tableau 23: Travaux et matériels de la mise en œuvre de la chaussée [Hoang, 2005]

1.2 Présentation du site étudié

1.2.1 Le projet de mise à deux fois deux voies, des RN7 - RN82, dans son ensemble

La Direction Départementale de l'Équipement de la Loire (DDE 42) a été impliquée à différents titres au cours des phases du projet de la mise à deux fois deux voies des RN7 et RN82 (figure 38). Les cellules ETN (études et travaux neufs) du service transport et infrastructures (STI) ont assuré la maîtrise d'œuvre du projet, elles étaient chargées des études et dossiers et ont assuré le suivi de l'opération durant les travaux (le suivi des entreprises prestataires pendant le chantier).

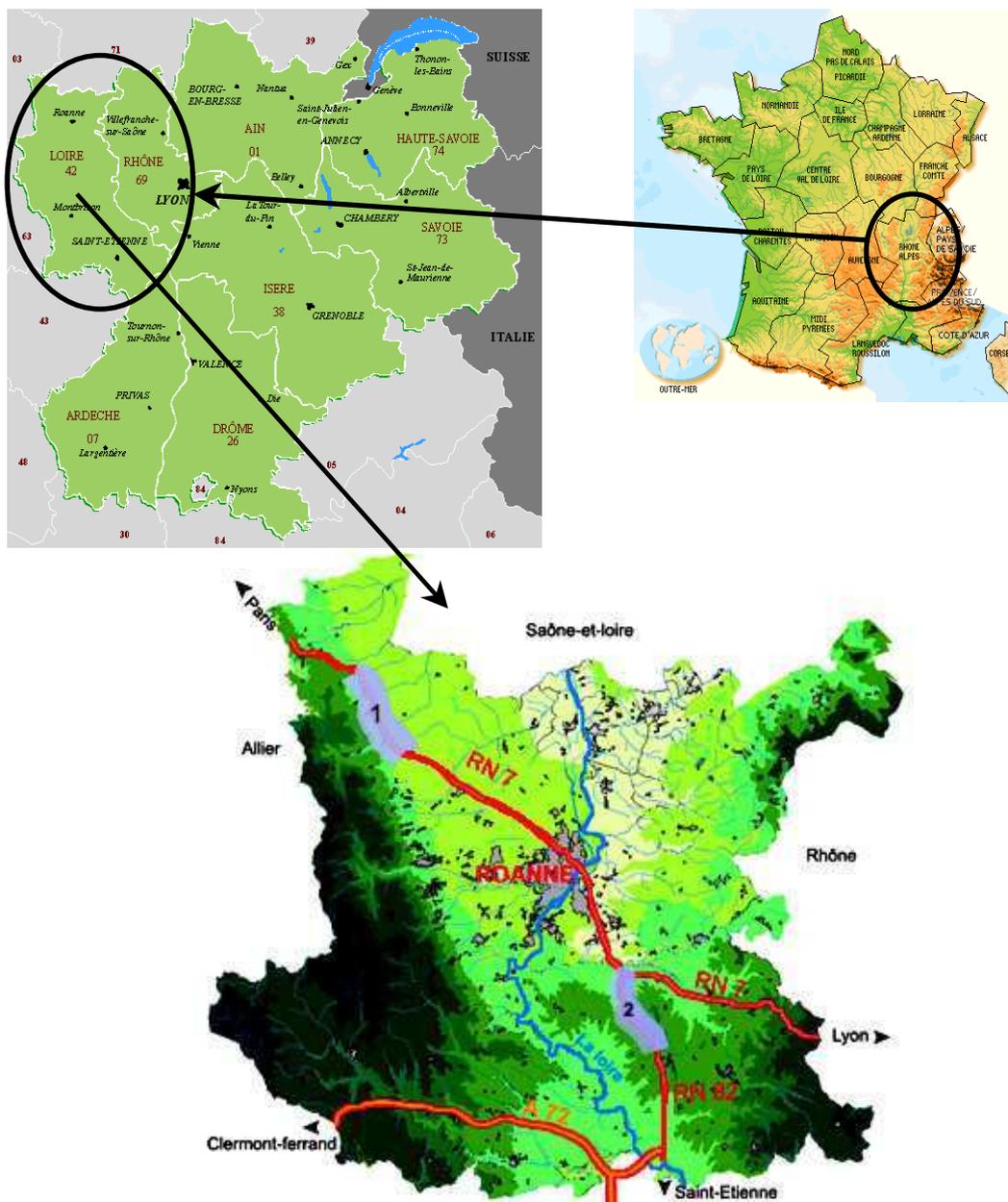


Figure 38 : L'opération RN7 et RN82

1: Déviation de La Pacaudière et Changy. 2: Déviation de Vendranges

Le programme de mise à deux fois deux voies des RN7 - RN82 concernait les principales sections suivantes⁸⁸:

- les déviations de Saint Martin d'Estreaux et de Neulise qui ont été mises en service respectivement en 2002 et en 1998;
- la déviation de Vendranges;
- La déviation de Changy –La Pacaudière (annexe 8).

Cet aménagement répond à plusieurs objectifs [Leveillard, 2004] :

Globalement, le but du projet était de créer une liaison entre l'A77 au nord (à Nevers), l'A89 (La Tour de Salvigny- Balbigny) et l'A72 au sud (à Balbigny). Ce qui constitue ainsi un axe parallèle aux autoroutes A71 (Paris- Clermont) et A6 (Paris –Lyon), qui formera un itinéraire de substitution pour des déplacements nord-sud.

De plus, localement ce projet visait l'amélioration de la qualité de vie des riverains actuels de la RN7 : pour des raisons de sécurité et de diminution des nuisances, les populations locales désiraient que soit dévié le fort trafic de poids lourds, des villages traversés par la Nationale.

Les aspects environnementaux de l'opération étudiée

Une première analyse des enjeux environnementaux de l'ensemble du programme a été réalisée sur la base des études d'environnement et en particulier en se basant sur l'étude d'impact [CETE, 1993] :

Le milieu environnemental de la RN7 - RN82 est un milieu principalement rural (à part autour de l'agglomération roannaise). Le paysage est essentiellement bocager avec une alternance de reliefs et de terrains plats. On note aussi une forte présence de l'eau (zones humides, étangs, cours d'eau). On relève essentiellement les points les plus sensibles suivants [Gentils, 2003] :

- Milieu aquatique : des cours d'eau de bonne qualité piscicole susceptibles d'être perturbés par le projet.
- Faune et flore : la route traverse le Grand Val, dans le périmètre d'une ZNIEFF de type I (Zone Nationale d'Intérêt Ecologique, Faunistique et Floristique à caractère local). Cette zone n'avait jamais fait l'objet d'une occupation humaine, et présente un caractère favorable à la présence d'espèces protégées.
- Paysage : le paysage dans son ensemble est bien typé et plutôt sensible,
- Patrimoine : des sites gallo-romains (vicus d'Ariolica) et des châteaux (Chateumorand, La Chamary) sont présents tout au long du tracé. En effet, cet axe a été fréquenté de longue date (ancienne route de poste au XV^e siècle) afin de connecter Paris à Lyon et à la Méditerranée.
- Milieu humain : la zone est essentiellement agricole (sauf l'agglomération roannaise) ; des problèmes peuvent donc apparaître lors du réaménagement foncier (s'il y a remembrement par exemple). Sur le plan de l'aménagement du territoire, le point le plus sensible semble être la zone des Baraques et des Tuileries, au nord de Roanne : il s'agit d'une zone périurbaine, entre zone agricole et zone d'activités, qui risque d'être profondément modifiée suite à l'aménagement routier.

La DDE de la Loire a voulu que ses projets s'inscrivent dans une démarche d'amélioration continue en réponse aux enjeux environnementaux. Elle s'est orientée, courant 2003, vers la mise en place d'un « système de management environnemental » type ISO 14001 sur les chantiers d'aménagement de la RN7 et de la RN82 entre St Martin d'Estreaux et Balbigny, afin que ses interventions « études et travaux neufs » maîtrisent mieux les enjeux environnementaux et assurent une bonne communication sur le thème de l'environnement

⁸⁸ <http://www.roanne7.net> (consulté en 2005)

auprès des différents intervenants de la DDE, de ses partenaires, et du grand public. Fin août 2006⁸⁹, elle a obtenu le certificat ISO14001 sanctionnant la mise en place de ce système de management environnemental (SME) conforme à la norme européenne NF EN ISO 14001.

Le périmètre retenu par la certification comprend précisément :

- d'une part, les travaux de construction de la déviation de la route nationale n°7 (RN7) évitant les agglomérations de la Pacaudière et Changy et celle contournant l'agglomération « des Tuileries » et du lieu-dit « Les Baraques » sur les communes de Mably et St Romain la Motte ;
- d'autre part, l'étude de projet et les travaux de construction de la section de route nationale RN82 reliant la déviation de Neulise au réseau autoroutier A89-A72 sur la commune de Balbigny.

1.2.2 L'opération prise en compte dans l'étude de calcul d'empreinte écologique

L'opération de la déviation de Vendranges (figures 38 et 39) se déroulait simultanément à ce travail de thèse. En effet, nous avons pu l'utiliser comme terrain d'expérimentation pour la méthode développée dans ce mémoire (visite de terrain et recueil de données auprès des agents et employés). L'ensemble du travail sur ce tronçon a duré environ trois années, de 2004 à 2007.



Figure 39 : Déviation de Vendranges

L'emprise de ce chantier est d'environ 50 hectares. C'est une opération qui s'étend sur 8 Km, à grande circulation.

C'est un chantier qui était déjà bien avancé au début de la réflexion sur la mise en place du système de management environnemental. Son analyse environnementale a été réalisée par le bureau d'étude CESAME. Le tableau 24 résume les aspects environnementaux qui sont apparus comme les plus significatifs pour l'analyse environnementale de ce chantier [Gondran, 2004].

⁸⁹ http://roanne7.net/article.php3?id_article=295

Phase du chantier	Aspect environnemental	Principaux impacts environnementaux
Travaux préparatoires	Ouverture de pistes	Destruction de la flore, faune et des sols
	Bûcheronnage	Destruction de la flore, faune et des sols
	Modification de cours d'eau	Dégradation de la qualité des eaux Dégradation des habitats et espèces piscicoles
	Décapage de la terre végétale	Destruction de la faune et flore; Erosion des sols décapés
Toutes phases	Stockage de la terre végétale	Dégradation de la qualité
	Ruissellement d'eau sur les pistes temporaires et plate-forme	Débit et augmentation des MES dans les cours d'eau
	Ravitaillement en carburant des engins	Risque de pollution des sols et eaux par hydrocarbures
	Production de déchets dangereux (batteries d'engins, huiles usagées, etc)	Risques de pollution des sols et eaux
Toutes phases / Situations d'urgence	Accident d'engin	Risque de rejets / fuites d'hydrocarbures
	Renversement d'engin	Risque de rejets / fuites d'hydrocarbures
Réalisation des ouvrages d'art	Lavage des engins, toupies, pompes à béton	Pollution chimique par ruissellement, colmatage du fond du lit par laitance ciment
Terrassement	Production de déblais	Production de matériaux impropres
	Stockage des déblais	Consommation d'espace Impact paysager
	Traitement des sols à la chaux	Consommation de matières premières Augmentation du pH des cours d'eau et sols
Chaussée	Centrale d'enrobés	Risques de pollution des eaux de surface et des sols
Finitions	Verdissement paysager	Plus ou moins bonne revégétalisation (espèces plus ou moins adaptées aux conditions, qualité, de la terre végétale) Risque d'eutrophisation si utilisation excessive d'engrais
	Génie écologique	Succès plus ou moins bon, dépendant des conditions climatiques et de la programmation de l'opération

Tableau 24: Synthèse des différents aspects et impacts environnementaux apparus comme significatifs sur l'opération de Vendranges [Gondran, 2004]

Notons que notre étude ne prend pas en compte certains aspects ayant pourtant un impact écologique non négligeable comme, par exemple, le remembrement.

1.2.3 Caractéristiques des grands travaux de construction du chantier de Vendranges

Durant les travaux de construction de ce chantier, nous avons pu identifier sept grandes étapes:

- Identification et matérialisation des emprises : Cette étape fait l'objet d'une procédure d'acceptation du projet par les différents acteurs. Ce sont toutes les étapes préalables à la

construction du chantier : une enquête parcellaire, une vérification de la bonne application de la loi sur l'eau, l'acquisition des terrains sur lesquels se tiendra le chantier, le remembrement agricole ainsi que le piquetage général.

- La libération des emprises : c'est l'étape est l'étape des travaux préparatoires au chantier. Elle est constituée par le déboisement et le défrichage des sols, le déplacement de tous les réseaux existant aux abords du futur chantier (communication, énergie et déplacement des réseaux d'eau potable, de collecte d'eaux usées et pluviales), le rétablissement des accès et dessertes, le déplacement des cours d'eaux (dans le cas du chantier de Vendranges, deux cours d'eau ont été déplacés tout en respectant la faune et la flore) ainsi que d'éventuelles fouilles archéologiques.

- La construction d'ouvrages d'art (figure 40) : Cette phase est le début proprement dit du chantier. Les différents types d'ouvrages sont construits : les ouvrages hydrauliques comme les bassins de rétention ou la pose des différentes canalisations (ce qui représente environ 13 km de tuyaux et 300 regards de visite pour le chantier de Vendranges), les passages à faune (au nombre de trois) ainsi que les passages inférieurs et la réalisation de 3 murs de soutènement.



Figure 40 : Exemples de travaux de construction d'ouvrages d'art

- Les terrassements généraux (figure 41): Cette phase est la plus importante du chantier de Vendranges. Les terrassements sont réalisés afin d'assurer l'assise de la future chaussée. Ces terrassements consistent en des mouvements de terrain effectués à l'aide d'une quarantaine d'engins et d'explosifs pour les parties les plus dures de la roche. On compte environ 1,8 millions de m³ de remblais.

C'est également à ce moment que sont mis en place les bassins d'assainissement pluvial et les bassins de rétention pour les eaux d'orages.

Une fois ces principaux travaux de terrassements terminés, on passe à la mise en œuvre d'une couche de matériaux drainant pour assurer une stabilité parfaite de l'assise de la chaussée (ce drain empêche la charge hydraulique de devenir trop importante ce qui pourrait soulever la chaussée). Elle est constituée d'environ 75000 m³ de matériaux drainant. Ensuite, une couche de géotextile est appliquée, et c'est à ce moment là qu'une couche de forme (de 0.50 m d'épaisseur) est réalisée en matériaux concassés à partir des roches du site. Cette couche a pour vocation d'assurer une insensibilité au gel. Ceci permet aux matériaux de ne pas gonfler si le sol gèle en profondeur. Une épaisseur de 0,10 m de grave non traité 0/20 est rajoutée pour le réglage de la couche de forme.



Figure 41 : Travaux de terrassements

- La constitution de chaussée: Une fois la couche de forme mise en place, on passe à la phase propre de constitution de la chaussée qui consiste en l'installation de plusieurs couches successives, de différents matériaux (figure 42).



Figure 42 : Travaux de chaussée

Pour le cas du chantier de Vendranges, la chaussée est bitumineuse (la structure n° 1: cf. §. 1.1.2). D'une épaisseur totale de 0,36 m, elle se compose de plusieurs couches en granulat et bitume (figure 43):

- ↪ Une couche de grave bitume 0,14, classe 3, d'une épaisseur de 0,12 m;
 - ↪ Une couche de grave bitume 0,14, classe 3, d'une épaisseur de 0,10 m;
 - ↪ Une couche de grave bitume 0,14, classe 3, d'une épaisseur de 0,09 m;
- Ces trois couches, composées du granulat et bitume, forment ce qu'on appelle la couche d'assise de la chaussée.
- ↪ Et une couche de roulement (enrobé) de béton bitumineux 0,10, classe 3 (composée d'une quantité différente en granulat et bitume), d'une épaisseur de 0,05 m. C'est la couche de surface.

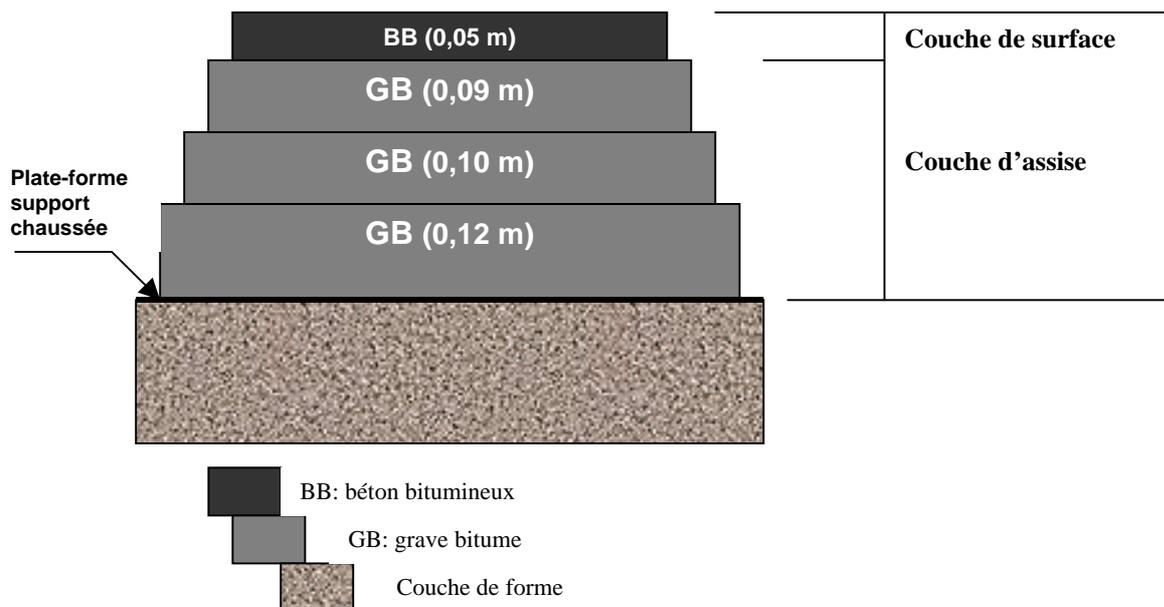


Figure 43 : Structure de la chaussée du chantier de Vendranges

- La mise en place des équipements de la route (signalisation): Cette phase consiste à mettre en place tous les équipements utiles à l'utilisateur. Ceux-ci comprennent les clôtures de l'emprise (c'est-à-dire la limite de propriété autour de la route), afin de mettre en place une protection efficace contre la grande faune, les dispositifs de retenue ainsi que les équipements de sécurité. Ces équipements de sécurité sont de deux sortes : les équipements dynamiques qui portent sur la surveillance du trafic et les prévisions météorologiques ainsi que les équipements statiques comme les signalisations horizontales et verticales, les glissières et le réseau d'appel d'urgence (la glissière de sécurité entraîne une pollution non négligeable des sols par le zinc).
- L'aménagement paysager et les plantations: Cette phase est la phase terminale du chantier. Les talus sont alors réalisés ainsi que les accotements. Pour le chantier de Vendranges, le réaménagement du paysage est fait à partir du potentiel existant dans la géologie actuelle. Une identification des grandes structures formant le sous-sol a été faite afin de définir les géométries propres de stabilité que permet ce sol. Ceci afin d'avoir une parfaite greffe de cet ouvrage routier dans la nature.

La géométrie de cette route est décrite sur le schéma suivant : 4 voies de 3,65 mètres de large, deux bandes d'arrêt d'urgence de 2,85 mètres de large et un terre-plein central large de 3 mètres.

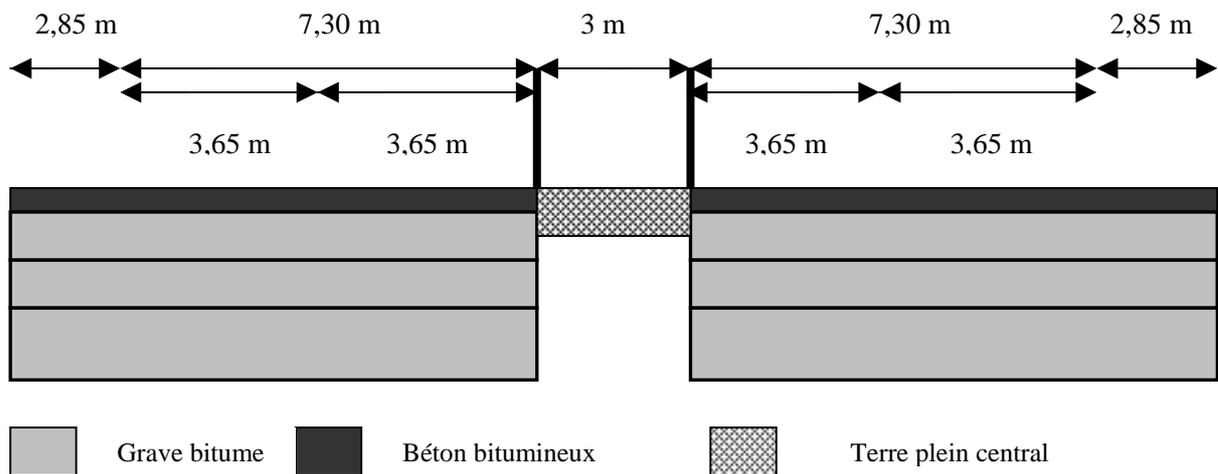


Figure 44 : Géométrie de la mise à 2x2 voies de l'axe RN7 - RN82 (Vendranges)

1.3 Fonction du système étudié

Le système considéré ici est une activité de construction routière. Comme pour une ACV, la fonction du système étudié peut être résumée à travers une unité fonctionnelle, choisie afin de pouvoir comparer les résultats de cette étude avec d'autres. L'unité fonctionnelle choisie ici est la suivante: « **Construire 8 kilomètres de route à 2 x 2 voies** ».

1.4 Frontières du site étudié

L'activité de construction est vue comme une entité qui accapare une certaine surface de terre productive propre à lui fournir les ressources qu'elle consomme, et à assimiler les déchets qu'elle génère et qui sont réintroduits dans le milieu naturel :

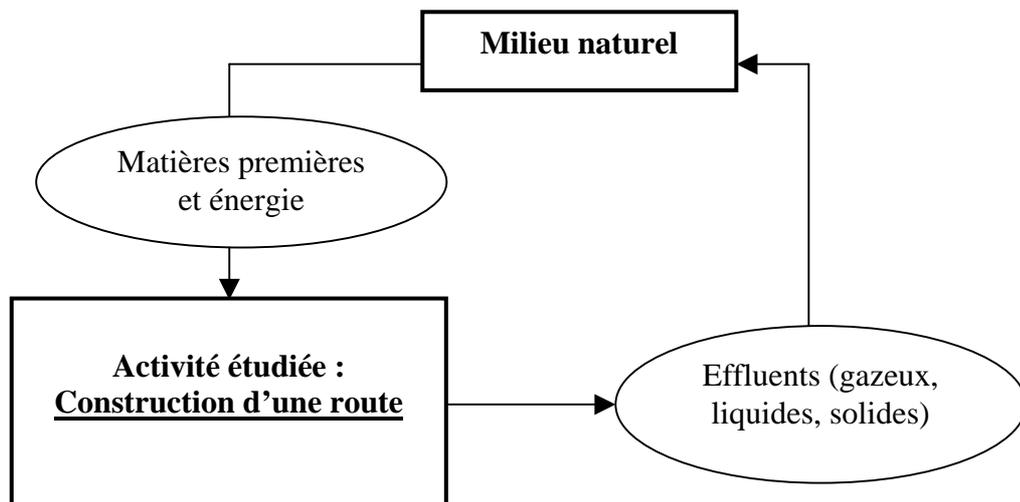


Figure 45 : Le système étudié

Pour calculer l'empreinte écologique du chantier de Vendranges en phase de construction, nous avons défini les frontières de ce système, afin de déterminer les éléments de l'activité sur lesquels le calcul de l'empreinte va s'appliquer, comme l'indique le schéma suivant :

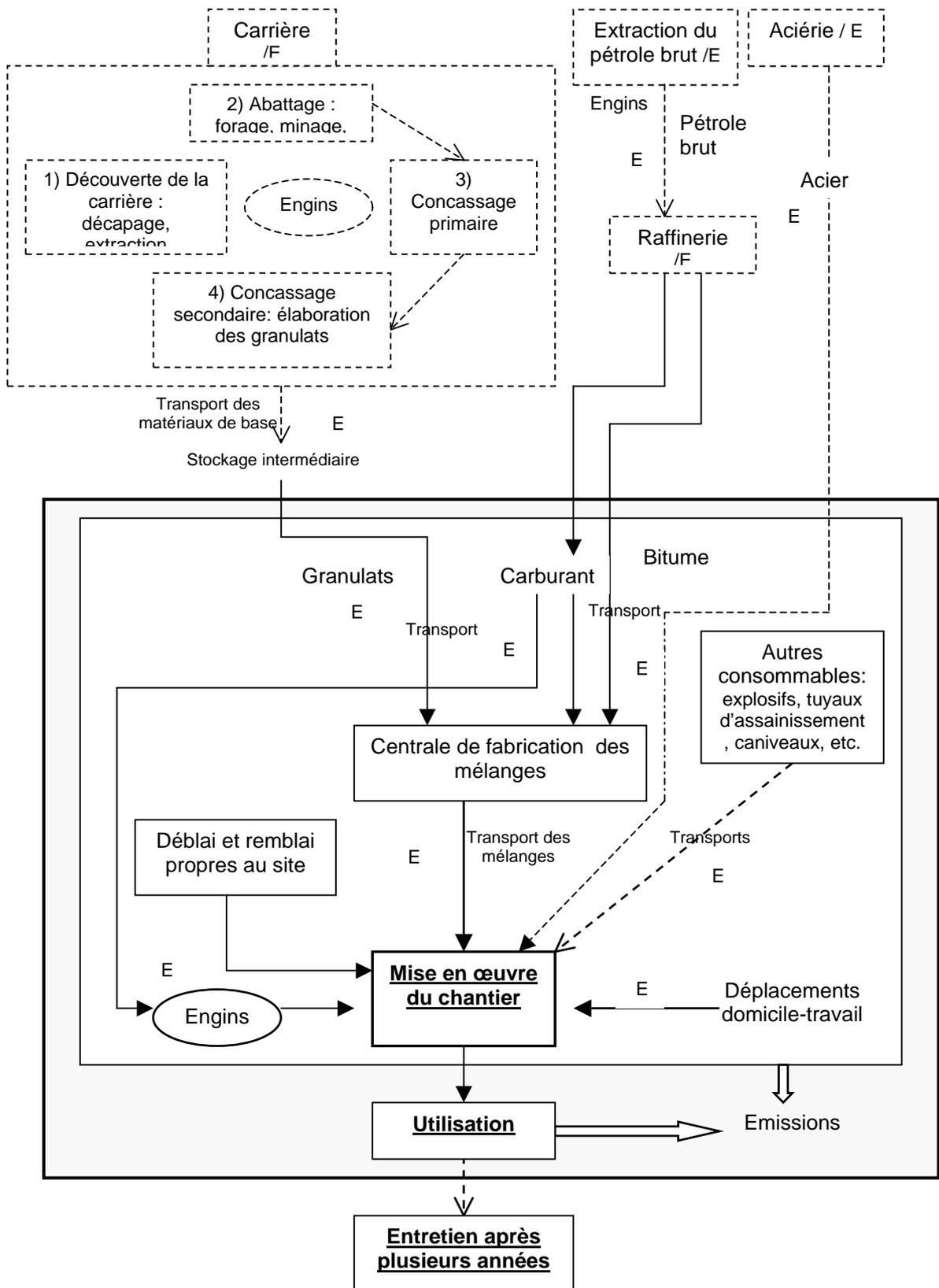


Figure 46 : Frontières du système étudié
(E: Energie)

nous avons dû nous limiter à la phase proprement dite de « la mise en œuvre du chantier », et principalement aux deux grandes phases de « terrassements généraux » et « chaussée » pour une période de construction d'environ deux ans (de 2005 à 2007 : période sur laquelle les données sont étudiées). Ceci est principalement dû au fait de leur forte part de responsabilité dans l'empreinte totale du chantier et au manque d'information sur les différentes

consommations des phases préalables de construction de la route. Notre calcul de l'empreinte écologique est donc une approximation de l'impact sur les ressources naturelles de la construction d'une route sur son environnement. Son objectif est avant tout méthodologique. En effet, les impacts environnementaux d'un tel chantier varient considérablement selon le milieu traversé (plus ou moins de matériaux à déblayer et remblayer, présence ou non de zones humides, etc) et les techniques de construction choisies.

Les principaux éléments pris en compte dans l'analyse sont les surfaces mobilisées pour la construction de la route, les consommables, les infrastructures et les équipements industriels intervenant dans l'activité désirée des terrassements et chaussées. Les empreintes écologiques des déplacements domicile-travail ainsi que le transport de matériaux de construction de base (bitume et granulats) et du carburant (pour l'alimentation des équipements) au cours des travaux de chaussée sont prises en compte.

De plus, une estimation de l'empreinte écologique liée à l'utilisation de ce tronçon routier est faite.

Cependant, par manque de données, certains éléments ne sont pas pris en compte: par exemple, le transport des autres consommables (autres que le carburant et les matériaux de construction) jusqu'au chantier (transport des explosifs, tuyaux d'assainissement, bombes de peinture, etc). De même, les déplacements des employés n'ont pas été pris en compte pour la phase de terrassements. Pour cette phase, on estime également que la totalité des matériaux nécessaires sont concassés à partir des rochers du site même.

2 Inventaire des données de consommation : postes pris en compte pour le calcul d'empreinte écologique

La première condition pour le calcul de l'empreinte est d'avoir une connaissance qualitative et quantitative assez précise des flux entrants (consommations) et des flux sortants (rejets) de notre terrain d'application durant la phase de construction (terrassement et chaussée). Pour l'étude, quelques-unes de ces données sont issues de l'analyse environnementale du chantier, d'autres sont obtenus auprès du service Transports et Infrastructures de la DDE de la Loire chargée de l'opération et des entreprises prestataires de la maîtrise d'œuvre « FOREZIENNE » et « MALET ».

Comme il a déjà été mentionné dans le chapitre 2.2.2 de la partie II, cinq catégories de consommations ont été définies afin de faciliter la collecte des données et détailler l'empreinte écologique:

- 'Consommables' qui remplace la catégorie alimentation;
- 'Infrastructures' qui remplace la catégorie logement;
- 'Transport';
- 'Biens manufacturés';
- 'Services'.

Le tableau 25 présente les différents types de consommation prises en compte dans les cinq catégories considérées, pendant les deux phases de terrassement et chaussée du chantier de Vendranges.

Catégories de consommation	Terrassement	Chaussée
Consommables	-eaux potables de la base de vie (bureaux) -eaux d'arrosage -bouteilles en plastique (bureaux) -bombes de peinture -papiers utilisés dans les bureaux -carburant utilisé pour l'alimentation des engins -béton des tuyaux d'assainissement -eau utilisée pour fabriquer le béton (béton des tuyaux d'assainissement) -explosifs	-eaux potables de la base de vie (bureaux) -eaux consommées par les engins de compactage -eaux d'arrosage -bouteilles en plastique (bureaux) -bombes de peinture -papiers utilisés dans les bureaux des entreprises. -carburant utilisé pour l'alimentation des engins ainsi que pour la centrale d'enrobage -produits dégoudronants -béton des tuyaux d'assainissement (pour finition des premiers travaux) - eau utilisée pour fabriquer le béton (béton des tuyaux d'assainissement et béton pour l'installation des caniveaux à fonte) -béton pour faire des caniveaux à fente -bitume -granulats -cinq gaines en PEhd -FILLER d'apport -caniveaux en PVC
Infrastructures	-emprise de la route -bureaux de type 'Algeco' -stockage et dépôt des matériaux -réseaux : fils et câbles électriques (cuivre, PVC) des bureaux installés provisoirement (de la 'DDE' et des entreprises prestataires, la 'Forezienne' et 'Malet') -électricité	
Transport	Manque de données sur les déplacements domicile/travail des employés et agents et transports des consommables.	-transport de certains matériaux de construction (granulats, bitume) -transport du carburant (pour l'alimentation des engins et la centrale d'enrobage) -transport domicile/travail des employés et agents.
Biens manufacturés	-engins terrassement - piquets d'implantation	-engins chaussée - piquets d'implantation
Services	-téléphone -traitement des eaux usées de la base de vie du chantier	-téléphone -traitement des eaux usées de la base de vie du chantier

Tableau 25 : Catégories de consommation prises en comptes dans le calcul d'empreinte écologique du chantier de Vandranges en phase de construction (terrassement et chaussée).

3 Les différents types de 'sols' à considérer

Nous avons conservé les catégories de sols des calculs pour les Nations comme expliqué au paragraphe 2.2.3 de la deuxième partie:

- Sols énergétiques : Les sols qui absorbent le CO₂ émis directement par l'activité, et indirectement tout au long du cycle de vie des articles de consommation du chantier routier.
- Sols construits (ou dégradés): Pour cette catégorie de sols, dans le cas du chantier, on considère toute l'emprise de la route, les surfaces nécessaires au stockage des déblais / remblais ainsi qu'à l'installation provisoire de la base de vie (bureaux) et la surface éventuellement nécessaire à la production de certains matériaux (exemple du béton).
- Sols forêts : Cette catégorie de sols correspond à la production de bois, liée aux piquets d'implantation utilisés sur le chantier ainsi qu'à la fabrication du papier consommé dans les bureaux du chantier.
- Sols aquatiques : comme mentionné dans le paragraphe 2.2.3 de la deuxième partie, nous avons ajouté cette catégorie qui remplace la catégorie 'espaces marins' afin de tenir compte de l'empreinte écologique associée à la consommation d'eau sur le chantier en phase de construction (terrassement et chaussée). Nous proposons donc pour l'introduction dans la méthode de ce sol les différents types de consommations, en eaux, suivants : eau potable sanitaire de la base de vie du chantier, eau en bouteille, eau non potable pour l'arrosage des pistes et la quantité d'eau, estimée, utilisée pour fabriquer certains matériaux consommés sur le chantier, notamment l'exemple du béton des tuyaux d'assainissement et le béton nécessaire pour l'installation des caniveaux à fonte).
- En ce qui concerne les terres arables et pâturages, pour le cas du chantier routier étudié, la contribution d'empreinte sur ce type de sol est nulle car nous ne prenons pas en compte les consommations de produits agricoles (alimentation des employés).

4 Contribution méthodologique pour l'adaptation au calcul d'empreinte du chantier routier étudié

4.1 En phase de construction : terrassement et chaussée

4.1.1 Empreinte partielle de la catégorie Consommables

- **Carburant**

Calcul d'empreinte en sols énergétiques

L'empreinte écologique tient compte des carburants utilisés sur le chantier pour des travaux de grosses puissances. Environ 2 515 000 litres sont utilisés pour l'alimentation des équipements industriels utilisés sur le chantier en phase de construction (travaux de terrassements et chaussée pour 8 km). Soit 314 375 litres /km de tronçon.

Les deux méthodes de calcul d'empreinte due aux consommations énergétiques (bilan énergétique et bilan carbone) peuvent être appliquées directement pour le calcul d'empreinte du carburant.

Pour le cas de notre terrain d'application, nous rappelons que nous retenons le calcul d'empreinte à partir des facteurs d'émission fournis par la méthode bilan carbone® de l'ADEME⁹⁰. C'est cette méthode que nous conservons pour tous nos calculs d'empreintes sur sols énergétiques.

Comme expliqué au paragraphe 3.1 de la deuxième partie, la quantité du carburant consommée est traduite à partir de l'équation 3 (cf.§. 2.2.4. Partie II).

En prenant en considération le ratio déjà calculé, de 0,6 hag/t de carburant, nous obtenons une empreinte sur sols énergétiques de 1283 hag pour 2138 tonnes (2 515 000 litres) de carburant utilisé sur le chantier routier de Vendranges en phase de construction (terrassement et chaussée).

⁹⁰ cf.§. 2.2.4 « Méthode bilan carbone® ».

- **Explosifs**

Environ 200 tonnes d'explosifs ont été utilisées sur le chantier en phase de construction (les émulsions encartouchées sont les plus utilisées sur les chantiers des travaux publics⁹¹).

En revanche, nous n'avons pas pris en compte cette quantité dans le calcul d'empreinte totale par manque de coefficients de transfert, ceci s'explique par l'inaccessibilité aux fiches techniques de ce genre de produits.

- **Matériaux de construction : béton, bitume, granulats et filler d'apport**

Calcul d'empreinte en sols énergétiques

La construction du chantier de Vendranges a nécessité l'introduction de quantités importantes de différents matériaux de construction :

- le béton contenu dans les tuyaux d'assainissement installés au cours des grands travaux de terrassements ainsi que pour l'installation des caniveaux hydrauliques nécessaires pour l'évacuation des eaux de ruissellement (pendant la phase chaussée);
- le bitume (considéré comme liant hydrocarboné)⁹² et granulats nécessaires pour les travaux de chaussée : Industriellement les bitumes sont fabriqués à partir de pétrole brut d'où l'on extrait, au préalable, les fractions les plus légères. De la partie restante, constituée par des huiles visqueuses, on sépare le bitume avec la dureté désirée.
- le filler d'apport qui est employé comme liant hydraulique pour la chaussée.

Environ 162 117 tonnes de granulats, 7 883 tonnes de bitume et 1 500 tonnes de filler d'apport ont été utilisées sur le chantier de Vendranges (données collectées). Concernant la quantité du béton des tuyaux d'assainissement installés, des tonnages ont pu être estimés en se basant sur les caractéristiques, des différents types de tuyaux utilisés, mentionnées dans le tableau 26. La quantité du béton utilisée (donnée collectée) pendant la phase chaussée pour l'installation des caniveaux a été rajoutée. Soit donc un total d'environ 5 168 tonnes de béton.

Béton des tuyaux d'assainissement (donnée estimée)				
Types	Diamètre (m)	Béton (kg/m)	Total des mètres utilisés sur le chantier (m)	Quantité totale (t)
1	0,30	148	3300	4641
2	0,40	200	3260	
3	0,50	280	2646	
4	0,60	400	1000	
5	0,80	590	2000	
6	1	1000	1180	
Béton pour installation des caniveaux (donnée collectée)				527

Tableau 26 : Tonnages déduits du béton utilisé sur le chantier (tuyaux d'assainissement et pour installation des caniveaux). Données BMR selon « FOREZIENNE » et « MALET »

De plus, d'autres tonnages estimés (utilisés indirectement sur le chantier) en matière de granulat (2274 tonnes), ciment (791 tonnes) et sable (1809 tonnes) nécessaires pour produire les 5168 tonnes de béton sont pris en compte dans l'empreinte totale (en prenant en considération les données citées au paragraphe 3.3.2 de la deuxième partie: une tonne de béton⁹³ nécessite 0,44 tonnes de granulats, 0,153 tonnes de ciment et 0,35 tonnes de sable).

