

# **L'ENERGIE GRISE DANS LA FILIERE BATIMENT ET TRAVAUX PUBLICS**

**Erik NIEMANN,  
chargé de mission auprès de la MGC/DRAST**

## Table des matières

- <b>1.1- Définition de l'énergie grise</b> .....	<b>7</b>
- 1.1.1- Questions que la notion d'énergie grise peut susciter.....	7
- 1.1.2- Notions de périmètres et de filières de transformation.....	8
- <b>1.2- Analyse du cycle de vie</b> .....	<b>8</b>
- 1.2.1- Importance de l'énergie grise dans l'optique de l'analyse du Cycle de Vie .....	9
- 1.2.2- Quantité d'énergie grise de quelques matériaux de construction courants.....	9
- 1.2.3- Précautions à prendre en comparant des résultats d'analyse d'énergie grise .....	10
- <b>2- chapitre 2</b> .....	<b>12</b>
- <b>2.1- Considérations générales sur les performances de l'habitat selon l'âge du bâtiment</b> ....	<b>13</b>
- <b>2.2- Considérations sur le bilan énergétique et l'énergie grise de trois types de bâtiment: constat et conclusions</b> .....	<b>13</b>
- 2.2.1- Les trois zones urbaines .....	15
- <b>2.3- L'évolution de l'immeuble urbain: gain de place et légèreté</b> .....	<b>16</b>
- 2.3.1.1- Les systèmes constructifs dans le pavillonnaire.....	17
- <b>2.4- L'entretien et la rénovation</b> .....	<b>17</b>
- 2.4.1- Conclusions et constatations provisoires sur la revalorisation des quartiers anciens.....	18
- <b>2.5- Consommations de chauffage des résidences en France (1968 – 2000)</b> .....	<b>19</b>
- 2.5.1- L'habitat et l'environnement.....	19
- <b>2.6- L'impact de la réglementation thermique (1975-2000)</b> .....	<b>20</b>
- 2.6.3- L'évolution des performances de la construction neuve.....	20
- <b>3- Chapitre 3</b> .....	<b>22</b>
- <b>3.1- Quelques données chiffrées sur les routes en France</b> .....	<b>23</b>
- <b>3.2- Démarche proposée</b> .....	<b>23</b>
- 3.2.1- Idée sous-jacente à la conception de ce chapitre.....	24
- <b>3.3- Les différentes étapes de vie d'un chantier routier</b> .....	<b>25</b>
- 3.3.1- Les terrassements.....	25
- 3.3.1.1- Les différentes phases du terrassement.....	25
- 3.3.1.2- Présentation des différents engins de chantier utilisés à ce stade.....	26
- <b>3.4- Fabrication des différentes couches</b> .....	<b>32</b>
- 3.4.1- Réalisation de la couche sol support.....	32
- 3.4.1.1- Réparation sous remblai.....	32
- 3.4.2- Décomposition de l'opération de mise en remblai .....	32
- 3.4.3- Le traitement des sols.....	33
- 3.4.3.1- Effet du traitement à la chaux.....	33
- 3.4.3.2- Le traitement mixte chaux ciment.....	34
- 3.4.4- La couche de forme.....	35
- 3.4.4.1- Conception de la couche de forme.....	35

- 3.4.4.1.1- Un détour : Évaluation du volume du sol support, jusqu'à la couche de forme, et traduction en termes d'énergie grise.....	36
-3.4.4.2- Nécessité et rôle de la couche de forme.....	37
- 3.4.5- Réalisation de la couche d'assise.....	38
- 3.4.6- Rôle particulier de la couche de surface .....	38
- 3.4.7- Politique d'entretien de la chaussée.....	39
-3.4.7.1- Récapitulatif des différents constituants, et contenu en énergie grise, couche par couche ....	40
- 3.4.7.1.1- Couche de remblai.....	40
Couche de forme.....	40
- 3.4.7.1.2- Couche de fondation et couche de base.....	40
- 3.4.8- Calcul détaillé des énergies grises du bitume et des granulats, couche par couche.....	41
-3.4.8.1- Accotement.....	43
- 3.4.9- Tableau récapitulatif (première ligne : bitume, deuxième ligne : granulats).....	43
- 3.4.10- Quelques commentaires.....	44
<b>- 3.5- Annexe : les différents types de couches de chaussées, caractéristiques et préconisations d'utilisation.....</b>	<b>44</b>
- 3.5.1- Constitution de la couche de forme.....	45
- 3.5.2- Couches supérieures : couches d'assise.....	46
- 3.5.3- Familles de structures de chaussées. Principes de fonctionnement.....	47
<b>- 4- Chapitre 4.....</b>	<b>49</b>
<b>- 4.1- Traitement des déchets issus du BTP.....</b>	<b>50</b>
<b>- 4.2- Les sites d'accueil des déchets du BTP.....</b>	<b>50</b>
<b>- 4.3- Les quatre grands types d'installation.....</b>	<b>50</b>
- 4.3.1- Les centres de regroupement, de tri et de valorisation des déchets.....	50
- 4.3.2- Les centres d'enfouissement des déchets ultimes.....	51
<b>- 4.4- Exemple du traitement des déchets dans Paris et Petite Couronne.....</b>	<b>51</b>
- 4.4.1- Élaboration du plan.....	51
- 4.4.2- L'état des lieux de la gestion des déchets du BTP à Paris et en Petite Couronne, et en Ile-de-France.....	52
<b>- 4.5- Valorisation des matériaux recyclés.....</b>	<b>52</b>
- 4.5.1- Déroulement des opérations de tri et valorisation.....	53
-4.5.1.1- Le matériau de recyclage et de démolition.....	53
-4.5.1.2- Les différents produits.....	54
- 4.5.1.2.1- Cas des graves.....	54
<b>- 4.6- Le recyclage et le retraitement des matériaux de surface dans l'industrie routière: réfection des routes.....</b>	<b>55</b>
- 4.6.1- Retraitement en place à froid des anciennes chaussées : description générale.....	55
- 4.6.2- Avantages et limites de la technique.....	56
- 4.6.3- Les matériels utilisés, et leurs fonctions respectives pour un chantier de retraitement.....	57
- 4.6.4- Domaine d'emploi de la technique.....	58
- 4.6.5- Retraitement aux liants hydrocarbonés. Principes de la technique, objectifs et mode d'emploi.....	58
-4.6.5.1- Domaine d'emploi.....	59
-4.6.5.2- Avantages et limites de la technique.....	59
-4.6.5.3- Les matériels utilisés et leurs fonctions.....	60
- 4.6.6- Retraitement à froid par des liants hydrauliques.....	60
-4.6.6.1- Les matériels et leur fonctions.....	62
<b>- 4.7- L'eau dans les terrassements et sur les chaussées.....</b>	<b>63</b>
- 4.7.1- L'eau dans les sols: .....	64
<b>- 4.8- Action de l'eau sur les sols.....</b>	<b>64</b>
- 4.8.1- Action de l'eau sur les matériaux de chaussées.....	64
- 4.8.2- Origines de l'eau présente.....	65

- 4.8.3- Comment empêcher l'eau d'entrer dans les chaussées ?.....	65
<b>- 4.9- Récupérer et évacuer les eaux de surface: l'assainissement routier.....</b>	<b>66</b>
<b>- 4.10- Évacuer l'eau qui est entrée: le drainage.....</b>	<b>67</b>
- 4.10.1- Principe et conception du drain .....	67
<b>- 5- CHAPITRE 5.....</b>	<b>69</b>
<b>- 5.1- Les bétons hautes performances (BHP).....</b>	<b>70</b>
- 5.1.1- Généralités.....	70
- 5.1.2- Principe général, voies d'obtention.....	70
<b>- 5.2- Les deux différentes voies d'activité physico-chimiques dans les BHP.....</b>	<b>71</b>
- 5.2.1- Première voie : défloculation des grains de ciment.....	71
- 5.2.2- Deuxième voie: Extension du squelette granulaire.....	71
<b>- 5.3- Les BHP: formulation et propriétés.....</b>	<b>72</b>
- 5.3.1- Les constituants.....	72
<b>- 6- chapitre 6.....</b>	<b>74</b>
<b>- 6.1- Le GBTool.....</b>	<b>75</b>
<b>- 6.2- CASBEE (Comprehensive Assessment System for Building Environment Efficiency).76</b>	<b>76</b>
- 6.2.1- Types de bâtiments traitables par l'évaluation CASBEE pour la construction nouvelle.....	76
<b>- 6.3- Critères de notation (score).....</b>	<b>76</b>
<b>- 6.4- Configuration de base de CASBEE.....</b>	<b>77</b>
<b>- 7- Chapitre 7.....</b>	<b>80</b>
<b>- 7.1- Remarques sur la définition de l'énergie grise.....</b>	<b>81</b>
- 7.1.1- L'énergie grise comme reflet de l'activité humaine, et du mode et des habitudes de vie et de consommation.....	81
- 7.1.2- L'énergie grise : un concept non monétarisable.....	82
-7.1.2.1- Remarques sur le cycle de vie d'un logement .....	83
- 7.1.3- Remarques sus les tendances contemporaines de l'urbanisme et sur les dépenses en énergie grise	83
- 7.1.4- Remarque caricaturale sur les limites d'entretien d'une chaussée mal conçue.....	84
- 7.1.5- Remarques sur l'assainissement et le drainage des routes et autoroutes.....	84
<b>- 8- ANNEXE 1.....</b>	<b>85</b>
<b>- 8.1- L'interprétation de l'analyse du cycle de vie .....</b>	<b>86</b>
- 8.1.1- Outils d'analyse des résultats .....	86
-8.1.1.1- Analyse de contribution .....	86
- 8.1.1.1.1- Analyse de dominance.....	86
- 8.1.1.1.2- Analyse d'influence.....	86
-8.1.1.2- Outil de vérification.....	86
- 8.1.1.2.1- Étude des sources d'incertitudes .....	86
- 8.1.1.2.2- Contrôle de complétude .....	87
- 8.1.1.2.3- Contrôle de sensibilité .....	87
- 8.1.1.2.4- Contrôle de cohérence.....	87
-8.1.1.3- Évaluation de la qualité des données .....	88
- 8.1.1.3.1- Analyse d'incertitude .....	88
- 8.1.2- Standardisation de l'analyse de cycle de vie (ACV) .....	88
- 8.1.2.1.1- Imputation et exclusion .....	88
- 8.1.2.1.2- Approche de division .....	88
- 8.1.2.1.3- Approche par extension des frontières .....	89
- 8.1.2.1.4- Approche par imputation .....	89
- 8.1.3- Le cas du recyclage .....	89
-8.1.3.1- Recyclage en boucle fermée .....	89
-8.1.3.2- Recyclage en boucle ouverte .....	90

- 8.1.4- Avantages et inconvénients .....	90
- 8.1.5- Deux types d'acv .....	91
- 8.1.6- Les flux et la méthode mathématique de l'acv .....	91
-8.1.6.1- Ecosphère, technosphère et définition des flux .....	91
- 8.1.7- Outils d'ACV .....	92
<b>Exemple de résultats .....</b>	<b>92</b>
<b>- 8.2- Les labels.....</b>	<b>93</b>
<b><i>ANNEXE 2.....</i></b>	<b><i>94</i></b>

# Chapitre 1

## - L'ENERGIE GRISE - GENERALITES ET REMARQUES-

## - 1.1- DÉFINITION DE L'ÉNERGIE GRISE

De manière classique, l'énergie « grise » (ou incorporée, ce qui est peut-être moins parlant), se définit comme la somme totale de l'énergie nécessaire à assurer l'élaboration d'un produit, et ceci de l'extraction du/des matériau(x) brut(s), le traitement, la transformation, la mise en œuvre du produit, ainsi que les transports successifs qu'aura nécessité la mise en œuvre. Sont également incluses les dépenses énergétiques des matériels et engins ayant contribué à son élaboration. L'unité physique utilisée pour la chiffrer est ordinairement le joule, ou encore Kilo joule, Méga joule, Tera joule.