⁹¹ <http://www.nobel-explosifs.com>

⁹² www.bitume.info

⁹³ www.creargos.com

Les empreintes partielles sur sols énergétiques de ces différents matériaux sont donc obtenues par la méthode bilan carbone® (équation 3)⁹⁴ en considérant respectivement les valeurs de facteurs d'émission de 0,055 tonnes équivalent carbone par tonne de béton [ADEME, 2007], 0,004 tonnes équivalent carbone par tonne de grave non traitée (pour le granulats) [ADEME, 2007], 0,095 tonnes équivalent carbone par tonne de bitume⁹⁵ [Chappat et Bilal, 2003], 0,006 tonnes équivalent carbone par tonne de liant grave hydraulique (pour le filler d'apport) [ADEME, 2007] et 0,24 tonnes équivalent carbone par tonne de ciment [ADEME, 2007]:

- 155 hag pour 5168 tonnes de béton utilisées sur le chantier en phase de construction.
- 411 hag pour 164391 tonnes de granulats (dont 162117 tonnes sont utilisées directement sur le chantier en phase de construction et 2274 tonnes (estimées) sont incorporées dans les 5168 tonnes de béton).
- 473 hag pour 7883 tonnes de bitume utilisées sur le chantier en phase de construction.
- 6 hag pour 1500 tonnes de filler d'apport utilisées sur le chantier en phase de construction.
- 119 hag pour 791 tonnes de ciment qui sont incorporés dans les 5168 tonnes de béton.
- Etant donné que ne nous disposons pas du facteur d'émission en tonne équivalent carbone par tonne de sable, nous n'avons pas calculé l'empreinte partielle de la quantité estimée du sable utilisé indirectement sur le chantier (incorporé dans les 5168 tonnes du béton).

Matériaux	Tonnages totaux (t)	Facteurs d'émissions (t équ. C/t)	EE Sols énergétiques (hag par la quantité totale utilisée sur le chantier)
Béton	5168	0,055	155
Granulats	164391	0,004	411
Bitume	7883	0,095	473
Filler d'apport	1500	0,006	6
Ciment (incorporé dans le béton consommé)	791	0,24	119
Sable (incorporé dans le béton consommé)	1809	?	?

Tableau 27: Empreintes écologiques partielles des différents tonnages de matériaux utilisés sur le chantier

Remarque:

* Pour le filler d'apport : En général ce terme est employé pour désigner des fines destinées à des usages particuliers, notamment lorsqu'il s'agit de constituants de certains liants hydrauliques. Pour cela, nous avons utilisé le facteur d'émission grave liant hydraulique.

Calcul d'empreinte en sols dégradés

Par manque d'informations disponibles sur les emprises et productions des carrières, nous prenons en considération la valeur d'empreinte de 0,0007 hag/t de béton, estimée sur la base de données bibliographiques citées au paragraphe 3.3.2 de la deuxième partie : le calcul d'empreinte sur sols dégradés du béton utilisé sur le chantier routier en phase de construction peut être obtenu en multipliant cette valeur par le tonnage total du béton. On obtient donc une empreinte écologique d'environ 4 hag pour 5168 tonnes de béton. Cette empreinte qui est très peu significative par rapport à l'appropriation de sols énergétiques, ne prend pas en compte l'impact sur le milieu naturel, il prend seulement la « consommation de l'espace ».

Il est difficile d'accéder à des éléments précis concernant les autres matériaux de construction. Nous conservons donc, par hypothèse, la valeur d'empreinte sur sols dégradés de 0,0007 hag/t

⁹⁴ cf.§. 2.2.4. Partie II

⁹⁵ Le bitume est un liant hydrocarboné [ADEME , 2007]

pour estimer les empreintes des tonnages utilisés en matière de granulat, utilisé directement sur le chantier, et filler d'apport:

- 113,5 hag pour les 162117 tonnes de granulat qui sont utilisées directement sur le chantier.
- 1 hag pour 1500 tonnes de filler d'apport utilisé sur le chantier.

Il est nécessaire de préciser que les empreintes, sur sols dégradés, des différents tonnages estimés de granulats (2274 t), de ciment (791 t) ainsi que de sable (1809 t) incorporés dans les 5168 tonnes de béton, sont prises en compte dans le calcul d'empreinte du béton ci-dessus.

• Caniveaux à grille PVC et gaines en PEhd

Calcul d'empreinte en sols énergétiques

Pendant la phase de chaussée, des caniveaux hydrauliques à grille PVC pour l'évacuation des eaux de ruissellement ainsi que des gaines en PEhd⁹⁶ ont été installées. Des tonnages ont pu être estimés liés au nombre de ces produits utilisés: Soit 7 tonnes de PVC (grilles des caniveaux) et 4 tonnes de PEhd (gaines).

Ces gaines servent principalement à :

- prévoir la possibilité de passer l'électricité tout le long du chantier;
- prévoir la possibilité d'offrir des fourreaux pour passage du haut débit pour des opérateurs;
- et à installer une fibre optique dédiée aux bornes d'appel d'urgence posées sur le tracé, et utiles à de futurs équipements.

En appliquant l'équation 3, les tonnages estimés sont traduits directement en empreintes sur sols énergétiques, en considérant respectivement les valeurs de facteurs d'émission de 0,51 tonnes équivalent carbone par tonne de PVC et 0,50 tonnes équivalent carbone par tonne de PEhd [ADEME, 2007]:

On obtient à la suite des empreintes de 2 hag par 7 tonnes de PVC et 1 hag par 4 tonnes de PEhd.

• Bombes de peinture

Calcul d'empreinte en sols énergétiques

Le calcul de l'empreinte sur les sols énergétiques des bombes de peinture se base sur une estimation des quantités d'aluminium et de peinture incorporées dans 2000 bombes utilisées sur le chantier en phase de construction. Soit environ 800 kg de peinture et 200 kg d'aluminium. Par la suite, la quantité estimée d'aluminium des bombes, peut être traduite directement en surface simple de sols énergétiques en considérant la valeur de facteur d'émission de 2,89 tonnes équivalent carbone par tonne d'aluminium [ADEME, 2007]. Le résultat est ensuite multiplié par les facteurs d'équivalence et rendement (équation 3).

Par manque de facteur d'émission propre à la peinture, on n'a pas pu calculer l'empreinte partielle de celle-ci par la méthode bilan carbone®. Nous proposons donc de calculer son empreinte en adoptant la méthode bilan énergétique (équation 2) en prenant en compte la valeur d'énergie incorporée spécifique de 11 GJ par tonne pour la peinture (Gabi4)⁹⁷ :

Soit donc une empreinte d'environ 0,4 hag par 200 kg d'aluminium et une empreinte de 0,1 hag par 800 kg de peinture.

⁹⁶ polyéthylène à haute densité

⁹⁷ Logiciel d'ACV

• Papier

Calcul d'empreinte en sols énergétiques

Par estimation, nous disposons du tonnage du papier utilisé dans les bureaux installés provisoirement sur le chantier durant les phases de terrassement et chaussée : environ 1,41 tonnes. Il suffit alors de convertir cette quantité en empreinte sur sols énergétiques, par application de l'équation 3, en considérant la valeur de facteur d'émission de 0,55 tonnes équivalent carbone par tonne de papier [ADEME, 2007]: Soit 0,5 hag par 1,41 tonnes.

Calcul d'empreinte en sols forêts

Pour le calcul d'empreinte écologique sur sols forêts du papier consommé dans les bureaux, au cours de la construction du chantier de Vandranges, nous retenons l'hypothèse (cf. 3.2.2. partie II) qui estime que, ce papier est produit à partir de bois issu de forêts françaises.

Et par la suite, nous retenons la valeur d'empreinte de 1,58 hag / t papier, que nous avons obtenu en appliquant les équations 5 et 5-a (cf. §. 3.2.2. Partie II).

Comme il a été déjà mentionné, cette empreinte ne prend pas en compte les conditions d'exploitation des forêts dans lesquelles pousse le bois nécessaire au papier.

Il suffit de multiplier cette valeur par 1,41 tonnes de papier consommées. On obtient ensuite une empreinte de 2 hag.

• Eaux potables

Les types de consommations en eaux potables considérés sont : l'eau sanitaire de la base de vie (bureaux), la quantité d'eau, estimée, utilisée pour fabriquer les tonnages du béton⁹⁸ (incorporés dans les tuyaux d'assainissement et nécessaires pour l'installation des caniveaux à fonte) ainsi que les eaux utilisées pour l'alimentation des engins de compactage.

Calcul d'empreinte en sols énergétiques

Etant donné que nous ne disposons pas actuellement des données sur les émissions complètes équivalentes en carbone par m³ d'eau potable traitée, nous proposons de calculer l'empreinte écologique de ces eaux par la méthode 'bilan énergétique' (équation 2). Pour cela, nous adoptons les données que nous avons déjà mentionnées au chapitre 3.4.2 de la deuxième partie (l'énergie incorporée de 10 MJ/m³ et le facteur de séquestration du carbone pour le pétrole de 0,14 m²/MJ). On obtient à la suite une empreinte d'environ 13 hag pour 106 389 m³ d'eau potable consommée.

En ce qui concerne les eaux minérales en bouteille (18000 bouteilles de 1,5 litres, soit 27000 litres d'eau minérale consommée pendant les travaux de terrassements et chaussée), on calcule l'empreinte écologique des bouteilles en plastique vu que nous ne disposons pas suffisamment d'information sur les coûts énergétiques de la production d'eau minérale.

Calcul d'empreinte en sols construits (dégradés)

Nous avons voulu calculer l'empreinte partielle en sols construits (ou dégradés) des eaux potables consommées sur le chantier routier en prenant en considération la surface physique de la station d'alimentation en eau potable de la commune (cf. chapitre 3.4.3, partie II). Cependant, nous n'avons pas pu accéder aux données précises de cette station!

⁹⁸ Quantité d'eau calculée sur la base des données issues de la bibliographie : 230 litres d'eau sont nécessaires pour fabriquer 2,3 tonnes de béton (www.creargos.com consulté le 24 Juin 2006).

- **Eaux non potables utilisées pour l'arrosage des pistes**

Calcul d'empreinte en sols aquatiques

Au cours de la construction de la route de Vendranges, le sol est humidifié pour éviter les poussières et bien compacter le sol d'une manière optimale. Comme il a été déjà signalé au chapitre 3.4.1 de la deuxième partie, la construction routière nécessite l'arrosage des pistes. Cela a donc nécessité un important pompage, qui était réalisé dans le Gand (un petit cours d'eau à proximité du chantier). Environ 35 000 m³ d'eau ont été prélevés pendant la durée du terrassement et 8600 m³ au cours de la phase chaussée.

Pour le calcul d'empreinte en sols aquatiques des eaux d'arrosage, nous appliquons la méthode proposée par l'équation 7 dans le chapitre 2.2.4 de la deuxième partie: le volume total d'eau pompé est divisé par la profondeur de la rivière qui se trouve à proximité du chantier de Vendranges (1,5 mètres environ) pour obtenir une surface physique. Cette dernière est ensuite multipliée par les deux facteurs d'équivalence et de rendement pour avoir une surface globale:

Les 43600 m³ d'eaux non potables utilisées pour l'arrosage des pistes présentent ainsi une empreinte d'environ 1 hag.

- **Bouteilles en plastique (bureaux)**

Calcul d'empreinte en sols énergétiques

Environ 18000 bouteilles de 1,5 litres d'eau ont été consommées (27 000 litres d'eau minérale) dans les bureaux pendant la construction du chantier. Le calcul de l'empreinte sur les sols énergétiques se base sur une estimation des kilogrammes de plastique incorporé dans ces bouteilles : Soit environ 540 Kg de plastique (la masse de plastique par bouteille est d'environ 0,03 Kg).

L'empreinte partielle en sols énergétique, des bouteilles en plastique, est donc calculée à partir de l'équation 3, en considérant la valeur de facteur d'émission suivante [ADEME, 2007] : 1,23 tonnes équivalent carbone par tonne de plastique qualité bouteille.

Soit 0,4 hag par 0,54 tonnes de plastique.

4.1.2 Empreinte partielle de la catégorie Infrastructures

- **L'emprise de la route / stockage des matériaux de construction/ surface occupée par la base de vie (bureaux)**

Calcul d'empreinte en sols construits (dégradés)

Dans le cas de ce chantier, on considère toute l'emprise de la route qui est d'environ 50 hectares et à laquelle se rajoute une surface de 160 m² environ, pour l'installation provisoire des bureaux type 'Algeco' durant la période de construction de la route, ainsi qu'une surface de 2,2 hectares nécessaire au stockage des matériaux de construction pendant les phases de terrassements et chaussées. Cette surface physique d'environ 52 hectares est convertie en surface globale au moyen des facteurs de rendement et d'équivalence de sols dégradés (cf. §. 2.2.4. Equation 4-a). Soit 267 hag sur sols dégradés.

- **Bureaux installés provisoirement sur le chantier en phase de construction**

Calcul d'empreinte en sols énergétiques

Les bureaux installés provisoirement sur le chantier (160 m²) en phase de construction sont des bureaux de type 'Algeco' principalement fabriqués en panneaux de bois CTBH⁹⁹ et en métal. Le calcul de l'empreinte sur les sols énergétiques de ces bureaux se base donc sur une estimation des empreintes des structures métalliques ainsi que les empreintes des structures en bois incorporées dans ces bureaux.

Par hypothèse, Les structures métalliques pour la construction des bureaux peuvent être traduites directement en surface simple de sols énergétiques à partir de l'équation 3, en considérant la valeur de facteur d'émission de 0,04 tonnes équivalent carbone par m² de métal [ADEME, 2007] : soit une empreinte sur sols énergétiques d'environ 4 hag.

En ce qui concerne les structures en bois, environ 555 m² a été estimé (en prenant en compte les cloisons (78 m), la hauteur (2,5 m), le sol et le plafond (160*2 m²) en CTBH, des bureaux).

En considérant que l'épaisseur des murs des bâtiments est d'environ 5 cm en bois CTBH, nous obtenons par hypothèse un volume d'environ 28 m³ (555 m² * 0,05 m). Cette valeur est ensuite convertie en empreinte en la multipliant par la masse volumique du bois¹⁰⁰ (650 kg/m³) et en faisant intervenir le facteur d'émission de 0,50 tonnes équivalent carbone par tonne de bois [ADEME, 2007], comme c'est indiqué dans l'équation 3. Soit une empreinte sur sols énergétiques d'environ 6 hag.

L'empreinte écologique partielle, sur sols énergétiques, des bureaux installés au cours de la construction de la route est d'environ 10 hag.

• Réseau: Câbles électriques

Calcul d'empreinte en sols énergétiques

Environ 500 mètres de câbles électriques ont été installés pour l'alimentation en énergie électrique pour les bureaux, pendant les deux phases de terrassement et chaussée.

Le calcul de l'empreinte sur les sols énergétiques se base sur une estimation des tonnages de cuivre et de PVC incorporés dans ces câbles électriques.

On considère que ces câbles sont constitués d'une âme en cuivre de 6 mm de diamètre et d'une gaine en PVC de 2 mm d'épaisseur. Les volumes de matériaux ainsi utilisés sont convertis en tonnage en considérant respectivement les masses volumiques du cuivre¹⁰¹ et PVC¹⁰² : 8,9 t/ m³ et 1,4 t/ m³.

Les données estimées de tonnage en PVC et en cuivre de ces câbles électriques, peuvent être traduites directement en surface simple de sols énergétiques, à partir de l'équation 3, en considérant les valeurs des facteurs d'émissions suivantes [ADEME, 2007]: 0,8 tonnes équivalent carbone par tonne de cuivre et 0,51 tonnes équivalent carbone par tonne de PVC. Les résultats sont ensuite multipliés par les deux facteurs de rendement et d'équivalence.

L'empreinte écologique partielle, sur sols énergétiques, des câbles électriques des bureaux installés au cours de la construction du chantier de Vendranges est d'environ 0,03 hag.

• Electricité

Calcul d'empreinte en sols énergétiques

⁹⁹ panneaux de particules agglomérées de bois

¹⁰⁰ www.bois-construction.org

¹⁰¹ <http://www.lenntech.com>

¹⁰² <http://www.lenntech.com>

Environ $15 \cdot 10^4$ kWh (donnée collectée des factures d'électricité) sont consommés dans les bureaux installés provisoirement sur le chantier de Vendranges au cours de construction. Avec une contribution de 88 % par les énergies nucléaire et thermique et 11 % par l'hydraulique, nous considérons, par hypothèse, qu'environ 132 000 kWh consommés sont d'origine nucléaire et thermique et 17 000 kWh sont d'origine hydraulique.

En prenant en considération la valeur d'empreinte de $2 \cdot 10^{-5}$ hag par kWh, obtenue par la méthode bilan carbone® (comme expliqué dans le chapitre 3.5.1. partie II), on obtient donc une empreinte partielle d'environ 8 hag par 132 000 kWh.

Calcul d'empreinte en sols construits (dégradés)

Les 17 000 kWh consommés, supposés être d'origine hydraulique, sont traduits en empreinte écologique en prenant en compte l'empreinte de l'hydroélectricité sur sols dégradés, calculée au chapitre 3.5.2 de la deuxième partie de ce mémoire, qui est d'environ $9 \cdot 10^{-6}$ hag/KWh : Soit donc 0,15 hag pour 17 000 kWh.

4.1.3 Empreinte partielle de la catégorie Transport

Calcul d'empreinte en sols énergétiques

Comme il a été déjà mentionné au 'chapitre 3.6' de la deuxième partie, pour cette catégorie devraient être pris en compte les transports domicile/travail des employés des entreprises prestataires et agents DDE affectés au chantier, les missions des différentes personnes travaillant sur le chantier et les trajets générés pour apporter les différents consommables, biens et équipements de leur lieu de production jusqu'au chantier (exemples des trajets parcourus, pour transporter les matériaux de construction, illustrés par la figure 46). Cependant, ces données sont souvent difficiles à obtenir. Nous n'avons pu disposer de données sur ces différents transports que pour la phase chaussée (les transports domicile/travail des employés et agents ($66 \cdot 10^4$ km) et les trajets parcourus pour apporter certains matériaux de construction (granulats et bitume) et le carburant utilisé pour l'alimentation des engins et de la centrale d'enrobage ($18,6 \cdot 10^4$ km)). Nous ne les prendrons donc pas en compte dans notre calcul d'empreinte de la phase de terrassements. Mais dans l'optique du suivi systématique des données en vue d'un calcul complet d'empreinte écologique, ces données devraient être évaluées.

Après estimation du nombre de kilomètres parcourus pour les transports pris en compte, comme c'est expliqué ci-dessus, le raisonnement défini par l'équation 3 est appliqué pour le calcul d'empreinte partielle 'sols énergétiques' de cette catégorie, en prenant en considération le facteur d'émission « transport domicile/travail en voiture » de $6,9 \cdot 10^{-5}$ t équ. C /km et le facteur d'émission « transport de marchandises – grands camions de 21,1 t à 32,6 t » de $3,7 \cdot 10^{-4}$ t équ. C /km [ADEME, 2007].

L'empreinte écologique, sur sols énergétiques, des différents trajets considérés (définis ci-dessus) est d'environ 72 hag.

4.1.4 Empreinte partielle de la catégorie 'Biens manufacturés'

• Engins utilisés sur le chantier

Calcul d'empreinte en sols énergétiques

La construction du chantier de Vendranges a nécessité la mise en œuvre d'équipements variés. Des tonnages ont pu être obtenus, grâce aux données des constructeurs, concernant les différents engins utilisés sur le chantier pendant les phases de terrassement et chaussée (tableau 28). La durée de vie moyenne choisie, de ces équipements, est d'environ 15 ans. Nous considérons aussi que chaque engin a été utilisé pendant environ deux années sur le chantier (et que sûrement chaque engin sera utilisé ailleurs après la construction de cette route).

Travaux de terrassement		Travaux de chaussée	
Equipement	Tonnage (t)	Equipement	Tonnage (t)
<i>Pelles</i>			
HITACHI/FIAT	80	Cabine de commande	5,8
Deux CATERPILAR 365 ME	70 *2	Doseur à granulats froids	22,4
LIEBHERR	50	Excréteur à granulats froids	2,1
CATERPILAR 330L	36	Tambour sécheur malaxeur recycleur	67,5
LIEBHERR 942	38	Filtre à manches	38
VOLVO	31	Silo de stockage auto-érectable	49
Deux CATERPILAR 325	29*2	Transporteur de granulats froids	4
<i>Bolldozers</i>			
		Cuve mobile de stockage, capacité 50 000 litres (x 2)	18,3
CATERPILAR D9 L	70	Cuve mobile de stockage, capacité 140 000 litres	30
Deux CATERPILAR D9 R	55*2	Finisseur (F31)	29,2
Trois CATERPILAR D6 R	22*3	Finisseur (F51)	20
CATERPILAR D6 HLGP	20	Camion répandeur 6 x 4 (CR100)	13,11
CATERILAR D5 H	14	Camion 4 x 2 (CT35)	7,233
<i>Tombereau automoteur articulé</i>			
		Camion 6 x 4, gravillonneur grue (CG104)	14,5
Deux VOLVO A 30 6*6	20 *2	Cuve à eau tractée 9 000 litres (CUT02)	2,8
Six VOLVO A 30 6*6	24,5*8	Niveleuse (CD68)	14,724
<i>Tombereau automoteur rigide</i>			
		Niveleuse (G69)	14,724
ouit CATERPILAR 769 D	31*8	Pelle hydraulique à chenille (P157)	31,665
<i>Niveleuse automotrice</i>			
		Compacteur à pneumatiques (RPA22)	19
CATERPILAR 14 G	18	Compacteur à pneumatiques (RPA32)	14
CATERPILAR 14 H	19	Compacteur à pneumatiques (RPA35)	15,63
<i>Chariot de forage</i>			
		Rouleau vibrant tandem (RTV38)	16,08
ATLAS COPCO F 9	18	Rouleau tandem articulé (RTV39)	13,9
<i>Compacteur</i>			
		Rouleau vibrant tandem (RTV42)	16,08
Deux BOMAG BW 219 D2	19,2*2	Compacteur vibrant monocylindre (RV62)	19,22
Deux HAMM 2620 D	18,3*2	Compacteur vibrant monocylindre (RV64)	19,22
<i>Engins sous traitant</i>			
	300		
Total	1578	Total	518,19

Tableau 28 : Différents engins utilisés sur le chantier de Vendranges pendant la construction (Terrassement et chaussée)

Par la méthode bilan carbone®, nous adoptons seulement les facteurs d'émissions des principaux matériaux¹⁰³ incorporés dans un véhicule d'une tonne (0,1 t de plastique, 0,07 t d'aluminium, 0,04 t de verre, 0,5 t d'acier, 0,05 t de caoutchouc, 0,07 t de liquides et 0,17 t d'autres matériaux) [ADEME, 2007]. Ces facteurs peuvent être traduits directement en surface de sols énergétiques pour calculer l'empreinte partielle d'un véhicule d'une tonne (tableau 29). Par la suite, on multiplie le résultat obtenu (l'empreinte d'un véhicule d'une

¹⁰³ Les émissions liées à la fabrication des quantités de matériaux utilisés pour construire un véhicule d'une tonne.

tonne) par le tonnage total des engins utilisés sur le chantier (2096 t) qu'il ne faudra pas oublier de diviser ensuite par la durée de vie moyenne des engins. On obtient une empreinte de 140 hag par 2096 t.

Principaux matériaux	Facteurs d'émissions des matériaux incorporés dans un véhicule d'une tonne (en t équ. C/ tonne de véhicule)	Incertitude sur le facteur ¹⁰⁴ %	Empreintes partielles des matériaux
Plastique	0,065		0,04
Aluminium	0,196		0,12
Verre	0,016		0,01
Acier	0,25		0,15
Caoutchouc	0,03		0,02
Liquides	0,035		0,02
Autres ¹⁰⁵	0,17		0,1
Emissions "hors matériaux" ¹⁰⁶	0,7		0,44
EE d'un véhicule d'une tonne (hag)	1,5	30	1

Tableau 29 : Empreintes partielles des principaux matériaux incorporés dans un véhicule d'une tonne

• Piquets d'implantation

Calcul d'empreinte en sols énergétiques

L'empreinte partielle des piquets d'implantation utilisés sur le site, principalement fabriqués en bois, a été intégrée dans le calcul d'empreinte totale du chantier en phase de construction. Des tonnages d'environ 22 tonnes ont pu être estimés.

Le raisonnement défini par l'équation 3 est appliqué pour le calcul d'empreinte partielle 'sols énergétiques' de ces piquets, en prenant en considération le facteur d'émission du bois, de 0,50 tonnes équivalent carbone par tonne [ADEME, 2007] : soit environ 7 hag par 22 t.

Calcul d'empreinte en sols forêts

Concernant le calcul d'empreinte écologique sur sols forêts des piquets en bois, au cours de la construction du chantier de Vendranges, nous conservons les données (cf. §. 3.2.2. Partie II) qui prennent en compte le rendement des forêts françaises (estimant que ces piquets sont produits à partir de bois issu de forêts françaises, comme c'est le cas du papier).

Et par la suite, nous retenons la valeur d'empreinte de 1,43 hag / t bois, que nous avons obtenu en appliquant les équations 5 et 5-b (cf. §. 3.2.2. Partie II).

Il suffit de multiplier cette valeur par 22 tonnes de bois : l'empreinte écologique des piquets en bois, sur sols énergétiques, est d'environ 31 hag.

4.1.5 Empreinte partielle de la catégorie 'Services'

• Eaux usées de la base de vie du chantier (bureaux)

¹⁰⁴ Selon l'ADEME (2007), l'incertitude sur ce chiffre (1,5 t équ. C/ t) est probablement inférieure à 40 %.

¹⁰⁵ dont électronique, dont la fabrication est très intensive en gaz à effet de serre (bilan carbone®, ADEME).

¹⁰⁶ Selon l'ADEME, ce sont les émissions liées à l'emploi de l'énergie pour l'activité de construction (Charbon, Gaz, produits pétroliers, électricité)

Calcul d'empreinte en sols construits (dégradés)

Comme il a été déjà expliqué au chapitre 3.4.4 de la deuxième partie, nous conservons l'hypothèse qui considère que les eaux usées des bureaux installés provisoirement sur le chantier au cours de la construction, sont traitées en station d'épuration par lagunage, ce qui est la méthode qui se rapproche le plus de l'assimilation par le milieu naturel. Par conséquent, pour calculer l'empreinte écologique en sols construits de ces eaux usées, il suffit de multiplier la valeur d'empreinte d'environ $1,4 \cdot 10^{-4}$ hag/m³ d'eau usée traitée (que nous avons déjà calculé) par les 88 m³ d'eaux usées de la base de vie. Soit donc une empreinte écologique partielle, peu significative, d'environ 0,01 hag par 88 m³ d'eaux usées.

• **Télécommunication**

Calcul d'empreinte en sols énergétiques

Dans le calcul d'empreinte écologique du chantier de Vendranges en phase de construction, nous avons aussi voulu intégrer l'empreinte partielle des communications téléphoniques pendant cette période. Nous avons donc considéré qu'une partie importante des communications étaient passées à partir de téléphones mobiles (soit 60 % des communications), le reste l'étant au moyen de téléphone fixe (40 % des communications). Un total de 20160 euros a pu être estimé (donnée sur factures de télécommunication).

Pour ce calcul, le contenu en gaz à effet de serre de « l'euro » peut être intervenir, en prenant en compte le facteur d'émission en t équ. C/ euro, afin de convertir les euros correspondants à ce type de service (20160 €), en appliquant la méthode 'bilan carbone' présentée par l'équation 3.

Ainsi, l'ADEME précise qu'environ 150 000 € de télécoms correspond à l'émission de 4,4 tonnes équivalent carbone [ADEME, 2007]. Cela peut donner un ratio d'environ $3 \cdot 10^{-5}$ tonnes équivalent carbone par euro.

En prenant en considération ce dernier facteur, on obtient ainsi une empreinte d'environ 0,4 hag par 20160 euros.

4.2 Estimation de l'empreinte écologique liée à la phase 'utilisation' de la route

L'empreinte écologique de la route de Vendranges en phase d'utilisation est liée à l'empreinte écologique des véhicules circulant sur ce même tronçon (de 8 kilomètres de route à 2 x 2 voies). Cependant, ce n'est pas encore évident, actuellement, d'estimer le trafic sur cette nouvelle route.

Ainsi, pour montrer que la phase utilisation d'une route peut être considérée comme un « nouveau périmètre » d'étude pour le calcul d'empreinte écologique, nous proposons d'estimer le trafic sur l'ancienne route. Nous nous sommes basés sur les données de l'année 2005.

Environ une moyenne de 11000 véhicules circulaient par jour (pour les deux sens), dont 20 % sont des poids lourds. Soit donc 8800 voitures particulières par jour et 2200 camions par jour (on estime que ce sont des camions de transport de marchandises, d'une moyenne de 6,1 tonnes à 10,9 tonnes).

Etant donné que ce tronçon s'étend sur 8 km, le raisonnement de l'équation 3 défini au chapitre 2.2.4 (et appliqué aux exemples présentés dans le tableau 17 au chapitre 3.6) de la deuxième partie, peut être appliqué pour calculer l'empreinte 'sols énergétiques' de ces différents transports, en considérant les deux facteurs d'émission suivants:

- le facteur d'émission « transport domicile/travail en voiture » de $6,9 \cdot 10^{-5}$ t équ. C /km;
- le facteur d'émission « transport de marchandises – camions de 6,1 t à 10,9 t » de $2 \cdot 10^{-4}$ t équ. C /km [ADEME, 2007].

Par conséquent, on obtient une empreinte écologique sur sols énergétiques, pour ce scénario, d'environ 5 hag par jour. Soit 1980 hag par an.

5 Présentation des résultats de l'étude de cas

5.1 L'empreinte écologique de la route en phase de construction

Après avoir calculé les empreintes partielles de chaque poste de consommation des deux phases de construction (terrassement et chaussée) du chantier routier étudié, on additionne les différents postes des deux phases pour avoir une empreinte totale pour la durée de construction d'environ deux ans, ou encore pour les 8 kilomètres de route construits (tableau 30). L'empreinte de la route de Vendranges s'élève donc à environ **3126 hag pour la durée de construction. Soit 3126 hag / 8 km de route construits (soit approximativement une empreinte d'environ 400 hag / km construit)**. Ce résultat n'inclut pas certaines données soit parce qu'elles étaient difficiles à trouver et à évaluer, comme il a été déjà mentionné (exemple des déplacements domicile-travail au cours des travaux de terrassements), soit par manque de certains coefficients de transferts (l'exemple des coefficients nécessaires pour traduire les tonnages d'explosifs en empreinte). Ainsi, le fait que certaines données ne sont pas disponibles, réduit le résultat d'empreinte du chantier routier en phase de construction.

Catégories	Unité	Données	Qualité de la donnée	Incertitude sur la donnée	Sols énergétiques (hag)	Incertitude sur le résultat d'EE _{Sols} énergétiques	Sols construits (hag)	Espaces aquatiques (hag)	Forêts (hag)	Total (hag)
Consommables										
Carburant	[t]	2138 (soit 2515000 litres)	1	5 %	1283	10 %	?	-	-	1283
Explosifs	[t]	200	1	5 %	?	?	?	-	-	
Béton	[t]	5168	1	5 %	155	25 %	4	(cf. §. 2.2.4. II) ¹⁰⁷	-	159
Bitume	[t]	7883	1	5 %	473	25 %	?	-	-	473
Granulat	[t]	162117	1	5 %	405	25 %	113,5	-	-	518,5
Granulat (incorporé dans le béton)	[t]	2274	1,25	5 %	6	25 %	Pris en compte dans l'empreinte du béton	-	-	6
Filler d'apport	[t]	1500	1	5 %	6	25 %	1	-	-	7
Ciment (incorporé dans le béton)	[t]	791	1,25	5 %	119	25 %	Pris en compte dans l'empreinte du béton	?	-	119
Sable (incorporé dans le béton)	[t]	1809	1,25	5 %	?	?	Pris en compte dans l'empreinte du béton	-	-	
Caniveaux à grille PVC	[t]	7	1	5 %	2	25 %	?	-	-	2
Gaines en PEhd	[t]	4	1	5 %	1	15 %	?	-	-	1
Bombes de peinture: 'Aluminium'	[kg]	200	1,75	10 %	0,4	40 %	?	-	-	0,4
Bombes de peinture 'Peinture'	[kg]	800	1,75	10 %	0,1	10 % (manque d'incertitude sur l'énergie incorporée)	?	-	-	0,1
Papier	[t]	1,41	1,25	5 %	0,5	25 %	?	(cf. §. 2.2.4. II) ¹⁰⁸	2	0,5
Eau potable	[m ³]	106389	1,25	5 %	13	5 % (manque d'incertitude sur l'énergie incorporée)	(cf. § 3.4.3. II)	(cf. §. 2.2.4. II) ¹⁰⁹	-	13
Eau d'arrosage	[m ³]	43600	1,25	5 %	-		6	1	-	6
Bouteille en plastique	[t]	0,54	1	5 %	0,4	25 %	?	-	-	0,4
Totale en hag					2464	17 %	124, 5	1	2	2591

¹⁰⁷ cf. §. 2.2.4. Calcul d'empreinte écologique sur sols aquatiques (partie II)

¹⁰⁸ cf. §. 2.2.4. Calcul d'empreinte écologique sur sols aquatiques (partie II)

¹⁰⁹ cf. §. 2.2.4. Calcul d'empreinte écologique sur sols aquatiques (partie II)

Infrastructures										
Emprise de la route/ Surfaces occupées par les stockages des matériaux / Surfaces occupées par les bureaux	[ha]	52	1	5 %	-	-	267	-	-	267
Bureaux (métal + bois)	[m ²]	160	1	5 %	10	37 %				10
Réseaux : fils et câbles électriques (cuivre + PVC)	[t]	0,05 cuivre 0,01 PVC	1,25	5 %	0,03	37 %				0,03
Electricité : énergie thermique	[kWh]	132 000	1,5	10 %	8	10 % (manque d'incertitude sur le facteur d'émission)				8
Electricité : hydroélectricité	[kWh]	17 000	1,5	10 %			0,15			0,15
Totale en hag					18	25 %	267			285
Transport										
1) Types de transports au cours des travaux de terrassements										
*Déplacements domicile-travail	[km]	?	?		?	?	?	-	-	
*Transport des consommables	[km]	?	?		?	?	?	-	-	
2) Types de transports au cours de la chaussée										
*Déplacements domicile-travail	[km]	660000	1,25	5 %	29	25 %	?	-	-	29
*Transport du carburant et de certains matériaux de construction	[km]	186080	1,25	5 %	43	14 %	?	-	-	43
*Transport des autres consommables	[km]	?	?		?	?	?	-	-	
Totale en hag					72	18 %				72
Biens manufacturés										
Engins	[t]	2096	1	5 %	140	35 %				140
Piquets d'implantation (en bois)	[t]	22	1,25	5 %	7	25 %			31	38
Totale en hag					147	35 %			31	178
Services										
Télécommunications	[euro]	20160	1	5 %	0,4	55 %				0,4
Poste (courriers)	[t]	?								
Traitement des eaux usées des	[m ³]	88	1,75	10 %			0,01			0,01

bureaux (par lagunage)										
Totale en hag					0,4	55 %	0,01			0,41
Total en hag / 8 km construits ou en hag / 2 ans de construction					2701	18 %	391	1	33	3126
hag / km construit					338		49	0,1	4	392

*Tableau 30 : Répartition de l’empreinte écologique du chantier de 8 km de mise à 2*2 voies de Vandranges durant la phase de construction (terrassements et chaussée), selon les différentes postes de consommation*

Sur la base des résultats d’empreintes des différentes catégories de consommations, du chantier de Vandranges, prises en compte dans le tableau ci-dessus, nous avons déduit des ratios en hag / unité de consommation pour certaines articles, que nous présentons dans le tableau suivant (tableau 31) :

Catégories	Unité	Sols énergétiques (hag)	Sols construits ou dégradés (hag)	Espaces aquatiques (hag)	Forêts (hag)
Consommables					
Carburant	[t]	0,6	-	-	-
Explosifs	[t]	?	?	-	-
Béton	[t]	0,03	$7*10^{-4}$?	-
Bitume	[t]	0,06	?	-	-
Granulat	[t]	0,0025	$7*10^{-4}$	-	-
Filler d’apport	[t]	0,004	?	-	-
Ciment	[t]	0,15		?	-
Sable	[t]	?	?	-	-
Caniveau à grille PVC	[t]	0,32	?		
Gaine en PEHD	[t]	0,31	?		
Aluminium	[t]	2	?		
Peinture	[t]	0,13	?		
Papier	[t]	0,34	?	?	1,58
Bois	[t]	0,31	?	?	1,43
Eau potable	[m ³]	$12*10^{-5}$	(cf. § 3.4.3. II)	(cf. §. 2.2.4. II) ¹¹⁰	
Eau d’arrosage (en prenant en compte la profondeur de la rivière de notre site étudié : 1,5 m)	[m ³]	-	$1,4*10^{-4}$	$2*10^{-5}$	-
Bouteille en plastique	[t]	0,8	?	-	-
Infrastructures					
Surface occupée	[ha]	-	5	-	-
Composition bureau : métal	[m ²]	0,03			
Composition bureau : béton	[m ²]	0,08			
Réseaux : fils et câbles électriques : * cuivre	[t]	0,5			
Réseaux :	[t]	0,3			

¹¹⁰ cf. §. 2.2.4. Calcul d’empreinte écologique sur sols aquatiques (partie II)

fils et câbles électriques : * PVC					
Electricité : énergie thermique	[KWh]	2*10 ⁻⁵			
Electricité : hydroélectricité	[KWh]	-	9*10 ⁻⁶	-	-
Transport (cf. tableau 17. § 3.6. Partie II)					
Biens manufacturés (cas des engins)					
Véhicule d'une tonne (cf. tableau 8. chapitre 4.1.4)	[t]	1			
Services					
Télécommunications	[euro]	2*10 ⁻⁵			
Traitement des eaux usées (par lagunage)	[m ³]		1,4*10 ⁻⁴		

Tableau 31: Empreintes écologiques en hag par unité de consommation pour certains articles

Incertitude sur le résultat total d'empreinte écologique (EE) du chantier de Vendranges en phase de construction

L'estimation de l'incertitude sur le résultat total d'empreinte peut être estimée en prenant en compte les incertitudes sur les différentes composantes de cette empreinte, à savoir celles sur les résultats d'empreinte en "sols énergétiques", "sols construits (ou dégradés)", "sols forêts" et "espaces aquatiques" :

$$EE_{\text{Totale}} = EE_{\text{Sols énergétiques}} + EE_{\text{Sols construits}} + EE_{\text{Sols forêts}} + EE_{\text{Espaces aquatiques}}$$

$$\frac{\Delta EE_{\text{totale}}}{EE_{\text{totale}}} = \frac{\Delta EE_{\text{sols énergétiques}} + \Delta EE_{\text{sols construits}} + \Delta EE_{\text{sols forêts}} + \Delta EE_{\text{aquatiques}}}{EE_{\text{totale}}}$$

Cependant, comme il a déjà été précisé dans le chapitre 5.2 de la deuxième partie de ce mémoire, comme nous ne disposons pas des valeurs d'incertitudes sur plusieurs facteurs de conversion nécessaires pour les calculs, et sachant également que l'empreinte totale du chantier routier s'exerce principalement sur les sols énergétiques (tableau 30 et figure 49), une première estimation de l'incertitude sur le résultat de l'empreinte "énergétique" totale (= 2701 hag) est obtenue en considérant les incertitudes sur les facteurs d'émission (cf. tableau 19. § 5.1 et tableau 17. § 3.6 Partie II) ainsi que celles estimées sur les données de consommations collectées, comme indiqué dans le tableau 30 et expliqué dans le chapitre 5.2 de la deuxième partie de ce mémoire :

$$\frac{\Delta EE_{\text{sols énergétiques}}}{EE_{\text{sols énergétiques}}} = 18 \% \text{ sur les } 2701 \text{ hag.}$$

$$EE_{\text{Sols énergétiques}} = 2701 \text{ et } \Delta EE_{\text{sols énergétiques}} = 2701 * 0,18 = 486 \text{ hag}$$

Quant aux incertitudes globales sur les résultats d'empreintes écologiques en "sols

énergétiques" des différentes catégories de consommation (consommables, infrastructures, transport, biens manufacturés, services), elles varient entre 17 % et 55 % comme indiqué dans le tableau 30, selon la sensibilité des données collectées et les incertitudes sur les facteurs d'émission de l'ADEME utilisés pour le calcul de ces empreintes.