Il est à noter que l'écologie des systèmes s'attache à comprendre et étudier le support du processus écologico-économique, en essayant d'y voir un « tout ». L'énergie grise, entendue comme concept utilisé dans l'écologie des systèmes s'attache à mesurer le « vrai » **coût énergétique** d'un produit, et tente d'étendre ceci au concept de « vraie valeur » de ce produit.

### - 1.1.1- QUESTIONS QUE LA NOTION D'ÉNERGIE GRISE PEUT SUSCITER

#### De quelle manière l'énergie grise est elle liée aux émissions de CO2 ?

Les émissions de dioxyde de carbone sont fortement corrélées avec l'énergie consommée dans la production de matériaux pour le bâtiment. Grosso modo, 0.098 tonnes de dioxyde de carbone sont produites par Giga joule d'énergie grise.

#### Pourquoi, et en quoi, l'énergie grise est-elle importante ?

Pour le cas de l'Australie, l'énergie grise comprise dans l'ensemble des bâtiments existants est équivalente à 10 ans de consommation énergétique du pays entier, pour une durée de vie moyenne d'un bâtiment de l'ordre de 100 ans. Le choix des matériaux et les principes de conception ont une action significative, même si elle n'était préalablement pas évidente, sur l'énergie requise pour construire un bâtiment. Ainsi peut-on dire que l'énergie grise est une mesure de l'impact environnemental de la construction et de l'efficacité des filières de recyclage.

#### Les valeurs de l'énergie libre diffèrent-elles beaucoup suivant les matériaux ?

L'énergie grise par unité de masse des matériaux utilisés dans la construction varie énormément, avec des valeurs de deux Giga joules par tonne de béton, à des centaines de Giga joules par tonne d'aluminium. Il faut toutefois noter que la conception d'un bâtiment fondée sur ces seuls critères quantitatifs est à proscrire, compte tenu des durées de vie différentes de ces matériaux, et des choix dans la conception de l'ouvrage.

#### Comment comparer l'impact de l'énergie grise des matériaux ?

Dans le choix entre différents matériaux de construction ou produits fait sur la base de l'énergie grise, il se trouve qu'il ne faut pas considérer seulement les matériaux « initiaux », mais aussi les matériaux consommés au cours de la durée de vie du

bâtiment pendant la maintenance, les réparations, et les éventuels remplacements. Au fur et à mesure que les bâtiments sont conçus de manière plus pertinente, l'énergie grise prend une valeur proche de l'énergie d'usage consommée à mi-vie de l'ouvrage

### Quelle est la part de consommation d'énergie fossile dans l'énergie grise ?

Celle-ci est considérable, en particulier dans le domaine de l'industrie routière, où le transport de milliers de tonnes de matériaux intervenant, soit dans le déblaiement du terrain, soit des éléments allant constituer, après des opérations elles-mêmes fortement consommatrices en énergie grise, est extrêmement consommateur en gazole. De plus, la grande énergie grise incorporée dans les engins de chantier, par rapport aux Véhicules Particuliers, vient que la part « fabrication en usine » se fait, sur ces derniers, par des systèmes utilisant l'énergie électrique, qui n'est pas nécessairement d'origine fossile

Le seul facteur, et le plus important de tous, influant sur la réduction de l'énergie grise est la conception de bâtiments à longue durée de vie, durables et adaptables. Plus grande est la durée de vie, plus l'énergie grise du bâtiment a des chances de « s'amortir », si toutefois l'obsolescence de certains éléments (chauffage, éclairage) ne vient pas réduire les « économies » faites.

## **- 1.1.2- NOTIONS DE PÉRIMÈTRES ET DE FILIÈRES DE TRANSFORMATION**

Dans l'élaboration d'un système consommateur ou producteur d'énergie grise, on définit avant tout un périmètre, qui fixe un champ d'utilisation et une frontière au domaine d'élaboration du/des produit(s), et dans lequel sont rassemblés différents sous-systèmes reliés entre eux par une chaîne de filière permettant d'aboutir à la production de produits finis. Il y a évidemment des matières « entrantes » (ex : granulats, ciment, eau) que nous qualifierons **d'intrants**.

Par opposition à ces derniers, il y a des **extrants**, dont les produits finaux, ainsi que les déchets que l'on destine à un recyclage permettant d'en faire de nouveaux intrants, soit dans le périmètre considéré (ex : déchets recyclés de maçonnerie réutilisés dans le périmètre bâtiment), soit dans d'autres industries (ex : déchets plastiques recyclés en bouteilles d'eau minérale), donc, que l'on destine à un **recyclage** permettant d'en faire de nouveaux intrants

## **- 1.2- ANALYSE DU CYCLE DE VIE**

L'activité et les pratiques humaines, notamment l'usage des matériaux dont sont faites nos maisons ont beaucoup d'effets négatifs sur l'environnement.

L'importance que revêt l'énergie grise et autres impacts environnementaux ne devient apparente qu'à partir du moment où les matériaux sont considérés dans une « vision » d'Analyse du Cycle de Vie (ACV).

Cette dernière examine l'impact environnemental complet d'un matériau ou produit, à chaque étape de sa vie –de l'obtention de matériaux bruts, jusqu'à leur conditionnement, leur transport à leur lieu de destination, et à leur recyclage.

L'ACV peut considérer un ensemble d'impacts environnementaux tels que déperdition de chaleur, utilisation d'eau ou d'énergie, émissions de gaz à effet de serre, production de déchets... On considère aussi les impacts directs, tels que la



pollution, les rejets de substances toxiques, etc.

L'ACV peut s'appliquer à un produit composite (ex : logement), ou à un composant individuel ou à un processus nécessité pour ce produit.

### **- 1.2.1- IMPORTANCE DE L'ÉNERGIE GRISE DANS L'OPTIQUE DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE**

Première constatation : le contenu en énergie grise varie de façon considérable entre différents produits et matériaux.

Une conception acceptable d'un immeuble à faible énergie considèrera cet aspect, et prendra un cycle de vie plus large, et il apparaîtra que se limiter à l'énergie utilisée pour garantir la simple maintenance de l'immeuble n'est pas acceptable. La consommation d' « énergie d'usage » dépend des occupants de l'immeuble. L'énergie grise ne dépend pas des habitants, puisqu'elle est incorporée aux matériaux.

Une étude menée par le CSIRO (organisme de recherche australien) a mis en évidence que le logement moyen contient 1.000GJ (Giga joule) d'énergie grise dans les matériaux utilisés pour sa construction. Ceci équivaut à 15 ans d'énergie d'usage. Pour une maison dont la durée de vie est de 100 ans, ceci représente environ 10% de l'énergie d'usage utilisée dans sa vie

### **- 1.2.2- QUANTITÉ D'ÉNERGIE GRISE DE QUELQUES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION COURANTS**

Le contenu en énergie grise varie considérablement selon le type de construction. Dans certains cas, un niveau élevé peut être justifié s'il contribue à une consommation d'énergie d'usage plus faible.

<b>MATERIAU</b>	<b>ENERGIE GRISE EN MJ / kg</b>
Bois tendre, scié et séché à l'air	3.4

Peinture acrylique	61.5
Plâtre	2.9
Ciment	5.6
Parpaings	1.5
Verre	12.7
Aluminium	170
Cuivre	100

Nous nous bornons à donner quelques chiffres dans le tableau précédent. A noter que, d'une manière générale, plus l'élaboration d'un matériau est complexe, plus grande est son énergie grise par unité de masse.

Ces chiffres doivent être utilisés avec prudence car :

- La « vraie » énergie libre d'un matériau fabriqué à Angoulême sera très différente, pour ce même matériau, que celle de celui fabriqué à Strasbourg, une fois ces deux matériaux transportés au même point (dépense en combustible différente dans les deux cas).
- L'aluminium issu d'un recyclage va contenir moins de 10% de l'énergie grise de l'aluminium sidérurgique
- Des matériaux à haute énergie grise, et à coût élevé, tels que l'acier sans étain, seront presque certainement recyclés plusieurs fois.

Les matériaux aux énergies grises les plus faibles, tels que le béton, les briques, et le bois, sont généralement utilisés en grandes quantités. Les matériaux avec un fort contenu énergétique (tel l'acier sans étain), sont souvent utilisés plus parcimonieusement. Il en résulte que la source la plus prépondérante d'énergie grise dans un bâtiment peut être contenue dans des matériaux à basse énergie grise, tels que le béton, ou des matériaux à énergie grise élevée, tels que l'acier.

### - 1.2.3- PRÉCAUTIONS À PRENDRE EN COMPARANT DES RÉSULTATS D'ANALYSE D'ENERGIE GRISE

La même prudence à avoir en ce qui concerne la dispersion – écart type – des données sur l'énergie grise de matériaux « élémentaires ». Elle doit être la même, voire même plus grande, que celle portant sur l'examen de données relative à des matériaux composés.

Quand un fabricant de matériaux fournit des chiffres spécifiques, s'il les a, il convient de comparer ces chiffres, pour ce(s) même(s) matériau(x). Des méthodes de calcul différentes produisent des résultats différents d'un

facteur multiplicatif pouvant aller jusqu'à 10. Pour de meilleurs résultats, il convient de comparer les chiffres fournis par une seule et même source, et d'en faire une analyse fondée sur une méthodologie cohérente, avec une base de données suffisante.

Sachant que cette variabilité des résultats existe, et est inévitable, il ne faut pas s'attacher trop sur les chiffres « vrais », mais de se fixer une ligne de conduite en tenant compte du caractère relatif des différences d'énergie grise entre matériaux.

En bref, des chiffres précis ne sont pas essentiels pour décider quels matériaux de construction utiliser pour abaisser le niveau de l'énergie libre dans une structure de Génie Civil.

## **- 2- CHAPITRE 2**

# ENERGIE GRISE DANS LE SECTEUR DU BATIMENT

## DEFINITION ET CONCEPTS SOUS- JACENTS

### - 2.1- CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES PERFORMANCES DE L'HABITAT SELON L'ÂGE DU BÂTIMENT

L'impact de la réhabilitation du logement ancien sur la consommation d'énergie finale repose sur deux données :

- La performance unitaire de cette réhabilitation, en kWh/m<sup>2</sup> de consommation annuelle de chauffage ;
- Le taux annuels de logement ayant bénéficié de travaux d'amélioration thermique.

Après la rénovation de l'équipement de chauffage, qui se traduit par une réduction de la consommation de 73%, la mesure relative aux vitrages est sans doute la plus efficace en ce qu'elle crée une synergie entre différentes composantes du confort, par réduction conjuguée :

- De l'effet de paroi froide ;
- De la condensation de la vapeur d'eau ;
- Des infiltrations parasites de l'air froid ;
- De la transmission du bruit extérieur.

Appliquée au parc ancien de qualité thermique médiocre (puisque sa consommation de chauffage moyenne annuelle dépasse 395 kWh/m<sup>2</sup>.an cette réhabilitation permet un gain annuel d'environ 200 kWh/m<sup>2</sup>.

Une constatation s'impose :

Lorsque la réhabilitation se charge du logement moyen de 1968 (consommation annuelle de 330 kWh/m<sup>2</sup>), un gain annuel de 200 kWh/m<sup>2</sup> signifie que la consommation finale est de 130kWh/m<sup>2</sup>, soit le niveau de la construction neuve de 1978. Cela peut se faire au prix d'un renforcement des opérations précédemment identifiées (augmentation de l'isolation des toitures, isolation partielle des murs, etc.).

## - 2.2- CONSIDÉRATIONS SUR LE BILAN ÉNERGÉTIQUE ET L'ÉNERGIE GRISE DE TROIS TYPES DE BÂTIMENT: CONSTAT ET CONCLUSIONS.

Le Club d'ingénierie Prospective et Environnement (CLIP) a, dans son n°13, développé de façon très approfondie le thème « habitat et développement durable ». Une grande partie de la problématique abordée est relative au parc de construction, son évolution, et, suivant l'hypothèse d'un plus ou moins grand respect de la NRT 2000 (nouvelle réglementation thermique), ainsi que son durcissement prévu, extrapole des prévisions à compter de l'an 2000 (2001 étant la date de parution de la brochure de cette revue du CLIP), jusqu'aux années 2005. Ne disposant pas d'assez de données pour corroborer telle ou telle hypothèse en 2006, nous n'aborderons pas ce volet.

Pour ce qui est de nos trois « morphologies » d'habitat, l'étude du CLIP a retenu :

- Un immeuble en centre ancien dense ;
- un grand ensemble d'urbanisme collectif en première couronne ;

- un habitat pavillonnaire en lotissement périphérique.

L'approche faite se caractérise, entre autres, par :

- une limitation aux indicateurs de consommations de matériaux et d'énergie ;
- la limitation à une échelle intermédiaire entre le logement en ville et « hors ville », permettant la mesure des choix d'aménagement sur l'environnement, en traitant simultanément les questions de logement et de transport ;
- une reconstitution des dépenses énergétiques du logement liées à la morphologie urbaine. Le choix de Paris est sa banlieue est dicté par la recherche de conditions météorologiques homogènes.
- les indicateurs sont donnés, comme le veut une certaine « idiosyncrasie » du chiffrage en bâtiment, par m<sup>2</sup> et par habitant.

L'auteur, se fondant sur les pourcentages massiques des différents constituants, avance le chiffrage suivant, pour les trois types d'habitat dont il a été fait l'objet jusqu'à présent. Nous les avons regroupés sous forme de tableau synthétique, quoiqu'il soit à mentionner que les chiffres donnés pour le HLM des années 1960 sont issus du cahier 367 du CSTB « étude des quantités et prix des matériaux entrant dans la constitution d'un logement ». Dans ce cahier figurent trois variantes qui donnent suivant le type de disposition constructive adoptée, 3 chiffres assez différents de l'énergie grise par m<sup>2</sup> totale.

Construction	Paris 1900	H.L.M. 1960	Pavillon 1990
Investi. énergétique (MJ/m <sup>2</sup> )	4336	3109	2888
Masse (Kg/m <sup>2</sup> )	1412	1295	853

Immeuble 1900	Masse (Kg/m <sup>2</sup> )	Conso. d'énergie (MJ/m <sup>2</sup> )
I, valeur initiale	1412	4336
R=rénovation annuelle	3.32	15.13
Durée de vie = I/R	425	

(années)		
----------	--	--

H.L.M 1960	Masse (Kg/m <sup>2</sup> )	Conso. d'énergie (MJ/m <sup>2</sup> ) <sup>+</sup>
I, valeur initiale	1295	3109
R, rénovation annuelle	6016	36.22
Durée de vie = I/R (années)	210	

Pavillon 1990	Masse (Kg/m <sup>2</sup> )	Conso. d'énergie (MJ/m <sup>2</sup> )
I, valeur initiale	853	2888
R, rénovation annuelle	5.33	45.01
Durée de vie = I/R (années)	160	

### - 2.2.1- LES TROIS ZONES URBAINES

Les bâtiments étudiés sont intégrés dans des ensembles urbains ou péri urbain bien définis :

- 1 Le quartier de Montholon du 9<sup>ème</sup> arrondissement de Paris dans lequel est situé l'immeuble des « habitations ouvrières » de 1900. Ces habitations ont une morphologie assez proche des immeubles « haussmanniens ». Le bâti est compacte et bien desservi par les transports collectifs.
- 2 Le « grand ensemble » de la Ferme du Temple à Ris-Orangis (Essonne) pour l'immeuble des années 1960. La densité d'habitants quelque peu inférieure à la moyenne des grands ensembles de la région parisienne (300 habitants / ha) ;
- 3 Le logement pavillonnaire du parc de Sénart (Essonne) pour la maison individuelle récente. Typique des logements des périphéries de ville, il est peu desservi par les transports en commun et extrêmement dépendant de l'automobile.

Ces trois typologies ont aujourd'hui un développement spécifique.

- 1 Les centres anciens sont relativement stables du fait notamment de la

grande durée de vie des immeubles d'habitation et sont de moins en moins menacés par la rénovation lourde.

- 2 La banlieue est en chantier et la réhabilitation va de pair avec une densification des grands ensembles.
- 3 La périphérie reste dans la limite de la dilution de l'espace urbain ce qui profite à la maison individuelle, de qualité constructible souvent médiocre.

Mentionnons qu'en Ile de France, 12.740 ha ont été urbanisés entre 1982 et 1990.

## **- 2.3- L'ÉVOLUTION DE L'IMMEUBLE URBAIN: GAIN DE PLACE ET LÉGÈRETÉ.**

La construction des immeubles urbains évolue en obéissant en premier lieu à la logique du gain de place. Celle-ci s'illustre dès les premiers temps de construction métallique dans le Paris Haussmanniens : Les pans de fer de 15 cm occupent 1/20<sup>ème</sup> de la surface hors œuvre contre 1/8<sup>ème</sup> pour des murs de 50 cm d'épaisseur. A noter toutefois que les techniques de construction de cette époque n'ont pas subi 'évolution importante dans une architecture où dominant les murs porteurs, en pierre et en brique, notamment en refend et en mitoyen.

L'économie de place moins importante pour les premiers planchers en fer et néanmoins suffisante pour que le métal s'impose dans leur réalisation (profil IPN). On fait également appel à l'entrevous en céramique. Il faut attendre les années 1930 pour que se multiplient les systèmes à ossature de béton armé et remplissage de maçonnerie.

La façade légère à base de panneaux préfabriqués ne représente qu'une part négligeable dans le logement des années 1950. Les isolants apparaissent largement dans le logement collectif avant même que ne soient prises des mesures dans le domaine de l'économie d'énergie. (Réglementation Technique 1975 : double mur, panneaux de liège, laine minérales, fibres de verre, bloc de béton cellulaire, briques creuses).

### ***-2.3.1.1- Les Systèmes Constructifs Dans Le Pavillonnaire***

La maison individuelle a souvent recours à l'industrialisation pour la recherche d'un meilleur rendement spatial. Il y a, semble-t-il, une utilisation accrue de matériaux « performants », par leur solidité, leur résistance et leur durabilité, ainsi que témoignant d'une meilleure compréhension de l'écosystème et ce, depuis une prise de conscience générale de la notion de développement durable. Toute prose sur ce sujet, d'ailleurs fort épineux, n'est pas notre propos.



## - 2.4- L'ENTRETIEN ET LA RÉNOVATION

La comparaison des investissements énergétiques amène aux constatations suivantes :

L'immeuble 1900 contient une masse de brique importante ce qui induit un coût énergétique élevé par unité de surface (+ 50% par rapport à la maison individuelle). Il est pourtant légèrement plus faible que celui de la maison individuelle par unité de masse. La diminution de poids total semblerait aller de pair avec un contenu énergétique plus important, notamment dans les procédés d'ossature et remplissage qui font appel à l'acier en structures métalliques ou en béton armé

Les solutions constructives apparaissent différemment dès qu'est prise en compte la rénovation, car le gain de poids se traduit par le recours à des matériaux moins durables, notamment dans l'enveloppe et le second œuvre, qui ont la durée de vie la plus courte. (De 20 à 100 ans).

En considérant la durée de vie des constituants (matériaux, structures compris) comme le temps nécessaire à leur renouvellement complet, c'est-à-dire à l'ensemble des rénovations et modifications du bâtiment successives, il est possible d'estimer les consommations d'énergie et de matériaux nécessaires (compte tenu de la connaissance de l'énergie grise de ceux-ci, le calcul devient purement énergétique)

Ainsi les pièces de bois de charpente régulièrement réparées seraient totalement remplacées dans une échéance de 250 ans, tandis que les briques ou les pierres le seraient à un rythme beaucoup plus faible (10% de remplacement tous les 50 ou 75 ans).