Nous manquons de données pour avoir plus de précisions pour calculer les incertitudes absolues dans l'évaluation des $EE_{Sols\ construits}$, des $EE_{Sols\ forêts}$ et des $EE_{Espaces\ aquatiques}$, nous nous proposons d'accorder une valeur de 0 à 400 hag près sur l'incertitude absolue ΔX qui est considérée, par hypothèse, être la somme des trois incertitudes absolues inconnues suivantes :

$$\Delta X = \Delta EE_{sols\ construits} + \Delta EE_{sols\ forêts} + \Delta EE_{espaces\ aquatiques} .$$

Cette fourchette de 0 à 400 hag est obtenue en donnant arbitrairement des incertitudes relatives variant de 0 % à 90 % sur les résultats d'empreinte en sols construits (391 hag), espaces aquatiques (1 hag) et sols forêts (33 hag) :

$EE_{Sols\ construits}$ (hag)	$\frac{\Delta EE_{construits}}{EE_{construits}}$	$\Delta EE_{construits}$ (hag)	$EE_{Espaces\ aquatiques}$ (hag)	$\frac{\Delta EE_{aquatiques}}{EE_{aquatiques}}$	$\Delta EE_{aquatiques}$ (hag)	$EE_{Sols\ forêts}$ (hag)	$\frac{\Delta EE_{forêts}}{EE_{forêts}}$	$\Delta EE_{forêts}$ (hag)	ΔX (hag)
391	0 %	0	1	0 %	0	33	0 %	0	0
	30 %	117		30 %	0,3		30 %	10	127
	60 %	234		60 %	0,6		60 %	20	255
	90 %	352		90 %	0,9		90 %	30	383

Cela nous permet, plus ou moins, d'étudier graphiquement une estimation de l'incertitude relative de l'empreinte écologique totale $\left(\frac{\Delta EE_{totale}}{EE_{totale}}\right)$ en fonction de ce paramètre inconnu :

$$\frac{\Delta EE_{totale}}{EE_{totale}} = \frac{486 + \Delta X}{3126}$$

$$EE_{totale} = 3126 \text{ hag et } \Delta EE_{sols\ énergétiques} = 486 \text{ hag}$$

Nous pouvons constater, à l'examen de la droite de la figure 47 que l'incertitude sur le résultat d'empreinte écologique totale croît de 15 à 30 % environ lorsque l'incertitude absolue sur les sols construits, forestiers et aquatiques augmente de 0 à 400 hag environ.

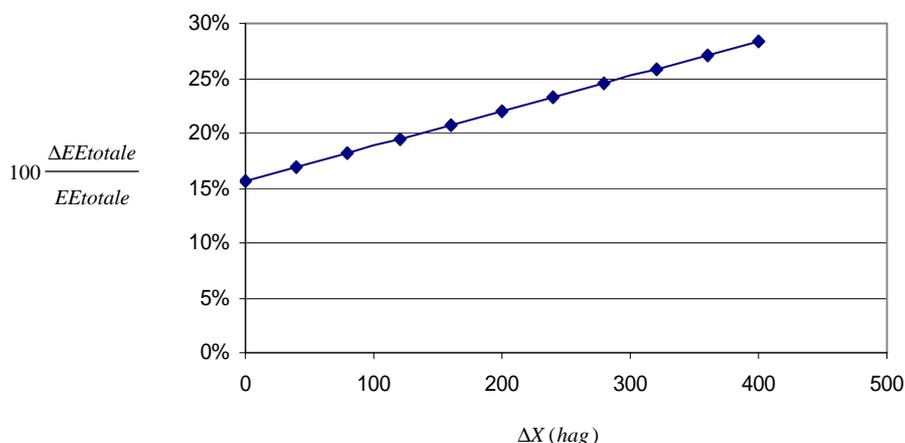


Figure 47 : Estimation de l'incertitude sur l'empreinte écologique totale

Mais on remarque toutefois que même en partant d'une incertitude de près de 90 % de la valeur d'empreinte écologique sur les sols construits, sols forêts et espaces aquatiques, on a une incertitude totale sur l'empreinte écologique totale qui reste inférieure à 30 %.

L'empreinte totale du chantier en phase de construction se répartit de la manière suivante sur les catégories de consommation :

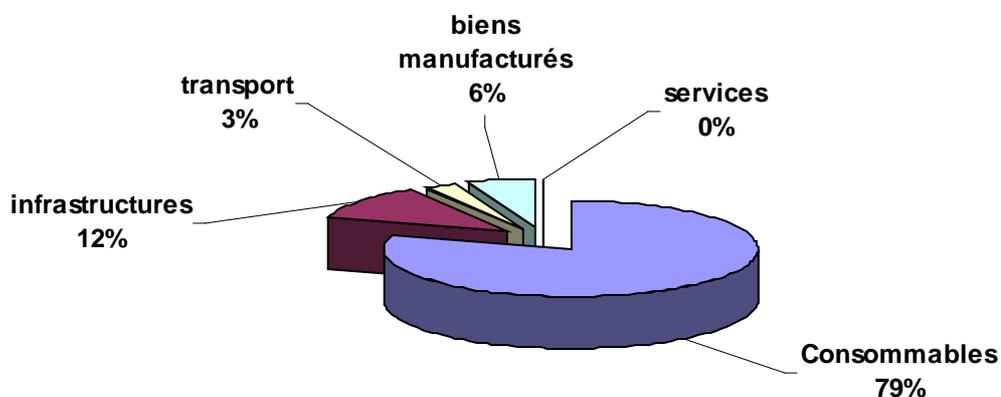


Figure 48 : Répartition de l'empreinte écologique selon les différentes catégories de consommation du chantier de Vendranges durant la phase de construction (terrassements et chaussées)

L'empreinte écologique totale s'exerce principalement sur les sols énergétiques (89 %), comme le montre le graphe suivant (figure 49) :

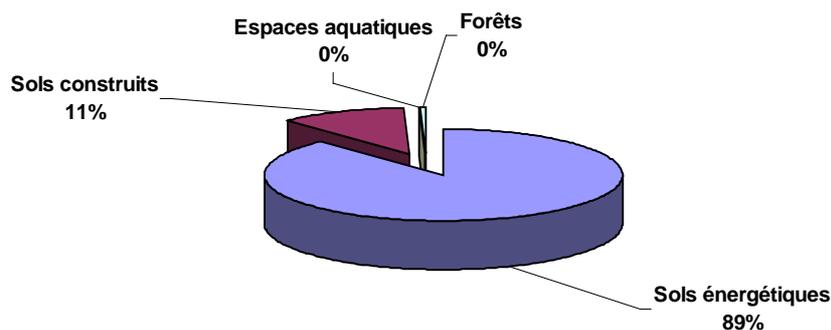


Figure 49 : Répartition de l'empreinte écologique totale sur les catégories de sols.

Si l'on observe la répartition des contributions à l'empreinte écologique totale, de la construction de la route, en fonction des différents postes de consommation, il s'avère que les consommations énergétiques proviennent principalement des consommables (79 %) (figure 48).

Le détail des contributions à l’empreinte totale par catégorie de consommation est explicité dans les paragraphes suivants.

5.1.1 Empreintes écologiques partielles des catégories de consommation

• Empreinte écologique des consommables

Les résultats de calcul des empreintes partielles de la ‘*catégorie consommables*’ au niveau du chantier étudié, pendant les deux phases de construction, montrent que l’empreinte écologique de cette catégorie s’exerce principalement sur les sols énergétiques, comme le montre le graphe n° 50.

L’empreinte écologique des consommables s’exerce surtout à travers la consommation du carburant (servant à l’alimentation des équipements industriels) et des différents matériaux de construction utilisés sur le chantier en phase de construction. Ces deux articles représentent à eux seuls 76 % de l’empreinte partielle des consommables $EEP^{Consommables} = 2591$ hag / 8 km, et environ 63 % de l’empreinte écologique globale du chantier en phase de construction (terrassements et chaussée).

Les carburants ont été placés dans la catégorie « consommables » car ils concernent à la fois l’énergie nécessaire pour extraire les déblais, aplanir la zone terrassée (activité désirée des terrassements) et transporter les déblais. Soit les stocker comme remblais dans des zones terrassées ou soit les stocker dans des zones de stockage spécifiques (activité de déplacements non désirée mais nécessaire). La quantité de carburant consommée par la centrale d’enrobage et nécessaire pour l’activité désirée des chaussées est également prise en compte.

L’information de la part de carburant qui a servi pour le transport des autres consommables utilisés sur le chantier, en elle-même n’était par contre pas disponible.

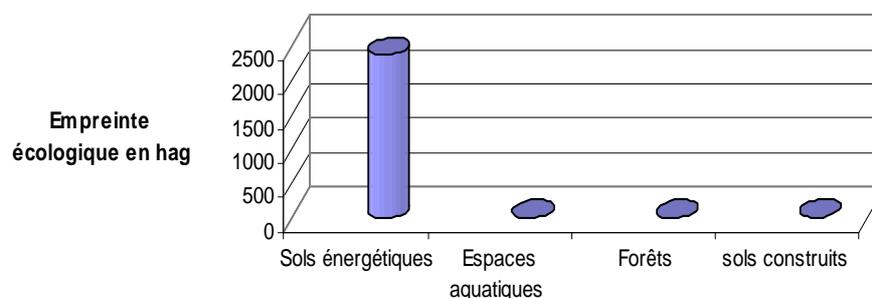


Figure 50 : Répartition de l’empreinte partielle de la ‘*catégorie consommables*’, du chantier en phases de construction (terrassements et chaussées), sur les catégories de sols.

• Empreinte écologique des infrastructures

L’empreinte partielle des infrastructures $EEP^{Infrastructures} = 285$ hag / 8 km construits (10 % de l’empreinte écologique totale), est associée principalement à l’emprise de la route et aux stockages de matériaux (93 %). Il semble que les réseaux des bureaux ne soient pas significatifs en terme d’empreinte, vu que la surface occupée par ces bureaux est négligeable par rapport à l’emprise totale du tronçon et aux stockages des matériaux.

• Empreinte écologique des transports

L'empreinte partielle de cette catégorie de consommation $EEP^{Transports} = 72 \text{ hag} / 8 \text{ km}$ construits, s'exerce principalement sur les sols énergétiques. Cette empreinte partielle $EEP^{Transports}_{Sols\text{énergétiques}}$ se répartit comme suit parmi les différentes activités de transport :

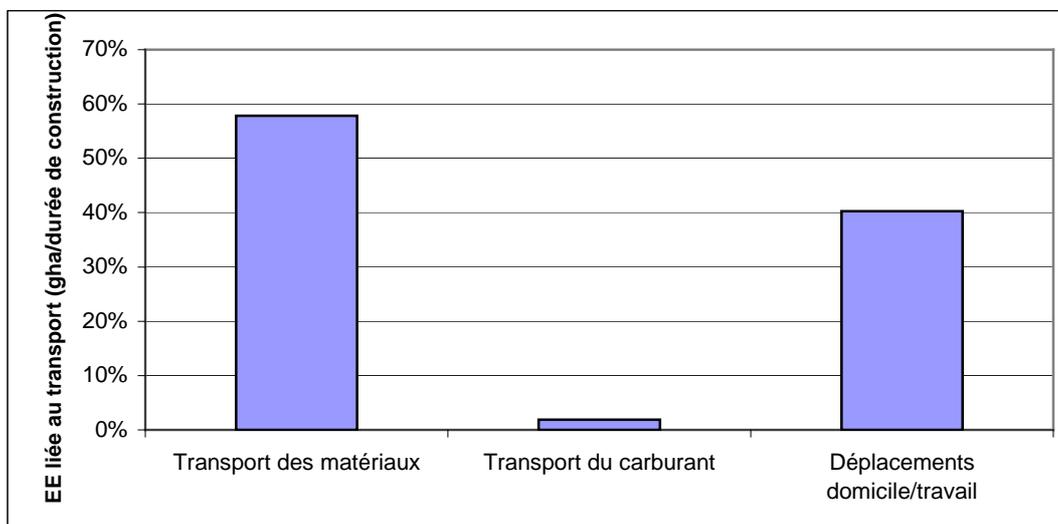


Figure 51 : Empreinte partielle sur sols énergétiques des activités de transport

L'empreinte du transport de certains matériaux (granulats et bitume) et du carburant, représente environ 60 % de l'empreinte partielle des transports $EEP^{Transports} = 72 \text{ hag} / 8 \text{ km}$.

L'empreinte du transport des employés et agents représente environ 40 % de l'empreinte totale sur les sols énergétiques pour la catégorie « Transport ». Une empreinte non négligeable qui s'explique par le fait que chaque employé se déplace seul avec sa propre voiture. Bien évidemment, il existe des opportunités de co-voiturage qui peuvent tendre à réduire cette empreinte (notons que l'empreinte du transport des employés au cours des travaux de terrassement n'est pas renseignée).

• Empreinte écologique des biens manufacturés

Notre étude a mis en évidence les impacts respectifs de certaines consommations qui auraient pu être négligées *a priori*: l'énergie incorporée (GJ / t) des équipements industriels utilisés sur le chantier ainsi que les émissions (t équ. C / t) liées aux produits incorporés dans ces engins par exemple.

L'empreinte partielle de la catégorie biens manufacturés sur sols énergétiques;

$EEP^{Biens\text{manufacturés}}$; s'élève à 178 hag / 8 km, soit 6 % de l'empreinte écologique totale (22 hag / km construit). Cela est dû au nombre important d'engins utilisés sur le chantier routier en phase de construction.

• Empreinte écologique des services

L'empreinte partielle des services est d'environ 0,4 hag / 8 km construits. Elle est associée principalement aux communications téléphoniques durant la construction du chantier.

L'empreinte liée au traitement des eaux usées n'est pas significative car la quantité de ces eaux prise en compte dans les calculs est faible vu que la surface occupée par ces bureaux est négligeable par rapport à l'emprise totale du tronçon.

5.2 Comparaison de l’empreinte écologique totale « Construction / Utilisation »

L’empreinte écologique des nations peut être divisées par le nombre d’habitants afin d’avoir une empreinte en hag/hab et de comparer cette valeur à la biocapacité disponible par habitant. Dans le cas d’une activité telle que celle de “travaux publics”, il est difficile de ramener l’empreinte écologique du chantier à une valeur ou un élément qui soit « parlant » au public et décideurs. Il faudrait pouvoir comparer l’empreinte écologique totale du chantier avec d’autres, mais cela n’est pas possible actuellement du fait du caractère innovant de la démarche.

Aussi, afin d’avoir un élément de comparaison, après avoir calculé l’empreinte écologique de la route de Vendranges en phase de construction (qui a durée à *peu près* deux ans = terrassements et chaussée), il pourrait être intéressant de mettre en relation l’ordre de grandeur de l’empreinte écologique liée à la construction par rapport à l’empreinte écologique des véhicules, circulant sur cette même route. Cependant et comme il a déjà été dit dans le chapitre 4.2, nous avons seulement pu obtenir au temps actuel les données concernant le trafic de l’ancienne route (communiquées par la DDE 42).

Bien que l’empreinte du tronçon en phase de construction ne soit pas négligeable (3126 hag par deux ans de construction), l’empreinte écologique du trafic estimé sur deux ans est plus importante (1980 hag/an soit 3960 hag par deux ans), comme le montre la figure 52.

En fait, au bout d’un peu plus de 18 mois, l’empreinte écologique liée à l’utilisation devient supérieure à celle de la construction.

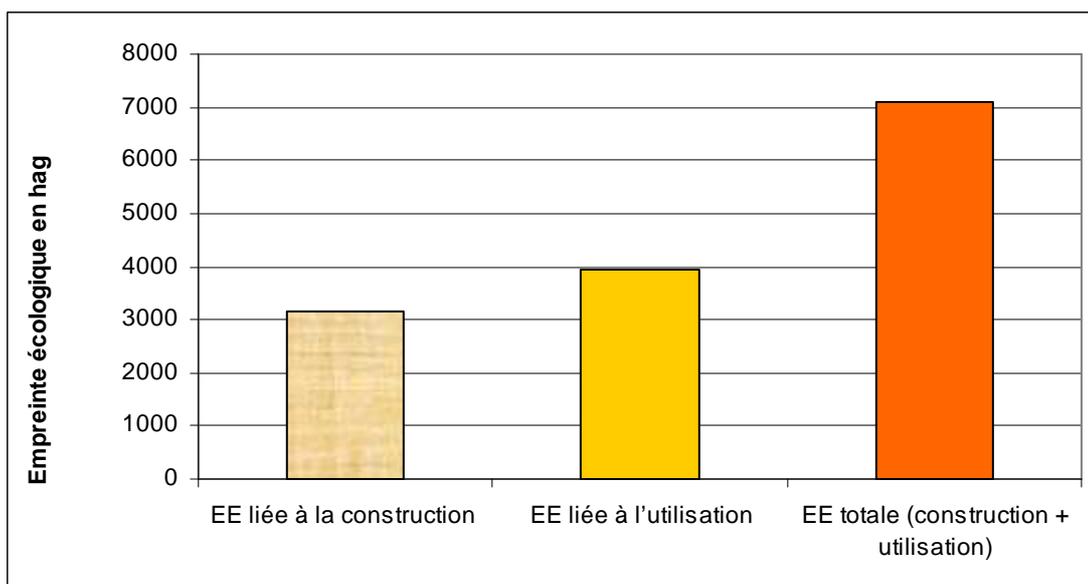


Figure 52 : Empreinte écologique liée à la construction (durée de deux ans de chantier) et l’utilisation de la route (pendant deux ans), en hag.

5.3 Fiabilité des résultats chiffrés

La méconnaissance des incertitudes sur tous les coefficients de conversion nécessaires pour le calcul ne permet pas d’établir un intervalle de confiance autour des valeurs obtenues pour l’empreinte écologique. Cependant, étant donné que nous retenons les résultats d’empreinte obtenus par la méthode bilan carbone et que nous nous disposons des incertitudes sur les facteurs d’émission (proposées par l’ADEME), nous avons conservé ces incertitudes en plus de celles estimées sur les données de l’inventaire, pour une première estimation d’erreur sur le

résultat d’empreinte totale, sur sols énergétiques, du chantier en phase de construction, comme c’est déjà expliqué au chapitre 5.2 de la deuxième partie et indiqué dans le tableau 30.

Plusieurs sources d’erreur peuvent être évoquées:

- Erreurs systématiques dans l’évaluation de la demande effective associées aux activités humaines: l’érosion des sols et les émissions toxiques sont par exemple occultées, conduisant à une sous-estimation des impacts humains [Monfreda et al., 2003].
- Estimations erronées des données manquantes [Monfreda et al, 2003]. Les paramètres qui n’ont pas été pris en compte par manque de données sont détaillés au chapitre 2.1 de la quatrième partie.
- Erreurs de données à partir des sources statistiques [Monfreda et al., 2003].
- Les erreurs de mesure sur les données de consommation et de rejet, dont l’intervalle de confiance, qui dépend de la précision des instruments de mesure, est inconnu. Cependant, des erreurs qualitatives sur ces données inventoriées, sont prises en compte, selon le tableau 20 du chapitre 5.2 de la deuxième partie.
- Les erreurs sur les facteurs de rendement et d’équivalence employés pour les sols productifs, sont inconnues.
- Les erreurs inhérentes aux hypothèses de calcul (exemple : coefficient d’absorption de carbone par hectare).

6 L’évaluation de l’étude de calcul d’empreinte du chantier de ‘Vendranges’ par rapport aux standards de l’empreinte écologique

Comme il a été déjà mentionné (cf. § 4. Partie II et § 2.3.2. Partie I), les standards de l’empreinte ont été récemment établis pour pouvoir comparer différentes études réalisées avec une qualité acceptable.

Dans ce tableau n° 32 sont présentés les résultats de l’analyse de l’évaluation de l’étude de calcul d’empreinte écologique du chantier de ‘Vendranges’ par rapport à ces standards, pour la méthode de calcul d’empreinte écologique ‘micro’ (que nous avons développé).

Chaque exigence, pour chaque ‘standard’, est donc noté selon ‘trois phrases types’ définis par le Global Footprint Network [GFN, 2006b]:

- “Pass”: Réussite (R)
- “Fail”: Echec (E)
- “Not Applicable”: Pas applicable (PA)

Standards	Exigences des standards	Evaluation de l'étude par rapport aux standards	Note
<p>S 1 : Concordance avec L'empreinte nationale “National Footprint Accounts (NFA)”</p>	<p>Chaque évaluation au niveau local (pour le pays dans lequel cette évaluation est faite) doit être conforme à l'évaluation de l'empreinte écologique au niveau national :</p> <p>a- Présentation des résultats en hectares globaux en utilisant des facteurs d'équivalence et de rendement.</p> <p>b- Utilisation de facteurs de conversion utilisés par le NFA pour le pays et l'année appropriés.</p> <p>c- Les types de sol considérés doivent être les mêmes que ceux établis dans le NFA.</p> <p>d- Le sol construit est exprimé en hag (comme l'empreinte écologique de ce type de sol au niveau national).</p> <p>e- L'évaluation prend en compte l'utilisation des différentes sources d'énergie (pétrole, gaz, hydroélectricité) et la séquestration de CO2, comme c'est le cas de l'empreinte au niveau national.</p> <p>f- Les nouvelles données non considérées dans le NFA sont clairement définies.</p> <p>g- Application et comparaison de l'étude avec les standards de l'empreinte écologique. Les résultats d'empreinte sont présentés et comparés selon les deux cas : 'si application</p>	<p>a- Les résultats de calcul d'empreinte du chantier routier sont présentés en hectares globaux.</p> <p>b- Les facteurs d'équivalence sont les mêmes pour tous les pays. Les facteurs de rendement utilisés sont pour la France, ce qui est correct. Par contre, ces facteurs sont de 2002 (fournis par GFN) alors que l'année de calcul de l'empreinte de l'activité étudiée est 2006.</p> <p>c- Les mêmes types de sols sont conservés : terres arables, pâturages, sols dégradés, sols forêts, sols énergie. La surface de pêche n'a pas été utilisée du fait de l'absence d'utilisation de ressources maritimes par l'activité étudiée. Cependant, la catégorie 'surfaces aquatiques' est ajoutée afin de tenir compte de l'empreinte écologique associée à la consommation d'eau.</p> <p>d- Les facteurs de rendement et d'équivalence ont été appliqués aux sols construits.</p> <p>e- Le calcul d'empreinte de l'énergie est fait en prenant en compte les différentes sources.</p> <p>f- Les méthodes de calcul basées sur de nouvelles données sont définies (l'exemple des facteurs d'émissions de la méthode Bilan Carbone® de l'ADEME utilisés comme facteurs de conversion).</p> <p>g- L'étude a essayé de suivre les standards le plus fidèlement possible ! Mais impossible de comparer avec la méthode NFA lorsque le système étudié n'est</p>	<p>R</p> <p>E</p> <p>R/E</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>PA</p>

	<p>des standards' ou 'non application des standards'.</p> <p>h- Clairement définir les énergies incorporées utilisées (expliquer pourquoi ces valeurs sont choisies).</p>	<p>pas un territoire.</p> <p>h- Les énergies incorporées ont pu être incluses dans la méthode de calcul d'empreinte par « bilan énergétique ». Le choix de ces données est clairement argumenté. Mais comme il a déjà été mentionné, c'est la méthode bilan carbone® qui a été utilisée, vu qu'elle tient en compte des données (facteurs d'émissions) propres au pays considéré (France), dont le calcul d'empreinte a été fait.</p>	R
<p>S 2 : Définition des Frontières de l'étude</p>	<p>a- Définition de l'activité pour laquelle l'empreinte est calculée.</p>	<p>a- L'activité concernée par le calcul d'empreinte est bien définie dans la troisième partie de ce travail de thèse : l'empreinte de la construction du chantier routier.</p>	R
	<p>b- L'étude précise clairement que l'empreinte écologique mesure la demande des activités humaines spécifiques (qui peuvent être les activités de production ou de consommation) : les actions associées à une entité.</p>	<p>b- Pour le cas de notre étude, l'activité de construction d'une route est vue comme une entité qui accapare une certaine surface de terre productive propre à lui fournir les ressources qu'elle consomme, et à assimiler les déchets qu'elle génère et qui sont réintroduits dans le milieu naturel.</p>	R
	<p>c- Clairement définir les frontières du système étudié (l'activité).</p>	<p>c- Les limites de l'activité étudiée sont bien définies</p>	R
	<p>d- Spécifier quelles perspectives d'empreinte sont utilisées.</p>	<p>d- Plusieurs perspectives ont été prises en compte dans cette étude : l'extraction des ressources et production (l'exemple du béton et papier) et en général la consommation de différents produits.</p>	R
	<p>e- Eviter les doubles comptage dans le calcul d'empreinte.</p>	<p>e- Pris en compte dans le calcul d'empreinte des différentes catégories de consommations et rejets.</p>	R
	<p>f- Prise en compte de tout le cycle de vie de la demande en ressources utilisées.</p>	<p>f- Ce point est pris en compte, pour le calcul d'empreinte de certaines ressources considérées de l'activité concernée en se basant sur les données d'ACV, mais pas pour tous les éléments par manque de données.</p>	E

<p>S 3 : Calculs au niveau Sub-national</p>	<p>a- Adaptation de la matrice de consommation et usage du sol au niveau sub-national en ajustant la matrice nationale (NFA).</p> <p>b- La matrice (consommations + types de sols) de la méthode utilisée doit être cohérente avec les NFA.</p> <p>d- Spécifier quelles méthodes ont été utilisées pour construire les comptes sub-nationaux.</p>	<p>a- La matrice de consommation et types de sols considérés de la méthode «par composantes» développée ici est ajustée le plus possible à la matrice nationale (NFA).</p> <p>b- Standard 3-a : Matrice cohérente au NFA.</p> <p>d- Un descriptif détaillé des sources et des méthodes de calcul d’empreinte des différentes sections de l’activité concernée est donné.</p>	<p>R</p> <p>R</p> <p>R</p>
<p>S 4 : (Support pour les études organisationnelles et des produits)</p>	<p>A établir au cours de 2008</p>		
<p>S 5 : Facteurs de conversion dérivés</p>	<p>a- Si les comptes d’empreinte nationale (NFA) ne fournissent pas les facteurs nécessaires ou si les facteurs disponibles manquent du fait de la spécificité requise pour l’évaluation de l’activité concernée: des facteurs de conversion dit secondaires, plus détaillés, peuvent être utilisés (données des analyses de cycle de vie par exemple ou autres sources).</p> <p>b- Les méthodes de calcul des facteurs de conversion dérivés doivent être clairement documentées.</p> <p>c- Dans le cas où un facteur de conversion ne peut pas être dérivé d’un facteur de conversion primaire existant, il doit être traité comme un élément Non-Standardisé (voir standard 7).</p>	<p>a- L’empreinte écologique des produits de l’activité concernée ayant été calculée en considérant plusieurs facteurs secondaires de conversion, à savoir les énergies incorporées issues des données d’analyse de cycle de vie ou les facteurs d’émissions de la méthode bilan carbone®.</p> <p>b- Une explication détaillée a été donnée dans le cas des facteurs de conversion adaptés pour notre étude.</p> <p>c- Ces éléments Non-Standardisés peuvent être identifiés facilement (exemple des énergies incorporées : manque d’une base de données standard).</p>	<p>R</p> <p>R</p> <p>R</p>
<p>S 6 : Consistance des composantes</p>	<p>a- Dans l’étude considérée, les résultats doivent être décrit selon les composantes de consommation en accord avec le NFA.</p> <p>b- L’étude assure que les composantes ne se chevauchent pas et qu’elles sont exhaustives</p> <p>c- L’étude explique ces composantes.</p>	<p>a- Les résultats de calcul d’empreinte de l’activité concernée (chantier routier) sont décrits dans la partie III selon les différentes catégories de consommations adaptées au NFA (consommables, Infrastructures, Transport, Biens manufacturés et Services).</p> <p>b- Classification des différentes composantes de consommation par types de sol utilisés.</p> <p>c- Ces composantes sont bien détaillées et classifiées par types de sol utilisés.</p>	<p>R</p> <p>R</p> <p>R</p>

	d- L'étude identifie clairement les éléments de chaque composante.	d- Les composantes sont bien détaillées (exemple des éléments pris en compte pour la composante «consommables » : papier, béton, carburant, etc).	R
S 7 : Utilisation d'éléments Non- Standardisés dans les études d'empreinte	a- L'étude identifie explicitement les éléments ajoutés en comparant avec le NFA standard. b- L'étude fournit clairement des informations de la méthode de calcul réalisée par les éléments rajoutés. c- S'il y a des éléments rajoutés, l'étude présente les résultats avec et sans ces éléments. d- S'il y a des éléments omis, l'étude explique pourquoi ils ont été omis et comment cela affecte la comparabilité des résultats avec d'autres études.	a- Les éléments ajoutés dans l'étude ont été définis. b- Les différentes méthodes de calcul sont définies. c- L'étude présente et compare les résultats de calcul en fonction des éléments rajoutés (énergies incorporées des produits ou leurs facteurs d'émission par exemple). d- Exemple d'éléments omis : Energie incorporée des « explosifs », dans le cas du chantier routier étudié, que nous n'avons pas pris en compte dans le calcul d'empreinte de ce chantier car l'accès à cette donnée était difficile. Cela affecte bien évident la comparabilité avec d'autres études.	R R R R
S 8 : (Support pour les méthodes de calcul)	<i>A établir à une date pas encore déterminée.</i>		
S 9 : Estimation des Erreurs (GUIDELINE)	a- Si possible les résultats finaux sont présentés avec une estimation de la marge d'erreur. b- Si possible, une estimation d'erreur sur les éléments suivants: - source de données (erreur approximative sur les données collectées, les coefficients utilisés, agrégation, etc). - erreurs associées à la troncation des étapes du cycle de vie	a- Résultats finaux présentés avec estimation d'« incertitudes », uniquement pour les résultats de calcul d'empreinte par la méthode 'bilan carbone®' (car les facteurs d'émission de l'ADEME sont donnés avec une estimation de la marge d'erreur). b- Dans le cas de notre étude : - pour les données de consommation collectées : une estimation sur les incertitudes est faite en se basant sur la qualité de ces données selon les détails cités dans le tableau 20 du chapitre 5.2 de la deuxième partie. Pour les coefficients de conversion : seuls les facteurs d'émission de la méthode 'bilan carbone®' sont donnés avec estimation d'erreur. - pour les énergies incorporées issues d'ACV	R R /E

	c- La description des estimations doivent être incluses; références et adoptions d'autres études sont possibles.	(intégrées dans les calculs d'empreinte par la méthode 'bilan énergétique'), elles sont données sans aucune indication sur leur niveau d'incertitude. c- Premières estimations décrites.	R
Standards de 'communication'			
S 10 : Traçabilité au NFA	a- L'étude fait référence à la date et version de l'édition du NFA. b- Au moment du commencement de l'étude, il est nécessaire de se référer à la dernière édition du NFA existante. c- Le rapport de l'étude contient des références à des articles appropriés, en incluant la dernière version du NFA.	a- Le NFA 2005 est cité dans la bibliographie [Wackernagel et al, 2005]. b- En effet, l'étude commencée début 2005-2006 : Se référer à la dernière version du NFA de 2005. c- L'étude s'est basée sur les éléments du rapport « National Footprint and Biocapacity Accounts 2005: The underlying calculation method » de 2005. Ce dernier est documenté de nombreuses sources appartenant à des organismes partenaires ou des spécialistes du domaine.	R R R
S 11 : Glossaire, Définitions et Versions	a- L'étude doit contenir un glossaire ou des définitions des termes clé, incluant l'empreinte écologique, la biocapacité, hectares globaux, facteurs de rendement, facteurs d'équivalence les composantes d'empreinte. b- L'étude utilise ces termes de manière consistante c- L'étude explique les types de sol. d- Le glossaire de l'étude est conforme au glossaire donné par le Global Footprint Network	a- Voir glossaire b- Les termes ont été utilisés à la façon des études du NFA. c- Types de sol considérés détaillés. d- Le glossaire des termes clés de l'empreinte écologique a dû être traduit en français.	R R R R
S 12 : Séparation des résultats	a- Le rapport inclut une estimation de la biocapacité globale en hag par personne. b- Le rapport explique la différence entre biocapacité globale et biocapacité locale ou régionale.	a- Dans le cas de notre étude, nous n'avons pas calculé l'empreinte écologique des personnes mais nous avons calculé l'empreinte de la construction d'une route (par la durée de construction de deux ans environ = 8 kilomètres de route construits). b- Différence précisée entre la biocapacité mondiale et la biocapacité française selon les données du rapport planète vivante 2006 (cf. chapitre 1.1.1, partie	PA R

analytiques de l’empreinte des interprétations normatives et des valeurs	<p>c- Le rapport explique que l’empreinte écologique fait la comparaison entre la demande humaine et la biocapacité selon la technologie et la consommation actuelles.</p> <p>d- Le rapport explique que l’empreinte mesure la demande des activités.</p> <p>e- Le rapport explique que l’empreinte ne promeut aucune politique ni stratégie à ce propos. Elle peut seulement être utilisée pour évaluer certains scénarios.</p>	<p>II).</p> <p>c- L’étude explique que l’empreinte écologique dresse un bilan écologique en comparant la demande et l’offre en ressources naturelles.</p> <p>d- Explication illustrée par l’étude de cas détaillée dans la troisième partie de ce travail de thèse.</p>	<p>R</p> <p>R</p> <p>PA</p>
S 13 : Scénarios d’Empreinte	<p>a- Si des scénarios sont utilisés, le rapport fait la distinction entre l’analyse de l’empreinte et les scénarios évalués.</p> <p>b- Le rapport affirme que les scénarios ne sont pas des prédictions.</p> <p>c- Dans le cas où des scénarios sont utilisés, ils sont décrits d’une façon compatible avec ces exigences.</p>	<p>Scénarios utilisés dans cette étude :</p> <ul style="list-style-type: none"> - calcul d’empreinte de la phase utilisation du tronçon construit (basé sur des estimations). - scénario de comparaison des empreintes écologiques du carburant et des biocarburants. - scénario de comparaison des empreintes écologiques de certains matériaux de construction de sous couches routières. 	<p>R</p>
S 14 : Limites de l’étude d’empreinte	<p>a- Il y a une mention explicite à la question de combien de capacité bioproductive de la biosphère (sols bioproductifs) est occupée par une activité déterminée.</p> <p>b- Un rapport des limitations de l’étude est complet et clair, avec les frontières bien identifiées.</p> <p>c- L’étude commente les éléments qui affectent l’exactitude et la précision des résultats.</p> <p>d- L’étude explique les estimations conservatives de l’empreinte, qui sous-estiment l’empreinte</p> <p>e- L’étude explique que l’empreinte et la biocapacité ne prédisent pas les futures biocapacités et consommations et que l’analyse ne prend pas en compte la dégradation des sols.</p>	<p>a- Plus ou moins mentionné (mais sans ignorer les limites de l’étude : exemple de l’indisponibilité de certaines données).</p> <p>b- Frontières et limites précisées dans l’étude.</p> <p>c- L’étude présente une discussion sur les principaux éléments : les facteurs de conversion, la qualité des données de consommation collectées, l’estimation d’incertitudes.</p> <p>d- Ceci a été décrit en parlant par exemple des données manquantes qui sous-estime, à la suite, l’empreinte totale.</p>	<p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>R</p> <p>PA</p>

S 15 : Explication de la relation entre durabilité et empreinte	a- Le rapport n'affirme pas que l'empreinte écologique soit une mesure complète de la durabilité b- Le rapport communique en résumé que l'empreinte veut répondre à une seule question: combien de capacité bioproductive est utilisée par l'activité humaine.	a- voir partie limites de l'empreinte (cf. § 2.3.2. Partie I) b- La discussion sur ce sujet est largement présentée dans l'étude.	R R
S 16 : Citation des sources et description des méthodologies	a- Le rapport donne des références sur d'autres études pour soutenir l'analyse et les conclusions. b- Le rapport donne les références de toutes les données utilisées pour construire la matrice de consommation.	a- voir « Références » b- Références définies	R R
S 17 : Référence aux Standards et aux Organismes de Certification	a- Le rapport confirme sa conformité avec les standards d'empreinte écologique et cite la version des standards utilisée. b- Le Rapport fait référence aux standards d'empreinte écologique c- Le Rapport fournit les coordonnées de contact, y compris le site web de l'organisme pour des informations supplémentaires.	a- L'étude est évaluée selon les standards d'empreinte écologique de 2006 [GFN, 2006b]. b- Référence bien mentionnée. c- www.footprintstandards.org .	R R R
S 18 : Style de communication.	a- Évitez les abréviations. Par exemple : plutôt prononcer 'Empreinte Ecologique' plutôt que 'EE'. Et 'le réseau d'empreinte écologique = Global Footprint Network' au lieu de prononcer seulement les trois lettres 'GFN'. b- Choisissez des noms descriptifs : par exemple en expliquant les composantes d'empreinte écologique et des sous-composantes (par exemple, n'utilisez pas le mot "déchets" comme une catégorie, mais plutôt "la gestion des déchets"). c- Évitez des tons moralistes ou critiques : être aussi descriptif que possible. Distinguer ce qui est 'analyse' et ce qui est 'interprétation'. Éviter les adjectifs inutiles (les termes comme « responsable ou la responsabilité »). d- Considérer comme message principal : non pas "réduire votre empreinte" mais "garantir votre bien-être et sauvegarder donc les services écologiques".	Des éléments pris en compte en communiquant sur le travail d'empreinte. Le travail porte principalement sur la méthode de calcul de l'empreinte écologique.	

	<p>e- La clarté des questions et réponses en communiquant sur l’empreinte.</p> <p>f- Si possible, utiliser des textes standards (www.footprintstandards.org).</p> <p>g- Évitez la critique ou le blâme ! Soulignez le sérieux du problème, mais maintenir un ton positif</p> <p>h- Laissez les lecteurs être les ‘héros’ et les laisser choisir. Évitez "devrait", "devoir," etc.</p>		
--	---	--	--

Tableau 32 : *Evaluation de l’étude de calcul d’empreinte écologique du chantier de Vendranges, par rapport aux standards.*

7 Conclusion

Cette étude confirme que l'approche par composantes (l'approche 'micro') est proche d'une analyse de cycle de vie, qui part du principe de modéliser de manière systémique l'objet dont on cherche à calculer l'empreinte en mettant en évidence les flux entrants et sortants de matières et d'énergie. Elle peut s'appliquer à des activités de nature et de taille très diverses en prenant en compte toutes les données détaillées du périmètre d'étude pour avoir un résultat plus proche de la réalité. Néanmoins, la méthode représente aussi certaines limites, dont quelques-unes sont citées dans le chapitre 5 de la deuxième partie. Nous en parlons en détail dans la partie suivante.

PARTIE IV

Partie IV Discussion sur intérêts et limites de l’empreinte écologique appliquée à un niveau ‘micro’ et Perspectives

Cette partie consiste à recenser les principaux intérêts et inconvénients de la méthode d'empreinte "micro"; développée dans la deuxième partie de ce travail de thèse; en repérant les principaux points possibles à développer dans le but d'améliorer la méthode de calcul développée dans ce mémoire.

En se basant sur les résultats obtenus par l'application de cette méthode de calcul d'empreinte dans le domaine de la construction routière (le cas du chantier de Vendranges), les principaux avantages sont présentés dans le premier chapitre de cette partie.

Certaines limites méthodologiques qui se dégagent par rapport à l'utilisation de cet indicateur au niveau d'une organisation ou d'un projet, sont abordées dans le deuxième chapitre de cette partie.

1 Intérêts de la méthodologie de calcul d’empreinte écologique au niveau « micro »

Dans la troisième partie de ce mémoire, l'application de la méthode de calcul d'empreinte 'micro' pour le cas d'un chantier routier a été présentée (le chantier de Vendranges). Les principaux résultats de ce calcul, obtenu en suivant la logique d'une analyse de cycle de vie appliquée à un site industriel, pour le chantier en phase de construction mettent en évidence les impacts respectifs de certaines consommations qui auraient pu, *a priori*, être perçues comme négligeables : consommations liées à l'énergie et la matière nécessaire à la fabrication des engins de chantier et des tuyaux d'assainissement par exemple.

C'est une application qui a suivi la logique d'une analyse de cycle de vie (impacts du berceau à la tombe) à un site industriel.

De plus, un des principaux avantages liés à cette étude est que l'empreinte écologique permet d'intégrer d'autres facteurs que l'énergie utilisée tout au long du cycle de vie du produit considéré : l'intégration, dans les calculs, de la surface nécessaire à la production du bois utilisé pour le papier des bureaux ainsi que la surface nécessaire à la production des matériaux de construction ou au traitement des eaux usées de la base de vie du chantier.

Ainsi, une approche 'par composants' (ou l'approche 'micro') proche d'une analyse de cycle de vie, et prend en compte toutes les données détaillées du périmètre d'étude et peut être considérée comme celle qui donne le résultat le plus proche de la réalité. Cependant, pour mener à bien cette approche, de nombreuses données apparaissent souvent comme manquantes. On pourrait accepter qu'une combinaison des deux méthodes ("par composants ou micro" et "national account") est nécessaire afin de compléter les données manquantes. Cette façon de faire reçoit l'appellation de *Stepwise method* [RPA, DEFRA, 2005] et consiste à utiliser une approche 'par composants' quand les données locales existent et une approche 'national account' pour le reste des cas. Les deux approches sont donc complémentaires [RPA, DEFRA, 2005]. Mais ceci est particulièrement intéressant pour des sites ou organisations dont les consommations sont proches des types de consommations moyennes de foyers (exemple: tertiaire), et non pour des applications très spécifiques, comme c'est le cas d'un chantier routier.

1.1 Application à l'évaluation et au contrôle environnemental

Les calculs d'empreinte écologique proposent l'observation de l'impact sur les ressources naturelles régénératives d'une population à un instant donné. Le suivi et la surveillance de l'empreinte dans le temps peuvent cependant permettre d'évaluer des progrès ou des régressions, vis-à-vis de la contribution d'une activité anthropique au déclin écologique global [Wackernagel

et Yount, 1998]. L'empreinte peut également participer à l'analyse de scénarii de réduction d'impact. Le suivi peut alors permettre d'évaluer l'efficacité d'une politique environnementale. Les tableurs mis en place peuvent, de manière générale, servir de base à l'élaboration de scénarii visant à évaluer les variations d'empreinte consécutives à une évolution stratégique, d'ordre technologique [Wackernagel et Yount, 2000] ou organisationnelle. L'empreinte représente également « un étalon pour mesurer le progrès de l'économie dans la réduction de son poids sur la nature » [Wackernagel et Rees, 1996].

Dans ce sens, l'étude de calcul d'empreinte écologique du chantier de Vendranges nous a montré que cet outil peut être utilisé comme « tableau de bord » permettant de garder une trace de l'ensemble des consommations et impacts d'une activité donnée. L'empreinte dans ce cas d'étude pourrait permettre de donner un cadre également systématique au *suivi* des consommations d'énergie, consommables, biens et services, d'autant plus que ce suivi est rarement réalisé dans le cadre de chantiers routiers publics. Cela pourrait permettre de réaliser à la suite des économies en identifiant des pistes de diminution de ces consommations.

• **Scénario de diminution de la consommation en carburant fossile pour minimiser les émissions de CO₂ : utilisation de biocarburant ?**

Le carburant est utilisé en grande quantité pour l'alimentation des engins (du chantier routier de Vendranges). Nous cherchons ci-dessous à évaluer l'impact en terme d'empreinte écologique de l'hypothèse du remplacement de ce carburant par du biocarburant issu de la biomasse. On appelle « biocarburant » un carburant liquide obtenu à partir de matières premières végétales. Actuellement, deux grandes filières industrielles existent : les alcools et les dérivés des huiles végétales [ADEME, 2007 et IFP¹¹¹].

La filière bioéthanol

L'éthanol est principalement issu, en France, des cultures de betteraves (annexe 9) et de céréales. Il est produit par fermentation de sucres ou d'amidon. Cet alcool peut être incorporé à l'essence jusqu'à 5 % en volume sans modification technique des moteurs et jusqu'à 7,5 % s'il est transformé au préalable avec l'isobutène pétrolier en ETBE (éthyl ter butyl éther), ce dernier étant autorisé jusqu'à 15 % [ADEME, 2007].

Ce bioéthanol peut également être utilisé avec des véhicules mieux adaptés, que l'on appelle «flexibles», qui permettent l'utilisation normale d'un mélange à 85 % d'éthanol et de 15 % d'essence (E85) [ADEME, 2007].



Figure 53 : Filière bioéthanol
Selon IFP (2007)

¹¹¹ http://www.ifp.fr/IFP/fr/cinfo/fd08_Biocarburants.htm

La filière huiles végétales

En ce qui concerne la filière des huiles végétales issues du pressage des oléagineux (colza ou tournesol), une réaction de transestérification (annexe 10) avec du méthanol ou de l'éthanol permet d'obtenir un produit incorporable dans le gazole pour les moteurs Diesel : l'EMHV (l'ester méthylique de l'huile végétale) et l'EEHV (l'ester éthylique de l'huile végétale). L'incorporation des esters est autorisée dans le gazole jusqu'à 5 % en volume, sans modification des moteurs diesel actuels, et peut même atteindre 30 %. Les esters doivent être conformes à la norme européenne (NF) EN 14214 qui définit leurs spécifications [ADEME, 2007].



Figure 54 : Filière biodiesel
Selon IFP (2007)

Il existe aussi ce qu'on appelle, les Huiles Végétales Pures (HVP). Il s'agit d'huiles non modifiées de colza ou de tournesol, obtenues simplement par pression à froid, décantation et filtration. Elles peuvent être utilisées, pures ou en mélange dans les véhicules diesel, avec ou sans adaptation des moteurs selon les configurations. Les HVP présentent de nombreux avantages, comme par exemple :

- le meilleur bilan énergétique parmi les biocarburants (1 unité de carburant fossile permet de produire 5 unités d'HVP environ),
- un bilan neutre en terme d'émissions de CO₂ et un produit biodégradable,
- une production possible en filière courte décentralisée, favorable au développement local,
- des co-produits, les tourteaux, très intéressants pour les exploitations d'élevage.

La production de carburants à partir de la biomasse (à partir des cultures alimentaires « colza, blé, betterave, etc » et de lignocellulose « bois, paille et déchets ») sont envisagés comme solution alternative pour diminuer la consommation du pétrole et les émissions de CO₂.

En théorie, lors de leur combustion, ils produisent du CO₂, mais les mêmes cultures de biomasse (producteurs de biocarburants) absorbent la même quantité de CO₂. L'augmentation de la quantité de CO₂ dans l'atmosphère liée aux biocarburants, provient donc des émissions de méthane lié à la décomposition biologique ou de protoxyde d'azote liés aux engrais, associées à des émissions provenant de la culture (émissions liées aux activités agricoles) et de la transformation et la distribution des produits de culture [ADEME, 2007].

L'ADEME a défini les facteurs d'émission suivants, discriminant une valeur « avec amont » et une valeur de combustion seule, dite « sans amont » (tableau 33):

	Facteurs d'émission par tonne	
	Sans amont (combustion seule)	Avec amont (activité de culture, transformation et distribution)
Bioéthanol t équ. C/t	0	0, 25
EMHV (colza) t équ. C/t	0,036	0, 24

Tableau 33: Facteurs d'émission retenus pour les biocarburants
[ADEME, 2007]

Il est nécessaire de noter que l'EMHV est un produit obtenu par transestérification d'huile végétale et de méthanol, ce dernier étant actuellement obtenu à partir de gaz naturel. L'EMHV contient ainsi une fraction de carbone non biologique, libérée à la combustion. Ceci n'est pas le cas du bioéthanol, dont l'ensemble du carbone est d'origine biologique [ADEME, 2007]. Ce qui explique les valeurs de facteurs d'émission, de ces deux produits, liés à la combustion seule présentés par le tableau 33.

En ce qui concerne la productivité des terres arables en produits bruts nécessaires pour la fabrication des biocarburants, le tableau 34 en donne un extrait :

Un hectare de culture de tournesol en culture biologique, par exemple, produit environ une tonne d'huile brute¹¹² (tableau 34). Cette surface peut être traduite en empreinte, en hectare global, par les deux facteurs d'équivalence et de rendement 'terres arables' (cf. tableau 5. Partie I).

Cultures	Productivité en biocarburant¹¹³ (t / ha)	Hectares de terres arables nécessaires pour produire une tonne de biocarburant	Type de biocarburant
Tournesol	1,06	1	huile
Colza	1,37	1	huile
Betterave	5,78	0,17	éthanol
blé	2,55	0,4	éthanol

Tableau 34 : Productivité en biocarburant

Source: Etude « Bilan énergétique et effet de serre des filières de production des biocarburants en France » 2002 - Ecobilan pour Minefi et ADEME

Une route enzymatique et deux voies thermochimiques sont actuellement en cours de développement pour produire des carburants à partir de lignocellulose: bois, paille et déchets [Duplan, 2007].

Le tableau 35 illustre l'hypothèse abordée ci-dessus en comparant l'empreinte écologique d'une tonne de carburant fossile, issu du pétrole, avec les empreintes estimées, en hectare global (c'est-à-dire en utilisant les FE et FR), des biocarburants issus des différentes biomasses. On estime que l'un de ces biocarburants pourrait être utilisé pour l'alimentation des équipements utilisés pour la construction du chantier routier.

¹¹² Tableur Excel, selon le rapport du conseil économique et social de Pasty, Débouchés non alimentaires des produits agricoles, 2004, p.97

¹¹³ Produit final

Une tonne de produit	EE sur sols énergétiques (hag)	EE sur sols arables (hag)	EE sur sols construits (hag)	EE sur espace aquatique (hag)	EE sur sols forêts (hag)	Total estimé (hag)
Carburant fossile issu du pétrole	0,6	-	? sol occupé par l'installation de raffinage ainsi que l'emprise des routes pour transporter les produits	-	-	0,6
Biocarburant obtenu de culture de tournesol	0,1	5	? sol occupé par l'installation du traitement de la matière première ainsi que l'emprise des routes pour transporter les produits	? eaux consommées pour l'irrigation	-	5,1
Biocarburant obtenu de culture de colza	0,1	5	? sol occupé par l'installation du traitement de la matière première ainsi que l'emprise des routes pour transporter les produits	? eaux consommées pour l'irrigation	-	5,1
Biocarburant obtenu de culture de betterave	0,15	1	? sol occupé par l'installation du traitement de la matière première ainsi que l'emprise des routes pour le transport	? eaux consommées pour l'irrigation	-	1,15
Biocarburant obtenu de culture de blé	0,15	2	? sol occupé par l'installation du traitement de la matière première ainsi que l'emprise des routes pour transporter les produits	? eaux consommées pour l'irrigation	-	2,15
Biocarburant obtenu de Lignocellulose « résidus de bois et de paille de céréales »	émissions non directes liées à la transformation ?	-	? sol occupé par l'installation du traitement ainsi que l'emprise des routes pour le transport	-	-	?
Biocarburant obtenu de Lignocellulose « déchets »	émissions non directes liées à la transformation?	-	? sol occupé par l'installation du traitement ainsi que l'emprise des routes pour le transport	-	-	?

Tableau 35 : Estimation des empreintes écologiques des biocarburants issus des différentes biomasses

D'après ce tableau, il est intéressant de signaler qu'en plus des émissions de CO₂, l'appropriation physique des terres agricoles (nécessaire pour la culture des biomasses) peut être prise en compte dans la méthode d'empreinte écologique contrairement aux bilan carbone et ACV. Ainsi, elle pourrait intégrer dans ses calculs l'appropriation des autres catégories de sols bioproductifs, mais par manque de données, ce calcul d'appropriation nécessite des éléments d'un accès peu aisé :

- sols construits : les sols occupés par les installations de traitement des biomasses brutes ainsi que l'utilisation des routes (l'emprise des routes) pour transporter les produits.
- sols forêts : notamment le bois nécessaire pour la production du biocarburant (seulement si ce dernier est obtenu du bois brut).
- espaces aquatiques : les quantités d'eau consommées pour l'irrigation des cultures alimentaires (betterave, blé...) destinées à la production du biocarburant.

En analysant les résultats d'empreinte des biocarburants, il s'avère que leur empreinte écologique est loin d'être négligeable. Cela corrobore les doutes émis récemment par la CE sur ces produits. Cependant, sur un plan méthodologique, il nous semble intéressant de proposer cette méthode alternative de calcul des empreintes énergétiques qui est, à l'heure actuelle, la seule façon d'évaluer l'impact qu'auraient nos consommations énergétiques sur le capital naturel régénératif si les modes de production de carburants était basés sur l'exploitation de ressources renouvelables. En effet, à l'heure actuelle, le choix méthodologique de prise en compte par l'empreinte écologique des consommations énergétiques fossiles est d'évaluer la surface qui serait nécessaire pour absorber le CO₂ émis. Un autre choix qui serait possible serait d'évaluer la surface qui serait nécessaire pour produire les biocarburants équivalents aux ressources fossiles consommés. Cette hypothèse n'a pas été choisie du fait du principe de toujours choisir, entre deux hypothèses possibles, celle qui donne le plus petit résultat. Ce choix joue donc en défaveur des biocarburants dans notre scénario ci-dessus.

Comme le confirme le tableau 36, en utilisant le scénario de remplacer le carburant fossile utilisé sur le chantier de Vendranges en phase de construction par le biocarburant issu du betterave par exemple, cette stratégie permet d'éviter de l'empreinte énergétique, mais on en rajoute sur les sols arables.

	Empreinte écologique sur sols énergétiques	Empreinte écologique sur sols construits	Empreinte écologique sur espaces aquatiques	Empreinte écologique sur sols Forêts	Empreinte écologique sur sols arables	Empreinte écologique totale
Empreinte actuelle (gha/ 8 km) (en utilisant le carburant fossile issu du pétrole)	2701	391	1	33		3126
Nouvelle empreinte (gha/ 8 km) (si on utilise le biocarburant issu du betterave par exemple)	1739	391	1	33	2138	4302

Tableau 36 : Empreinte totale du chantier de Vendranges, en phase de construction, portant sur l'idée de remplacer le carburant issu du pétrole par le biocarburant issu du betterave.

Il est donc important de préciser que l'obtention des biocarburants à partir des cultures alimentaires, nécessite d'importantes surfaces cultivables, ce qui explique l'empreinte élevée

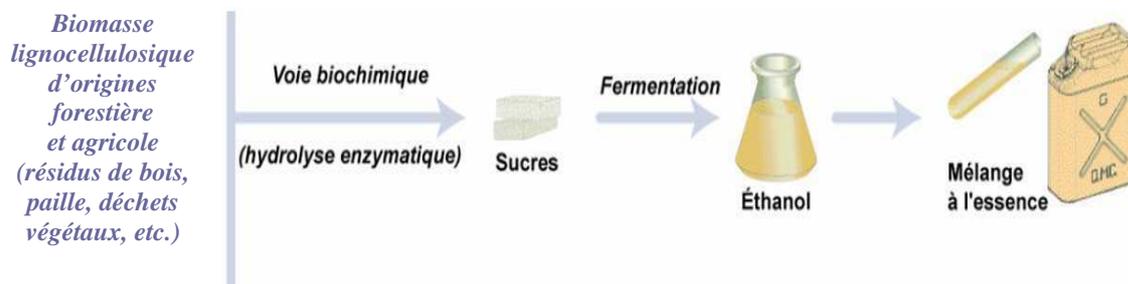
remarquée sur ce type de sols (tableau 35). Selon Jean Marc Jancovici¹¹⁴, il faudrait par exemple cultiver 118 % de la surface totale de la France en tournesol pour remplacer l'intégralité des 50 Mtep de pétrole consommées chaque année par les français dans les transports (104 % de la surface nationale avec le Colza, 120 % avec la betterave et 270 % avec le blé). Pour remplacer totalement la consommation de carburants fossiles par des biocarburants, il faudrait plusieurs fois la surface terrestre. L'emprise de "sols arables" est plus importante dans ce cas. A ce propos, il ne faut pas ignorer les sous produits : pour fabriquer l'éthanol à partir de betterave par exemple, la vinasse devrait être épandue sur une surface non négligeable.

« Les biocarburants sont donc un intéressant problème de politique agricole, mais un élément négligeable d'une politique énergétique », signale Jean Marc Jancovici.

En revanche, les nouvelles filières de production du biocarburant à base de lignocellulose (résidus de bois, de paille de céréales et déchets) pourraient offrir des perspectives intéressantes¹¹⁵, car l'utilisation de la biomasse lignocellulosique pour la production d'éthanol-carburant (figure 55) présenterait de multiples avantages des points de vue environnementaux et socio-économiques :

- bilan en émissions de CO₂ plus favorable que l'éthanol issu des plantes sucrières¹¹⁶, vu qu'on évite les émissions liées à l'activité de culture de ces dernières (betterave par exemple). Par manque de données, nous n'avons pas pu calculer les empreintes liées à ces types de biocarburants qui sont principalement obtenus à base de résidus et de déchets;
- valorisation des coproduits et déchets;
- pas de compétition avec les surfaces agricoles à usage alimentaire ou agroalimentaire (tableau 35);
- moindre coût de la matière première (puisque ce sont des déchets qui pourront être valorisés).

Figure 55 : Transformation de la matière lignocellulosique en éthanol



Selon IFP (2007)

Mais il demeure encore de nombreux verrous technologiques avant un déploiement à l'échelle industrielle [IFP, 2007], car certaines étapes de procédés sont complexes et leur amélioration nécessite de progresser sur des aspects cognitifs, notamment sur l'enzymologie de la cellulose et sur la physiologie des levures nécessaires pour le procédé. L'implantation d'unités de production industrielle est un enjeu majeur dont l'avenir repose en grande partie sur les retombées de l'essor des biotechnologies¹¹⁷.

¹¹⁴ <http://www.manicore.com> (consulté le 3 mars 2007)

¹¹⁵ www.ifp.fr

¹¹⁶ www.ifp.fr

¹¹⁷ www.ifp.fr

La directive européenne 2003/30/CE demande à ce qu'en 2010 les biocarburants représentent 5,75 % de la consommation et à planifier la substitution de 20 % de carburants d'origine fossile par des biocarburants dans le secteur des transports¹¹⁸ d'ici 2020, en continuant d'étudier le potentiel de ces derniers sur les technologies moteurs avancées [IFP, 2007].

En avril 2007, un rapport de l'ONU n'arrive pas à quantifier les avantages et inconvénients des biocarburants. Il propose aux décideurs d'encourager leur production et utilisation, en cherchant à maximiser les bénéfices pour les populations pauvres et pour l'environnement tout en développant la recherche pour des usages d'intérêt public [UN-Energy, 2007].

De plus, les données de l'étude de l'ADEME (2007) liées aux bilans énergétiques des biocarburants ont été controversées¹¹⁹. Le Réseau action climat (RAC-F) a remis en cause ses méthodes de calculs dès 2005, tout comme l'Institut national de recherche agronomique (INRA) dans un article sur l'ambivalence des filières agrocarburants [INRA, 2005]. Il s'est avéré aussi qu'aux échelles européennes et internationales, les études sur leurs bilans énergétiques et d'émissions de gaz à effet de serre (GES) utilisaient une autre méthodologie. On ne compte plus aujourd'hui le nombre d'études qui remettent en cause l'intérêt des agrocarburants et dénoncent leurs impacts collatéraux sur l'environnement [Journal de l'Environnement, 2008]. La méthode qu'a utilisée l'ADEME dite de "l'imputation massique", consiste à affecter les consommations énergétiques et les émissions de GES aux agrocarburants et à leurs coproduits selon leur masse (et non au prorata de leur contenu énergétique = imputation au contenu énergétique). Cette méthode est simple à mettre en œuvre mais elle ne reflète pas la réalité car les coproduits sont parfois très lourds (vinasses des filières éthanol par exemple). Ils supportent donc une grande part des coûts énergie et GES, améliorant artificiellement les bilans des agrocarburants [Journal de l'Environnement, 2008]. Sans oublier que les filières d'importation ne sont pas étudiées, alors que les agrocarburants produits dans les pays du Sud peuvent avoir un impact important sur les émissions de GES, notamment à cause de la déforestation, et que la France aura certainement recours à ces importations si elle maintient ses objectifs d'incorporation.

Le Grenelle de l'environnement a conclu, en octobre 2007, qu'une nouvelle étude «exhaustive et contradictoire» devait être demandée à l'ADEME.

L'ADEME s'apprête donc à publier son étude sur un nouveau référentiel de calcul pour les bilans énergétiques et d'émissions de gaz à effet de serre (GES) des agrocarburants en France¹²⁰. Ce nouveau référentiel débouchera sur des données fondamentales pour les décisions politiques à venir.

• Diminution de la consommation en matériaux de construction nécessaires pour la construction routière

Comme il a été déjà expliqué dans la troisième partie de ce mémoire, l'empreinte écologique du chantier de Vendranges en phase de construction s'exerce surtout à travers la consommation du carburant (servant à l'alimentation des équipements industriels) et aussi des différents matériaux de construction utilisés sur le chantier. La diminution de la consommation en ces matériaux est donc une solution qui pourrait réduire l'empreinte écologique totale de ce chantier.

¹¹⁸ www.ifp.fr

¹¹⁹ JDLE : «On ne compte plus les études remettant en cause les agrocarburants», le 14/04/2008 (In: <http://www.journaldelenvironnement.net/fr>).

¹²⁰ Réseau Action Climat-France : Communiqué de presse, Montreuil, le 3 avril 2008 - Étude agrocarburants de l'Ademe : les dés seraient-ils déjà jetés ?

Ainsi et par hypothèse, certains matériaux de base constituant les sections de chaussée du chantier de Vendranges pourraient être remplacés par d'autres qui sont recyclés ou valorisés. C'est le cas, par exemple, des enrobés en béton bitumineux qui constitue la couche de surface (ou de liaison) de la chaussée de Vendranges. Ils sont composés de bitume et de granulats (cf. figure 43, Partie III) aux caractéristiques mécaniques performantes et variées (environ 20000 tonnes de Béton Bitumineux sont utilisées).

Pour cela, nous proposons de comparer les empreintes écologiques de trois structures différentes de couche de surface :

- couche composée d'une tonne de béton bitumineux à 0 % de recyclage, comme c'est le cas de la chaussée de Vendranges;
- couches composées d'une tonne de béton bitumineux avec plusieurs taux de recyclage, de 10 % à 30 %, comme expliqué dans le tableau 37;
- couche composée d'une tonne de mâchefers valorisables, traités¹²¹ (tableau 37) et ayant subi une autre étape de traitement au liant hydrocarboné (bitume) pour qu'ils soient valorisés en sous-couches routières.

Béton bitumineux			
Matériaux (t)	Granulats (t) (Carrière)	Bitume (t) (Raffinerie)	Autres matériaux recyclés (t) (chantier)
BB 0 %	94,7	5,3	0
BB 10 %	85	4,68	11,5
BB 20 %	75	4,18	21,6
BB 30 %	65	3,68	33,1
Mâchefers			
Matériaux¹²² (%)	Mâchefers valorisables¹²³	Bitume	Additifs
	94,5 %	4,5 %	1 %

Tableau 37 : Variation des quantités de matériaux (exemples de structures de la couche de surface) (Taux de recyclage du BB de 10 % à 30 %, selon [Ventura et al, 2005])

Définition des mâchefers :

Les Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères (MIOM) sont des résidus solides de la combustion des déchets ménagers qui représentent 25 à 30 % des tonnages d'ordures ménagères incinérés. De par leurs propriétés mécaniques, ils peuvent être utilisés comme matériaux en technique routière. Cette utilisation des MIOM est encadrée depuis 1994 (circulaire 94-VI-1 du 9 mai 1994, relative à l'élimination des mâchefers d'incinération des résidus urbains) [Elbouazzaoui, 2002]. Cette circulaire définit une classification des mâchefers selon leur potentiel polluant et précise les conditions dans lesquelles les mâchefers peuvent être valorisés.

Il est important à signaler que le potentiel polluant des mâchefers est évalué à l'aide de l'essai de lixiviation normalisé NF X 31-210, ce qui permet de classer les résidus en "valorisables", "maturables" ou "stockables". Cependant ce test n'est pas suffisant pour déterminer ou prévoir le comportement et l'impact environnemental à long terme du matériau dans un scénario donné de valorisation. En effet, il s'avère peu représentatif des conditions réelles d'utilisation du matériau.

¹²¹ Criblage, déferraillage, tri des métaux non ferreux et broyage.

¹²² Valorisation des MIOM en techniques routière: suivi environnemental de produits routiers à base de MIOM sur chaussées tests. INERIS et EUROVIA, par Bernard Bartet et Ivan Drouadaine. In : http://ofrir.lcpc.fr/article_produit/26/4/109/produit_joined_file/Bartet_drouadaine2001.pdf.

¹²³ Mâchefers valorisables qui sont traités dans une installation de traitement avant d'être valorisés en sous-couches routières.

C'est dans ce contexte que s'inscrivent plusieurs études qui permettent de mettre au point un modèle permettant d'évaluer l'impact environnemental à long terme de l'utilisation des mâchefers classés « Valorisable » en sous-couche routière, et plus particulièrement le transfert des polluants vers les ressources en eau [Barthet, 2003]. C'est le cas des études d'évaluation de l'écotoxicité des lixiviats¹²⁴ des MIOM qui permettent de mieux apprécier l'impact du rejet de lixiviat sur le milieu naturel [Barthet, 2003].

Nous n'allons pas détailler tout ce qui a déjà été écrit sur l'évaluation de l'écotoxicité des lixiviats des MIOM, mais pour cela nous suggérons les travaux de thèse de Barthet (2003) et Triffault-Bouchet (2004).

La valorisation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) intéresse particulièrement l'industrie des granulats pour la construction routière¹²⁵. Même si les MIOM, n'ont pas la dénomination de granulats au sens de la norme XP P 18-540 "Granulats", une fois maturés, criblés, déferrailés et séparés de leurs métaux non ferreux dans des installations adéquates, ils se présentent comme une grave qualifiable par l'article 7 de cette norme : "Granulats pour les couches de fondation, de base et de liaison de la chaussée".

En d'autres termes, ils peuvent après traitement être considérés comme de véritables matériaux de construction.

Comparaison des empreintes

En premier temps, en considérant le facteur d'émission de 0,054 tonne de CO₂ par tonne de béton bitumineux [Chappat et Bilal, 2003], soit 0,015 t équ. C / t, l'empreinte écologique de ce dernier est d'environ 0,01 hag/t. Ce calcul a été fait en prenant en compte la méthode d'empreinte 'bilan carbone®' expliqué par l'équation n° 3 dans le chapitre 2.2.4 de la deuxième partie de ce mémoire. De la même façon, à des taux de recyclage différents de 10 %, 20 % et 30 % comme c'est expliqué dans le tableau 37 et en faisant respectivement intervenir les valeurs de facteurs d'émission de 0,014 t équ. C / t [Chappat et Bilal, 2003]; 0,012 t équ. C / t et 0,011 t équ. C / t [ADEME, 2005], nous obtenons presque la même valeur d'empreinte d'environ 0,01 hag/t (tableau 38).

¹²⁴ Appelés aussi percolats: résultent de la percolation des eaux météoriques à travers les MIOM valorisés en techniques routières.

¹²⁵ www.incineration.org

Une tonne de :	Facteur d'émission (t équ. C / t)	Incertitude sur le facteur d'émission %	EE sur sols énergétiques (hag/t)	EE sur sols dégradés (hag/t)
béton bitumineux à 0 % de recyclage	0,015	20	0,009	?
béton bitumineux avec 10 % de recyclage	0,014	20	0,009	?
béton bitumineux avec 20 % de recyclage	0,012	20	0,008	?
béton bitumineux avec 30 % de recyclage	0,011	20	0,007	?
mâchefers valorisés	?	?	?	?

Tableau 38 : Empreintes écologiques de quelques exemples de matériaux de construction de la couche de surface de chaussée (couche de liaison).

Ces résultats montrent que ces taux de recyclage considérés ne sont pas significatifs.

Une étude d'ACV de couches de liaison de chaussées recyclées à différents taux (réalisée par le LCPC) confirme ce résultat en signalant que les différences constatées entre des taux de recyclage de 0 % à 30 % restent faibles [Ventura et al, 2005].

Dans un deuxième temps, pour estimer l'empreinte d'une tonne de mâchefers sur les sols énergétiques, un facteur d'émission en tonne équivalent de carbone par tonne de mâchefers traités pour valorisation en sous-couches routières est nécessaire pour l'application de l'équation n° 3, expliquée dans la deuxième partie. Ceci nous permettrait d'avoir un ordre de grandeur de l'empreinte de ces mâchefers en sols énergétiques, afin de la comparer avec les empreintes des autres matériaux de construction considérés (le béton bitumineux à des taux de recyclage de 0 % à 30 %).

En effet, l'incinération des ordures ménagères émet du CO₂ : l'ADEME (2007) définit un coefficient d'émission de 41,3 kg de CO₂ par giga Joule d'ordures ménagères. Elle indique également le PCI de ces combustibles de 8,8 giga Joule par tonne [ADEME, 2007]. A partir de ces informations, le contenu en CO₂ d'une tonne d'ordures ménagères peut être déterminé : soit 0,4 t CO₂ / t d'ordures ménagères (ou 0,1 t équ. C /t). Cependant, par hypothèse méthodologique, nous décidons de ne pas attribuer ces émissions de CO₂ aux mâchefers car elles se produiraient même si les mâchefers n'étaient pas valorisés. Il faudrait donc connaître l'énergie et les émissions de CO₂ supplémentaires liées au traitement des mâchefers en vue de leur valorisation.

Néanmoins, nous n'avons pas pu accéder à cette donnée précise liée au traitement des mâchefers. En ce qui concerne le calcul d'empreinte sur les sols dégradés des exemples de matériaux considérés (béton bitumineux à différents taux de recyclage et mâchefers valorisés), il conviendrait de prendre en considération les principaux éléments suivants :

- le sol dégradé en exploitant les carrières (pour la production du béton bitumineux);
- l'emprise des routes pour transporter les produits;
- sols occupés par les installations de traitement.

Comme il a été déjà évoqué, l'intégration de ce type de sols renforce l'intérêt de la méthode d'empreinte écologique.

En revanche, nous faisons l'hypothèse que l'empreinte des mâchefers sur ce type de sols pourrait être moins significative que l'empreinte du béton bitumineux, puisque la production de ce dernier nécessite l'utilisation d'une quantité importante des granulats ce qui augmente à la suite l'exploitation des carrières (tableau 39).

EE sur sols dégradés	béton bitumineux à 0 % de recyclage	béton bitumineux à 30 % de recyclage	mâchefers
* dégradation des sols en exploitant les carrières	L'extraction des granulats	L'extraction des granulats	-
* l'emprise des routes pour transporter les matériaux jusqu'au lieu de traitement :	sols construits utilisés pour transporter la matière première (les granulats de la carrière et le bitume de la raffinerie) jusqu'à la centrale d'enrobage pour la production du BB (à 0 %).	sols construits utilisés pour transporter les matériaux jusqu'à la centrale d'enrobage pour la production du BB (à 30 %).	sols construits utilisés pour : - transporter les mâchefers jusqu'à l'usine de maturation. - transporter les mâchefers valorisables au lieu de traitement
* sol occupé par les installations de traitements :	par la centrale d'enrobage	par la centrale d'enrobage	-par l'usine de maturation -par l'installation de traitement
* l'emprise des routes pour transporter les matériaux jusqu'au site:	sols construits utilisés pour transporter le BB jusqu'au lieu de l'activité de construction.	sols construits utilisés pour transporter le BB jusqu'au lieu de l'activité de construction.	sols construits utilisés pour transporter les mâchefers traités jusqu'au lieu de l'activité de construction.
* zones de stockages :	sols occupés par les stocks de la matière première et le produit fini.	sols occupés par les stocks de la matière première et le produit fini.	- sols occupés par les stocks (mâchefers valorisables) - sol qui serait nécessaire pour stocker les mâchefers si non valorisés.

Tableau 39 : Sols dégradés considérés dans le calcul d'empreinte du béton bitumineux (à 0 % et 30 % de recyclage) et des mâchefers valorisés en technique routière.

La valorisation en technique routière des mâchefers reste une solution qui permet en effet de minimiser l'exploitation des ressources naturelles en économisant les granulats concassés et à la suite minimiser l'empreinte sur les sols dégradés (tableau 39), bien qu'il ne faille pas ignorer les risques écotoxiques et la complexité d'évaluation des impacts environnementaux à long terme.

1.2 Application à la communication : un outil synthétique et souple d'utilisation pour la comparaison de différentes études

En reprenant le « processus d'évaluation triangulaire » illustré par la figure 23 de la première partie de ce mémoire, pour le cas du chantier routier étudié, l'empreinte écologique a permis d'évaluer approximativement la contribution à chaque catégorie d'impact de la plupart des flux du bilan de ce chantier.

Après avoir identifié les indicateurs élaborés à partir des bases de données d'ACV et de bilan carbone® (les énergies incorporées et les facteurs d'émission), les données de l'inventaire sont agrégées par ces indicateurs ainsi que par d'autres coefficients. Une évaluation globale des impacts du site est ensuite effectuée en sommant les résultats agrégés et en les convertissant à l'aide des coefficients de transfert (évoqués en détail dans les parties précédentes: *facteur de séquestration du carbone pour le pétrole, taux d'absorption par les forêts, fraction absorbée par océans, etc*) pour obtenir à la fin un **'score unique' adapté à la communication vers l'extérieur : l'hectare global** (figure 56).

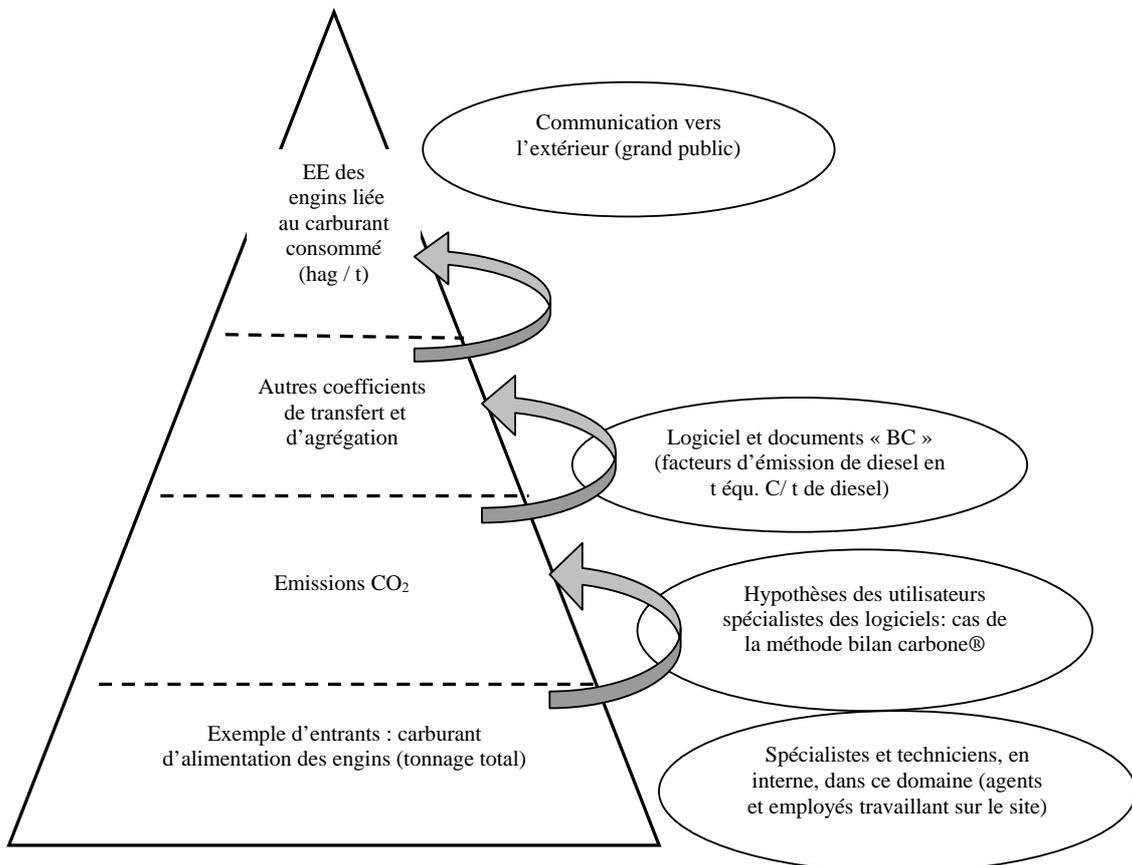


Figure 56 : Processus d'évaluation par l'empreinte écologique : le cas du carburant utilisé pour l'alimentation des engins du chantier routier

C'est aussi un outil simple d'utilisation qui pourrait être utilisé pour comparer différentes études: c'est le cas par exemple des empreintes en sols énergétiques des matériaux de construction, qu'on peut comparer d'une structure de chaussée à l'autre.