La durée de vie d'un bâtiment serait donc :

- Soit la durée de vie de ses composants les plus durables (le terme de leur remplacement total progressif)
- **Soit le temps nécessaire à une consommation de ressources qui égalerait l'investissement initial.**

Cette dichotomie quelque peu extrême peut être nuancée par les considérations qui suivent

- Égaler la durée de vie d'un bâtiment à celle de ces composantes les plus durables revient à occulter le fait que de nombreuses variantes de construction d'un même bâtiment incorporent des composants à durée de vie réduite, mais également peu onéreux et d'une facilité de remplacement ou de rénovation importante.
- Un logement est, dans beaucoup de cas, un patrimoine ou en fait fonction. Il est parfois plus que difficile de le déclarer inhabitable. Une telle décision ne ferait qu'accroître le mécontentement des populations y vivant, qui sont souvent défavorisées.

- Une solution moins radicale que celle présentée et reposant sur la notion de durée de vie consisterait à la généralisation de la politique de rénovation de l'habitat, toutes proportions gardées (excluant une opération de rénovation lourde, d'un coût prohibitif)
- C'est pourquoi l'association de matériaux d'une durabilité moyenne et de matériaux à haute performance, très sophistiqués, d'un coût prohibitif ne semble pas une solution systématiquement viable.
- Il est à noter, que ces matériaux hautement performants sont chers en énergie grise. A titre d'exemple, mentionnons le coût de l'aluminium (191 MJ / kg) contre celui du bois (0.3 MJ / kg) ce qui va à l'encontre de solutions de vitrages (simples, doubles, voire triples) à châssis aluminium.

## **- 2.4.1- CONCLUSIONS ET CONSTATATIONS PROVISOIRES SUR LA REVALORISATION DES QUARTIERS ANCIENS**

De façon provisoire, on peut conclure que l'amélioration des performances moyennes de chauffage du parc repose essentiellement sur la réhabilitation du parc ancien, et en particulier sur une amélioration des niveaux de confort thermique. La valorisation des quartiers anciens est un des moyens de la sauvegarde du patrimoine urbain inaugurée par la loi Malraux en 1962. La reconquête des centres urbains peut participer à enrayer la dispersion urbaine. 86 secteurs sauvegardés ont été créés en 30 ans, 600 zones de protection du patrimoine architectural, urbain et paysager (ZPPAUP) ont vu le jour depuis le lancement de cette nouvelle procédure en 1983.

La réhabilitation a connu une première période d'activité intense dans le parc social au cours des années 1980 : les deux tiers des interventions concernaient alors les travaux d'économie d'énergie, et la réfection de la peau des bâtiments. Mais plus significative a été la mise en place d'une politique de l'habitat ancien qui s'est appuyée sur les PACT-ARIM (Propagande et Action sociale Contre les Taudis, créée en 1942, et Association de Rénovation Immobilière, créée en 1968), ainsi que l'Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat, créée en 1970

Les travaux liés au confort thermique ont perduré au cours des années 1990, au sein de préoccupations plus globales, ayant trait à l'amélioration de la sécurité technique, de l'environnement des immeubles, des parties communes, du confort acoustique, ainsi qu'à la restructuration des logements. Il s'agissait de réduire les coûts de maintenance/entretien, et une meilleure gestion des parties communes.

La menuiserie a constitué le premier poste de dépense (26%), devant l'isolation thermique (16%).

Les besoins de réhabilitation concernaient encore 700.000 logements en 1996, bien que 300.000 aient été réhabilités au niveau de la peau.

Au cours des années 1990, les travaux d'amélioration et de gros entretien ont représenté la moitié de l'activité des entreprises intervenant dans le domaine du logement.

## - 2.5- CONSOMMATIONS DE CHAUFFAGE DES RÉSIDENCES EN FRANCE (1968 – 2000)

### - 2.5.1- L'HABITAT ET L'ENVIRONNEMENT

L'activité du secteur bâtiment s'appuie sur une importante consommation de ressources (énergie, matériaux, eau), que ce soit en phase d'exploitation, ou tout au long du processus de construction, maintenance, démolition.

L'activité de construction (industrie des matériaux, chantier et transport), consomme en moyenne 3 à 4 GJ d'énergie grise par mètre carré de surface habitable

Le chauffage, qui est une des principales sources de déperdition d'énergie, atteignait en 2000 :

environ 380 TWh/an pour la consommation totale

environ 180 kWh/m<sup>2</sup>.an (soit 648KJ/m<sup>2</sup>) pour la consommation unitaire.

Néanmoins, il faut tempérer l'importance de ces chiffres par une statistique globale de la consommation énergétique totale, en produits pétroliers, à l'échelle nationale.

*Unité : million de tep*

	1973	1979	1985	1990	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	évolution 2001/2000
Supercarburant et essence auto	16,5	18,6	18,8	19,1	16,4	15,7	15,3	15,2	15,1	14,4	14,2	-1,5%
Gazole	6,6	9,2	10,9	17,5	22,9	23,5	24,6	25,7	26,7	27,4	28,7	4,8%
Carburéacteur et essence aviation	2,0	2,6	2,7	4,0	4,8	5,1	5,3	5,6	6,1	6,3	6,2	-1,9%
Fioul lourd	4,6	4,0	2,0	2,2	1,9	1,9	2,1	2,4	2,4	2,4	2,1	-15,3%
Divers <sup>2</sup>	1,4	1,2	1,0	0,9	0,9	0,8	0,9	1,1	1,1	1,0	0,8	-8,1%
<b>Total produits pétroliers</b>	<b>31,0</b>	<b>35,6</b>	<b>35,5</b>	<b>43,6</b>	<b>46,9</b>	<b>47,1</b>	<b>48,2</b>	<b>50,0</b>	<b>51,4</b>	<b>51,5</b>	<b>52,0</b>	<b>1,0%</b>
Electricité <sup>3</sup>	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,0%
<b>Consommation finale</b>	<b>31,6</b>	<b>36,2</b>	<b>36,1</b>	<b>44,3</b>	<b>47,6</b>	<b>47,9</b>	<b>49,0</b>	<b>50,9</b>	<b>52,3</b>	<b>52,4</b>	<b>52,9</b>	<b>1,0%</b>

En rappelant que la conversion entre tep, KWh et J se fait selon l'identité : 1tep = 11.6 KWh et 1 KWh = 3.62 GJ, on trouve aisément que la consommation nationale énergétique a été de  $52.9 \times 10^6 \times 42 \times 10^9 = 2.220$  TWh /an, à comparer aux 380 TWh /an de consommation totale de chauffage.

Il convient donc de ne pas « diaboliser » les déperditions d'énergie par chauffage : les consommations d'énergie fossile et blanche, et en particulier celles dépensées par les transports, ne sauraient faire oublier leur prépondérance.

## - 2.6- L'IMPACT DE LA RÉGLEMENTATION THERMIQUE (1975-2000)

### - 2.6.1-

### - 2.6.2-

### - 2.6.3- L'ÉVOLUTION DES PERFORMANCES DE LA CONSTRUCTION NEUVE

Les logements neufs, qui croissaient au rythme de 500.000/an dans les années 1970, de performance thermique supérieure au logement ancien (sur le plan du chauffage et de l'isolation, tout au moins), ont participé à un réel gain d'énergie, qui aurait été certainement plus important si cette création massive n'avait autant bénéficié à la maison individuelle (60% des constructions neuves), dont les besoins de chauffage sont théoriquement plus faibles.

Les progrès technologiques ont visé essentiellement les parties courantes de l'enveloppe des constructions.

L'introduction de matériaux d'enveloppe isolants a été progressive dans la construction moderne (copeaux et fibres de bois, liège, laine minérale). Elle s'est généralisée à la faveur des normes de construction (Arrêté du MRU du 17/09/1952). Depuis la NRT de 2001, les gains technologiques concernent en particulier les deux principaux points faibles de l'enveloppe, vitrages et ponts thermiques. La distinction entre les différents types de chauffage est occultée par la généralisation des niveaux d'isolation actuellement exigée pour le chauffage électrique.

Le surcoût total est estimé à moins de 1% du coût de la construction, avec une baisse attendue de 7% de la consommation de chauffage.

La nouvelle réglementation thermique NT2005, qui se verra applicable au deuxième semestre 2006, vise à minimiser les déperditions de chaleur liées à une isolation et des installations de chauffage et les mesures d'isolation mal conçues.

On y trouve notamment que, pour un logement parisien ayant reçu une simple réhabilitation thermique (celle portant sur l'enveloppe, loin d'être complète puisque les parois verticales sont maintenues dans leur état d'origine, le coefficient de « déperdition de chaleur » U reste nettement supérieur à la référence réglementaire 2001), on obtient des déperditions de 1.86W/m<sup>2</sup>.K contre les 1.05W/m<sup>2</sup>.K attendus . A titre d'exemple, on peut se livrer au calcul des déperditions de chaleur avant et après réhabilitation, pour les trois types d'habitat étudiés ; en y incluant toutes formes d'énergie d'usage chiffrables a priori :

Dans ce tableau, on a inclus deux « hypothèses » de performance technique de l'enveloppe

ENERGIE (MJ/m <sup>2</sup> .an)	Paris 1900	Grand ensemble	pavillonnaire
Chauffage (hyp1 / hyp2)	315 / 566	277 / 490	373 / 839
Autres	268.2	268.2	268.2

consommations			
Rénovation (bâtiment + voirie)	18.8	43.5	54.2
Déplacements	206	561	601
TOTAL (hyp1 / hyp2)	808 / 1049	1150 / 1362	1296 / 1762

### **- 3- CHAPITRE 3**

# ENERGIE GRISE ET ROUTES

## - 3.1- QUELQUES DONNÉES CHIFFRÉES SUR LES ROUTES EN FRANCE

Chacun a conscience de l'importance des infrastructures routières dans l'économie nationale, mais il semble opportun de rappeler quelques chiffres, pour mieux montrer l'impact et l'envergure de la « route ».

*Longueur totale du réseau routier français, DOM-TOM inclus (au 1er Janvier 2004)*

Autoroutes	7 840 km
Dont concédées	2 543 km
Routes nationales	27 893 km
Départementales	362 033 km
Communales	609 635 km (de largeur supérieure à 5km)
<b>TOTAL</b>	<b>1.009.944 km</b>

Par ailleurs, on trouve un coût de reconstruction à l'identique de **197,57 milliards d'euros**, dont 94,11 milliards pour les autoroutes, concédées ou non

Ce coût n'est nullement comparable, certes, avec les mille milliards d'euros que représentent, dans le génie civil public, les ouvrages d'art, mais, d'une part, ouvrages d'art et routes sont associés, et ce chiffre a l'avantage de montrer le fait que le coût de la route est non négligeable.

### **- 3.2- DÉMARCHE PROPOSÉE**

La principale source de nuisance et, on le verra, de dépense d'énergie grise est la combustion de carburant liée au transport des matériaux, au répandage, et aux manipulations sur ces matériaux nécessaires à la construction et à l'entretien de cette route.