Le tableau 40 présente les quantités en matériaux utilisées ainsi que leurs empreintes, lors de la construction initiale de trois cas de chaussées étudiées (ramenées à un km et à deux sens de circulation) :

- La chaussée bitumineuse du chantier de Vendranges;
- Autre chaussée bitumineuse, selon le travail de thèse de Hoang (2005);
- Chaussée BAC (qui contiennent des couches en béton de ciment ainsi qu'en béton armé continu), d'après le travail de thèse de Hoang (2005);

	Granulats		Bitume		Ciment		Acier		Total
	Quantité t/km	EE hag	EE hag/km						
Chaussée bitumineuse de Vendranges	20264	51	985	59	0	0	0	0	110
Autre chaussée bitumineuse [Hoang, 2005]	19170	48	684	41	0	0	0	0	90
Chaussée BAC [Hoang, 2005]	14490	36	24	1,4	1604	241	164	90	368

Tableau 40 : Empreintes sur sols énergétiques, liées aux différentes quantités de matériaux incorporés dans trois cas de chaussée.

Dans un premier temps, cette comparaison nous permet de valider les données que nous avons obtenues pour le chantier de Vendranges qui sont du même ordre de grandeur que celle de la chaussée bitumineuse étudiée par Hoang (2005).

Dans un second temps, nous pouvons noter que la chaussée BAC présente une empreinte plus importante (figure 57) du fait qu'elle consomme plus de matériaux (ciment et acier) que les chaussées bitumineuses. Quant aux cas de ces dernières, elles consomment plus de béton bitumineux (granulat + bitume).

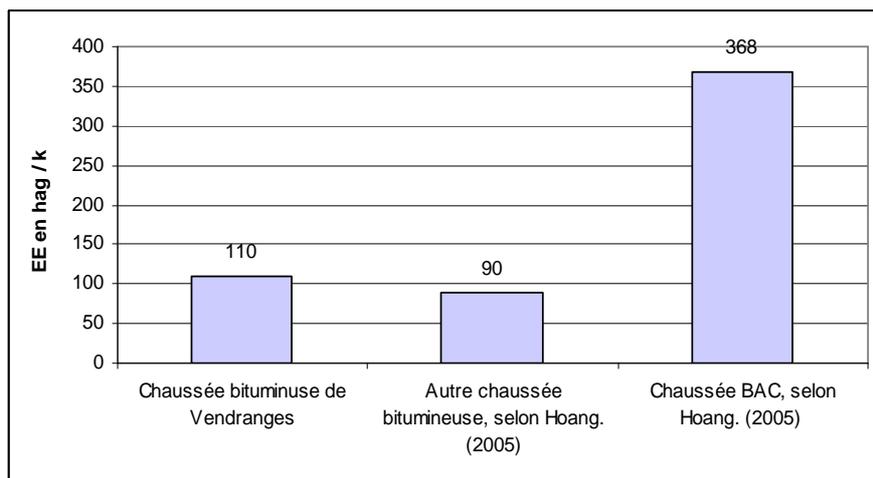


Figure 57 : Empreintes sur sols énergétiques de trois types de chaussée (hag/km), liées aux différents matériaux utilisés.

De plus et comme il a été déjà évoqué dans la troisième partie de ce mémoire, l'empreinte de la phase de construction d'un chantier routier est généralement faible par rapport à l'utilisation

(circulation des camions et des voitures). C'est aussi un résultat qui valide la conclusion d'une étude d'ACV qui a été effectuée sur une portion de route d'un kilomètre de longueur représentative d'une route à grande circulation en France, d'une structure plus ou moins différente du chantier de Vendranges [Peuportier, 2002]. Cela démontre que les deux outils sont complémentaires l'un de l'autre et qu'au delà de l'intérêt de l'empreinte écologique, elle peut être utilisée comme outil plus synthétique pour interpréter les données d'analyse de cycle de vie.

Elle peut aussi compléter le champ du Bilan Carbone® en y intégrant la notion de territoire : L'emprise au sol des activités humaines est directement prise en compte, contrairement aux autres outils.

• **L'empreinte écologique : un outil simple pour l'interprétation des résultats de cycle de vie des produits**

Comme il a été déjà mentionné, la méthode d'empreinte peut facilement interpréter les bases de données complexes d'ACV, en agrégeant toutes les données disponibles en un seul chiffre, ce qui facilite la communication par rapport « au grand public ». C'est le cas de la plupart des résultats obtenus dans notre étude de cas analysée dans ce travail de thèse (cf. Partie III) ainsi que la base de donnée développée sur les différentes empreintes de plusieurs matériaux (cf. tableau 19. Partie II), qui sont compréhensibles et facilement communicables, ce qui est appropriable pour la sensibilisation.

C'est aussi le cas d'une base de données d'ACV suisse, appelée "ecoinvent v1.2" [Huijbregts et al, 2007; Frischknecht et al, 2005], qui contiennent des informations de cycle de vie de plusieurs produits et services consommés dans l'économie occidentale, et qui a été utilisé pour tirer des empreintes écologiques spécifiques de certains produits. Un extrait est illustré par l'annexe 11.

2 Limites de l'application de la méthodologie de l'empreinte écologique à une activité et perspectives

2.1 Limites de l'inventaire

L'indisponibilité des données propres au site étudié est l'une des principales limites rencontrées dans l'étude. C'est un point que nous avons déjà abordé dans le chapitre 5 de la deuxième partie: Plusieurs données nécessaires qui concernent notre étude de cas, mais dont il aurait été important d'avoir un ordre de grandeur sur leurs empreintes, n'entrent pas dans le résultat total d'empreinte. Par exemple :

- La quantité des produits d'entretien des équipements industriels;
- L'ensemble des kilomètres effectués par tous les consommables et biens de l'activité étudiée (même en aval du fournisseur);
- Les surfaces de sols occupées par les installations de production de tous les consommables ainsi que l'emprise des routes pour transporter les produits;
- Autres données sur plusieurs sous-systèmes liés à l'activité de la construction routière: carrière, raffinerie, aciérie (cf. figure 46. partie III).

Par conséquent, étant donné que le calcul de l'empreinte écologique exclut les consommations dont la demande n'est pas assez renseignée (manque de données, données incertaines, etc.), le résultat est par la suite une valeur minimale et sous-estime la véritable contrainte exercée sur les milieux naturels [Monfreda et al, 2003].

Ce premier niveau d'imprécision concernant l'évaluation des flux de matière et d'énergie (données d'inventaire) est d'ailleurs rencontré dans plusieurs études d'ACV et bilan carbone® (difficultés de définition des périmètres d'étude).

2.2 Question des coefficients de conversion

Concernant « l'approche par composants », les données de l'inventaire nécessitent un nombre très élevé de différents facteurs de conversion locaux, en particulier les "*énergies incorporées*" des différents matériaux qui sont principalement issues des études d'ACV (cf. tableau 19, Partie II), ainsi que les surfaces nécessaires pour la production de ces derniers. Ces facteurs nécessaires pour traduire les différentes consommations en empreinte écologique sont parfois difficiles à trouver, c'est le cas des explosifs qui n'ont pas pu être intégrés dans l'empreinte totale du chantier, puisque nous n'avons pas pu accéder aux fiches techniques de ces derniers.

Nous rappelons donc qu'il n'existe à ce jour aucune base de données 'officielle' généralement reconnue de ces facteurs de conversion propres aux différents matériaux. Cela rend le calcul long et minutieux, et délicate la comparaison entre des études différentes.

De plus, la fiabilité de ces données d'ACV employées est un facteur important de précision pour l'empreinte calculée. C'est ensuite une limite importante de la méthode d'empreinte « micro », car les frontières et hypothèses des ACV ne sont pas toujours clairement précisées, et les résultats pas toujours récents. En outre, il arrive fréquemment que plusieurs ACV aient été menées sur le même produit, par des organismes différents et selon les modes de fabrication envisagés et les hypothèses sélectionnées, leurs résultats peuvent varier sensiblement (cf. § 5. partie II).

Nous rajoutons que les difficultés tiennent aussi au manque de normalisation des "*facteurs d'émission*" en CO₂ des différents matériaux et produits. En effet, la méthode bilan carbone®, concerne seulement le périmètre français.

Un tableau présenté en annexe 12, dont une partie est présentée ci-dessous, illustre un extrait des ordres de grandeur en terme de temps ayant été nécessaire (heures, semaines, jours, mois) pour la collecte des principaux facteurs nécessaires pour la traduction en empreinte des matériaux pris en compte uniquement dans notre étude de cas détaillée dans la troisième partie de ce mémoire:

- les énergies incorporées ainsi que les facteurs d'émission propres aux différents matériaux pour le calcul de leurs empreintes en "sols énergétiques" (cf. équations 2 et 3. Partie II): qui mettaient environ une heure jusqu'à trois semaines par chaque facteur, selon l'accessibilité aux différentes études d'ACV.
- les facteurs de conversion surfaciques (ha /t papier et bois) nécessaires pour la conversion des tonnages du papier et bois concernant le calcul d'empreinte sur les "sols forêts" (cf. équation 5. Partie II): qui mettaient environ deux semaines.
- le facteur de conversion surfacique nécessaire pour la conversion du béton en empreinte sur "sols dégradés": qui mettait presque quatre mois pour être estimé.

Matériau	Facteurs de conversion nécessaires pour le calcul d'empreinte en sols énergétiques		Facteurs de conversion nécessaires pour le calcul d'empreinte en sols forêts		Facteurs de conversion nécessaires pour le calcul d'empreinte en sols dégradés	
	Facteur	Temps de collecte	Facteur	Temps de collecte	Facteur	Temps de collecte
Carburant	- énergie incorporée - facteur d'émission - facteur de séquestration du carbone pour le pétrole - facteur d'absorption du CO ₂ par les forêts (1 t équ. C /ha/an) - facteur du taux d'absorption par océans (29 %) - FE et FR	? 1 h 1 h 2 h 2 h 1 h	-	-	facteur de conversion surfacique en ha par tonne de carburant ? : sol occupé par l'installation du traitement ainsi que l'emprise des routes pour le transport - FE et FR	1 h
Explosifs	- énergie incorporée - facteur d'émission	Plusieurs mois : pas de données précises	-	-	facteur de conversion surfacique en ha/t d'explosif	Plusieurs mois : mais difficultés d'obtenir des données
Béton	- plusieurs énergies incorporées selon différentes sources d'ACV. - facteur d'émission	2 S 1 h	-	-	facteur de conversion surfacique en ha/ t de béton produit (l'emprise des routes pour le transport n'est pas pris en compte)	4 M

Tableau 41 : Estimation du temps de collecte des coefficients de conversion de quelques exemples de matériaux

(h:heure, J: jour, S:semaine, M:mois)

N.B: Les facteurs d'absorption du CO₂ par les forêts, du taux d'absorption par les océans, de rendement (FR) et d'équivalence (FE) ainsi que le facteur de séquestration du carbone pour le pétrole (intégré dans la méthode d'empreinte par bilan énergétique), sont utilisés pour le calcul d'empreinte en sols énergétiques de tous les matériaux.

Par conséquent, il est important de préciser que ces différents facteurs définis, dans notre base de données, concernent particulièrement une activité de travaux publics. Pour développer une méthode qui soit applicable pour différents secteurs d'activité, il serait nécessaire de compléter cette base en intégrant tous les coefficients permettant la conversion en empreinte des différents matériaux susceptibles d'être

rencontrés dans plusieurs activités industrielles : industries agroalimentaire, pharmaceutique, textile, sites de traitement des déchets, etc.

Sans ignorer les écarts sur les facteurs de conversion selon les sources choisies qui varient de 16 % à 90 % (exemple des énergies incorporées présentées par le tableau 19 de la deuxième partie), l'application de différentes méthodes, basées sur des facteurs différents, pour le calcul d'empreinte de certains postes donne par la suite des écarts qui peuvent monter jusqu'à 90 % entre les résultats d'empreinte de ces postes (exemple des résultats d'empreintes des deux méthodes 'bilan énergétique' et 'bilan carbone', présentés par le tableau 19 de la partie II).

En revanche, nous rappelons que l'un des principes de base des calculs d'empreinte écologique, lorsque plusieurs hypothèses se présentent, est de choisir l'option qui donne le résultat d'empreinte le plus faible afin de donner plus de force au message de Wackernagel : « on estime l'empreinte écologique minimale de l'organisation en question » [Wackernagel et al, 2005]. Néanmoins, cette hypothèse conduit à sous-estimer l'impact sur l'environnement.

De même, un autre point à signaler sur d'autres facteurs de conversion concerne le cas des "*facteurs de rendement*" (FR) qui devraient être étudiés de plus près [Wackernagel & Yount, 2000]: Ils sont considérés durables dans le temps, ce qu'ils ne sont probablement pas, car on peut légitimement supposer que les rendements diminuent en fonction des effets nuisibles: inondations des côtes, désertification, érosion des sols, contamination salinisation mutations des grands systèmes forestiers, etc. Tous ces impacts contribuent à une réduction de la surface de sols bioproductifs disponibles [Wackernagel & Yount, 2000]. Postuler que ces facteurs (FR) sont constants, conduit donc à sous-estimer la demande excessive de l'homme en terme de ressources.

2.3 Empreinte écologique sur les sols énergétiques

En plus des principales difficultés citées précédemment, le calcul de l'empreinte écologique en sols énergie prend seulement en compte la superficie qui serait nécessaire pour absorber les seules émissions de carbone [Piguet et al, 2007], ce qui laisse de côté de nombreux gaz à effet de serre (CH₄, N₂O, CFC, HFC, HCFC, PFC et SF₆, etc).

Ainsi, dans le calcul d'empreinte sur les sols énergétiques, on fait l'hypothèse qu'environ 1/3 du CO₂ est absorbé par la terre et l'océan, mais ce tiers risque d'être, a terme, ramené à 0 car il y a une possibilité de saturation de la biosphère par rapport à ses capacités d'absorption [canadell, 2007]. Dans ce cas, les empreintes liées à l'absorption du CO₂ seront beaucoup plus élevées encore.

Nous rajoutons, qu'au cours des éditions ultérieures, le taux de séquestration de carbone retenu fluctua considérablement (1,5 t équ. C /ha; 1 t équ. C /ha) [Piguet et al, 2007] en fonction des connaissances du moment sur les capacités d'absorption de carbone des forêts et océans. Le GFN fit varier entre 40 et 100 ans la rotation des coupes de bois qui détermine en partie ce taux de séquestration. Aujourd'hui, le GFN opte pour une rotation des coupes de bois de 100 ans et estime ainsi que les 3,8 milliards d'hectares de forêts ont un taux moyen de séquestration d'une tonne de carbone par hectare et par an (1 t équ. C /ha). C'est ce dernier ratio que nous avons intégré dans nos calculs d'empreinte sur les sols énergétiques. Selon Piguet (2007), cette approche ignore cependant les émissions de carbone de la matière organique en décomposition (respiration hétérotrophe).

De plus et comme il a déjà été mentionné, ce potentiel de séquestration biologique est limité dans l'espace car tout dépend des surfaces disponibles pour la plantation de forêts et aussi limité dans le temps, vu que les forêts plantées sont des puits nets de CO₂ durant quelques décennies mais elles perdent leur capacité d'absorption [House et al, 2002].

Il est aussi nécessaire de signaler que la biocapacité "carbone", désignée par l'espace "réel" existant pour la séquestration du carbone, n'est pas calculée [Piguet et al, 2007] et donc n'est pas intégrée dans la biocapacité totale de 1,78 hag par personne (cf. tableau 43. § 2.8 Partie IV). Cette dernière qui est seulement constituée de ressources (= biocapacité ressource) (§ 2.8).

Autre difficulté concernant l'utilisation de *l'énergie nucléaire* qui n'est pas encore pris en compte de façon satisfaisante: Comme nous l'avons déjà expliqué dans le chapitre 2.3.2 de la première partie de ce mémoire, l'énergie nucléaire est par exemple comptabilisée de la même façon que les énergies fossiles, pour ne pas ignorer d'impact sur l'environnement, alors que les effets des déchets d'une source et de l'autre sont très différents. Wackernagel *et al.* (2005) reconnaissent cette faiblesse et défendent l'idée qu'il est impossible de quantifier les effets des déchets radioactifs en termes de surface car les sols ont pour eux une capacité d'assimilation presque nulle. L'empreinte écologique ne traite en théorie que les ressources qui peuvent être renouvelées et les déchets qui peuvent être absorbés, ce qui n'est donc pas le cas de ces rejets non-biotransformables (radioactifs, toxiques, etc.) [Holland, 2003].

En effet, l'empreinte écologique mesure la pression sur les capacités régénératives de la planète [Wackernagel, 2006]. Ça ne doit pas être considéré comme un indicateur universel parfait, mais peut être utilisé en complément d'indicateurs représentant les impacts toxicologiques des activités étudiées.

De nombreuses discussions du comité (GFN et partenaires internationaux) - à l'aide d'un forum scientifique qui a été ouvert sur Internet et animé par le GFN en octobre/novembre 2007 - permettent de modifier chaque année (dans une perspective d'amélioration continue) les standards des calculs d'empreinte. Pour répondre à la limite de comptabiliser l'empreinte du nucléaire de la même façon que le combustible fossile, le GFN recommande dans la version 2008 des standards de supprimer l'empreinte du "nucléaire" de l'empreinte énergétique des calculs d'empreinte nationale (National Footprint Accounts). Des changements méthodologiques beaucoup plus solides à ce propos, sont envisagés pour les raisons suivantes [Kitzes et al, 2007] :

- Il n'y a aucune base scientifique sur le fait d'associer l'empreinte écologique de l'électricité issue des combustibles fossiles avec celle qui est fournie par le nucléaire. Cette façon de faire réduit sans doute la robustesse scientifique de la méthode de calcul de l'empreinte nationale.
- D'autres aspects fondamentaux liés au nucléaire ne sont pas actuellement couverts par la méthode de calcul de l'empreinte nationale et devraient correctement être traités : le risque d'accident lié au nucléaire, les effets du stockage des déchets radioactifs à long terme.
- Les émissions de carbone liées aux activités de production de l'électricité nucléaire (pendant l'extraction de l'uranium, la production de ciment des réacteurs ou d'autres matériaux utilisés pour les opérations de stockage des déchets nucléaires par exemple), ainsi que la surface physique occupée par les générateurs d'électricité nucléaire, sont pris en compte dans la méthode de calcul d'empreinte nationale actuelle (National Footprint Accounts) à travers les consommations électriques nationales. Par contre, seule l'électricité produite par combustible fossile est prise en compte dans les calculs "micro".

En même temps que nos travaux, une thèse se déroulait sur l'empreinte écologique du nucléaire à l'institut européen de recherche sur l'énergie " *European Institute for Energy Research (EIFER)* " par Lionel Thellier. Celle-ci n'étant pas terminée au moment de la rédaction de nos travaux, nous n'avons pas pu prendre en compte ses propositions.

2.4 Aspects non pris en compte

L'empreinte écologique sous-estime la réalité : le chiffre qu'on lui attribue tend à être trop faible [OFS, 2006], car elle ne cherche pas à quantifier certains aspects environnementaux comme les aspects toxicologiques, tel que la pollution locale de l'eau par des polluants, les impacts sur la faune locale (biodiversité) et les nuisances telles que le bruit et odeurs.

Plusieurs substances, qui fragilisent la capacité de la nature à se régénérer, ne peuvent pas être couvertes par cet indicateur. C'est l'exemple des HAP et COV (polluants susceptibles d'être rencontrés sur le chantier).

Ces matières étant difficilement, voire non dégradables par la nature, il est impossible de déterminer la surface nécessaire pour ce faire.

De façon plus générale, et dans d'autres contextes que celui de notre étude de cas, la méthodologie fait aussi l'impasse sur la déforestation, la désertification, l'érosion et la salinisation des sols.

Ceci nous confirme fortement que l'empreinte doit donc être utilisée en complément à d'autres outils et non être considéré comme un indice unique.

2.5 Difficulté de double comptage

Le principe "d'éviter le doublage comptage" dans les calculs d'empreinte est une règle de base des calculs nationaux. Cependant, il est difficile voire impossible dans les calculs "micro" de l'éviter : si on calcule les empreintes écologiques de plusieurs entités A, B et C par exemple, il est souvent difficile de définir le périmètre de l'estimation de ces empreintes au niveau micro et ainsi, il se peut que les "intrants" de l'une des entités sont déjà pris en compte comme "sortants" d'une autre entité différente, comme le montre le schéma simplifié suivant :

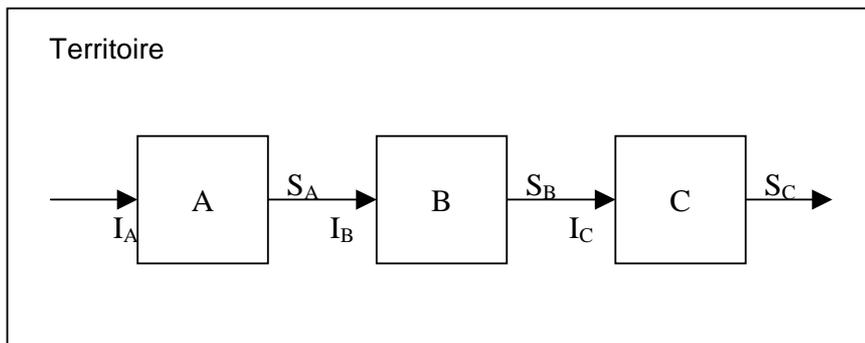


Figure 58 : Exemple illustrant les difficultés de double comptage dans les calculs d'empreinte au niveau 'micro'

En effet, la somme des empreintes écologiques des différentes entités d'un territoire donné est différente de l'empreinte du territoire en lui-même :

$$EE_A + EE_B + EE_C \neq EE_{\text{territoire}}$$

2.6 Sensibilité des résultats de calcul d'empreinte écologique

Comme il a été déjà mentionné dans le chapitre 5.2 de la deuxième partie de ce mémoire, les données de la méthode d'empreinte écologique sont, à l'heure actuelle, présentées sans aucune indication sur leur niveau d'incertitude. Nous rappelons qu'une première contribution à l'estimation du niveau d'incertitude a été faite pour les résultats d'empreinte sur les sols énergétiques, en prenant seulement en considération les incertitudes sur les facteurs d'émission du bilan carbone® définis par l'ADEME (cf. tableau 19. § 5.1 Partie II) ainsi que les incertitudes estimées sur les données de consommation collectées, vu que les autres facteurs de conversion - nécessaires pour la traduction des consommations en empreinte énergétique - sont données sans aucune indication sur leur niveau d'incertitude (les facteurs de rendement et d'équivalence, le facteur d'absorption du CO₂ par les forêts de 1 t équ. C /ha/an, le facteur du taux d'absorption par les océans de 29 %, ainsi que le facteur de séquestration du carbone pour le pétrole et les énergies incorporées qui sont intégrés dans la méthode de calcul à partir "d'un bilan énergétique").

Concernant les données de l'inventaire, leurs incertitudes estimées sont de 5 ou 10 %, comme ceci est montré dans le tableau 30 (§ 5.1 Partie III) et expliqué dans le chapitre 5.2 de la deuxième partie, vu que la plupart de ces données de consommations sont issues, dans la majorité des cas, de fiches vérifiées par les entreprises.

L'incertitude sur l'empreinte énergétique est d'environ 20 % (tableau 30. § 5.1 Partie III). Cependant, nous n'avons pas pu calculer avec précision l'incertitude sur l'empreinte écologique totale du chantier, vu que nous nous disposons pas des incertitudes sur les facteurs utilisés pour les calculs d'empreintes en sols construits, forêts et aquatiques. Nous avons seulement pu faire une estimation graphique sur cette incertitude (de l'EE_{totale}) qui peut varier par hypothèse entre 15 % et 30 % (cf. figure 47. § 5.1 Partie III).

2.7 Autre difficultés soulevées par l'application de la méthode à certains articles de consommation

2.7.1 Energie

L'empreinte de la composante 'énergie' pourrait être logiquement détaillée selon les pôles de consommation (nucléaire, combustibles fossiles, hydraulique, etc) de manière à calculer séparément l'empreinte du nucléaire et en visualiser à la suite les articles les plus significatifs dans l'empreinte totale sur le "sol énergie".

Les principaux objectifs du changement méthodologique souhaité concernant l'empreinte du "nucléaire", sont détaillées dans le "paragraphe 2.3" ci-dessus.

2.7.2 Bureaux

Le calcul de l'empreinte sur les sols énergétiques des 'bureaux' installés provisoirement sur le chantier, ne fait pas intervenir les opérations de construction et d'assemblage proprement dites, mais uniquement les facteurs d'émission des deux principaux matériaux de construction, le bois CTBH et le métal. En effet, quant aux bureaux 'Algeco', la donnée de facteur d'émission de ce métal, précisée dans les facteurs de conversion de la méthode Bilan carbone® [ADEME, 2007] n'est accompagné d'aucune précision sur la nature de ce métal ainsi que la composition type d'un bureau.

2.7.3 Biens manufacturés

Concernant le calcul d'empreinte en sols énergétiques des équipements utilisés sur le chantier routier de Vendranges, nous avons pris en compte les émissions liés à la fabrication des quantités de matériaux utilisés pour construire un véhicule d'une tonne, en adoptant les facteurs d'émissions de la méthode bilan carbone®, liés aux quantités des principaux matériaux incorporés dans ce véhicule (plastique, aluminium, verre, acier, caoutchouc, liquides, matériaux électroniques). Néanmoins, ce calcul ne fait pas intervenir les opérations d'assemblage de ces engins.

Concernant le calcul d'empreinte des équipements industriels par la méthode 'bilan énergétique', une seule valeur d'énergie incorporée de 100 GJ / t (dans la base de données des calculs nationaux de GFN) caractérise tous les biens manufacturés, qu'il s'agisse de machines, d'équipements électriques ou d'instruments de précision. Cette approche constitue là aussi une approximation; les intensités énergétiques et matérielles des biens manufacturés dépendent de leur degré de complexité.

Les deux méthodes de calcul d'empreinte pour une tonne de véhicule, présentent presque le même résultat comme le précise le tableau suivant :

	Empreinte écologique d'un véhicule d'une tonne (hag/t)
A partir de "bilan carbone"	1
A partir du "bilan énergétique"	1,24

Tableau 42 : Empreinte écologique d'un véhicule d'une tonne à partir de bilan carbone et bilan énergétique.

La méthode à partir du bilan carbone nous paraît plus fiable, car les données sont spécifiques aux biens considérés. Ainsi, contrairement au ratio 1,24 hag/ t obtenu par la méthode "bilan énergétique" (qui intègre l'énergie incorporée de 100 GJ / t), l'empreinte de 1 hag/ t, obtenue à partir de la donnée en bilan CO₂, ne serait sûrement pas conservée pour tous les types d'équipements (machines, équipements électriques, etc), car tout dépendra des émissions liées aux différentes quantités de matériaux incorporés dans ces derniers.

En effet, les travaux sur les calculs "micro" d'empreinte peuvent servir à affiner les bases de données de l'empreinte écologique des calculs nationaux.

2.7.4 Eau : appropriation de sols aquatiques

La consommation d'eau ne bénéficie pas encore d'une attention spécifique dans les études d'empreinte. Nous avons donc proposé une contribution pour la prendre en compte dans le cas de "la construction routière". Cependant, notre proposition ne résout pas entièrement la question, car dans notre étude de cas, la collecte des eaux se fait à partir d'une rivière (cf. § 2.2.4. Partie II)¹²⁶, ce qui n'est pas souvent le cas pour d'autres activités industrielles. Mais une deuxième méthode a été abordée pour le cas des eaux collectées à partir des précipitations surfaciques (m³/m²/an), par infiltration et ruissellement, vers les sources pompées qui peuvent alimenter l'activité industrielle (cf. § 2.2.4. Partie II)¹²⁷. En revanche, il est important de rappeler

¹²⁶ § 2.2.4 Calculs des empreintes : Principales équations de base (Calcul d'empreinte écologique sur sols aquatiques).

¹²⁷ § 2.2.4 Calculs des empreintes : Principales équations de base (Calcul d'empreinte écologique sur sols aquatiques).

que cette infiltration est conditionnée par d'autres facteurs plus compliqués concernant les propriétés du sol : structure, texture, porosité, compaction, couverture végétale, teneur en eau initiale, etc.

En effet, la surface simple d'espaces aquatiques calculée ($\text{Débit total [m}^3\text{]} / \text{Précipitations surfaciques [m}^3\text{/m}^2\text{]})$ est constituée d'une mosaïque de sols bioproductifs (terres agricoles, pâturages, forêts, etc.).

2.8 Biocapacité

En plus du non-calcul de la "biocapacité carbone" (tableau 43), pour désigner l'espace qui rendrait compte de l'espace séquestrant réellement du carbone, la "**biocapacité totale**" (cf. § 2.3.2 Partie I) n'intègre pas également la préservation des surfaces nécessaires à la diversité biologique [Piguet et al, 2007]. Cette biocapacité est seulement pensée dans la perspective de la mise en valeur économique de la totalité des 11,2 milliards d'hectares considérés.

En effet, cette biocapacité équivaut au niveau maximal de production des ressources d'origine biologique. Elle comprend seulement le potentiel de 'productivité biologique' des zones non exploitées [Piguet et al, 2007] : le tableau 43 montre qu'elle est essentiellement constituée de quatre ressources (terres cultivées, herbages pour les pâturages, forêts et pêches). Ainsi, à partir de ce tableau, nous déduisons que les cultures, les pâturages et les forêts présentent au niveau mondial respectivement des réserves écologiques de l'ordre de 0,04 hag, 0,13 hag et 0,54 hag. Or, seules les pêcheries enregistrent un déficit écologique négatif (- 0,01 hag), soit environ 1/14 de leur revenu écologique, un chiffre qui est loin d'être aussi alarmant que les publications récentes sur le sujet de surpêche le laisse entendre¹²⁸ [Piguet et al, 2007].

	Biocapacité (hag par habitant)	Empreinte écologique (hag par habitant)	Balance ou déficit écologique (hag par habitant)
- Sols arables	0,53	0,49	0,04
- Pâturages (herbages)	0,27	0,14	0,13
Forêts	0,77	0,23	0,54
Pêche	0,14	0,15	- 0,01
- CO ₂ de combustibles fossiles	?	1,06	
- Nucléaire	?	0,08	
Terrains bâtis (ou sols construits)	0,08	0,08	0
Total monde	1,78	2,23	- 0,45

Tableau 43 : Biocapacité et déficit écologique (hag / personne)
Selon le *Living Planet Report 2006*

La biocapacité de l'espace bâti est de 0,08 hag par personne et équivaut exactement aux 0,08 hag de son empreinte (tableau 43), d'où un déficit nul : une balance écologique parfaitement équilibrée. En revanche, on attribue une biocapacité à l'espace bâti alors que ce dernier est connu pour être une cause de l'amenuisement des cultures [Piguet et al, 2007]. Ainsi, la biocapacité de cette catégorie de sols (sols construits) est évaluée à partir du facteur d'équivalence des sols arables, en considérant que les villes sont généralement construites sur les terres agricoles.

¹²⁸ Selon WORM Boris et alii. "Impact of Biodiversity Loss on Ocean Ecosystem Services". Science, vol. 314, n° 3, novembre 2006 : Du fait de la perte de biodiversité des océans et de la surpêche qui y contribue, les projections indiquent que la plupart des poissons pêchés auront disparu d'ici au milieu du XXI^e siècle.

3 Conclusion

L'application du modèle développé de calcul d'empreinte écologique au niveau "micro", pour la comparaison de plusieurs scénarios et études (les empreintes des carburants / biocarburants, les empreintes de certains matériaux de construction des couches routières, les empreintes de trois cas de chaussées) nous a montré que l'empreinte écologique à ce niveau pourrait être aussi plus parlant et pédagogique. En effet, il serait intéressant de l'utiliser pour comparer plusieurs activités et aussi pour mesurer le progrès de plusieurs projets dans la réduction de leur poids sur l'environnement en suivant leurs différentes consommations (énergie, consommables, biens, etc). En revanche, il serait nécessaire d'améliorer encore le "modèle" en approfondissant les différentes limites détaillées ci-dessus.

CONCLUSION GENERALE

L'empreinte écologique est un indice de visualisation des impacts créés par nos modes de vie. Notre empreinte écologique est plus importante que ce que la terre peut supporter (EE = 2,23 hag/hab, Biocapacité = 1,78 hag/hab). Deux niveaux d'action sont nécessaires pour que cette empreinte diminue : * réagir au niveau global ou * au niveau local avec plusieurs petites actions qui pourraient être plus efficaces qu'une grosse que l'on ne fait pas au niveau global.

Ce travail a consisté à développer un modèle synthétique de calcul d'empreinte pouvant aider les acteurs (administrations, MOA travaux publics, sites industriels, organisations diverses, etc) à représenter l'évaluation environnementale des impacts de leurs activités.

Une présentation des connaissances générales sur les impacts de l'activité humaine et une synthèse bibliographique sur les méthodologies d'évaluation environnementale des impacts sur l'environnement a été effectuée. Cette synthèse a permis de montrer que l'interaction entre ces outils, applicables aux différents domaines (produit, projet, organisation ou territoire), pourra donner une force à l'évaluation environnementale en réduisant la complexité. Ainsi, le choix de ces outils d'évaluation dépend des objectifs fixés et liés aux différents impacts environnementaux à évaluer (que ce soit à l'échelle locale ou planétaire) et de l'idée que leur conception doit être adaptée aux objectifs recherchés.

Dans ce travail de thèse, nous avons développé une nouvelle méthode de calcul de l'empreinte écologique à l'échelle d'un projet. Le modèle synthétique réalisé a été présenté dans la deuxième partie de ce mémoire. La méthodologie de calcul que nous avons suivie est définie par cinq grandes lignes : définition du périmètre du système étudié, inventaire des données de consommation, calcul des facteurs de conversion correspondant aux données collectées, calculs des empreintes de chaque poste de consommations et somme des différents postes et enfin, l'analyse des résultats.

L'application du modèle sur un projet de travaux publics (la mise à 2*2 voies d'un tronçon routier) a été présentée dans la partie III.

Outil comptable qui permet d'objectiver des impacts environnementaux globaux, l'empreinte écologique est un indicateur environnemental qui quantifie l'intensité avec laquelle on exploite la biocapacité naturelle. Elle pourrait être un indicateur pertinent à suivre dans le cadre d'une évaluation environnementale.

Les principaux résultats de l'étude de cas de ce travail de thèse ont montré que l'empreinte écologique a permis d'évaluer approximativement la contribution à chaque catégorie d'impact de la plupart des flux du bilan du chantier routier étudié en combinant ACV des matériaux, biens et services consommés et analyse environnementale de site afin d'identifier les différents flux. Cet outil pourrait permettre de donner un cadre systématique au suivi des consommations d'énergie, consommables, biens et services d'un chantier routier public. La feuille de calcul développée pourra être utilisée pour évaluer l'impact, en terme de réduction d'empreinte écologique, des différentes alternatives pouvant être proposées dans le cadre des projets de travaux publics. Le suivi dans le temps peut donc permettre d'évaluer des progrès ou des régressions, vis-à-vis de la contribution de ces projets au déclin écologique global. Le suivi et la surveillance de l'empreinte écologique peuvent alors permettre d'évaluer l'efficacité d'une politique environnementale.

En intégrant d'autres facteurs que l'énergie utilisée tout au long du cycle de vie du produit considéré, l'empreinte écologique est complémentaire à d'autres indicateurs. C'est un "Indice synthétique" : selon l'INSEE, un indice synthétique mesure la variation de la valeur d'une grandeur complexe définie comme agrégation d'un ensemble de grandeurs élémentaires.

En particulier « l'empreinte écologique » permet de :

- synthétiser et d'interpréter les bases de données complexes d'ACV afin de mettre en relation et comparer différents impacts s'exerçant à l'échelle d'une activité.
- motiver et impliquer différents acteurs sur la contribution à un mode de vie qui n'est pas écologiquement durable.

En effet, connaître l'empreinte écologique des différents aspects d'un projet peut aider à cibler les aspects environnementaux à améliorer en priorité, à élaborer des scénarios afin de mesurer et comparer les avantages environnementaux de diverses options possibles (comparer les empreintes écologiques du carburant et du biocarburant : exemple abordé dans la partie IV de ce mémoire) et à réaliser des économies en identifiant des pistes de diminution de des consommations en énergie, en produits de carrière, en eau, etc.

L'empreinte écologique est surtout intéressante pour des aspects environnementaux qui associent directement consommation de ressources naturelles régénératives et consommation d'énergie (papier, biocarburants, produits alimentaires).

L'utilisation de l'empreinte écologique au niveau d'une activité a permis de rendre plus attractif et plus compréhensible un diagnostic relativement technique. C'est un excellent vecteur pédagogique de communication, facilement compréhensible et porteur de messages forts pour le grand public, avec notamment la notion de "biocapacité" et limites de la planète Terre, un support de discussions constructives dans de nombreux domaines, reposant sur des hypothèses et des données chiffrées (l'exemple de la consommation d'énergies fossile et des produits de carrière dans l'empreinte globale d'une activité de travaux publics).