Notre démarche sera donc de présenter les différentes phases de construction et d'entretien d'un tronçon routier dont nous définirons les caractéristiques parmi les multiples variantes de structures de chaussées, telles qu'elles sont définies par le SETRA.

*Notre principale référence bibliographique a été une thèse, de M. Tung Hoang, soutenue le 3/11/2005, dont l'intitulé est : « Tronçons autoroutiers : une méthodologie de modélisation environnementale et économique pour différents scénarios de construction et d'entretien ».*

Cette thèse, sous la double tutelle de l'Ecole Centrale de Nantes et de l'Université de Nantes, a bénéficié de l'accueil du LCPC de Nantes, et, au sein de cet établissement (plus particulièrement concerné par les procédés routiers, du soutien de plusieurs personnes particulièrement préoccupés par les problèmes environnementaux liés à la route.

Les seuls problèmes environnementaux pris en compte dans cette note étant

ceux des dépenses excessives d'énergie grise, nous ne nous préoccuperont pas de l'aspect écologique des retombées de la construction routière

D'autres sources d'informations utiles ont été, pour n'en citer qu'une, le catalogue des chaussées du SETRA, qui nous a aidé à concevoir un type de chaussée pour illustrer nos propos.

N'ayant pu disposer du Guide des Travaux Routiers et terrassements (GTR), nous avons puisé certaines informations dans le cours de Michel FAURE, (T I et II), de l'ENTPE ainsi que les guides techniques du SETRA et du catalogue des chaussées, du même organisme,

### **- 3.2.1- IDÉE SOUS-JACENTE À LA CONCEPTION DE CE CHAPITRE**

Dans un souci d'homogénéité avec le contenu et les résultats de la thèse mentionnée, nous avons choisi le type d'axe routier suivant :

Une autoroute à 2x2 voies a été choisie, avec un dimensionnement standard dans un climat doux : température moyenne 15°C, sans gel ni pluie. Les voies sont du type VRS (voie du réseau structurant). Les hypothèses de dimensionnement de la chaussée sont fondées sur une durée de service de 30 ans, le trafic initial poids lourds est de 2000 PL/jour/sens/voie. Le trafic poids lourds correspond à 20% de l'ensemble du trafic, et 90% du trafic poids lourds se trouve localisé sur la voie lente.

Avant de proposer des chiffres « en vrac », il s'agit :

- De décrire l'état des lieux, tel qu'il se présente à l'entrepreneur chargé des travaux,
- De décrire de façon aussi détaillée que possible , étape par étape, ce à quoi il veut arriver avant l'étape suivante, le type de matériaux qu'il utilise et où ils sont mis à disposition, les engins de chantier qu'il utilise pour chaque manipulation, et la façon de procéder.
- De donner, sur la base d'un modèle que nous proposons comme type de chantier routier classique, avec une structure également classique, un chiffrage des différents «entrants », c'est-à-dire ici, des matériaux apportés.
- D'estimer les quantités d'énergie libre dépensée à chaque étape, entrant par entrant .

Une fois ces estimations faites et le chantier totalement expliqué dans son déroulement, d'effectuer un total détaillé des quantités d'énergie grise, mettant en évidence les postes les plus « consommateurs ».

### **- 3.3- LES DIFFÉRENTES ÉTAPES DE VIE D'UN CHANTIER**



## ROUTIER

En passant outre sur l'enquête d'utilité publique et la définition du tracé du chantier, ainsi que le choix des matériaux constituant la chaussée, nous commencerons par ce que la chronologie nous impose : **les terrassements.**

### - 3.3.1- LES TERRASSEMENTS.

Ceux-ci, dont le but est de fournir une assise solide à la chaussée proprement dite, dépendent fortement, dans leur conception et leur déroulement, de la nature des terrains rencontrés dans le terrain naturel .

On peut, grosso modo, différencier trois grands types de terrains :

- meubles, avec ou sans cohésion, tels que limon, sables, argiles, alluvions , moraines, sols d'altération.
- rocheux, de grande cohésion, englobant la plupart des roches saines et des sols compacts.
- mixtes, de cohésion moyenne, souvent qualifiés de sols riippables

#### -3.3.1.1- *Les Différentes Phases Du Terrassement.*

Le concepteur, qui doit être entouré de bons géotechniciens, doit avoir connaissance, en fonction du tracé de la route :

des **différentes natures de sols** rencontrés dans le creusement du déblai, la connaissance des problèmes qu'ils posent (présence d'eau et prévision du comportement du sol en cas de relèvement brutal de la nappe phréatique), qualités et caractéristiques mécaniques, etc. Tout ce travail est supposé avoir été fait par des laboratoires agréés (LRPC, LCPC) .

de la possibilité de **réutiliser**, voire avec traitement à des liants hydrauliques tels que ciment et chaux, **une partie des sols extraits** de la « fosse » du chantier, pour constituer l'assise de la chaussée. Ceux-ci sont alors mis en déblai.

par ailleurs, compte tenu de la profondeur de la fouille, les terrains latéraux forment aussi des déblais, et peuvent éventuellement servir de source de matériaux, s'ils sont sains.

Il y a donc lieu d'opérer un tri « sélectif » des matériaux, sans perdre de vue que la partie « transport », s'il y a réalisation, est onéreuse en carburant.

Le fond du **déblai** peut être constitué soit d'un matériau naturel initial en place, soit d'un matériau extérieur dans le cas où la nature du matériau en place est inadaptée .

***L'opération « terrasser » consiste à extraire, charger, transporter et étaler des matériaux. Le choix du matériel est effectué principalement en fonction des difficultés d'extraction, et de la distance de transport.***

C'est pourquoi nous avons scindé ce sous-chapitre en différents paragraphes, dont les intitulés sont :

1. Présentation des différents engins de chantier, leurs fonctionnalités, leurs caractéristiques ;
2. Réalisation de la couche « sol support » ;
3. Réalisation de la couche de forme ;
4. Réalisation de la couche d'assise, elle-même divisée (du bas vers le haut), en couche de fondation et en couche de base ;
5. Réalisation de la couche de surface, divisée en couche de liaison, et couche de roulement.

### **-3.3.1.2- Présentation Des Différents Engins De Chantier Utilisés À Ce Stade**

Brève description des **décapeuses** ( scrapers ou scrapeurs)



vue : décapeuse poussée par un bouteur

La décapeuse est une benne racleuse se chargeant et se déchargeant en marche. Le chargement se fait par inclinaison de la caisse vers l'avant, et attaque du sol au moyen d'un couteau. A l'avant de la caisse de l'engin, une porte (ou vanne) de forme spéciale et réglable en hauteur, a pour fonction de contenir les matériaux à l'intérieur de la caisse au fur et à mesure du chargement (porte entrouverte) et pendant le transport (porte fermée). La décapeuse découpe ou avale une lame de sol, le déchargement se fait aussi par l'avant : un bouclier mu par vérins hydrauliques pousse et éjecte le matériau après que la porte ait été relevée.

Une décapeuse peut être automotrice ou tractée, à pneus ou à chenilles. Le type le plus répandu est la décapeuse automotrice à pneus.

Une décapeuse se charge rarement toute seule. Elle a besoin d'être poussée au moyen d'un bouteur, appelé dans ce cas « **pousseur** »

Les décapeuses ont des bennes de capacité comprise entre 8 et 41m<sup>3</sup> pour les plus grosses, la puissance du moteur allant de 220 à 960 CV. Cet engin est particulièrement sophistiqué en raison de sa double fonction :

- 1 extraction et chargement : vitesse très lente + couple d'entraînement le plus élevé possible aux roues motrices.

- 2 transport : vitesse la plus élevée possible (50 à 60km/h) dans les pires conditions de circulation. .

Brève description des caractéristiques essentielles du **bouteur – ou bulldozer** -



Le bouteur est un tracteur à chenilles portant une lame à l'avant. Cet engin décape et pousse les matériaux devant lui. On voit qu'il ne peut agir que sur des distances de transport très courtes, inférieures à 100 m. Les utilisations les plus fréquentes du bouteur sont les suivantes :

- 3 décapage (terre végétale ou sol découvert...)
- 4 poussage des décapeuses (scrapers), la lame est alors remplacée par un équipement spécial
- 5 réglage des matériaux
- 6 dessouchage
- 7 défonçage. Pour ce travail, le bouteur est muni à l'arrière d'une puissante dent en acier spécial, que des vérins permettent d'enfoncer dans le soc ; cette dent agit comme un soc, et le défonçage (ou ripage) permet de fragmenter des sols rocheux d'une épaisseur inférieure à 40cm.

La lame du bouteur est perpendiculaire à l'axe de celui-ci ; elle peut être inclinée, et l'engin met en cordon les matériaux qu'il extrait, sans les transporter.

Brève description de la niveleuse ( ou Motorgrader, ou grader)



C'est l'engin par excellence pour étaler des matériaux (on dit « régaler »), et pour les niveler, c'est-à-dire les positionner à l'altitude désirée en respectant le dévers du projet.

La niveleuse est constituée d'un long châssis, type « col de cygne », portant le moteur et les organes de transmission à l'arrière ; ce châssis est monté sur un

essieu arrière comportant généralement 4 roues en tandem, et sur un essieu avant directeur dont le plan des roues peut être incliné à droite ou à gauche par rapport à la verticale. Une lame est placée au centre du châssis par l'intermédiaire d'un système articulé qui lui permet de prendre diverses positions :

- rotation complète autour d'un axe vertical, par l'intermédiaire d'une couronne
- rotation autour d'un axe longitudinal de l'ensemble lame et couronne, la lame pouvant aller jusqu'à la verticale
- translation de la lame sur elle-même, permettant de la déporter sur la droite ou sur la gauche (coulissement)
- inclinaison de la lame sur l'avant (régalage) ou sur l'arrière (décapage).

La niveleuse permet :

- le régالage et le nivelage des remblais
- le dressage des talus
- le surfacage des couches
- le malaxage, la mise en cordon, le répandage et le réglage des matériaux.

Les niveleuses sont des engins dont la puissance peut varier de 100CV à plus de 350CV, avec un poids de 10 à 25 T. La largeur de la lame, en général de l'ordre de 1.70 m, peut être portée à 4.9 m pour les plus puissantes.

#### Brève description des engins de compactage



L'image ci-dessus est celle d'un compacteur vibrant à cylindre lisse. Il existe bien d'autres types, d'usage et de caractéristiques différents.

Extraire un sol revient à le décohésionner, à l'aérer, à le « foisonner », c'est-à-dire lui donner un volume plus important que ce même sol en place. Le foisonnement est loin d'être négligeable et se traduit par des augmentations de volume de l'ordre de 30 à 40%.