En revanche, sur le plan méthodologique, l'exercice de calculer l'empreinte écologique à une activité a permis de mettre également en évidence certaines limites :

1- La fiabilité des données d'ACV employées est un facteur important de précision pour l'empreinte calculée et c'est aussi une limite importante de la méthode d'empreinte « micro », puisque les frontières et hypothèses des ACV ne sont pas toujours clairement précisées.

Ainsi, il arrive fréquemment que plusieurs études d'ACV, menées sur le même produit, varient sensiblement d'une étude à l'autre, ce qui implique la variation des résultats de l'empreinte écologique du même produit selon les différentes sources d'ACV.

De plus, rares sont les données sur les surfaces occupées par différentes activités humaines (extraction de matériaux, leur traitement). De nombreuses données sont aujourd'hui manquantes mais mériteraient d'être mieux suivies.

2- Certains facteurs de conversion, nécessaires pour traduire les différentes consommations d'une activité en empreinte écologique, sont donnés sans aucune indication sur leur niveau d'incertitude (l'exemple des énergies incorporées, des facteurs d'équivalence et de rendement). Ce niveau d'imprécision est également rencontré dans plusieurs études d'ACV :

Ces remarques sont également vraies pour la réalisation d'ACV. Il est donc intéressant de concevoir une base de données de référence publique (de type bilan carbone mais intégrant d'autres impacts que le CO₂) et utilisable par tous pour pouvoir comparer différents matériaux et opérations possibles.

3- Le nombre très élevé de différents facteurs de conversion nécessaires rend le calcul long et minutieux. Il faudrait une base de données publique qui s'enrichirait des différents facteurs de conversion calculés par les différents universitaires ou membres du GFN afin de simplifier les calculs ultérieurs d'empreinte.

4- Difficulté de comparer les résultats d'empreinte d'un projet (exprimée, par exemple, en gha/ 8 km de route construits, pour le cas de notre terrain d'application) à la "biocapacité totale" (1,78 gha/habitant) : L'empreinte écologique des nations peut être divisée par le nombre d'habitants afin d'avoir une empreinte en hag/hab et de comparer ensuite cette valeur à la biocapacité disponible par habitant. Or, dans le cas d'une activité de travaux publics, il est difficile de ramener l'empreinte écologique du chantier à une valeur comparable à la "biocapacité totale" pour que ça soit plus « parlant » au public et décideurs.

Mais il serait très intéressant de comparer les empreintes écologiques de plusieurs projets similaires ou de plusieurs phase d'un projet. Dans notre cas d'étude, nous avons comparé l'empreinte du chantier en phase de construction à son empreinte en phase d'utilisation et étudié des scénarii alternatifs susceptibles de réduire l'empreinte écologique du chantier étudié. Cela peut rendre plus parlant et pédagogique le calcul.

Il faudrait pouvoir comparer l'empreinte écologique totale du chantier avec d'autres.

5- Des impacts non pris en compte par la méthode aujourd'hui mais qui sont pourtant importants à mettre en avant sur des activités industrielles (toxicité, impact sur l'eau, impact sur faune et flore). Indice synthétique mais pas indicateur unique, l'empreinte écologique doit être accompagnée dans un tableau de bord par d'autres indicateurs.

Un développement complémentaire ultérieur de cet outil souple et évolutif serait envisageable en approfondissant les différentes "limites" évoquées ci-dessus et en augmentant la quantité des facteurs de conversion, dans le modèle développé, nécessaires pour le calcul d'empreinte écologique de plusieurs activités de différents domaines (travaux publics ou activités industrielles). Cela permettrait une utilisation facilitée par les différents acteurs.

**REFERENCES
BIBLIOGRAPHYQUES**

REFERENCES BIBLIOGRAPHYQUES

[ADEME, 2007] ADEME, Bilan carbone Entreprises et collectivités. Guide méthodologique, version 5. Objectifs et principes de comptabilisation. 2007 [en ligne]. Disponible sur : < <http://www2.ademe.fr>> (consulté le 23 mai 2007).

[ADEME, 2005] Bilan carbone [CDROM]. ADEME, 2005.

[AFNOR, 1998] AFNOR (1998), FD X30-310, Management Environnemental: Prise en compte de l'environnement dans la conception des produits- Principaux généraux et application- Lignes directrices, 16 p.

[Aissani, 2005] Aissani Linda. L'Analyse de Cycle de vie de la filière hydrogène: rapport de stage DEA. DEA Sciences et Technique du Déchets. Saint Etienne /Lyon : ENSMSE/ INSA de Lyon, 2005, 48 p

[Alizé-LCPC-routes] Alizé-LCPC-routes [en ligne]. Disponible sur : <www.lcpc.fr/fr/produits/alize/alize>

[André, 1999] Pierre André et al. L'évaluation des impacts sur l'environnement. Processus, acteurs et pratique. Canada : Institut de l'énergie et de l'environnement de la francophonie, 1999, 391p.

[Barrett et al, 1999] BARRETT J., VALLACK H., JONES A. et al. A Material Flow Analysis and Ecological Footprint of York, Technical Report. Stockholm Environment Institute, 1999, 110 p.

[Barrett et Scott, 2001] BARRETT J., SCOTT A. The Ecological Footprint: A metric for corporate sustainability. International Journal of Corporate Sustainability, Corporate Environmental Strategy, 2001, vol. 8, n°4, pp. 316-325.

[Barrett et al 2004] BARRETT J., CHERRET N., BIRCH R. (2004). Step Change: An Analysis of the Policy and Educational Application of the Ecological Footprint. Rapport pour WWF daté de mars 2004.

[Barrett, 2006] BARRETT John. The ecological footprint of Hertfordshire. Stockholm Environment Institute York: Stockholm Environment Institute, 2006, 59 p.

[Barthet, 2003] Barthet Lucile. Contribution à l'évaluation de l'impact sur les écosystèmes de la valorisation de résidus de procédés thermiques en BTP. Thèse de doctorat, Ecole doctorale: Chimie de Lyon, 2003, 218 p.

[Benoit, 2002] BENOIT V. Analyse technique, économique, environnementale et sociale de trois filières de production d'hydrogène par la méthode Multicriterial Analysis for Sustainable Industrial Technologies (MASIT), Post-doctorat, INSA de Lyon et CEA, 2002, 89 p.

[Bergossi, 2006] Bergossi Olivier. Questions fréquentes sur l'empreinte écologique. L'empreinte écologique, 2006, 171p.

[Boiral, 2004] Boiral Olivier. Environnement et Economie : Une relation équivoque. Faculté des sciences de l'administration. [en ligne]. Université Laval, Québec, Canada G1K 7P4. Disponible sur :

<http://www.vertigo.uqam.ca/vol5no2/art11vol5no2/vertigovol5no2_boiral.pdf> (consulté le 14 février 2005).

[Boiral, 2005] Boiral Olivier. Comment concilier environnement et industrie. Série Sciences Humaines « Les enjeux sociaux de l'environnement ». N° 49, Juillet- août 2005.

[Boutaud , 2003] Boutaud Aurélien. « L'empreinte écologique : un outil pour les territoires », in revue Territoires, n°438 « Développement durable, une utopie les pieds sur terre », mai, pp. 44-45. 2003.

[Boutaud, 2004] Boutaud Aurélien. Le développement durable: penser le changement ou changer le pansement ? : Bilan et analyse des outils d'évaluation des politiques publiques locales en matière de développement durable en France: de l'émergence d'un changement dans les modes de faire au défi. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 2005, 415 p.

[Boutaud et al, 2006] Boutaud, A., Gondran, N. and Brodhag, C. '(Local) environmental quality versus (global) ecological carrying capacity: what might alternative aggregated indicators bring to the debates about environmental Kuznets curves and sustainable development?', Int. J. Sustainable Development, Vol. 9, No. 3, 2006, pp.297–310.

[BRGM, 2002] Ministère de l'Ecologie et du Développement durable, Ministère de la Recherche, BRGM – Service EAU. Situation hydrologique, Bilan Annuel 200, Bulletin n°67 [en ligne]. Disponible sur :

<http://www.rnde.tm.fr/ftp/brgm/bsh_brgm_02_1.pdf> (consulté le 26.05.2004).

[British Petroleum, 2004] British Petroleum, 2004. Statistical Review of World Energy 2004. London, British Petroleum. [en ligne]. Disponible sur

<<http://www.bp.com/centres/energy/>> (consulté le 22 août 2004).

[Brodhag et al, 2004] Brodhag, C., Breuil, F., Gondran, N., et Ossama, F. Dictionnaire du développement durable. AFNOR, 2004, 283 p.

[Canadell et al, 2007] Canadell JG., Pataki D., Pitelka L (eds) (2007) Terrestrial Ecosystems in a Changing World. The IGBP Series, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

[Canter, 1996] Canter L W (1996). Environmental impact assessment. 2ième edition, McGraw-Hill, New York, E.-U., 660 p.

[CDIAC, 1999] CDIAC, 1999. Carbon Dioxide Emissions from Fossil-Fuel Consumption and Cement Manufacture. Oak Ridge, Tennessee, Oak Ridge National Laboratory, Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC). [en ligne]. Disponible sur <<http://cdiac.esd.ornl.gov>>

[Chambers et al, 2000] CHAMBERS N., SIMMONS C., WACKERNAGEL M. Sharing Nature's Interest: Ecological Footprints as an Indicator of Sustainability. Earthscan Publications Ltd. Londres : Earthscan Publications Ltd, 2000, 200 p. ISBN-10: 1853837393.

[Chappat et Bilal, 2003] Chappat Michel., Bilal Julian. La route écologique du futur. Analyse de cycle de vie. Colas, 2003, 40 p.

[CMED, 1988] Notre avenir à tous. Rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement. Editions du Fleuve et les Publications du Québec, 1988, Québec.

[CNRS, 1997] L'atmosphère, son évolution : Aérosols et climat. Extrait de la Lettre n°14 Programme International Géosphère Biosphère-Programme Mondial de Recherches sur le Climat (PIGB-PMRC) [en ligne]. Disponible sur <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim/biblio/pigb14/02_aerosols.htm> (consulté le 22 août 2006).

[CNUED, 1992] CNUED (1992). Déclaration de Rio, Conférence de Rio de Janeiro, 3-14 juin 1992.

[Commission européenne, 2006] Protection de la biodiversité : l'Union Européenne clarifie les responsabilités de chacun (02/06/2006) [en ligne]. Disponible sur <http://ec.europa.eu/news/environment/060602_1_fr.htm>

[Commission européenne, 2002] Le 6ème Programme d'action pour l'Environnement de l'Union Européenne – Engagement et obligation juridiquement contraignants. Bureau Européen de l'Environnement, décembre 2002 [en ligne]. Disponible sur <http://www.eeb.org/activities/env_action_programmes/bee-6eme-pae-french-translation.pdf>

[Daly, 2002] Daly, H. E. (2002). Sustainable development: definitions, principles, policies., Available on Internet http://www.worldbank.org/wbi/B-SPAN/docs/essd_hdaly.pdf, The World Bank, Washington, DC.

[DE CAEVEL, 2005] DE CAEVEL, B et OOMS, M. Typologie des enjeux environnementaux et usage des différentes méthodes d'évaluation environnementale, juin 2005. RDC Environnement, Bruxelles [en ligne]. Disponible sur <http://www.record-net.org/record/etudesdownload/record03-1011_1A.pdf> (consulté le 02 novembre 2006).

[DEFRA, 2005] RPA DEFRA . Sustainable Consumption and Production – Development of an Evidence Base. Study of Ecological Footprinting [en ligne]. Final Report, 2005. Disponible sur : <<http://www.defra.gov.uk/environment/business/scp/pdf/footprint-final.pdf>> (consulté le 15 janvier 2006).

[Dessus et al, 2008] Dessus B, Le Treut H, Laponche B. Effet de serre : n'oublions pas le méthane. La Recherche, numéro 417, mars 2008. [en ligne]. Disponible sur <<http://www.global-chance.org>> (consulté le 15 avril 2008)

[DR, 2000] DR, 2000, Structure expérimentale de chaussée. Recyclage des matériaux de chaussée. Direction des Routes. Document proposé par le Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement.

[Drechsler, 2002] Drechsler, C. Comportement de protection de l'environnement et performances de l'entreprise industrielle : proposition d'une théorie particulière du processus d'investissement environnemental. Thèse de doctorat, Ecole des Hautes Etudes Commerciales, 2002.

[DRIRE, 2004] La pollution de l'air d'origine industrielle. Edition 2004 [en ligne]. Disponible sur :
<<http://www.rhonealpes.drire.gouv.fr/environnement/portailenvironnement/bilan2004/DRIRE-FASCICULE%20AIR.pdf> > (consulté le 18 mars 2004).

[Duplan, 2007] Duplan Jean Luc. Conversion de la biomasse en carburant-IFP Lyon, PO 3. Conférence ENSM-SE, Saint Etienne, 22 novembre 2007.

[Edith et Weterings, 1999] Edith Smeets, Rob Weterings. Environmental indicators: Typology and overview [en ligne]. In. European Environment Agency, Technical report No 25, 1999. Disponible sur :
<http://reports.eea.europa.eu/TEC25/en/tech_25_text.pdf> (consulté le 07.02.2005).

[EEA, 2000] EEA JRC/GVM 2000 - EU Joint Research Center, Global Vegetation monitoring Unit. 2000. Global Land Classification Database (GLC2000). European Commission, Brussels, Belgium.

[Elbouazzaoui, 2002] EL bouazzaoui I. Evaluation de l'écotoxicité de mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) : Etude de quelques paramètres influençant les résultats de toxicité : rapport de stage DEA. DEA Sciences et Technique du Déchets. Lyon : ENSMSE/ INSA de Lyon, 2002, 48 p

[EPD, 2002] Espaces Pour Demain. L'industrie des carrières et le développement durable. Paris : Editions Johanet, 2002, 129p.

[Eurostat, 2000] Eurostat, 2000. Towards Environmental Pressure Indicators for the EU. Luxembourg, Eurostat, European Commission.

[FANI, 2002] FANI CAHYANDITO M. The MIPS Concept. Material Input Per Unit of Service: A Measure for an Ecological Economy [en ligne]. In: Institute of Forestry Economics. University of Freiburg. Germany, 2002. Disponible sur :
< <http://www.ife.uni-freiburg.de/Homepage%20English/homepage/home.htm> > (consulté le 12 février 2005).

[FAO, 2001] FAO, 2001. FAOSTAT. Rome, Food and Agriculture Organization (FAO). Accessed January 2004 for data to year 2001.

[FAO et UNECE, 2000] FAO and UNECE, 2000. Temperate and Boreal Forest Resource Assessment 2000. Rome, Food and Agriculture Organization (FAO) and United Nations Economic Commission for Europe (UNECE).

[FAO, 2000a] FAO, 2000a.. Forest Resource Assessment 2000. Rome, Food and Agriculture Organization (FAO), Forestry Department.

[**FAO, 2000b**] FAO, 2000b. Global Fibre Supply Model. Rome, Food and Agriculture Organization (FAO).

[**FAO, 1997**] FAO, 1997. The State of the World's Fisheries and Aquaculture 1996. Rome, Food and Agriculture Organization (FAO), Fisheries Department.

[**Frischknecht et al, 2005**] Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hischer, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M., 2005. The ecoinvent database: overview and methodological framework. International Journal of Life Cycle Assessment 10 (1), 3–9.

[**Gentils, 2003**] Gentils Aurélien. Etude de faisabilité d'un système de management environnemental à la DDE de la Loire pour la mise à 2x2 voies de la RN7 – RN82. Enjeux environnementaux du projet de mise à 2x2 voies [en ligne]. Direction Régionale de l'Équipement de Rhône-Alpes, 2003. Disponible sur : <http://www.roanne7.net/article.php3?id_article=37> (consulté le 05 novembre 2005).

[**GFN, 2006a**] Global Footprint Network, advancing the science of sustainability. Annual report 2006.

[**GFN, 2006b**] Global Footprint Network (2006). Ecological Footprint Standards 1.0 (Released on 16th of June 2006) [en ligne]. Disponible sur < www.footprintstandards.org > (consulté le 20 janvier 2006).

[**GIEC, 2007**] Bilan 2007 des changements climatiques : Impacts, adaptation et vulnérabilité [en ligne]. Disponible sur <<http://www.umadev.com/mies/images/documents/AR4%20SPM%20GR2%20FR%2007-04-07.pdf>>.

[**Gondran, 2006**] Gondran Natacha. L'empreinte écologique. In: Société Alpine de Publications. Lyon, 2006, pp. 119-133.

[**Gondran, 2004**] Gondran Natacha, Mise en place d'un système de management environnemental à la DDE de la Loire pour la mise à 2x2 voies de la RN7 – RN82. [en ligne]. ENSM-SE / DDE de la Loire, septembre 2004. Disponible sur : <http://site.emse.fr/publications/SME-rapport09-2004.pdf> (consulté le 12 décembre 2005).

[**Gondran, 2001**] Gondran Natacha. Système de diffusion d'information pour encourager les PME-PMI à améliorer leurs performances environnementales, doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 373p, 2001.

[**Goxe et Rousseau, 2006**] Goxe Antoine., Rousseau Sandrine. Les indicateurs territoriaux de développement durable, 315p, 2006.

[**Grisel et Duranthon, 2001**] Grisel Laurent., Duranthon Georges. Pratiquer l'écoconception - Lignes directrices, collection AFNOR pratique 153 pages, 2001.

[**Grisel et Osset, 2004**] Grisel L., Osset P. Analyse de cycle de vie, Application et mise en pratique, 345 p, 2004.

[Haake, 2000] Haake J. Les stratégies des entreprises pour une utilisation des matières plus respectueuse de l'environnement. Thèse sciences économiques. Versailles-St-Quentin-en-Yvelines : Université de Versailles-St-Quentin-en-Yvelines, 2000, 287 p.

[Hoang, 2005] Hoang Tung. Tronçons autoroutes : une méthodologie de modélisation environnementale et économique pour différents scénarios de construction et d'entretien. Thèse de doctorat. Ecole centrale de Nantes et l'Université de Nantes, 2005, 323 p.

[Holland, 2003] Holland L. Can the principle of the ecological footprint be applied to measure the environmental sustainability of business? Corporate Social Responsibility and Environmental Management, 2003, vol. 10, pp. 224-232.

[House et al, 2002] House, J, Prentice, C, and Le Quéré, C. 2002. Maximum impacts of future reforestation or deforestation on atmospheric CO₂. Global Change Biology (8): 1047-1052.

[Huijbregts et al, 2007] Huijbregts Mark A.J., Stefanie Hellweg, Rolf Frischknecht, Konrad Hungerbühler, A. Jan Hendriks. Ecological footprint accounting in the life cycle assessment of products [en ligne]. Switzerland, 2007, 10p. Disponible sur : <www.sciencedirect.com> (consulté le 03 mars 2007).

[IEA, 2007] International Energy Agency. Key world energy statistics. [en ligne]. Disponible sur < In : <http://www.iea.org>> (consulté le 13 mars 2007).

[IEA, 2004] IEA, 2004. CO₂ Emissions from Fuel Combustion (2001 data). Paris, France, International Energy Agency (IEA) of the OECD.

[IFEN, 2007] Indicateurs [en ligne]. Disponible sur < <http://www.ifen.fr>> (consulté le 20 août 2007).

[IFEN, 2006a] Institut Français de l'Environnement. Les impacts du réseau routier sur l'environnement, 2006, Suppl., n°114, 4p.

[IFEN, 2006b] Le changement climatique. Edition 2006 [en ligne]. Disponible sur <http://www.ifen.fr/uploads/media/climat_ree2006.pdf> (consulté le 21 avril 2006).

[IFEN, 2004] L'appauvrissement de la couche d'ozone [en ligne]. Disponible sur < <http://www.ifen.fr/acces-thematique/air/couche-d-ozone.html>>.

[IIASA et FAO, 2000] IIASA and FAO, 2000. Global Agro-Ecological Zones (GAEZ) 2000 CD-ROM. Rome, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) and Food and Agriculture Organization (FAO).

[INRA, 2005] L'ambiance des filières agrocarburants [en ligne]. INRA Sciences sociales, Recherches en économie et sociologie rurales, N° 2 – décembre 2005, 20ème année. ISSN 0988-3266. Disponible sur : < <http://www.inra.fr/internet/Departements/ESR/publications/iss/pdf/iss05-2.pdf>> (consulté le 28 avril 2008).

[INSEE, 2006] Institut National de la Statistique et des Études Économiques. Bilan l'électricité en France [en ligne]. Disponible sur http://www.insee.fr/fr/ffc/chifcle_fiche.asp?tab_id=324 (consulté le 08 février 2006)

[Iosif, 2006] Iosif, A-M. Modélisation physico chimique de la filière classique de production d'acier pour l'analyse de l'Inventaire du Cycle de Vie. Thèse de doctorat INPL Science et Ingénierie des Matériaux - E.N.S.M.N, Nancy, 2006.

[Iosif et al, 2007] Iosif, A-M., Ablitzer, D., Hanrot, F., Birat, J-P. (2007). Nouvelle approche d'analyse de l'Inventaire du Cycle de Vie pour la filière classique de production d'acier. Congrès SFGP 2007. Saint Etienne [en ligne]. Disponible sur http://www.emse.fr/sfgp2007/dyn_programme_resumes.php (consulté le 20 février 2008).

[IPCC, 2007] Climate Change 2007: The Physical Science Basis [en ligne]. Disponible sur <http://www.greencross.fr/IMG/pdf/SPM2feb2007.pdf>.

[IPCC, 2001] IPCC, 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge, UK, Cambridge University Press, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

[ISO, 1996] ISO (1996), Norme ISO 14001 : Système de management environnemental. Spécification et lignes directrices pour son utilisation, 14p.

[ISO, 1997] ISO (1997), Norme ISO 14040 : Management environnemental. Analyse de cycle de vie, principes et cadre, 12 p.

[ISO, 1998] ISO (1998), Norme ISO 14041 : Management environnemental. Analyse de cycle de vie, définition de l'objectif et du champ d'étude et analyse de l'inventaire, 22 p.

[ISO, 1999] ISO (1999), Norme ISO 14031 : Management environnemental. Evaluation de la performance environnementale, 35 p.

[ISO, 2000] ISO (2000), Norme ISO 14042: Management environnemental. Analyse de cycle de vie, évaluation de l'impact de cycle de vie, 17 p.

[ISO, 2000] ISO (2000), Norme ISO 14043 : Management environnemental. Analyse de cycle de vie, Interprétation du cycle de vie, 19 p.

[ISO, 2006] ISO (2006), Norme ISO 14044 : Management environnemental. Analyse du cycle de vie. Exigences et lignes directrices.

[Janin, 2000] Janin M. Démarche d'éco-conception en entreprise. Un enjeu : construire la cohérence entre outils et processus, doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2000, 322 p.

[Journal de l'Environnement, 2008] JDLE. "On ne compte plus les études remettant en cause les agrocarburants". In : <http://www.journaldelenvironnement.net> (14/04/2008).

[**Khalifa, 2000**] Khalifa K. Analyse du cycle de vie, Méthodes d'évaluation des impacts [en ligne]. In : Techniques de l'Ingénieur, 2000. Disponible sur : <<http://www.techniques-ingenieur.fr/affichage/DispIntro.asp?nGcmID=G5615>> (consulté le 17.12.2004)

[**Kitzes et al, 2007**] Kitzes J, Galli K, Bagliani M et al. A Research Agenda for Improving National Ecological Footprint Accounts [en ligne]. Brass, 2007, 33p. Disponible sur : <http://www.brass.cf.ac.uk/uploads/fullpapers/Kitzes_et_al_M65.pdf > (consulté le 16 janvier 2008).

[**Laforest, 2004**] Laforest V. (2004). Production Plus Propre et Meilleures Techniques Disponibles, Rapport Interne (ENSM-SE).

[**Lazzeri, 2006**] Lazzeri Yvette. Les indicateurs territoriaux de développement durable. In: L'Harmattan. Paris, 2006, pp. 21-26.

[**Lenzen, 2001**] Lenzen, M. 2001. A generalised input-output multiplier calculus for Australia. Economic Systems Research 13(1), 65-92.

[**Leveillard, 2004**] Leveillard Florine. Etude des modalités d'application de la norme ISO 14001 à la maîtrise d'œuvre publique de projets routiers : application à la mise en place d'un SME à la DDE de la Loire : rapport de stage DEA. DEA Sciences et Technique du Déchets. Saint Etienne /Lyon : ENSMSE/ INSA de Lyon, 2004, 48p

[**Lewan et Simmons, 2001**] LEWAN L., SIMMONS C. The use of Ecological Footprint and Biocapacity Analyses as Sustainability Indicators for Subnational Geographical Areas : A Recommended Way Forward. European Common Indicators Project, EURO CITIES/ Ambiente Italia, 2001, 24p.

[**LPR, 2006**] Living Planet Report 2006. In : <http://www.footprintnetwork.org> (consulté le 06 septembre 2007).

[**Marechal, 1996**] Marechal, J.-P. (1996). L'écologie de marché, un mythe dangereux. Le Monde Diplomatique (11/11/1996).

[**Maurin, 2004**] Maurin M, Problématique pour une approche globale multi-nuisances dans l'environnement, Inrets- LTE, Bron, 16 p, Juin 2004.

[**Meadows et al, 1972**] Meadows Donnela, Meadows Dennis, Randers Jorgens., William Behrens. Limits to Growth (pour l'édition française Halte à la croissance ?). éd. Fayard, 1972.

[**Monfreda et al, 2003**] Monfreda, C., Wackernagel, M., Deumling, D., Establishing national natural capital account based on detailed Ecological Footprint and biological capacity assessments. Land Use Policy, 2003, vol. 10, pp. 1-16.

[**Monfreda et al, 2004**] Monfreda, C., Wackernagel, M., Deumling, D., 2004. "Establishing national natural capital accounts based on detailed ecological footprint and biological capacity accounts." Land Use Policy, 21 (2004) 231-246.

[**Nascimento, 2006**] Nascimento Iuli. L'empreinte écologique. In: Société Alpine de Publications. Lyon, 2006, pp. 29-41.

[**NRE, 2001**] Loi n° 2001-420 du 15 mai 2001 relative aux nouvelles régulations économiques [en ligne]. Disponible sur <http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/loiNRE_n2001_420_du-15_05_2001.pdf>.

[**OCDE, 1991**] Bonnes pratiques pour les études de l'impact sur l'environnement exercé par les projets de développement. In : Lignes directives sur l'environnement et l'aide, Organisation de Coopération et de Développement Economique, Comité d'aide au développement, n°1, 1991.

[**OFS, 2006**] Office fédéral de la statistique. L'empreinte écologique de la Suisse. Une contribution au débat sur la durabilité [en ligne]. Neuchâtel, 2006. Disponible sur <http://www.bafu.admin.ch/umweltbeobachtung/03207/03209/index.html?lang=fr> > (consulté le 13 septembre 2006).

[**OMS, 2004**] Outdoor air pollution : smog [en ligne]. Disponible sur <http://www.euro.who.int/eprise/main/WHO/Progs/WHD2/20030307_7?language=French>

[**ORSE, 2004**] Rapport de mission remis au gouvernement. Bilan critique de l'application par les entreprises de l'article 116 de la loi NRE [en ligne]. Disponible sur <http://www.orse.org/fr/home/download/rapport_NRE.pdf>.

[**Pauly et Christensen, 1995**] Pauly, D. and Christensen, V., 1995. Primary production required to sustain global fisheries, *Nature* 374, 255-257.

[**Personne, 1998**] Marion Personne. Contribution à la méthodologie d'intégration de l'environnement dans les PME-PMI : Evaluation des performances environnementales. Thèse de doctorat en Sciences et techniques du déchet. Saint-Etienne : Ecole Nationale Supérieure des Mines. Janvier 1998. 294 p. Disponible sur : <<http://agora21.emse.fr/entreprise/>>.

[**Peuportier, 2002**] Peuportier Bruno. Contribution à l'analyse de cycle de vie d'un kilomètre de route. Rapport final de l'étude pour USIRF/CIM Béton/GPB/SPECBEA, Ecole des Mines de Paris, Armines . Novembre 2002.

[**Piguet et al, 2007**] PIGUET Frédéric Paul. L'empreinte écologique : un indicateur ambigu. *Futuribles* [en ligne]. 2007, n°334, pp. 5-24. Disponible sur <<http://hdl.handle.net/2042/9035>> (consulté le 25 décembre 2007), ISSN 0337 307 X.

[**Rousseaux, 1993**] Rousseaux P., Evaluation comparative de l'impact global du cycle de vie des produits, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 237 p, 1993.

[**Sachs, 1981**] Sachs, A et P.B. Clarck. Improving EIS scoping : Federal Agency experience and techniques. Institute for Environmental Negotiation, University of Virginia, E.-U.

[**Schaefer et al, 2006**] Schaefer F, Luksch U, Steinbach N and al. 2006. Ecological Footprint and Biocapacity. The world's ability to regenerate resources and absorb waste in a limited time period, 11p.

[**Schiesser, 1999**] Schiesser P. Facteur 10 et sac à dos écologique: outils pour mesurer les progrès vers une consommation plus soutenable, Conférence Euroforum Eco-conception des produits, Paris, 1999.

[**SEI, 1998**] SEI, 1998. Conventional Worlds: Technical Description of Bending the Curve Scenarios. Stockholm, Stockholm Environment Institute (SEI), PoleStar Series Report no. 8.

[**SETRA, 1994**] SETRA. Aménagement des routes principales (sauf les autoroutes et routes express à deux chaussées. Guide technique, 1994 117p. et annexes.

[**SETRA et LCPC, 1998**] SETRA, LCPC, 1998, Réseau routier national. Catalogue des structures types de chaussées neuves. Guide technique SETRA, LCPC.

[**SETRA et LCPC, 2000**] SETRA, LCPC, 2000, Réalisation des remblais et des couches de forme. Fasicule I, II, 2^{ème} édition. Guide technique SETRA, LCPC.

[**Sharp, 1998**] Sharp, G.D. 1988. Fish populations and fisheries: their perturbations, natural and man induced. In: Postma, H., Zijlstra, J.J. (eds.), Ecosystems of the World 27(6). New York, Elsevier, pp. 155-202.

[**Simmons et al, 2000**] Simmons, C., Lewis, K., Barrett, J. 2000. Two feet – two approaches: a component-based model of ecological footprinting. Ecological Economics 32(3), 375-380.

[**Sommet mondial du développement durable, 2002**] Déclaration de Monsieur Jacques Chirac devant l'assemblée plénière du sommet mondial du développement durable. Johannesburg - Afrique du Sud. lundi 2 septembre 2002 [en ligne]. Disponible sur : <http://www.un.org/events/wssd/statements/franceF.htm> (consulté le 14 avril 2005).

[**Steinfeld et de Haan, 1997**] Steinfeld, H. and de Haan, C. (eds.), 1997. Livestock - Environment interactions: Issues and options. Food and Agriculture Organization of the United Nations, the United States Agency for International Development and the World Bank, European Commission Directorate-General for Development - Development Policy Sustainable Development and Natural Resources. Harvey Blackburn.

[**TREDI, 2003**] CSD AZUR. Étude d'impact. AZO 1809-1. TREDI, 2003, 400 p. environ.

[**Triffault-Bouchet, 2004**] Triffault-Bouchet Gaëlle. Effets sur les écosystèmes aquatiques lenticques des émissions de polluants provenant de différents modes de valorisation/élimination de déchets - Application à des mâchefers d'UIOM et à des boues de dragage de canaux. Thèse de doctorat, Université de Savoie / ENTPE, 2004, 309 p.

[**UN Comtrade, 2005**] UN Comtrade 2005, UN Commodity Trade Statistics Database, UNDESA – United Nations Department of Economic and Social Affairs – Statistics Division. UNDESA, NY. <http://unstats.un.org/unsd/comtrade/> (accessed April 2005)

[**UN-Energy, 2007**] Sustainable bioenergy : A framework for decision makers [en ligne]. Rapport UN-Energy, avril 2007, 64p. Disponible sur : <<http://esa.un.org/un-energy/pdf/susdev.Biofuels.FAO.pdf>> (consulté le 11 janvier 2008).

[Ventura et al, 2005] Ventura A., Mazri C., Monéron P., Jullien A, Guidoux Y., Schemid M. Comparaison environnementale de couches de liaison de chaussées recyclées à différents taux par la méthode d'analyse de cycle de vie. Ed: LCPC, bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2005, pp. 93-113.

[Vuillier, 2005] Vuillier Nicolas. L'exploitation de granulats. Le 8 et 9 novembre 2005, Colloque MESH - MALO [en ligne]. UNICEM, 2005. Disponible sur : < http://www.ifremer.fr/mesh-malo/pdf/2a_UNPG_Granulats_marins.pdf> (consulté le 27 avril 2006).

[Wackernagel, 1994] Wackernagel Mathis. Ecological footprint and appropriated carrying capacity : A tool for planning toward sustainability. Thèse de doctorat : Faculty of graduate studies, the university of British Columbia, 1994, 219p.

[Wackernagel et Rees, 1996] Wackernagel M, Rees W, “Urban ecological footprints: Why cities cannot be sustainable, and why they are a key to sustainability” [en ligne]. Disponible sur < www.elsevier.com> (consulté le 12 décembre 2004).

[Wackernagel et Rees, 1996] Wackernagel M., Rees W. Notre empreinte écologique. Montréal, Québec : Éditions Écosociété, 1999, 210 p. ISBN 2-921561-43-3

[Wackernagel et Yount, 1998] Wackernagel M., Yount J.D. The Ecological Footprint: an indicator of progress toward regional sustainability. Environmental Monitoring and Assessment, 1998, vol. 51, pp. 511-529.

[Wackernagel et Yount, 2000] Wackernagel M., Yount J.D. Footprints for sustainability: the next steps. Environment, Development and Sustainability, 2000, vol. 2, pp. 21-42.

[Wackernagel et al, 2002] Wackernagel M, Niels B. Schulz, Diana Deumling, Alejandro Callejas Linares, Martin Jenkins, Valerie Kapos, Chad Monfreda, Jonathan Loh, Norman Myers, Richard Norgaard, and Jorgen Randers., Traking the ecological overshoot of the human economy. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America. Vol. 99, 9 Juillet 2002.

[Wackernagel et Monfreda, 2003] Wackernagel M., Monfreda C. Potential Standards/Certification criteria. Document de travail non édité. Global Footprint Network, Oakland – CA – USA, 2003, 2p.

[Wackernagel et al, 2005] WACKERNAGEL M., MONFREDATA C., MORAN D., WERMER P., GOLDFINGER S., DEUMLING D., MURRAY M. (2005). National Footprint and Biocapacity Accounts 2005: The underlying calculation method.

[Wackernagel, 2006] Wackernagel M. L'empreinte écologique. In: Société Alpine de Publications. Lyon, 2006, pp. 161-164

[Walter et al, 2005] Walter V. Reid, Harold A. Mooney, Angela Cropper, Doris Capistrano, Stephen R. Carpenter, Kanchan Chopra, Partha Dasgupta, Thomas Dietz, Anantha Kumar Duraiappah, Rashid Hassan, Roger Kasperson, Rik Leemans, Robert M. May, Tony McMichael, Prabhu Pingali, Cristián Samper, Robert Scholes, Robert T. Watson, A.H. Zakri, Zhao Shidong, Neville J. Ash, Elena Bennett, Pushpam Kumar, Marcus J. Lee, Ciara Raudsepp-Hearne, Henk

Simons, Jillian Thonell, et Monika B. Zurek. Millennium Ecosystem Assessment. Synthesis Report, Pre-publication Final Draft Approved by MA Board on March 23, 2005.

[**Wanida, 2006**] Wanida Wanichpongpanā and Shabbir H. Gheewala. Life cycle assessment as a decision support tool for landfill gas-to energy projects. Environment Division, The Joint Graduate School of Energy and Environment, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 126 Pracha-Uthit Rd., Bangmod, Tungkru, Bangkok, Thailand [en ligne]. Disponible sur < <http://www.sciencedirect.com> > (consulté le 31 décembre 2006).

[**Wathern, 1988**] Wathern P. An introductory guide to EIA. In: P Warthern (éd), environmental impact assessment, theory and practice. Unwin Hyman, Boston, E.-U. 3-30.

[**Wenisch, 1999**] Wenisch S. Contribution à l'élaboration de l'analyse du cycle de vie de la chaîne de traitement par incinération. Thèse en « Sciences et Techniques du Déchet ». Lyon : INSA de Lyon, 1999, 257 p.

[**Wernert, 2004**] Wernert Fabian. Empreinte écologique d'une filière d'incinération des déchets industriels dangereux: rapport de stage DEA. DEA Sciences et Technique du Déchets. Saint Etienne /Lyon : ENSMSE/ INSA de Lyon, 2004, 64p

[**Wiedmann et Lenzen, 2006**] Wiedmann T, Lenzen M. On the conversion between local and global hectares in ecological footprint analysis. [en ligne]. Disponible sur <<http://ideas.repec.org/a/eee/ecolec/v60y2007i4p673-677.html>> (consulté le 02.06.2007).

[**Wiedmann, 2007**] WIEDMANN Thomas, WOOD Richard, LENZEN Manfred, TOVEY Jane, MOLONEY Susie. The International Ecological Footprint Conference. 8-10 May 2007, Cardiff [en ligne]. Cardiff : “Modelling Ecological Footprints for sub-regional Levels: A Detailed Footprint of Consumption in Local Areas of Melbourne and Victoria”, 2007. Disponible sur : <http://www.brass.cf.ac.uk/uploads/Wiedmann_et_al_A59.pdf > (consulté le 30 octobre 2007).

[**WRI, 2000**] WRI, 2000. World Resources 2000-2001 – People and Ecosystems: The Fraying Web of Life. Washington DC, USA, World Resources Institute (WRI).

[**Wuppertal Institut, 2004**] Integrated Regional production and logistics management a promising perspective for European Regions? June 21st, 2004, Wuppertal, Germany [en ligne]. Disponible sur <<http://www.agf.org.uk/pubs/pdfs/r1456unpub.pdf>> (consulté le 02 janvier 2005).

[**Wuppertal Institut, 2005**] MIPS [en ligne]. Disponible sur <<http://www.wupperinst.org/projekte/mipsonline/index.html>> (consulté le 27.01.2005).

[**WWF, 2006**] WWF. Rapport planète vivante 2006 [en ligne]. Disponible sur < <http://assets.panda.org/downloads/lpr2006fr.pdf> > (consulté le 13 mai 2006).

ANNEXES

ANNEXES

Annexe I: Méthodes de pondération utilisées dans la réalisation d'une ACV

Méthodes de calculs des impacts

a- Méthode des volumes critiques :

La méthode des volumes critiques a été développée à la demande du Buwal (Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage suisse) en 1984 pour analyser les écoprofiles des matériaux d'emballage (acier, aluminium, plastiques, papiers, cartons et verres). C'est la méthode la plus utilisée dans les ACV.

Les données de l'inventaire de l'analyse de cycle de vie sont utilisées pour calculer le volume critique d'air, le volume critique d'eau, le volume des déchets solides et la consommation cumulée d'énergie. Le tableau suivant indique les différents indices et les flux correspondants.

Indices	Flux
Volume critique d'air	Poussières/particules, CO, NH ₃ , NO _x , HCl, SO ₂ , Cl ₂ , fluorures, HF, mercaptan, hydrocarbures, aldéhydes, Pb, Hg, Cd
Volume critique d'eau	NH ₃ , NH ₄ ⁺ , Cd, Cu, Fe, Pb, chlorures, composés organiques dissous, cyanures, DBO, fluorures, hydrocarbures, phénols, solvants chlorés, sulfates
Équivalents énergétiques	Énergie thermique, énergie électrique
Volume des déchets solides	Pas de différenciation des catégories de déchets
DBO : demande biologique en oxygène	

Tableau : Indicateurs de la méthode des volumes critiques

* volume critique d'eau :

Le volume critique d'une substance j correspond à la quantité d'eau pure nécessaire pour diluer la quantité de substance j à un niveau conforme à la concentration de référence choisie (normes). les volumes critiques des différents éléments émis sont tous exprimés dans la même unité, ce qui permet de les additionner pour les rejets dans l'eau.

Cet indicateur permet d'apprécier l'impact toxique et écotoxique des émissions dans l'eau et dans l'air.

Si on considère les rejets dans l'eau, l'impact des substances j émises par le système i est donné par la formule suivante :

$$I^i = \sum_j V_{c_{air^i}} = \sum_j \frac{m_j^i}{C_j}$$

Avec :

I^i (m³) : Impact toxique et écotoxique des substances émises dans l'eau par le système i .

$V_{c_{air^i}}$ (m³) : volume critique de la substance j émise dans l'eau par le système i .

m_j^i (g) : masse de la substance j émise dans l'eau par le système i .

C_j (g/m³) : concentration de référence de la substance j émise dans l'eau.

* volume critique d'air :

Cet indicateur est calculé de la même façon pour les rejets dans l'eau. les volumes critiques des différents éléments émis sont tous exprimés dans la même unité, ce qui permet de les additionner pour les émanations gazeuses.

* volume des déchets solides :

Leur masse et leur densité sont utilisées pour calculer le volume occupé en décharge. Tous les volumes de déchets sont agrégés sans aucune différence de nature ou d'origine.

* consommation d'énergie :

Un équivalent énergétique est utilisé pour l'énergie thermique et l'énergie électrique sur la base de : 3,6 MJ thermique = 1 KWh électrique
La notion de volume critique est en fait un artifice mathématique qui permet de sommer les pollutions de natures différentes. Une de ses limites est qu'elle ne tient pas compte du devenir des substances et de leur dégradation ou dilution : on ne tient pas compte des transformations des substances nocives dans l'environnement ; des temps de séjour de ces substances et des effets de synergie ou d'antagonisme.

b- Méthode CML :

En 1992, un rapport réalisé par Heijungs du "Centre of Environmental Science" (CML) de l'Université de Leiden (Pays -Bas) a été publié . La méthode d'évaluation de l'impact alors proposée, communément appelée la méthode CML.

Dans cette méthode, les impacts environnementaux sont calculés en quatre étapes [KHALIFA, 2000] :

- classification ;
- caractérisation ;
- normalisation ;
- évaluation.

Elle présente de nombreux points commun avec la méthode Éco-indicateur, notamment pour les impacts écologiques. Cette dernière se différencie au niveau de l'évaluation des impacts toxicologiques et écotoxicologiques et du processus de pondération des impacts ou de l'évaluation globale des impacts.

Méthode : L'impact toxique des substances j émises par le sous-système i est donné par la formule :

$$I^i = \sum_j m_{s,j}^i \times HCA_j + m_{w,j}^i \times HCW_j + m_{s,j}^i \times HCS_j$$

I^i (kg) : potentiel de toxicité humaine relatif aux rejets du système i

$m_{a,j}$, $m_{w,j}$, et $m_{s,j}$ (kg) : représentent respectivement les quantités de la substance j émises dans l'air, l'eau et le sol
HCA, HCW et HCS (kg kg⁻¹) : facteurs de pondération établis par le CML et qui s'appuient sur l'effet et sur l'exposition de la substance j .

c- Méthode des écopoints :

La méthode des écopoints a été développée à la demande du Buwal (Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage suisse) pour optimiser les choix d'emballages sur le plan écologique, compte tenu des contraintes légales. La méthode agrège tous les flux répertoriés dans l'inventaire par le biais d'un indice unique, appelé écopoint. Il s'agit d'une approche directe, c'est-à-dire qu'elle ne contient pas d'étape de classification.

Méthode : Chacune des charges d'un système i est transformée en écopoint, unité commune à toutes les charges, au moyen d'un facteur de conversion appelé écofacteur. L'écopoint est calculé de la manière suivante :

$$I^i = \sum_j \text{écofacteur}_j \times m_j^i = \sum_j \frac{1}{F_k} \times \frac{F_j}{F_k} \times m_j^i$$

Avec :

I^i (écopoints) : nuisance environnementale du système i .

m_j^i (g/an ou m³/an) : quantité annuelle j émise ou consommée par le système i .

F_k (g/an ou m³/an) : charge maximale annuelle admissible pour j .

F_j (g/an ou m³/an) : niveau annuel de rejets ou de consommation de j .

Le quotient F/F_k exprime le fait que l'on pondère un rejet en fonction du rapport entre la contrainte réelle effectivement exercée sur le secteur écologique considéré et la charge totale admissible pour ce même secteur.

Le quotient $1/F_k$ exprime le fait que les quantités émises doivent toujours être rapportées à la charge maximale admissible pour la zone considérée. Ceci permet de donner une pondération plus grande aux substances qui ont un effet important à faible dose.

L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que les charges maximales (F_k) ne sont pas définies sur des bases scientifiques mais résultent de décisions politiques (objectifs de réduction des émissions).

Annexe 2: Méthodes de pondération utilisées dans la réalisation d'ACV (suite)

Méthode	École	Résumé du principe
Addition par milieux	Midwest Research Institute	Addition des différentes émissions dans l'air entre eux, des rejets dans l'eau entre eux...
Volumes critiques	-Buwal -Agence Japonaise de l'Environnement	Pondération des rejets dans l'eau et dans l'air en faisant référence aux exigences réglementaires (limites de rejets)
Ecofacteurs et écopoints	3ème Buwal	Pondération de tous les facteurs d'impact par les objectifs suisses de rejet ou de consommation de chaque facteur d'impact. L'objectif est d'aboutir à une note unique.

Indices reflétant des problèmes environnementaux (ex. : Eco-indicateurs 99)	Hollande et Suède (méthode la plus employée)	Traduction de chaque consommation ou rejet en terme de contribution à un problème environnemental à l'aide d'indices
Integrated substance chain management (ISCM)	Hollande	Les consommations et rejets sont rapportés au total des consommations et rejets du pays, puis les problèmes sont pondérés entre eux. Aboutit à un chiffre unique.
EPS-System ("méthode Volvo")	Suède	Chaque rejet est affecté d'un score selon 6 critères
Tellus Institute (Boston)	Tellus Institute	Pondération des rejets en fonction des dépenses de santé liées à chaque pollution
Monétarisation		Donne une valeur économique (Euro ou \$) de dommage ou d'évitement pour chaque unité d'impact environnemental.

Source : Etude RECORD N°03-1011/1A

Annexe 3: Analyse de cycle de vie simplifiée

Cette approche simplifiée peut se décliner de plusieurs manières selon que l'on réduit d'avantage les frontières du système pour minimiser la quantité de données à collecter, qu'on limite les recherches approfondies de données ou que l'on combine données quantitatives et qualitatives.

a- Simplification en se limitant à la seule étape d'inventaire de la méthodologie (*mono-étape ou écobilan*) pour identifier les opérations les plus polluants. L'écobilan de l'acier pour emballage, par exemple, représente ainsi l'inventaire de l'ensemble des impacts engendrés par l'acier utilisé dans les emballages et ce depuis son extraction jusqu'à sa fin de vie.

b- Simplification en se limitant à un seul critère (*mono-critère*¹²⁹): la consommation de ressources, l'effet de serre, la présence de substances toxiques...

Ce type d'approche monocritère est réalisée le plus souvent dans le cadre d'une politique énergétique de pays qui exige de toutes les activités une baisse des ponctions en ressources énergétiques ou une stratégie particulière d'entreprise souhaitant réduire les impacts négatifs de ses produits sur l'effet de serre.

Le contenu énergétique est basée sur une approche monocritère focalisée sur la fabrication d'un produit.

c- Simplification en se basant sur certains problèmes d'environnement et des étapes particulières du cycle de vie. C'est l'approche adoptée par l'ESQCV¹³⁰ (Evaluation Simplifiée et Quantitative du Cycle de Vie). Cette grille est extraite du fascicule documentaire de l'AFNOR, FD X30-310 sur « la prise en compte de l'environnement dans la conception et le développement des produits » publié en mai 1998 [Janin, 2000].

L'ESQCV est une méthode d'éco-conception basée sur une évaluation réduite à certaines phases du cycle de vie. Concrètement, l'entreprise renseigne un questionnaire balayant différents critères préalablement sélectionnés. Les réponses apportées positionnent le produit à un niveau "bon", "moyen" ou "faible". Cette démarche présente l'avantage d'être facilement appropriatif par les PME-PMI.

Cette méthode vise à rechercher de façon simple des pistes d'améliorations écologiques tout au long du cycle de vie d'un produit, sur la base d'un nombre restreint d'informations environnementales.

L'ESQCV fait le lien entre les aspects économiques et environnementaux, à travers deux ratios définis de la façon suivante :

- Poids économique = Coût du produit / Produit Intérieur Brut (P.I.B.)
- Poids environnemental = Impact lié au produit / Impact annuel à l'échelle Nationale.

Les valeurs respectives de ces deux ratios servent à déterminer si une piste d'amélioration concernant l'impact en question mérite ou non une action immédiate.

¹²⁹ Mis au point par le CEREN (Groupement d'intérêt économique rassemblant l'ADEME, Charbonnage de France, Electricité de France, Gaz de France et l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques et l'Observatoire de l'Energie), le contenu énergétique, qui est basée sur cette approche monocritère, a fait l'objet de travaux de normalisation (Norme NF X30-110, [AFNOR 83]).

¹³⁰ Extraite du fascicule documentaire de l'AFNOR, FD X30-310 sur « la prise en compte de l'environnement dans la conception et le développement des produits » publié en mai 1998.

Annexe 4 : Outils à dominante qualitative pour l'évaluation d'impact environnemental des produits

- Approche matricielle

Ces approches se présentent sous la forme de tableaux ou matrices à remplir d'une manière plus ou moins élaborée, prenant en compte plusieurs critères d'évaluation et plusieurs phases du cycle de vie du produit. Et c'est l'exemple de la grille d'évaluation de NF-Environnement, élaborée par l'ADEME qui prend en compte un certain nombre de critères déclarés pertinents pour chaque phase de cycle de vie du produit. Cette grille est utilisée pour évaluer un produit lors de l'attribution de l'écolabel Français, NF-Environnement [Janin, 2000].

Par principe, il s'agit tout simplement de remplir la grille de façon qualitative pour identifier les points à améliorer.

- Indice écologique

Cette méthode préconise l'établissement d'un indice qui repose sur l'évaluation d'un nombre limité de critères retenus comme pertinents.

Cet indice s'intéresse à la qualité écologique des produits [Janin, 2000]. Une analyse, basée sur l'identification des problèmes environnementaux de différents niveaux de gravité, va les reformuler sous forme de questions qualitatives dont les réponses sont hiérarchisées de la situation idéale (modalité favorable) à la situation insatisfaisante (modalité défavorable) et pondérées par des pénalités.

La pénalité est 0 pour une modalité favorable, X (à déterminer) pour une modalité défavorable et X/2 pour une modalité médiane.

la méthode générale de l'indice est la suivante :

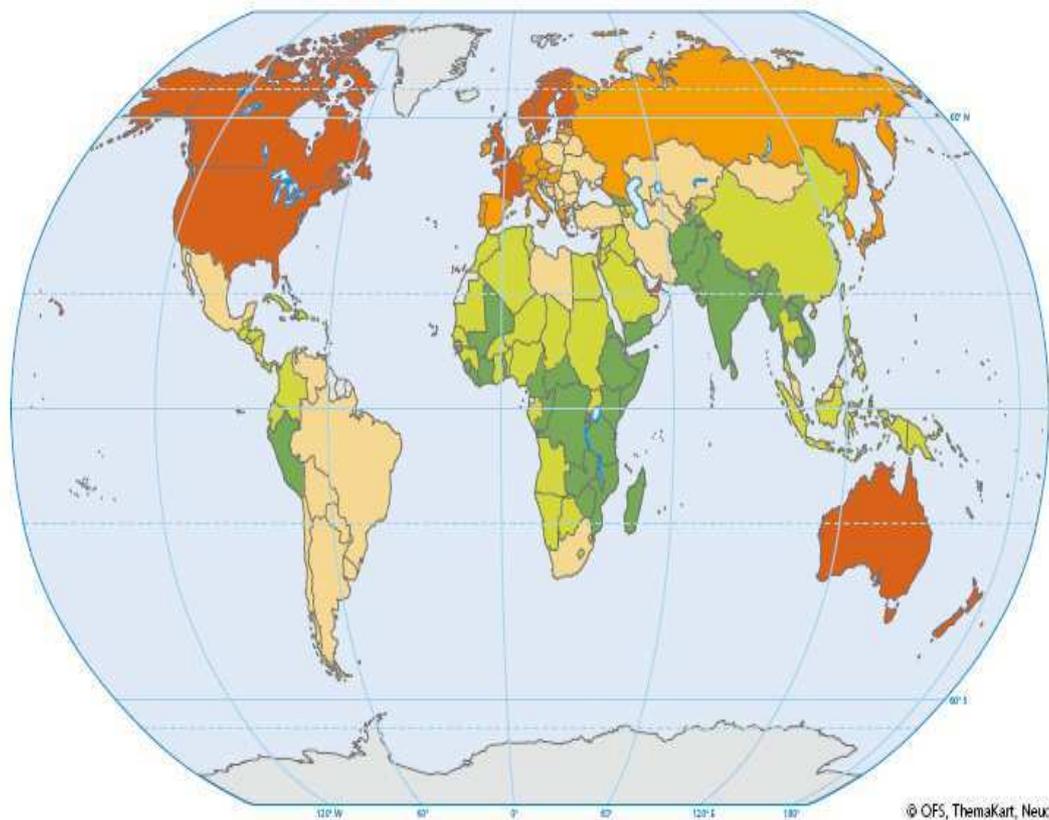
- Choix du produit à évaluer
- Définition des classes regroupant les critères d'évaluation à partir des priorités environnementales de l'entreprise
- Définition des modalités pour chaque critère
- Définition des pénalités maximales relatives à chaque critère (pour une modalité défavorable)
- Calcul de l'indice écologique.

L'indice global du produit est égal à : $100 - \text{Sommes des pénalités}$

- Check-lists

en général, ce sont des questionnaires d'évaluation qui aident à établir rapidement le profil environnemental du produit. Les aspects qualitatifs d'un produit qui peuvent être pris en compte sont par exemple: son caractère jetable ou réutilisable, le caractère vierge ou recyclé des matériaux présents, etc. Les check-lists peuvent être standard ou bien spécifique à une entreprise.

Annexe 5: Distribution mondiale de l'intensité de l'empreinte écologique



Empreinte écologique par rapport à la biocapacité mondiale moyenne disponible par personne, en %

■ < 50 ■ 50 – 99 ■ 100 – 199 ■ 200 – 299 ■ ≥ 300 ■ aucune donnée disponible

Source: Global Footprint Network, 2005

Annexe 6 : Les standards de l’empreinte écologique (GFN, 2006)



Ecological Footprint Standards

Released on 16th of June 2006

Objective

The purpose of Standards for Ecological Footprint applications is to encourage the generation of mutually comparable and high-quality results. Such standards serve to make analyses robust, transparent, and reliable, and therefore lead to results that are trusted and relevant for decision makers at all levels.

There are two parts to the Ecological Footprint Standards:

1. Applications Standards define requirements for calculating Footprint results, to ensure that Footprint calculations are conducted in a consistent manner, so that results are reproducible and comparable with other studies employing common boundary definitions.
2. Communication Standards define requirements for reporting Footprint results, to ensure that project reports do not distort the intention nor misrepresent the limitations of the accounts.

Additional Information:

The Ecological Footprint Standards contain both compulsory Standards and voluntary Guidelines.

Standards are those elements that are required for Footprint studies to be certified. In other words, all standards (unless they are not applicable) must be met in order to qualify for certification. Global Footprint Network will establish a certification system based on these standards.

Guidelines are recommended practices which are not required for study certification.

Populations and Organizations – The Footprints of Consumers and Producers

Depending both on the subject and the research question that is being investigated, Ecological Footprint studies have significant differences.

For national and sub-national populations, Ecological Footprint studies often focus on consumption of the population as a whole. With studies that focus on a population’s consumption, it is generally possible to draw boundaries that do not overlap, so that adding the Footprints of the various regional sub-populations of a nation sums to the Footprint of the nation. This is in contrast to organizations such as manufacturing companies and service providers. These types of organizations are in the middle of a supply chain, where they consume goods and services .

Rev 2006 03 27 1 of 34 www.footprintstandards.org Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 2 of 34 www.footprintstandards.org

in the production of other goods and services, which are either sold to a consumer, or sold to another organization along the supply chain. These organizations are both producers and (intermediate) consumers. Therefore special attention needs to be devoted to define the boundaries of investigation.

The fact that organizations are in the middle of the supply chain makes drawing study boundaries far more difficult for organizations, and it may not be possible to meet some requirements, such as Standard 3.2.

The Standards Committees decided to focus on Sub-National Population studies for this first release of the Standards. As a result, some of the requirements in this Standards release are not applicable in the case of organizations. This will be addressed in Ecological Footprint Standards 2.0, which will be released in 2007.

Applicability of Ecological Footprint Standards 1.0

These Standards can be used to assess the quality of any Footprint study, even if specific requirements are judged not applicable, or waived by the client.

In many such cases, it still may be possible to certify a study by defining the boundaries of the study, and then justifying why specific elements of the Ecological Footprint Standards 1.0 are not applicable, with reference to the boundary constraints.

Even when it is not possible or desirable to certify a study, use of the Standards to assess the study is still valuable. Assessing the requirements, and indicating why they are not applicable or appropriate, helps users of the study understand its limitations.

More information supporting these standards, and the related certification process, is found at www.footprintstandards.org .

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 3 of 34 www.footprintstandards.org

- 1.1 Results are expressed in global hectares (or global acres), using the appropriate equivalence and yield factors.
- 1.2 If the analysis directly or indirectly uses primary conversion factors (Note 1B and Glossary) they are identical with those used in the National Footprint Accounts for the appropriate country and year.
- 1.3 Land types used in the study are consistent with the National Footprint Accounts, both for the Footprint and (if included) the Biocapacity. The application maps both demand and biocapacity to the National Footprint Accounts land types (Note 1C).
- 1.4 Built-up land is treated in the same way as the National Footprint Accounts, i.e., it is expressed in global hectares, not actual hectares.
- 1.5 Where applicable, the assessment calculates the use of various energy sources and carriers (such as oil, gas, hydro-power) and the sequestration of CO₂ in the same way as the National Footprint Accounts. (Note 1D)
- 1.6 If the assessment includes additional data components or information not provided in the National Footprint Accounts (e.g. the energy Footprint has been broken down into different uses by activity or sector), this is clearly documented.
- 1.7 To permit comparisons with Standard-compliant Footprint studies, any additional parts of the calculation which are not consistent with the core standards are unambiguously differentiated. Therefore, the Footprint results are calculated and presented in two ways: 1) As the Footprint would be if the standards were strictly followed; and 2) As the Footprint would be with the non-standard components added. (e.g., if a Footprint was

added for pollutants, which are currently not included in the National Footprint Accounts).(Note 1E)

Standard 1:

Intent:

To ensure that the assessment is consistent with the Global Footprint Network's National Footprint Accounts (NFA) for the country in which the assessment is made.

Additional Information:

The National Footprint Accounts are data sets that track each nation's and humanity's Footprint (demand on bioproductivity) and the biocapacity that is available within each nation and on this planet to meet human demand. The National Footprint Accounts are the ecological "books" that provide an accounting of the historical balance between this supply and demand, on both global and national levels.

To make Footprint studies comparable, the Standards require that each assessment is consistent with the National Footprint Accounts by either a) using conversion factors identical to the ones used by the National Footprint Accounts or b) by breaking down national totals from the National Footprint Accounts using appropriate techniques (Note 1A).

Requirements:

(Each requirement is assessed as Pass, Fail, or Not Applicable)

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 5 of 34 www.footprintstandards.org

COMMENT DRAFT 2 1.8 If the analysis does not use the same embodied energy values as the National Footprint Accounts, the analysis clearly identifies which ones are different, and explains why these values are preferred to the National Footprint Accounts embodied energy values. For comparability purposes, any parts of the embodied energy calculations which are different from the National Footprint Accounts method are clearly differentiated and presented separately. (Note 1E)

Notes:

(1A) Background discussions on maintaining compatibility with the National Footprint Accounts are, for example, available in the European Common Indicator Report (Lewan and Simmons, 2001) and in the Input-Output (IO) based approach (Wiedmann et al., 2005).

(1B) Primary Conversion Factors are used to convert from a primary product (e.g., roundwood for Forest Land, wheat for Cropland, or salmon for Fisheries) to the area (in gha) required to produce the primary product. Primary Conversion Factors are most often reported in units of annual tonnes of primary product/gha, but roundwood is reported in annual m³/gha and some energy sources (e.g., hydropower) are reported in annual MJ/gha. Secondary Conversion Factors are used to calculate the area needed to produce a secondary or daughter product (e.g., paper from wood for Forest Land, bread from wheat for Cropland, or frozen salmon croquettes from salmon from Fishing Grounds.) Secondary conversion factors are also reported in units of annual tonnes/gha (or possibly other annual units per gha, such as annual \$ per gha). Different methods exist for calculating the primary resource inputs for secondary products (e.g., Life Cycle Analysis (LCA), production recipes, Input-Output (IO) analysis, etc.).

(1C) This means using either average bioproductive land (in global hectares) or the breakdown to National Footprint Accounts land types: Cropland, Forest, Grazing Land, Built-up Land, Fishing Ground, and CO₂ Area (or CO₂ Sequestration Area) (also in global hectares).

(1D) In 2005, a working group was established to determine how to assess the Footprint of nuclear power in the National Footprint Accounts. This group may propose a different method of treating nuclear power in the National Footprint Accounts. If the National Accounts review

committee approves of this new approach, implementation is expected no earlier than the 2006 National Footprint Accounts Editions.

(1E) Refer also to Standard 6: Use of Non-Standard Elements in Footprint studies.

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 6 of 34 www.footprintstandards.org

Standard 2:

Intent:

To ensure that the study boundaries are clearly defined.

Additional Information:

In order to compare Footprint studies, the boundaries must be clearly defined, so that the range of activities included in the study is clearly understood. The selection of study boundaries depends strongly on the specific goals of the Footprint study.

Requirements:

(Each requirement is assessed as Pass, Fail, or Not Applicable)

- 2.1. The study clearly identifies the scope of the work (i.e. which activity's Footprint is being assessed in the study. For example, this can be the final consumption of a national population, a regional or city population, or a household; it can also be the provision of a service or (finally consumed) product), or it can be a specified set of activities within an organization.
- 2.2. The study makes clear that a Footprint assessment - as any other resource tracking framework - analyzes activities, which can be activities of production or consumption. (Note 2A)
- 2.3. The study boundaries are specifically and unambiguously defined. (Note 2B)
- 2.4. The study specifies which Footprint perspectives (e.g., resource extraction Footprint, economic production Footprint, consumption Footprint, trade Footprint etc.) are used in the analysis, and clearly differentiates among them
- 2.5. The study explicitly addresses how it avoids double-counting of areas. (Note 2C)
- 2.6. The assessment accounts for the full life-cycle demands on resources used. This is established either by using appropriate embodied Footprint data from the National Footprint Accounts, or by using techniques that take into account impacts of all upstream production processes (e.g., data from an LCA or IO analysis). (Note 2D; for exceptions see Note 2E)

Notes:

(2A) The Footprint measures demand on nature, which results from specific human activities. It is the actions of an entity (person, city, country) that creates the demand on bioproductive space. Thus, organizations per se cannot be analyzed, since it is not clear, which activities are associated with an organization and which ones are not (e.g., is the CO₂ emitted from company X's business, the CO₂ Footprint of the airline, of the oil company that provided the kerosene, of company X, or of company X's client company that is served by this business trip?). Yet the activities of organizations can be analyzed: for instance one can calculate the Footprint of generating and distributing the electricity sold by a utility company – which is not the “Footprint of the utility.” At present, there is no inherent logic nor a standardized set of rules regarding what activities should, or should not, be included in the Footprint of an organization.

(2B) If the study is done for a product or organization's activities, the boundaries are specifically and unambiguously defined. For guidance on setting boundaries, see the Global Footprint Network boundary paper (Wackernagel et al., 2006) or the System boundary description, Sec. 4.2.3.3 of DIS/ISO 14044 (ISO, 2005) Also see the LCA methodology as documented in the ISO 14040 series. Note that the boundary definition must identify the portion of the organisation's production that is sold to final consumers.

(2C) The same bioproductive land area should be counted only once even though it may provide two or more services. Because material flows are the basis upon which the Footprint is calculated, intermediates or inputs and outputs must not be double counted (e.g., counting the flour used to make bread and the bread itself; or counting paper when it's purchased and again when it's recycled Or, if intermediates are double counted, the part that is (or potentially is) double counted must be identified.

(2D) If the study looks at the Footprint associated with an organization's activities (Note 2A), it might be more productive to propose a "circle of influence for Footprint reductions" approach rather than a "Footprint of the organization's activities" approach for determining boundaries. The Global Reporting Initiative (GRI) offers extensive discussions on how to determine boundaries for measuring an organization's performance and its spheres of influence (GRI Boundary Protocol, 2005). GRI also acknowledges the challenges of reporting boundaries. For shortcomings of this GRI Boundary Protocol see Dey, Lenzen, Foran and Bilek (2002). Note that IO resolves the boundary issue from one particular perspective, namely, if the question is: "what are the resource flows associated (directly and indirectly) with sales for final consumption?" This question can also be addressed with other methods, depending on categories to be analyzed, requisite level of accuracy, and precision required for the study. For an alternative approach to identifying levels of influence, see Lenzen et al, 2006.

(2E) In the case of intermediate demand (e.g., Footprint of a business' activities), full life cycle accounting may not be possible. If so, this must be noted, with explanations, and standard 2.6 would be considered "Not Applicable". When Standard 2.6 cannot be met, it is very probable that Standard 3.2 cannot be met either, as it may not be possible to eliminate overlapping boundaries. This imposes constraints on how the results are interpreted, and how they can be compared to other Footprint studies.

Standard 3:

Intent:

To ensure that Sub-National Footprint results can be compared when assessed using the same boundary definitions.

Additional Information:

The European Common Indicators Project (ECIP) evaluated early Footprint studies, and reports from this activity informed decisions made in establishing these standards. In particular, the project identified numerous areas where lack of agreement on common components and boundary conditions resulted in Footprint studies that could not be compared with each other (Lewan & Simmons, 2001; ECIP Final Report). These reports discuss and reference various methods for establishing the Consumption Land Use Matrix. An alternative approach to allocating consumption is via IO analysis (Wiedmann et al, 2005; Global Footprint Network and University of Sydney, 2005)

Sub-National Population calculations introduce analytical difficulties not present at the National level; organizational Footprint assessments introduce still more challenges. It is important to distinguish between regional population studies (States, Counties, Cities), which can generally be

treated in a similar manner, and organizational studies, which introduce quite different problems than the regional population studies.

In particular, when conducting Footprint assessments on the activities of companies, there are multiple overlapping life cycles (for example, the steel producer uses trucks made from steel made from ore transported by the trucks using fuel extracted from the earth using steel drilling rigs). These overlaps increase the risk of double counting when assessing the Footprint. This problem can be reduced by drawing explicit boundaries for the study (Standard 2). (Note 3A)

Requirements:

(Each requirement is assessed as Pass, Fail, or Not Applicable)

- 3.1 The study calculates (and presents) sub-national Footprints by adapting the national per capita Consumption Land Use Matrix to the sub-national population under consideration (Notes 3B, 3C). Adjusting the national Consumption Land Use Matrix to the sub-national population can be done by various methods (e.g., allocation based on supplementary consumption statistics, LCA, IO) consistent with these standards.
- 3.2 The method used to populate the Consumption Land Use Matrix, and to calculate the Sub-National Population Footprint, is consistent with the National Footprint Accounts, so that when applied to all non-overlapping sub-national regions, the sum of regional results equals the National Footprint Accounts national results for Footprint and Biocapacity. (Note 3A)
- 3.3 The study needs to make explicitly clear what proxies/methods are used to construct sub-national accounts (e.g. expenditure on petrol or car ownership as a proxy for private transport).

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 9 of 34 www.footprintstandards.org

Notes:

(3A) As noted in 2A, Ecological Footprint method applies to activities, not organizations such as companies, industry sectors, production plants etc. In the case of production chains, it is important to recognize that Footprints of all intermediate demand Footprints do not add up to the final demand Footprint, because their activities may have overlapping Footprints (e.g., the Footprint of baking bread overlaps the Footprint of milling flour. Flour is used in making bread, hence summing the Footprints would lead to double counting the milling Footprint.). The sum of the Footprints of all business activities will be larger than the Footprint of the economy as a whole, due to double counting along the production chain of goods and services. Since this overlap exists, Standards 3.2 and 5.2 are usually not applicable to Footprints of business activities. Most Footprint applications focus on the activity of “final consumption” or a particular population. For an attempt to develop a consistent system of delineating producer and consumer footprints into mutually exclusive but collectively exhaustive contributions, see Lenzen et al, 2006. For a discussion on boundaries, see Wackernagel, et al., 2006.

(3B) Guideline: Consumption Land Use Matrix Suggested Top-Level Components (see also Standard 6: Consistency of Components). Note that for Footprint studies of organizations, which are in the middle of the supply chain, defining consumption may be difficult. None the less, reporting data in this format is a useful tool in identifying the magnitude of an organization’s impact on various land types. For organizations, the consumption categories below may not be appropriate, and for such studies the practitioner and client should negotiate appropriate categories. As noted previously, Ecological Footprint Standards 2.0 will include a more detailed treatment of organizations.

Built-up Land	CO ₂ Area	Cropland	Grazing Land	Forest	Fishing Ground	Total
Food						
Shelter						
Mobility						
Goods						
Services						
Total						

(3C) As of 2005, Consumption Land Use Matrices are not included as part of the National Footprint Accounts – only a sample template is included. But such matrices have been developed for several countries. Global Footprint Network encourages users in each country to use one common matrix to increase consistency. If the Consumption Land Use Matrix does not exist, or there is reason to believe that the existing Matrix is outdated or inadequate, the study must develop the National Consumption Land Use Matrix as part of the Sub-National Footprint Study.

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 10 of 34 www.footprintstandards.org

Standard 4:

Intent:

To ensure that all conversion factors used in Footprint calculations are consistent with the National Footprint Accounts.

Additional Information:

The National Footprint Accounts provide all the primary conversion factors describing the area demand of primary activities (apart from those aspects not yet covered by the current accounts). If more detailed (secondary) factors are needed, for instance of products that are made from a number of input factors, these may be calculated using the conversion factors for primary resources as provided by the National Footprint Accounts. Calculations for these newly derived factors must be clearly documented.

If National Footprint Accounts do not provide the necessary factors, or the available factors lack specificity needed for the assessment, data from life-cycle analyses or other sources may need to be used. However, it is important to remember that household consumption only captures a limited part of the overall consumption of a society (typically 40 percent of consumption is attributable to non-household activities such as infrastructure, universities, policing, hospitals etc.). Therefore, household consumption needs to be adjusted to capture associated resource consumption not immediately part of the life-cycle. Input-output based approaches automatically capture life-cycle-wide contributions and assign impacts to all final demand components. However, some Footprint studies might simply want to use factors that are “taxed” with this extra burden/overhead.

Requirements:

(Each requirement is assessed as Pass, Fail, or Not Applicable)

- 4.1 Secondary conversion factors are derived from the primary conversion factors in the National Footprint Accounts. (Note 4A)
- 4.2 Calculation methods for any derived conversion factors are clearly documented (e.g., data source given, method of calculation described, discussion of indirect or life-cycle effects included in the factor, description of boundaries compliant with Standard 2).
- 4.3 When a conversion factor cannot be derived from the existing primary conversion factors, the calculation of the needed conversion factor is treated as a Non-Standard Element (see Standard 6).

Notes:

(4A) In calculating derivative conversion factors, a variety of methods could be used. It is the responsibility of the study to ensure that the results are consistent with the National Footprint Accounts data.

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 11 of 34 www.footprintstandards.org

Standard 5:

Intent:

To make reports comparable worldwide by ensuring that consumption components and sub-components are consistent with National Footprint Accounts and mutually non-overlapping.

Additional Information:

The consumption components for Footprint results are:

- Food (e.g. consumption areas associated with (the chain) of food production)
- Shelter (e.g. domestic energy and land use and consumption areas associated with of the construction industry)
- Mobility (e.g. fuel and land use for private transport and consumption areas associated with provision of public transport)
- Goods (e.g. consumption areas associated with products of the manufacturing industry)
- Services (e.g. consumption areas associated with provision of public and private services)

The above components can be broken down into sub-components as needed to provide the desired level of detail. For example, “Mobility” can be subdivided in sub-components such as private automobile, public transit and air travel; public transit can be further expanded to reflect bus, light rail, etc.

‘Waste’ must not be treated as a separate component, but a subset of other components (i.e., waste is a stage in the lifecycle of every product, so waste is a function of each lifecycle rather than a separate component). However, waste management can be a sub-component of Services, or gains from recycling can be a sub-component of Goods.

In some cases the analysis may require components other than the guideline components in the Guideline Consumption Land Use Matrix to answer a specific Footprint question. In such cases, the report must clearly identify any non-standard components, or any allocation that differs from the recommendation of this Standard (see Standard 7 for further requirements for non-Standard elements).

Best Practice Recommendation: To ensure consistency and comparability, use an official classification system for subcomponents. For the consumption Footprint for example, one possible classification system is COICOP (Classification of Individual Consumption according to Purpose), which in turn is consistent with National Accounts (at least in developed countries). Classification system components can be aggregated to the components mentioned above. While a different breakdown is conceivable as well (E.g. “Energy” could be shown separately) in order to maintain comparability use of the components listed above is recommended.

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 12 of 34 www.footprintstandards.org

Requirements:

(Each requirement is assessed as Pass, Fail, or Not Applicable)

5.1 The study reports results in Consumption components and sub-components that are consistent with National Footprint Accounts.

5.2 The study ensures that components are non-overlapping and exhaustive. (See also note 3A regarding studies of organizations)

5.3 The report explains the consumption components.

5.4 The study clearly identifies which items are included in which component. (Note 5A)

Notes:

(5A) In some cases, the source data may not permit disaggregating data sufficiently to allocate subcomponents as recommended in the Additional Information discussion. For example, in the case of Food, the recommended practice is to include food packaging and food transport Footprints in the Food component. However, due to source data limitations, it may be appropriate for a study to group all packaging and transport into a single category, such as goods, rather than reporting them in both the Food and Goods categories. This is permissible. The intent is that allocation of subcomponents is documented and unambiguous.

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 13 of 34 www.footprintstandards.org

Standard 6:

Intent:

To ensure that if the Footprint assessment either adds new elements to, or omits elements from, the standardized Footprint elements, these differences are identified and explained.

Additional Information:

For comparability, each Footprint assessment needs to include a way to compare itself to the National Footprint Accounts. However, there may be reasons for adding to or leaving out aspects of the National Footprint Accounts in a particular Footprint application. These additions or omissions must be clearly documented both to avoid inappropriate comparisons and to identify where the method is not compliant with the Standards.

When a Footprint assessment deviates from the Standards, it must identify which aspects are consistent with the Standards, and which are not. Non-standard methods should be described in detail, explaining the underlying philosophy and purpose as well as documenting the calculation procedures. So long as the study clearly identifies the non-standard elements, and shows how these elements change the Footprint compared to a Standard-compliant analysis, the study can be certified. (Note 6A)

When these non-standard methods advance the utility of Footprint analysis, they will be reviewed by the various Standards Committees and may be integrated in the next generation of National Footprint Accounts and Standards. In this way, the Network encourages creativity and explorations that will help to make the method even more valid and reliable.

Requirements:

(Each requirement is assessed as Pass, Fail, or Not Applicable)

- 6.1. The study explicitly identifies elements added or left out as compared to the standard National Footprint Accounts.
- 6.2. The study provides transparent documentation of the calculation method used for added elements.
- 6.3. If new elements are added, the study presents the results with and without these elements, so that a direct comparison of results to other Standardized results can be made.

Notes:

(6A) It is not necessary to analyze all Footprint components to comply with these Standards, as long as the Footprint boundaries are clearly drawn and the relevant components identified. For example, an assessment of the Footprint of milk served in a school might only require the Food component. Accurately defining the study scope and boundaries is critical in this case.

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 14 of 34 www.footprintstandards.org

Standard 7:

Intent:

To give a sense of the precision of Ecological Footprint results and to make comparisons of results more meaningful.

Additional Information:

The provision of error margins enables a more meaningful comparison between results. They allow a judgment whether differences in Ecological Footprints are real or only ostensible. An estimation of the precision should also increase the credibility of the Ecological Footprint. Unfortunately, National Footprint Accounts depend on data inputs that mostly lack information about error margins. Hence the national results cannot be bracketed with error margins (Note 7A).

It is important to recognize that this guideline addresses errors in the source data, or errors introduced as a result of analytical limitations (e.g., truncation errors or unavoidable double counting because information is lacking). It does not address methodological errors, such as double counting of demand or production elements when these are separable.

Guidelines:

- 7.1. If possible, final results of Ecological Footprint calculations should be presented with an estimated error margin.
- 7.2. An estimate of the following types of error should be given:
 - a. data source error (from collection etc, basically the baseline error of the raw data and coefficients used)
 - b. errors associated with proportionality assumptions (e.g. based on physical or based on monetary flows)
 - c. aggregation errors (these apply whenever data for a broad component is applied to a more specific subcomponent, and they apply in principle to both process-type and input-output methods)
 - d. errors associated with the truncation of upstream as well as end-of-life stages of the life-cycle
- 7.3. For each error type a statement should be made regarding whether the error is assumed to be a random or a systematic error (for example a truncation error is systematic, most source errors are random).
- 7.4. A description of how the estimates were derived is included; references to and adoptions from other studies are possible.