Le compactage a pour objectif de ramener la teneur en vides du sol à un niveau voisin de la teneur en vide qu'il avait avant extraction (roches massives traitées à l'explosif exclues). Les engins de compactage les plus couramment utilisés sur les chantiers de terrassement sont :

- les compacteurs à pneus

- les compacteurs vibrants à cylindres lisses
- les compacteurs à pieds dameurs
- les plaques vibrantes.

Pour les compacteurs à pneus, la charge par roue conditionne l'efficacité en profondeur, tandis que la pression de gonflage des pneus conditionne l'efficacité superficielle.

Pour les compacteurs vibrants à cylindres lisses, la vibration de l'engin est générée par la rotation d'un balourd à l'intérieur du (ou des) cylindre(s). En agissant sur la vitesse de rotation on agit sur la fréquence de vibration, et en jouant sur la masse du balourd ou son excentricité, on peut modifier l'amplitude de la vibration.

Dans cette gamme, peut-on encore distinguer :

- les monocylindres, qui, même si la totalité du poids de l'engin qui repose sur les roues n'est pas utilisée pour le compactage, présentent toutefois une meilleure capacité de translation qu'un tandem
- les tandems, pour lesquels la masse de l'engin est utilisée pour le compactage. On distingue les tandems longitudinaux (possédant un cylindre avant et un cylindre arrière), et les tandems transversaux (deux cylindres fixés sur un seul essieu).

Brève description des différents types de pelles



Les pelles servent à extraire et à charger des matériaux. Elles comportent un bras articulé se terminant par un godet. L'ensemble peut tourner autour d'un axe vertical, et il est disposé sur une plate-forme automotrice.

Le moteur principal (déplacement, rotation, commandes) est en général un moteur de type Diesel. Les mouvements du godet et des bras sont généralement commandés hydrauliquement ou quelquefois par câbles pour les très grosses pelles du type « dragline ».

Le châssis d'une pelle peut être monté sur pneus (petites pelles), sur chenilles (pelles moyennes et grosses), sur patins (très grosses pelles)

La pelle peut être utilisée :

- 1 en butte : le godet est poussé et prend en avant. La pelle peut alors attaquer les matériaux situés en hauteur
- 2 en rétro : le godet est tiré et prend en arrière. La pelle peut alors excaver.
- 3 en drague line : le godet, monté sur câble, est déposé au sol par la flèche, et tiré au treuil vers l'engin. Il se remplit par raclage.

Dans la gamme des engins disponibles sur le marché, on peut trouver des pelles sur chenilles pesant moins de 8T et d'une puissance de 50CV , les plus rares étant les pelles version butte pouvant atteindre 300T et plus de 2000CV.

#### Brève description des chargeurs

Les pelles sont des engins puissants mais dont les déplacements sont lents. Dans de nombreux cas, on leur substitue les chargeurs, très mobiles, souples et rapides.

Un godet travaillant toujours en butte est monté sur deux bras articulés. Cet ensemble ne peut se mouvoir que dans un plan vertical. Il est monté sur un tracteur. Le godet se charge à l'avancement . On distingue alors deux types de chargeurs : déversement à l'avant, déversement à l'arrière.

Le godet des chargeurs peut avoir une capacité allant jusqu'à 10 m<sup>3</sup>, pour des puissances de l'ordre de 600 CV, et des vitesses de déplacement pouvant atteindre 50 km/h pour les chargeurs sur pneus



#### Brève description des tombereaux (dumpers)



Ces engins peuvent atteindre des puissances et des dimensions considérables. En général, le moteur diesel comporte de nombreux perfectionnements et une puissance très élevée. La transmission est le plus souvent automatique (convertisseur de couple, servo-transmission). Le différentiel sur les roues arrière comporte un système antidérapant ou de blocage.

La suspension, facteur de vitesse de déplacement, donc de productivité, est le plus souvent hydraulique ou hydropneumatique. Le freinage est particulièrement efficace et surdimensionné.

On distingue les tombereaux articulés (au gabarit routier) d'une capacité de 20T à 35 T de charge utile, des tombereaux de chantier compacts de 35 T à plus de 200 T dont la vitesse maximale peut atteindre 75 km/h.

Enfin, les arroseuses, qui interviennent dès que la présence d'eau est requise. Considérée un peu rapidement comme engin dit « de servitude », l'arroseuse joue un rôle essentiel. Sa capacité en eau doit suivre les cadences du chantier (ex : 10.000m<sup>3</sup> par jour sur un chantier nécessitent 200 m<sup>3</sup> d'eau –compte tenu de l'évaporation – pour augmenter la teneur en eau de 10 % (C'est-à-dire 10 voyages pour une citerne de 20 m<sup>3</sup>).



### - 3.4- FABRICATION DES DIFFÉRENTES COUCHES

#### - 3.4.1- RÉALISATION DE LA COUCHE SOL SUPPORT

##### -3.4.1.1- *Réparation Sous Remblai*

Il s'agit :

- 1 D'aplanir le terrain naturel lorsqu'il est en pente, pour éviter que le remblai ait tendance à glisser ;
- 2 D'enlever les matériaux putrescibles (souches d'arbre,...) ;
- 3 De drainer et canaliser hors de l'emprise toutes les venues d'eau

### - 3.4.2- DÉCOMPOSITION DE L'OPÉRATION DE MISE EN REMBLAI

Cette opération peut se décomposer en 3 parties :

- Le déchargement du véhicule transporteur
- Le régalage
- Le compactage

#### a) Déchargement :

Lorsque les terres sont déplacées au bulldozer, cette opération est évitée, puisqu'il n'y a pas chargement dans un véhicule

Lorsque les terres sont transportées à la décapeuse, le déchargement et le régalage se font en une seule opération

Lorsque les terres sont transportées en camion ou en tombereau, le déchargement se fait par basculement de la benne, et il y a constitution d'un tas qu'il faudra ensuite régaler avec un autre engin (niveleuse ou bulldozer)

#### b) Régalage :

Le problème essentiel est celui de l'épaisseur de la couche de matériaux : elle est conditionnée par le compactage et doit être adaptée :

1. A la puissance de l'engin de compactage
2. A la nature du sol à compacter
3. A la teneur en eau de ce sol

**Le Guide des Terrassements Routiers (SETRA-LCPC)** donne des indications précises sur cette épaisseur.

#### c) Compactage :

C'est l'opération la plus délicate de la mise en remblai,

Pour obtenir en effet un compactage efficace et économique, il faudrait se placer à une teneur en eau voisine de ce que les géotechniciens appellent « l'Optimum Proctor Normal ».

Pour les sols peu sensibles à l'eau et perméables, les excès d'eau ne sont pas gênants, car celle-ci s'évacue sous l'effet de la densification du squelette minéral. Par contre, pour les sols sensibles à l'eau, les excès d'eau se traduisent par des chutes de portance sensibles : le sol se comporte alors comme une « boue » fluide incompactable.

Quand aux sols moyennement plastiques et « dotés de dilatance », ils sont susceptibles de générer un phénomène très gênant : le matelassage.



On désigne de cette expression imagée le phénomène suivant : à l'emplacement où opère le compacteur, le sol s'enfoncé profondément, mais il reflue tout autour du compacteur en se gonflant.

Notre propos n'est pas de donner ici surabondance d'explications techniques, surtout s'agissant des sols, dont l'étude et la prévision du comportement constitue une science en soi.

### - 3.4.3- LE TRAITEMENT DES SOLS

La raréfaction des ressources en bons matériaux dans certaines régions et l'importance du coût des transports, on amené les techniciens routiers à valoriser les matériaux disponibles sur le chantier.

Le traitement en place des matériaux fins comme des limons pour l'exécution des remblais et des couches de forme s'est très largement développé ces vingt dernières années en France. Nous aborderons ici les actions de traitement des matériaux avec la chaux ou d'autres réactifs (ciments, cendres volantes, laitiers ou autres sous-produits industriels).

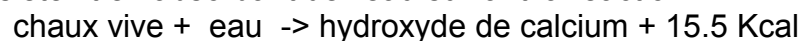
#### -3.4.3.1- Effet Du Traitement À La Chaux.

La chaux (dite aérienne) se présente sous les deux formes suivantes :

- la chaux vive, qui est principalement (à 90% en général) constituée d'oxyde de calcium. Elle est obtenue par calcination du calcaire aux environs de 1000°C
- la chaux éteinte, qui est obtenue par hydratation de la chaux vive, et contient principalement de l'hydroxyde de calcium.

Lorsqu'on mélange de la chaux vive à un sol fin (limon ou argile trop humide), se développent les réactions et phénomènes suivants

la chaux s'éteint en absorbant de l'eau suivant la réaction :



Cette première réaction abaisse la teneur en eau du mélange. La réaction est fortement exothermique : de l'eau s'évapore (« le sol fume »), c'est une autre cause d'abaissement de la teneur en eau. Ces phénomènes sont responsables d'une décroissance de la teneur en eau d'importance comparable, dont le total peut atteindre environ 0.8% à 1% d'eau par 1% de chaux

Les modifications entraînées au sein du matériau lui-même rendent celui-ci beaucoup plus facile à malaxer.

En définitive, 1% de chaux vive peut faire décroître, effet du malaxage et de l'aération compris, la teneur en eau de l'ordre de 1.5 à 2% .

Mais le traitement à la chaux a d'autres effets :

Il entraîne une modification immédiate des propriétés géotechniques : dès l'incorporation de la chaux, les fines argileuses s'agglomèrent en éléments plus grossiers et friables. Ce phénomène, appelé floculation, s'explique par la formation de « ponts » d'hydroxyde de calcium entre les feuillets et l'argile.

Il modifie les caractéristiques à long terme du sol traité : la chaux en tant que base forte, élève le PH du sol argileux, et participe à la mise en solution de l'alumine et de la silice. Il se forme des aluminates et des silicates de calcium hydratés, qui, en cristallisant, agissent comme un liant entre les grains. Il se produit une réaction dite « pouzzolanique ». Les performances mécaniques s'en trouvent augmentées

### ***-3.4.3.2- Le Traitement Mixte Chaux Ciment***

Pour améliorer les caractéristiques d'un sol traité à la chaux, et notamment le rendre moins gélif, on peut effectuer un deuxième traitement au ciment.

Les réactions du ciment avec un limon, préalablement traité à la chaux, consistent essentiellement en une hydratation des silicates et aluminates de calcium anhydres, ce qui conduit à une cristallisation des produits hydratés : c'est la prise hydraulique.

C'est la croissance des microcristaux formés et leur enchevêtrement qui enrobe et relie les grains entre eux.

#### **L'étude de formulation**

Il s'agit de doser chaux et ciment à incorporer dans le sol à traiter pour satisfaire les deux points suivants :

- Un critère relatif à l'exécution, avec dosage composé capable de conférer au sol fin une portance immédiate suffisante, permettant le compactage et la circulation des engins de chantier.
- La recherche du dosage en ciment à incorporer au mélange sol fin-chaux, pour obtenir les performances mécaniques exigées, pour une couche de forme, voire une assise de chaussée à faible trafic.

Le traitement en place est le plus utilisé, car moins coûteux qu'un traitement en centrale. Généralement, il est réalisé lors de l'exécution du déblai.

L'épandage de la chaux ou du ciment est réalisé avec des équipements à dosage volumétrique ou pondéral permettant le répandage à même le sol de 5 à 40 kg/m<sup>2</sup> de pulvérulent.

Le mélange est réalisé avec :

- 1 des charrues à disques permettant de gros débits (jusqu'à 1000m<sup>3</sup>/h), mais sur une épaisseur ne dépassant pas 20cm,
- 2 des rotobêches, engins d'origine agricole, dont la profondeur de malaxage est de l'ordre de 30 à 35 cm,
- 3 des pulvimixers à arbre horizontal, permettant des profondeurs de malaxage jusqu'à 40 cm, et des rendements de 200 à 600 m<sup>3</sup>/h

Dans le cas de matériaux traités pour couche de forme (ou assise traitée) il convient de protéger la surface des intempéries, de l'évaporation de l'eau et du trafic de chantier. Généralement on procède à un cloutage de la surface réalisé avec des gravillons 10/20 ( i.e. de grosseur comprise entre 10 et 20 mm), que l'on incruste dans le sol traité avec un cylindre lisse avant la réalisation d'un enduit superficiel à l'émulsion de bitume (voir plus loin)

### - 3.4.4- LA COUCHE DE FORME

#### -3.4.4.1- Conception De La Couche De Forme

On appelle ainsi une couche de matériaux qui termine les terrassements et que l'on met en place aussi bien sur la surface du déblai que sur la partie supérieure du remblai.

La partie supérieure de cette couche de transition entre les terrassements et les chaussées constitue la « plate-forme support de la chaussée » (PF).

On désigne par Partie Supérieure des Terrassements ou PST la zone supérieure (environ 1m d'épaisseur) des terrains en place (cas des profils en déblai) ou des matériaux rapportés (cas des profils en remblai). La plate-forme de la PST est l'Arase de terrassements (AR).

#### - 3.4.4.1.1- UN DÉTOUR : ÉVALUATION DU VOLUME DU SOL SUPPORT, JUSQU'À LA COUCHE DE FORME, ET TRADUCTION EN TERMES D'ÉNERGIE GRISE

Parmi les hypothèses retenues dans la thèse de M. Tung Hoang, figurent notamment certaines, relatives à la qualité des sols, et à la géométrie du terrain naturel. Rappelons ces hypothèses.

- 1 le tronçon de route élémentaire (module), est de 25 km, et passe alternativement sous des bosses ou sous des creux amenés à devenir déblais et remblais.
- 2 Une alternative est proposée : soit une seule « longueur d'onde » de 25 km ( une bosse et un creux) (hypoth.1), soient 7 « longueurs d'onde » de 3.57 km (hypothèse 2)

L'auteur suppose également que chaque « bosse » fournira, de façon suffisante, les matériaux servant à constituer les déblais sous la couche de forme. Il avance le chiffre de **150.000 m3 de déblai**.

La distance séparant l'arase des terrassements et le fond de fouille est de 1m, l'épaisseur de la couche située entre les mêmes zones est de 10 m, la base de la structure a une largeur de 40 m, et la largeur de la PF est de 25 m.

*Ce trapèze a donc une surface de :  $10 \times ((25 + 40) / 2) = 325 \text{ m}^2$*

Un tronçon de route de 1 km nécessiterait donc :  $325(\text{m}^2) \times 1000(\text{m}) = \underline{\underline{325.000 \text{ m}^3}}$  de déblai. Les deux chiffres ne concordent pas.

Reste à aborder la question du transport des matériaux.

Pour l'auteur, après arrachage de la couche végétales des buttes, il ne reste, si l'on peut dire –hors travaux de remise en forme des tas formés- qu'à « pousser le

plein dans le creux », ce qui est une façon minimaliste d'estimer les dépenses en énergie « diesel » des chargeuses ou bulldozers.

Par ailleurs, les chiffres de consommation en énergie de combustible diesel qui nous ont été communiqués faisaient avancer une consommation de 1l de diesel/ m<sup>3</sup> de matériau. Il s'agit là d'une moyenne effectuée par un organisme technique ayant compilé les données dont il disposait. A noter que cette consommation est, dans sa forme, indépendante du trajet effectué.

*L'énergie primaire d'un litre de diesel est de 9.8 KWh, soit  $9.8 \times 1000 \times 3600 \text{ J} = 35.3 \text{ MJ}$*

Il suffit donc, pour connaître le coût en énergie du transport de la quantité totale de déplacement de matériaux utilisés comme support de couche de forme, de multiplier ce chiffre par le volume de matériaux, soit :

$$W1 = 325.000 \times 35.300.000 = 11.5 \text{ TJ}$$

(Téra-Joules : milliards de milliards de Joules)

### **-3.4.4.2- Nécessité Et Rôle De La Couche De Forme**

Selon les cas de chantier (nature des sols, climat, etc.), la couche de forme se présente sous des formes différentes Elle peut être :

- 1 Inexistante car inutile lorsque les matériaux constituant le remblai ou le sol en place ont eux-mêmes les qualités requises,
- 2 Limitée à l'apport d'une seule couche d'un matériau ayant les caractéristiques nécessaires ; c'est le concept traditionnel de la couche de forme
- 3 Constituée d'une superposition de couches de matériaux différents répondant à des fonctions distinctes, incluant par exemple un géotextile, des matériaux grossiers, une couche de fin réglage, un enduit gravillonné..

Cette association conçue rationnellement permet de former une structure d'adaptation dont la surface présente les caractéristiques requises pour une plate-forme support de la chaussée..

A court terme, on demandera à la couche de forme un minimum de portance permettant aux engins d'évoluer , et des qualités drainantes, ou tout au moins d'insensibilité à l'eau, qui lui empêcheront de perdre ses qualités de portance. A long terme : elle devra homogénéiser la portance du substratum et permettre de définir un niveau minimum de cette portance sur l'ensemble du projet. Elle devra également jouer le rôle de couche anticontaminante et drainante, lorsque la chaussée doit être construite sur un sol de fondation particulièrement humide et plastique. Dans ce cas, on recommande d'interposer entre ce sol et le matériau de la couche de forme une nappe de textile artificiel non tissé, qui aura pour fonction essentielle de séparer définitivement le sol naturel et le matériau drainant, sans migration possible de fines de l'un vers l'autre, bien que la pression interstitielle du sol plastique puisse se dissiper librement à travers la nappe et s'écouler dans le matériau drainant.

En bref, la couche de forme est une transition entre les terrassements et la construction de la chaussée.

Le choix du type de matériau qui sera employé pour la couche de forme dépendra de plusieurs facteurs :

- Tout d'abord, très pratiquement des matériaux que l'on trouvera disponibles dans les terrassements. Au stade de la couche de forme, l'on recherche surtout des matériaux économiques en quantité suffisante.
- De l'époque à laquelle on prévoit de faire les travaux. Les exigences sur les matériaux sont plus grande en plein hiver
- Des problèmes spécifiques posés par les sols rencontrés le long du tracé au cours de l'étude du projet. Selon que l'on aura affaire à des sols fins, plastiques, humides, à des graves argileuses ou à des sols évolutifs, etc., le problème de la couche de forme se posera différemment.
- Des problèmes spécifiques posés par la technique choisie de la future chaussée.

Le GTR (Guide des Terrassements Routiers) du SETRA et du LCPC traite aussi de l'utilisation des sols en couche de forme et de leurs conditions de compactage, ainsi que de leur dimensionnement

### - 3.4.5- RÉALISATION DE LA COUCHE D'ASSISE

L'assise de chaussée est généralement constituée de deux couches, la couche de fondation, surmontée de la couche de base. Elles sont toutes deux flanquées latéralement d'un accotement, auquel il sera fait plus longuement allusion plus loin. (L'accotement se termine, dans la partie supérieure, au niveau de la couche de roulement, c'est-à-dire à la partie supérieure des couches de surface- voir infra – Ces couches en matériaux élaborés, le plus souvent liés (bitume, liants hydrauliques) pour les forts trafics, apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic. Elles répartissent les pressions sur le support, afin de maintenir les déformations à ce niveau dans les limites admissibles.

*Choix particulier d'une couche d'assise : deux couches de grave bitumineux GB3 ( terminologie SETRA ) , et DR, 2000.*

*Précisons immédiatement que, parmi les trois alternatives (chaussée BAC, chaussée expérimentale, chaussée BB qui constituaient les seules solutions compatibles avec les recommandation du GTR et du Catalogue des Routes), nous avons retenu, parmi ces trois possibilités décrites par l'auteur de la thèse : **la chaussée BB (terminologie SETRA ?), constituée d'une couche d'assise faite de deux sous-couches de graves bitumineux (GB3) de 13 cm chacune, d'une couche de liaison en BBSG ( béton bitumineux semi grenu), d'une épaisseur de 6.5 cm, et d'une couche de roulement de 2.5 cm en BBTM ( béton bitumineux très mince)***

L'accotement est construit en granulats non traités (GNT) avec la **couche d'étanchéité en 4 cm de BBM.**

### - 3.4.6- RÔLE PARTICULIER DE LA COUCHE DE SURFACE

Dans une chaussée, la couche de surface joue un rôle capital. Non seulement elle est la seule couche « vue » par les usagers, mais de son choix dépendront les choix au niveau des couches inférieures. La qualité d'usage de la chaussée dépend pour une large part des caractéristiques de surface de la couche de roulement, donc de sa nature et de son état. Cette couche contribue en outre à la pérennité de la chaussée, entre autres par l'étanchéité qu'elle apporte.

Dans la perspective « cycle de vie du tronçon routier », il convient de signaler que des prescriptions techniques très précises sont données par le Ministère. Pour la structure autoroutière choisie, sa description suit.

### - 3.4.7- POLITIQUE D'ENTRETIEN DE LA CHAUSSEE

Il existe actuellement plusieurs politiques d'entretien possibles pour les routes du réseau structurant. Au sein du Ministère, on peut en dénombrer deux : la plus ancienne datant de 1998, est désignée par le sigle PE98. Elle est plutôt théorique, est proposée par le catalogue de structure neuve ( SETRA et LCPC , 1998) . Elle est désignée PE98. La plus récente date de 2004, nommée PE04. Pour notre cas de chaussée, le déroulement des opérations de répandage de matériau neuf se lit : **x%M y cm**, ce qui signifie que l'on répand sur x% sur la surface de l'ancienne chaussée une nouvelle couche en matériaux M d'épaisseur y cm. Toutefois, avant de répandre la nouvelle couche d'enrobé, on procède au fraisage de l'ancienne chaussée. Le fraisage est effectué une seule fois, selon la politique d'entretien PE04, pour la voie lente de la chaussée, 30 ans après la construction initiale.