Notes:

(7A) The uncertainty estimation technique developed by Ecoinvent Centre for the Swiss life cycle inventory database (Frischknecht and Jungbluth, 2004) provides a pathway for developing uncertainty data where none currently exist. This method has not yet been evaluated for use with the National Accounts.

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 15 of 34 www.footprintstandards.org

Standard 8:

Intent:

To ensure that the report clearly identifies whether or not the report is consistent with the most recent National Footprint Accounts.

Additional Information:

The National Footprint Accounts follow a consistent methodology, and understanding this methodology is essential to avoid misinterpreting Footprint results. The methodology paper is reviewed on an annual basis and revised as needed. The current version of the paper is located at www.footprintstandards.org.

Requirements:

(Each requirement is assessed as Pass, Fail, or Not Applicable)

- 8.1 The report references the National Footprint Accounts edition, version and data year (Note 8A) used in the analysis.
- 8.2 The National Footprint Accounts edition referenced is current with latest National Footprint Accounts edition that was available at the time when assessment was initiated or later edition. In no case is the National Footprint Accounts edition more than 2 years old. However, it is permissible to use a previous year's data using the latest Edition (e.g., years prior to 2002 using the 2005 Edition) to ensure that the National Footprint Accounts data set is from the same period as other data used in the assessment.
- 8.3 The report contains references to appropriate reference papers, including but not limited to the most current version of the methodology paper available at www.footprintstandards.org.

Notes:

(8A) The National Footprint Accounts are updated on an annual basis. This ensures that the National Footprint Accounts use the most complete data sets available – source data may change as databases are corrected, or additional information is added, or industry classifications are modified. Use of an older Edition may result in Footprint assessments that are not comparable to those using the current Edition. Because each Edition can calculate the Footprint for any previous year, it is necessary to specify which data year is used in the assessment. This means that if an assessment uses other data sets that are not updated as rapidly or as frequently as the National Footprint Accounts data sources, it is possible to match the data sets for the appropriate periods. The National Footprint Accounts (as of 2006) include back-cast data – the results of applying the current methodology to the updated data sets in the National Footprint Accounts –to help explain changes in Footprint that occur because of methodological and source data changes.

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 16 of 34 www.footprintstandards.org

Standard 9:

Intent:

To ensure that the study provides the reference information needed both for traceability and auditing of results, and for understanding the technical language specific to Footprint studies.

Additional Information:

In order to keep terms and definitions consistent within the Network, all standardized reports need to use the same glossary (available from www.footprintstandards.org as a supporting document to these standards).

Requirements:

(Each requirement is assessed as Pass, Fail, or Not Applicable)

- 9.1 The study includes a glossary or definitions for key terms, including Ecological Footprint, Biocapacity, global hectares, yield factors, equivalence factors, and Footprint components.
- 9.2 The study uses these terms consistently.
- 9.3 The report explains land types.
- 9.4 The study glossary is consistent with the Global Footprint Network glossary attached here and available on the Standards website (www.footprintstandards.org)

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 17 of 34 www.footprintstandards.org

Standard 10:**Intent:**

To ensure that the analytical, science-based Footprint results are recognized and accepted as valid, the Footprint report clearly distinguishes between analytical results from the Footprint measurement and any conclusions, interpretations or recommendations relating to policy, planning or practice.

Additional Information:

In the financial world there are two separate functions: accounting (documentation of what is), and financial planning (strategies for how to reach a goal). In Footprint assessments too, analysts need to be clear about what part of the study is documentation/analysis, and what part is recommendations for action. Certification only applies to the analytical part of a Footprint analysis. Certification does not assess or validate recommended actions. However, only studies that do not confound accounting and recommendation can be certified.

Descriptive statements such as “we humans are using 1.2 planets” or “The per capita US Footprint is 5 times larger than the capacity that exists per person on this planet” are admissible and encouraged. They are powerful in themselves, and lead people to formulate their own conclusions about the nature of the problem, and ethical or moral implications of resource use. Such practices translate into statements like: “x global hectares exist per person. In contrast, this population uses y global hectares per person.” (Yet stating, for example, “the fair share is x hectares per person” would not qualify for certification).

Requirements:

(Each requirement is assessed as Pass, Fail, or Not Applicable)

- 10.1 The report includes an estimate of the global biocapacity in gha per person.
- 10.2 The report explains the difference between global biocapacity and regional or local biocapacity. (Note 10A)
- 10.3 The report explains that the Footprint analysis compares human demand on the earth’s biocapacity to the available biocapacity, i.e., an accounting of biocapacity supply vs. demand, given current technology and consumption patterns.
- 10.4 The Footprint report measures the demand of activities (producing, using, consuming). The Footprint of any entity results from the entity’s activities, rather than from the mere existence of the entity.
- 10.5 The report makes clear that the Footprint is an ecological accounting tool, and as such, may inform choices but does by itself not advocate nor promote any particular strategy, policy, or solution.
- 10.6 Any discussion that implies rights to, or limits on rights to, a given per capita Footprint (as for example in phrases such as Fair share, Fair Earthshare, equitably allocating, etc.) is kept clearly distinct from the analysis and not presented as a necessary conclusion of

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 18 of 34 www.footprintstandards.org

the methodology nor attributed to Global Footprint Network. Descriptive statements comparing per capita demand to per capita capacity do not violate this requirement, nor do any statements clearly identified as the opinion of the report’s author. Discussion of rights, or limits on rights, that are codified in law, does not violate this requirement.

Guidelines:

- 10.7 Best practices include statements comparing actual consumption to global averages and availability. They also report on national or regional biocapacity.

- 10.8 Best practices include discussion of the ramifications of global and local capacity, as well as discussion related to import/export of demand and biocapacity. (See also notes 13A and 13B in Standard 13 for additional discussion)
- 10.9 Best practices may outline possibilities and options for action, yet does not endorse. It analyzes the current situation, and compares this with alternative scenarios, or identifies opportunities.
- 10.10 Best practices use the Footprint to stimulate people's creativity and encourage participation. In many cases where Footprint is being used, it is more effective to focus on the consumption dilemma and range of possible solutions, rather than advocating particular solutions or support for a particular interest (Note 10B). By using the Footprint to provide data, it helps invite people to the table and build consensus around the concern about ecological overshoot. This approach generates questions and asks participants, be they cities, businesses or individuals, for participation and for contributing their solutions.

Notes:

(10A): The report makes Footprint comparisons that are based on global biocapacity, reported in global hectares (gha) or global acre (gac). Global comparisons are necessary, because the Footprint is grounded on global biocapacity and global demand. The report can also use standardized local hectares as long as the conversion into global hectares is provided. Local hectares, such as Dutch hectares, would show the biocapacity per average Dutch hectare. In a given year, each Dutch hectare would be worth a constant, fixed amount of global hectares

(10B): For example, the term 'fair earthshare' raises the following concern: While the Footprint provides a powerful framework for describing social resource (in)equity within the context of global limits, using interpretative words like 'fair earthshare' can muddle description with prescription. Separating analysis from judgment makes the analysis far more powerful. It lets the analysis speak for itself. At the same time it also provides more support for those who want to use Footprint results for their interpretations. Early Footprint (and environmental space) analysis ran into unnecessary barriers and controversies by mixing what the analysts thought is fair with the analysis of what is happening now. This allowed contrarians to attack the analysis, thereby also undermining the arguments of the interpreters.

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 19 of 34 www.footprintstandards.org

Standard 11:

Intent:

The Ecological Footprint is presented as an ecological accounting tool, and not as a predictive model. Nevertheless, it can be applied in predictive modeling by translating scenario results into Footprint equivalents.

Additional Information:

The Ecological Footprint is an ecological accounting tool. The Footprint's technical integrity is grounded in the fact that the Footprint assesses past consumption and biocapacity, based on actual production and consumption data (see also Standard 10.3). The Footprint does not attempt to predict future consumption or biocapacity, nor predict technological innovation. It just documents what is.

However, one of the valuable tools for evaluating and evolving policy recommendations is the use of Footprint scenarios. Scenarios are Footprint analyses of hypothetical situations, based on explicit starting assumptions. These assumptions may be more or less valid, and, like all forward looking statements, scenarios are speculative because the underlying assumptions are subject to change.

At present there are no commonly agreed to methods for developing and applying scenarios within the Ecological Footprint.. For this reason, these standards do not include specific requirements for evaluating the quality of a scenario.

Requirements:

(Each requirement is assessed as Pass, Fail, or Not Applicable)

- 11.1 If scenarios are used, the report distinguishes between the underlying Footprint analysis, and any scenarios evaluated as part of the study.
- 11.2 The report makes clear that scenarios are not predictions of the future, but rather assessments of what would be the Footprint consequences if a given set of conditions are met.
- 11.3 When scenarios are used, they are conducted and described in a manner consistent with these standards.

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 20 of 34 www.footprintstandards.org

Standard 12:

Intent:

To ensure that Footprint analyses clearly identify the research question, the study's limitations, the method used, and the method's limitations, so that results are not misinterpreted.

Additional Information:

The Footprint measures the percentage of the biosphere's bioproductive capacity occupied by a given human activity. This activity could be anything ranging from the entire human demand on the planet down to the production of one pencil. Clearly stating the research question helps the reader understand what aspect of this demand the Footprint assessment is addressing, and what it is not.

The national Ecological Footprint accounts are constructed so as to not exaggerate human demand on nature. In other words, they have a bias toward underreporting. More specifically, this means that some types of demand are not included for lack of data (e.g., waste absorption, freshwater use or acid rain), and, for some included aspects of demand, conservative conversion factors are used (e.g., the CO₂ method of fossil fuel use accounting is conservative compared to other possible approaches that calculate fossil energy use in terms of fuelwood, biomass energy or food production).

Because the Footprint measures supply by measuring the actual productivity of the various land types, the Footprint does not directly incorporate the impact of environmental pollutants, such as Hazardous Air Pollutants (HAPs), heavy metals, or Persistent Organic Pollutants (POPs), nor does it directly incorporate land disturbance. If environmental pollutants or land disturbance are a significant part of the study, they must be assessed using other methods, or treated as a non-standard element of the study. (Note 12A)

Requirements:

(Each requirement is assessed as Pass, Fail, or Not Applicable)

- 12.1 There is an explicit mention of the research question that the Footprint is attempting to answer (i.e., how much of the bioproductive capacity of the biosphere is occupied by a given activity?)
- 12.2 The statement of the study's limitations is complete, clear and accurate, with study boundaries clearly identified. See Standard 2 for additional discussion.
- 12.3 The report discusses the factors affecting the accuracy and precision of the results.
- 12.4 The report notes that Footprint assumptions are conservative, i.e., more likely to underestimate the Footprint and overestimate biocapacity. The following text, or a

paraphrase of this text, meets this requirement: “National Footprint Accounts are managed so that, when in doubt, they underestimate the Footprint and overestimate the available biocapacity. For example, many waste streams are still excluded for lack of adequate data, and optimistic carbon sequestration rates are used for calculating the carbon Footprint.”

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 21 of 34 www.footprintstandards.org

- 12.5 The report explains that the Footprint and biocapacity measure historical demand and supply, respectively, and cannot predict future biocapacity and consumption. The following text, or a paraphrase of this text, meets this requirement: “The National Footprint Accounts are based on the actual consumption and production data reported by United Nations statistical agencies in annual updates. Ecological Footprint assessments analyze both actual demand on biocapacity and available biocapacity for a specified year. Ecological Footprint accounts reflect the analyzed year’s consumption, land management and harvesting practices. The Ecological Footprint does not forecast future technologies, or consumption patterns, or changes in land management practices, all of which will affect the Footprint in future years”.
- 12.6 The report acknowledges that the Footprint does not address degradation of bioproductivity from any causes, as might arise from eroding or depleting soils, or from pollutants such as heavy metals or PCBs inhibiting bioproductivity. The following text, or a paraphrase of this text, meets this requirement: “The Ecological Footprint does not analyze land use practices for degrading practices, or predict the impact of ecotoxic or bioaccumulative materials on bioproductivity. The Footprint only reports human demand based on actual yields from bioproductive land. Footprint accounts do not incorporate future impacts of pollutants or erosion. This would require assumptions about future impacts which are not yet robust and broadly accepted. Thus, the Footprint only detects degradation of biocapacity (through erosion, desertification or pollution) indirectly, as a declining trend in yields or an increasing trend in inputs, or both.”

Notes:

(12A) Since the Footprint is a comparison of past demand against past biocapacity, the impact of pollutants or land change may be detected as a declining trend in biocapacity, such as smaller yield factors or increased natural loss factors. The Footprint is not intended to predict future changes in bioproductivity.

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 22 of 34 www.footprintstandards.org

Standard 13:

Intent:

To ensure that the Footprint is understood as only one necessary criterion of sustainability, and not an absolute indicator of sustainability.

Additional Information:

The requirement that humanity’s Footprint be smaller than available global biocapacity is a necessary but not sufficient, condition for sustainability. (Note 13A)

Policy decisions regarding biodiversity, resource management, social well-being and other sustainability dimensions require consideration of factors beyond the Footprint. Footprint reports need to state clearly that Footprints are not complete sustainability measures.

Issues not directly related to the Footprint, such as social satisfaction, human health, the integrity of natural ecosystems, or the conversion and management of non-renewable resources such as minerals must be assessed using other tools.

Standards:

(Each requirement is assessed as Pass, Fail, or Not Applicable)

13.1 The report does not state or imply that the Footprint is a complete measure of sustainability.

13.2 It contains either the following standard language, or a paraphrased version:

“The Ecological Footprint is an [ecological] accounting tool that compares a particular human demand on the Earth’s biosphere in a given year to the available biological capacity of the planet in that year. It can also be compared to the biocapacity of a nation or a region in that year. The Ecological Footprint documents what has occurred - it provides a snapshot in time. It does not predict future demand or capacity, nor prescribe allocation.

The Ecological Footprint attempts to answer one central sustainability question: ‘how much of the bioproductive capacity of the biosphere is used by human activities.’

To measure overall progress towards sustainable development, the Ecological Footprint needs to be complemented by other measures.”

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 23 of 34 www.footprintstandards.org

Guidelines:

(Each requirement is assessed as Pass, Fail, or Not Applicable)

13.3 The report explains that while the Footprint analysis measures biocapacity, it does not determine how much of the total biocapacity is available to meet human demand (Note 13B)

13.4 The report acknowledges that the amount of global biocapacity reserved for wildlife, and how such land is managed, does not have a scientifically rigorous determination. (Note 13B)

Notes:

(13A) Global sustainability requires that the global Footprint be less than or equal to the global biocapacity. However, because regions of the globe exchange trade, it is possible for local regions to have a Footprint greater than the local biocapacity, because the deficit is overcome by imports. However, from the standpoint of bioproductivity the earth is a closed system, and this imposes a maximum on the global demand. Exceeding this demand leads to overshoot, or using nature’s resources faster than nature can regenerate them, which is not sustainable.

Also, comparison of a local population’s Footprint to the local or regional biocapacity does not necessarily predict whether that Footprint could be sustained on a global scale. A small Footprint in a region of even smaller biocapacity might be sustainable on a global scale, while a large Footprint in a region with reserve biocapacity is not sustainably replicable either at a global level. Finally, it is possible for a local population to have a Footprint smaller than the local biocapacity, but because of exports still create local ecological overshoot through overharvesting.

(13B) The Footprint measures human demand on biocapacity. Since the Earth’s bioproductivity is required to support all species on Earth, decisions on how much of the biocapacity can be used by humans is as much a values-based decision as it is a scientific analysis. For example, if humans consume 100% of the Earth’s biocapacity, then there is nothing remaining to support wildlife. As it is ultimately an ethical choice in what kind of biodiversity rich world humanity wants to live – or, from a minimalist perspective, how much biodiversity is absolutely essential for human life on this planet, best practices call for making the need for this choice clear to users of Ecological Footprint results. For recent discussions on the area needed to preserve biodiversity, and the challenges posed by human demand on land areas, see Ceballos et al. (2005) and Stokstad (2005).

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 24 of 34 www.footprintstandards.org

Standard 14:

Intent:

To ensure the transparency and credibility of the report, relevant sources are cited, and study methods are described.

Additional Information:

Data used in the analysis is either measured as part of the study, or taken from previous studies. If measured as part of the study, the methodology, and related limitations, must be described. If data is taken from other sources, these need to be cited, along with an estimation of data quality.

Requirements:

(Each requirement is assessed as Pass, Fail, or Not Applicable)

- 14.1 The report references relevant other work that is used to support the analysis and conclusions.
- 14.2 The report references all data sources used in compiling the Consumption Land Use Matrices.

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 25 of 34 www.footprintstandards.org

Standard 15:

Intent:

To ensure that the standards and certification process is transparent.

AND

To ensure that Footprint reports can be independently checked for compliance to standards.

Additional Information:

In order to build and maintain confidence in the standards and certification process, the Ecological Footprint Standards and Certification protocols are posted on a publicly accessible website, www.footprintstandards.org . This site also has comment forms to permit public comment and suggestions to aid in improving the standards.

Requirements:

(Each requirement is assessed as Pass, Fail, or Not Applicable)

- 15.1 The Report confirms compliance to the Ecological Footprint Standards, and cites Standards edition number.
- 15.2 The Report references both the Ecological Footprint Standards and Certification protocols, with links to these documents at www.footprintstandards.org .
- 15.3 The Report provides contact information, including a reference to www.footprintstandards.org for additional information.

Ecological Footprint Standards 1.0 Rev 2006 03 27 26 of 34 www.footprintstandards.org

COMMENT DRAFT 2

Standard 16:

Intent:

To strengthen the influence, trustworthiness, and effectiveness of standardized Footprint assessments by increasing consistency in style, tone and messages.

Additional Information:

While Footprint reports need to be creative and explore ever new kinds of empowering applications, using common style sheets will help building the common Footprint “brand.”

Guidelines:

- 16.1. Avoid Acronyms. For example: Rather than EF, say Footprint; rather than GFN, say Global Footprint Network or Footprint Network.
- 16.2. Choose descriptive, accessible names and labels: for example, when explaining Footprint components and sub-components, use names that are not confusing (for example, do not

- use “waste” as a category, but rather “waste management” or “disposable goods” or whatever is actually meant by the sub-component).
- 16.3. Less is more. Keep things as simple and accessible as possible.
 - 16.4. Avoid preachy, moralistic or judgmental tones: Be as descriptive as possible. Identify what is analysis and what is interpretation. Avoid unnecessary adjectives. Avoid terms like responsible or responsibility (particularly if there is no legal context or code). Rather say, “can be attributed to” or “is associated with”. It reduces credibility to be judgmental or heavy-handed, and moralistic.
 - 16.5. Consider as main message: not “reduce your Footprint” but “secure your wellbeing, and therefore safeguard ecological assets” (once readers will buy the importance of safeguarding ecological assets, they will choose/conclude themselves to reduce their Footprint. This is more powerful, lasting, respectful, and empowering than telling them to reduce their Footprint.
 - 16.6. Be clear about questions that are being answered. When offering results and answers, make sure there is clarity what question is being answered. For instance, we need to make clear that Footprint is not a thing in itself but is shorthand for a particular research question, which is: How much of the biosphere do given activities occupy? Footprint is just one method for answering that question.
 - 16.7. Use standard texts where possible. Avoids rewrites, use as much standard text as possible. Avoids reediting, and shows consistency. Check www.footprintstandards.org for standard texts you can use on particular aspects.
 - 16.8. Be inviting: Make sure reader gets that you are on his/her side and want to make their life better—“we are all in this together.” Avoid criticism or blame. Emphasize the seriousness of the problem, but maintain a positive and empowering tone.
 - 16.9. Let readers be the heroes and let them choose. Avoid “should,” “ought to,” etc. Focus instead on clear results yielded by the method, and let them speak for themselves. Generally choose language that has a positive rather than preachy tone. Be inviting).

Annexe 7 : Epaisseur préconisée de couche de forme et classe de plate-forme obtenue

PST	Classe d'arase	Matériau des couche de forme	Epaisseur préconisée (m)	Plate-forme
PST1	AR1	B11, B41, C1B41, C1B51, C2B21, C2B41, C2B51, D11,	0,8	PF2
		B31, C1B11, C2B11, C2B31, D21, D31	0,75	PF2
		R11, R22, R42, R62	0,7	PF2
		R21, R41, R61	0,6	PF2
PST2	AR1	Tous matériaux ci-dessus	0,5	PF2
PST3	AR1	Tous matériaux ci-dessus	0,4	PF2
	AR2	Tous matériaux ci-dessus	0,3	PF2
PST 4, 5 et 6	AR2	Tous matériaux ci-dessus	Réglage ou rabotage ou enduit	PF2
	AR3	Tous matériaux ci-dessus	Réglage ou rabotage ou enduit	PF3
	AR4	Tous matériaux ci-dessus	Réglage ou rabotage ou enduit	PF4

PST : Partie Supérieure du terrassement. Ari : Arase terrassement. Bi, Ci et Di : Classification du sol.

Ri : Classification des matériaux rocheux

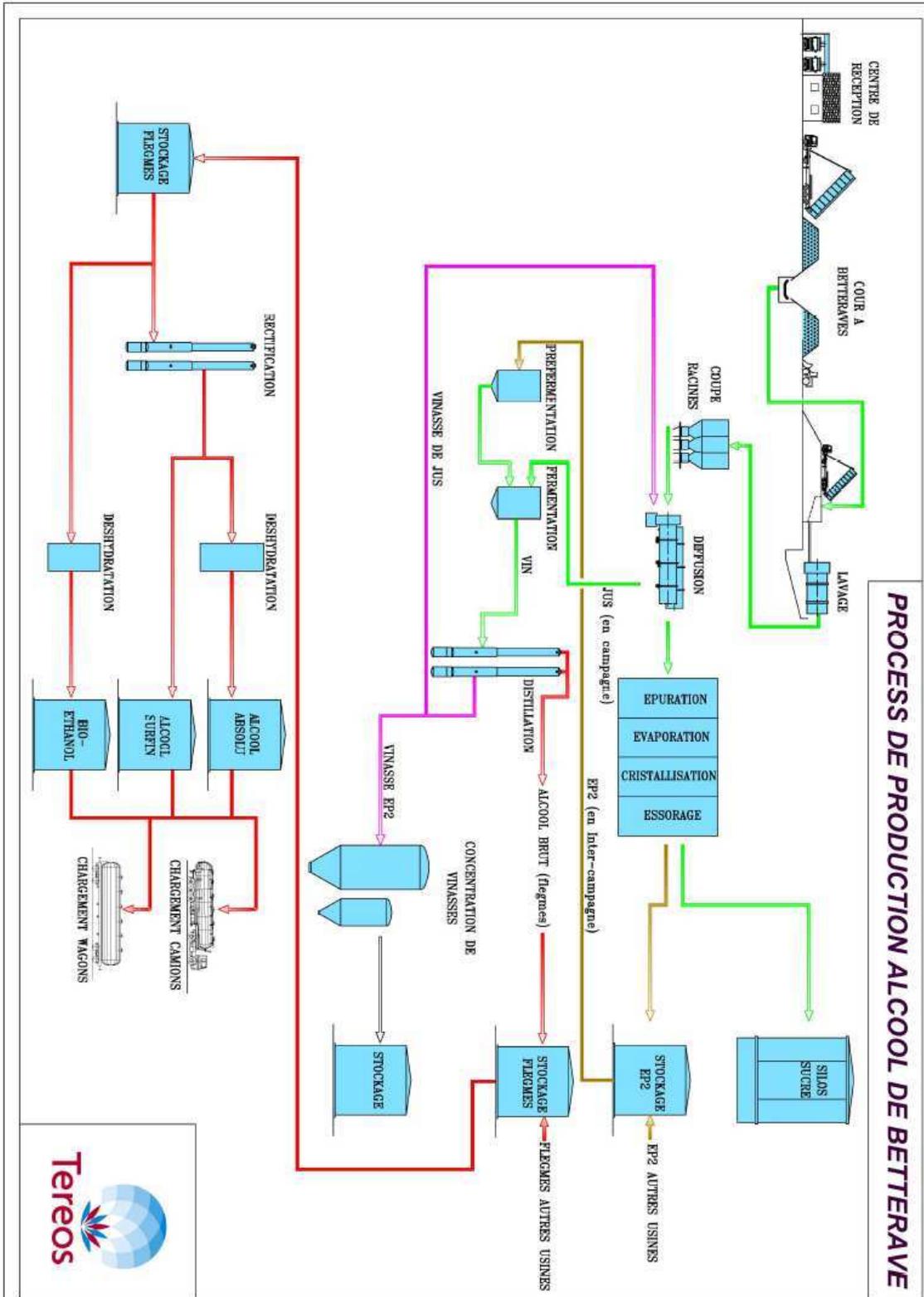
[Hoang, 2005] et [SETRA et LCPC, 1998]

Annexe 8 : Déviation changy - La pacaudière



<http://roanne7.net>

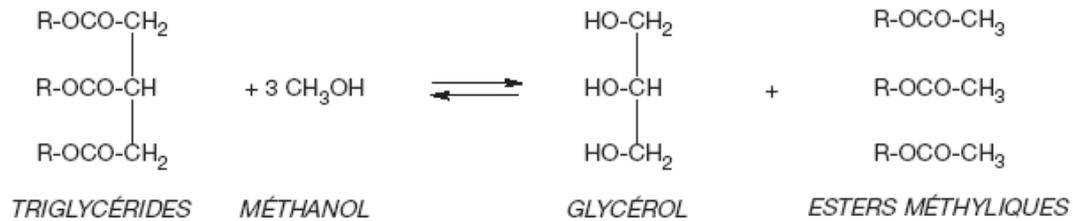
Annexe 9 : Process de production de Bioéthanol issu du betterave



Annexe 10 : Réaction de transestérification

Les esters méthyliques sont obtenus par réaction de transestérification des triglycérides avec le méthanol selon le schéma suivant. Cette réaction est équilibrée. Elle s'effectue en présence d'un catalyseur.

Les triglycérides des huiles sont des esters de glycérol, encore désigné sous le nom de glycérine, et d'acides gras R-COOH.



Annexe 11: Extrait de la base de donnée suisse "ecoinvent v1.2"

Name	Location	Unit	Infra-structure	EcoCat	climate	nuclear	area	total
					footprint	footprint	footprint	footprint
					m2.yr	m2.yr	m2.yr	m2.yr
compost plant, open	CH	unit	yes	agricultural means of production	1,9E+06	5,5E+05	1,4E+06	3,8E+06
dried roughage store, air dried, solar	CH	m3	yes	agricultural means of production	2,0E+02	4,2E+01	4,0E+02	6,5E+02
dried roughage store, air dried, solar, operation	CH	kg	no	agricultural means of production	8,3E-02	1,3E-01	1,0E-01	3,1E-01
dried roughage store, cold-air dried, conventional	CH	m3	yes	agricultural means of production	1,8E+02	3,7E+01	3,9E+02	6,0E+02
dried roughage store, cold-air dried, conventional, operation	CH	kg	no	agricultural means of production	9,1E-02	1,8E-01	1,0E-01	3,7E-01
dried roughage store, non ventilated	CH	m3	yes	agricultural means of production	1,3E+02	2,7E+01	2,5E+02	4,1E+02
dried roughage store, non ventilated, operation	CH	kg	no	agricultural means of production	3,7E-02	1,4E-02	6,5E-02	1,2E-01
dung slab	CH	m2	yes	agricultural means of production	3,4E+02	3,3E+01	1,1E+02	4,8E+02
housing system with fully-slatted floor, pig	CH	pig place	yes	agricultural means of production	3,6E+03	5,3E+02	9,6E+02	5,1E+03
housing system with fully-slatted floor, pig, operation	CH	pig place	no	agricultural means of production	1,5E+02	3,0E+02	2,2E+01	4,7E+02
label housing system, pig	CH	pig place	yes	agricultural means of production	3,7E+03	6,2E+02	2,0E+03	6,4E+03
label housing system, pig, operation	CH	pig place	no	agricultural means of production	8,8E+01	4,5E+01	4,1E+01	1,7E+02
loose housing system, cattle	CH	LU	yes	agricultural means of production	3,4E+04	6,1E+03	3,6E+04	7,6E+04
loose housing system, cattle, operation	CH	LU	no	agricultural means of production	1,1E+03	1,3E+03	7,3E+02	3,1E+03
milking parlour	CH	unit	yes	agricultural means of production	1,6E+05	2,4E+04	8,2E+04	2,6E+05
shed	CH	m2	yes	agricultural means of production	4,8E+02	7,7E+01	1,1E+03	1,6E+03
slurry store and processing	CH	m3	yes	agricultural means of production	4,3E+02	5,4E+01	5,7E+01	5,5E+02
slurry store and processing, operation	CH	m3	no	agricultural means of production	1,5E-01	4,9E-01	6,9E-03	6,4E-01
tied housing system, cattle	CH	LU	yes	agricultural means of production	3,7E+04	5,6E+03	3,1E+04	7,4E+04
tied housing system, cattle, operation	CH	LU	no	agricultural means of production	1,1E+03	1,3E+03	6,3E+02	3,1E+03
tower silo, plastic	CH	m3	yes	agricultural means of production	3,4E+02	5,9E+01	4,4E+01	4,4E+02
barley IP, at feed mill	CH	kg	no	agricultural means of production	5,5E-01	1,1E-01	2,8E+00	3,4E+00
barley organic, at feed mill	CH	kg	no	agricultural means of production	4,6E-01	9,7E-02	3,9E+00	4,4E+00

Selon [Huijbregts et al, 2007; Frischknecht et al, 2005]

Annexe 12 : Estimation du temps de collecte des coefficients de conversion de certains matériaux

Matériau	Facteurs de conversion nécessaires pour le calcul d'empreinte en sols énergétiques		Facteurs de conversion nécessaires pour le calcul d'empreinte en sols forêts		Facteurs de conversion nécessaires pour le calcul d'empreinte en sols dégradés	
	Facteur	Temps de collecte	Facteur	Temps de collecte	Facteur	Temps de collecte
Carburant	- énergie incorporée - facteur d'émission - facteur de séquestration du carbone pour le pétrole - facteur d'absorption du CO ₂ par les forêts (1 t équ. C /ha/an) - facteur du taux d'absorption par océans (29 %) - FE et FR	? 1 h 1 h 2 h 2 h 1 h	-	-	facteur de conversion surfacique en ha par tonne de carburant ? : sol occupé par l'installation du traitement ainsi que l'emprise des routes pour le transport - FE et FR	1 h
Explosifs	- énergie incorporée - facteur d'émission	Plusieurs mois : pas de données précises	-	-	facteur de conversion surfacique en ha/t d'explosif	Plusieurs mois : mais difficultés d'obtenir des données
Béton	- plusieurs énergies incorporées selon différentes sources d'ACV. - facteur d'émission	2 S 1 h	-	-	facteur de conversion surfacique en ha/t de béton produit (l'emprise des routes pour le transport n'est pas pris en compte)	4 M
Bitume	-plusieurs énergies incorporées selon différentes sources d'ACV. - facteur d'émission	2 S 2 J				
Granulat	-plusieurs énergies incorporées selon différentes	2 S				

	sources d'ACV. - facteur d'émission	1 h				
Filler d'apport	-plusieurs énergies incorporées selon différentes sources d'ACV. - facteur d'émission	1 S 1 h				
Ciment	-plusieurs énergies incorporées selon différentes sources d'ACV. - facteur d'émission	2 S 1 h				
Sable	-plusieurs énergies incorporées selon différentes sources d'ACV. - facteur d'émission	2 S ?				
PEHD (des Gaines)	- énergie incorporée selon différentes sources d'ACV. - facteur d'émission	2 M				
Aluminium (des bombes de peinture)	plusieurs énergies incorporées selon différentes sources d'ACV. - facteur d'émission	3 S				
Peinture (des bombes de peinture)	plusieurs énergies incorporées selon différentes sources d'ACV. - facteur d'émission	3 S				
Bois et Papier	plusieurs énergies incorporées selon différentes sources d'ACV. - facteur d'émission	1 S	- rendement m ³ de bois pour un hectare de forêt - tonnage de bois pour une tonne de papier - masse volumique moyenne du bois (t/m ³)	2 S	facteurs de conversion surfacique en ha par tonne de bois et par tonne de papier ?	
Plastique (des bouteilles)	plusieurs énergies	2 S				

	incorporées selon différentes sources d'ACV. - facteur d'émission					
Composition bureau : métal	- facteur d'émission	?				
Cuivre (des fils et câbles électriques)	plusieurs énergies incorporées selon différentes sources d'ACV. - facteur d'émission	1 S				
PVC (des fils et câbles électriques)						
Electricité: énergie thermique	-pertes associées à la production et à la distribution de l'électricité en France	3 J				
Electricité : hydroélectricité					les GJ produits par la surface de sols dégradée par les barrages (934 GJ/ha/an)	1 S
Plusieurs engins	-énergie incorporée - facteurs d'émission des matériaux incorporés dans un véhicule d'une tonne	1 h 1 S				
Télécommunications	-énergie incorporée - facteur d'émission	1 h 1 J				
Transport	Facteurs d'émissions par km parcouru pour différents types de transport	2 J				

(h: heure, J: jour, S:semaine, M:mois)

N.B: Les facteurs d'absorption du CO₂ par les forêts, du taux d'absorption par océans, de rendement (FR) et d'équivalence (FE) ainsi que le facteur de séquestration du carbone pour le pétrole (intégré dans la méthode d'empreinte par bilan énergétique), sont utilisés pour le calcul d'empreinte en sols énergétiques de tous les matériaux.

N° d'ordre : 488 SGE

Ibtissam EL BOUAZZAOU

ECOLOGICAL FOOTPRINT : proposition of a method and model of representation of ecological footprint at a small scale for organisation or project.

Spécialité : Environmental Sciences and Engineering

Mots clefs : ecological footprint, environmental evaluation, component-based approach, life cycle assessment, carbon balance, road project.

Résumé : Ecological footprint, at a national and global level, proposes a kind of “ecological balance” that assesses and compares biologically productive area supply and demand. If the success of this index at a national level is proven (living planet reports, for example), we assume that, to help each organisation or person to apprehend its own contribution to ecological footprint, it can be helpful to develop methods of estimation of ecological footprint at organisational level.

The classical method of ecological footprint calculation is based on the calculation of equivalence and yield factors thanks to national statistics of areas and tons of productions. Then, statistics of national consumptions (taken into account production, importations and exportations of products) are translated into global hectares representing global average biologically productive areas that are necessary to produce the resources that are consumed and the wastes that are generated by each country. Thus, for a given sub national system (city or organisation, for example), two methods can be used to have an idea of its ecological footprint : (1) The national account based approach is based on the corrections of factors from the different national averages of consumptions. For an organisation whose consumptions are very different from an average household, this method does not appear to be satisfying,

(2) The component-based approach that is based on an inventory of the various consumptions and wastes generated by the observed system, the calculation of standards or specific (when standards factors are not available) conversion factors based, for example on life-cycle analysis studies. This method seemed to the authors of his paper more appropriate to evaluate the ecological footprint of a productive activity. However, it requires several methodological adaptations to the classical ecological footprint methods and it presents some limitations. These adaptations and limitations will be presented in this paper.

In order to precise these adaptations requirements and limitations, we developed and experimented such a component-based approach on a real case. Our application field is a road work on the RN7 – RN 82 to turn a section into a four-lane road, between Cosne sur Loire and Balbigny, France This is a particularly complex case as it involve several participants (the Loire’s departmental service for equipment is the prime contractor, the works are done by private companies) and is constituted by various very different phases of activity (earth-works, road way construction, etc.).

**Ecole Nationale Supérieure des Mines
de Saint-Etienne**

N° d'ordre : 488 SGE

Ibtissam EL BOUAZZAOU

L'EMPREINTE ECOLOGIQUE : Proposition d'un modèle synthétique de représentation des empreintes à l'échelle « Micro » d'une organisation ou d'un projet.

Spécialité : Sciences et Génie de l'Environnement

Mots clés : Empreinte écologique, évaluation environnementale, approche par composante, analyse de cycle de vie, bilan carbone®, projet routier

Résumé : Aujourd'hui, face à l'épuisement des ressources naturelles et à la menace des changements climatiques, les acteurs souhaitant évaluer la pression exercée sur les ressources naturelles par nos modes de vie, ont besoin d'outils pertinents. L'empreinte écologique pourrait être l'un de ces outils.

L'analyse de l'empreinte écologique permet d'évaluer la consommation des ressources naturelles régénératives et les besoins d'absorption des déchets d'une population humaine ou d'une économie donnée, en termes de surface correspondante de sol productif. Elle veut exprimer le degré de dépassement de la capacité de charge de l'écosystème exercé par une société ou une région dans les conditions de technologie et d'organisation sociale actuelles. Si l'on utilise les termes d'offre et demande, cet indice permet de dresser un bilan écologique en comparant la demande (empreinte écologique) et l'offre (biocapacité) en ressources naturelles régénératives.

Le calcul de l'empreinte écologique est basé sur la traduction des consommations en surfaces (hectares globaux) de terre et d'eau biologiquement productives utilisées pour produire les ressources consommées et pour assimiler les déchets générés avec les technologies actuelles. Si la méthode est de plus en plus robuste au niveau des calculs d'empreintes nationaux, les calculs d'empreinte de sous-systèmes locaux ne fait pas encore l'objet d'une standardisation. Deux approches pour la transformation de données de consommations en unités de surfaces peuvent être utilisées pour un système donné :

- La méthode « basée sur les calculs nationaux » consiste à pondérer les différentes composantes de l'empreinte du pays dans lequel se situe le système étudié par les ratios entre consommations propres au système étudié et consommations nationales.
- L'approche par composante se base sur un inventaire direct des consommations à un niveau plus local (région, ville, etc) et par l'utilisation de facteurs de conversion spécifiques. Cette méthode nous semble plus appropriée pour des calculs d'empreinte d'une organisation, mais elle nécessite des adaptations méthodologiques pour rendre plus fiables les calculs à petite échelle (au niveau d'une organisation ou d'un projet).

Cette étude vise donc à développer une méthode de calcul d'empreinte écologique en mettant en évidence les intérêts et limites qui peuvent être tirés d'un tel calcul à un niveau 'micro'.

Nous avons choisi de travailler sur une activité de travaux publics pour laquelle nous pouvions obtenir les données, afin de montrer les intérêts de l'utilisation de cet indice dans le cadre d'une telle activité. Notre terrain d'application est le projet de mise à 2*2 voies du tronçon de la RN7-RN82 entre Cosne-Sur-Loire et Balbigny, en France.