<b>TEMPS</b>	<b>PE04 APPLIQUEE A LA CHAUSSEE BB</b>
9 ans	75% BBTM 2.5 cm + 25%BBM 4cm
17ans	50% BBTM 2.5cm + 50% BBM 4cm
25 ans	100% BBM 4cm
30 ans	Fraisage voie lente 8 cm EME pour voie lente 100% BBTM 2.5 cm

Trente années sont en général considérées comme une moyenne acceptable pour la durée de vie d'une chaussée routière. Néanmoins, tous les trente ans, le traitement à la fraiseuse, et la pose d'un enrobé à module élevé (EME) permettent de prolonger la durée de vie.

La fraiseuse est un engin de chantier assez imposant (voir image ci-dessous), dont le rôle est de mettre en charpie, sur une épaisseur contrôlée, les couches traitées aux liants bitumineux. Une balayeuse, qui suit également le travail couche par couche, récupère les « déchets » à des fins de recyclage. Très peu de bitume est donc perdu dans l'ensemble de l'opération.



Fraiseuse

Il est à présent temps de faire , comme pour des « mètres », une estimation des volumes de tous les constituants de toutes les couches précédemment décrites, afin, grâce à des tables de conversion massique ou volumique, d'en estimer l'énergie libre

### **-3.4.7.1- Récapitulatif Des Différents Constituants, Et Contenu En Energie Grise, Couche Par Couche**

#### **- 3.4.7.1.1- COUCHE DE REMBLAI.**

Le calcul a déjà été fait plus haut. Rappelons les deux principaux chiffres :

VOLUME = **325.000m<sup>3</sup>**

W1 = ENERGIE GRISE = **11.4 TJ** , par km de route

#### **COUCHE DE FORME**

Rappelons qu'elle a une épaisseur de 0.5 m et une largeur totale de 25 m. Pour un tronçon d'1 km, le volume est donc de :  $0.5 \times 25 \times 1000 =$  **12.500m<sup>3</sup>**

Mais les matériaux la constituant doivent nécessairement être transportés, et avec l'hypothèse de dépense en combustible diesel de 1l/ m<sup>3</sup> de matériau transporté, et d'une équivalence de 9.8KWh par litre de diesel, soit  $9.8 \times 1000 \times 3600 \text{ J} = 35.3 \text{ MJ}$  on a :

W2 = ENERGIE GRISE =  $12.500 \times 35.3 \times 1.000.000 =$  **445 GJ = 0.445 TJ**

**(1 GJ = 1.000.000 .000 J)**

#### **- 3.4.7.1.2- COUCHE DE FONDATION ET COUCHE DE BASE**

Nous traiterons leur cas simultanément.

Le SETRA et le LCPC fournissent t les quantités et proportions de liants, dans le dosage des matériaux utilisés. Les prescriptions figurent dans le tableau ci-après. Il s'agit de dosage par tonne d'enrobé.

MELAN GES	DOSAGE
BBSG 0/14	52 kg de bitume + 948 kg granulats
BBTM 0/10	56.2 kg bitume + 944 kg granulats
GB3 0/20	43.5 kg bitume + 957 kg granulats
BBM 0/14	50 kg bitume + 950 kg granulats

### - 3.4.8- CALCUL DÉTAILLÉ DES ÉNERGIES GRISES DU BITUME ET DES GRANULATS, COUCHE PAR COUCHE

Valeurs et formules valables pour chaque couche

<u>Énergie grise</u> :	(Eg) <sub>b</sub> = 44,1. 10 <sup>6</sup> J/kg (Eg) <sub>g</sub> = 0,1. 10 <sup>6</sup> J/kg
<u>Masse volumique</u> :	(RO) <sub>b</sub> = 1,03. 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> (RO) <sub>g</sub> = 1,5. 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>
<u>Rendement diésel</u>	(r) <sub>d</sub> = 35,28. 10 <sup>6</sup> J/m <sup>3</sup>

Formule pour la masse de bitume contenu dans un volume Ve d'enrobé:

$M_b = (\%)_b \cdot (RO)_b \cdot V_e$ , où  $(\%)_b$  est le pourcentage de bitume dans l'enrobé de chaque classe.  $V_e$  est le volume total de l'enrobé.

Formule pour la masse de granulats contenus dans un volume Ve d'enrobé:

$M_g = (\%)_g \cdot (RO)_g \cdot V_e$ , où  $(\%)_g$  est le pourcentage d'enrobé de chaque classe.

Formule pour l'énergie grise (Eg)<sub>b</sub> du bitume contenu dans une masse Me d'enrobé:

$(EG)_b = (Eg)_b \cdot M_e$   
pour les granulats :

$(EG)_g = (Eg)_g \cdot M_e$



### I) COUCHE SUPPORT DE LA COUCHE DE FORME (GRANULATS)

$$V1 = 325 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

$$W1 = EG1 = rd.V1 = 11,5 \cdot 10^{12} \text{ J}$$

$$M1 \# (RO)g.V1 = 488 \cdot 10^6 \text{ kg}$$

### I) COUCHE DE FORME

$$V2 = 0,5\text{m} \cdot 25\text{m} \cdot 10^3 \cdot \text{m} = 12,5 \cdot 10^3 \text{ m}^3$$

$$M2 = (RO)g \cdot V2 = 18,8 \cdot 10^6 \text{ kg}$$

$$W2 = (Eg)g \cdot M2 = 1,86 \cdot 10^{12} \text{ J}$$

### III).1 COUCHE DE FONDATION + COUCHE DE BASE : BITUME

$$(\%)b = 43,5 \cdot 10^{-3}$$

$$V3-1 = 25 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot 10^3 \text{ m}^3 = 625 \text{ m}^3$$

$$M3-1 = (RO)b.V3-1 \cdot (\%)b = 28 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

$$W3-1 = (Eg)b.M3-1 = 1,23 \cdot 10^{12} \text{ J}$$

### III).2 COUCHE DE FONDATION + COUCHE DE BASE : GRANULATS

$$(\%)g = 957 \cdot 10^{-3}$$

$$V3-2 = V3-1 = 625 \text{ m}^3$$

$$M3-2 = (RO)g.V3-2 \cdot (\%)g = 897 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

$$W3-2 = (Eg)b.M3-2 = 89,7 \cdot 10^9 \text{ J}$$

### IV).1 COUCHE DE LIAISON : BITUME

$$(\%)b = 52 \cdot 10^{-3}$$

$$V4-1 = V3-1 = 625 \text{ m}^3$$

$$M4-1 = (RO)b.V4-1 \cdot (\%)b = 33,5 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

$$W4-1 = (Eg)b.M4-1 = 1,48 \cdot 10^{12} \text{ J}$$

### IV).2 COUCHE DE LIAISON : GRANULATS

$$(\%)g = 948 \cdot 10^{-3}$$

$$V4-2 = V4-1 = 625 \text{ m}^3$$

$$M4-2 = (RO)g \cdot V4-2 \cdot (\%)g = 889 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

$$W4-2 = (Eg)g \cdot M4-2 = 88,9 \cdot 10^9 \text{ J}$$

### V).1 COUCHE DE ROULEMENT : BITUME

$$(\%)b = 56,2 \cdot 10^{-3}$$

$$V5-1 = V4-1 = 625 \text{ m}^3$$

$$M5-1 = (RO)b \cdot V5-1 \cdot (\%)b = 35,5 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

$$W5-1 = (Eg)b \cdot M5-1 = 1,57 \cdot 10^{12} \text{ J}$$

### V).2 COUCHE DE ROULEMENT : GRANULATS

$$(\%)g = 944 \cdot 10^{-3}$$

$$V5-2 = V4-1 = 625 \text{ m}^3$$

$$M5-2 = (RO)g \cdot V5-2 \cdot (\%)g = 932 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

$$W5-2 = (Eg)g \cdot M5-2 = 93,2 \cdot 10^9 \text{ J}$$

#### -3.4.8.1- Accotement

Reste à traiter le cas de l'accotement et de la couche d'étanchéité en BBM.

L'accotement se divise en : -une partie en grave non traitée GNT, qui est formée de deux parallélogrammes, l'un de largeur 1m, et de hauteur à angle droit 1m, l'autre de largeur 2m et de hauteur à angle droit également 1m. La section a donc une surface de  $3\text{m}^2$ , soit un volume sur 1000m de  $3 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ . Les tables de conversion d'énergie grise par matériau (A2) nous donnant la valeur  $(Eg)g$  de  $150 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3$ , on en déduit la valeur  $W6-2$  de l'énergie grise de la grave non traitée :

$$w = 150 \cdot 3 \cdot 10^{6+3} \text{ J} = 450 \cdot 10^9 \text{ J}$$

$$W6-0 = 450 \cdot 10^9 \text{ J} \text{ (Pour la partie GNT)}$$

#### Couche d'étanchéité en BBM :

Celle-ci, rappelons-le, a une épaisseur de 0,04m, et épouse dans ses dimensions horizontales l'accotement, sur la partie supérieure de la chaussée.

Son volume est donc  $V6-1 = 40 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^3 \text{ m}^3 = 120 \text{ m}^3$ . Par ailleurs, le pourcentage de bitume dans l'enrobé est de  $(\%)b = 52 \cdot 10^{-3}$ .

On en déduit donc :

$$W6-1 = (\%)b \cdot (Eg)b \text{ (J/m}^3) \cdot V6-1 = 45,42 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3 \cdot 120 \text{ m}^3 \cdot 52 \cdot 10^{-3} = 283 \cdot 10^9 \text{ J}$$

$$W6-1 = 283 \cdot 10^9 \text{ J}$$

1.

De même, le pourcentage de granulats dans d'enrobé est de  $950 \cdot 10^{-3} = (\%)g$ , les tables de conversion d'énergie grise des granulats nous fournissent la valeur  $(Eg)b =$

150.10<sup>6</sup> J/m<sup>3</sup>.

On a donc :  $W6-2 = (\%)g.(Eg)b.V6-2 = 17,1.10^9 \text{ J}$  :  **$W6-2 = 17,1.10^9 \text{ J}$**  ,  
et l'énergie libre due aux granulats est donc de: :  **$W6-0 + W6-2 = 467.10^9 \text{ J}$**

### - 3.4.9- TABLEAU RÉCAPITULATIF (PREMIÈRE LIGNE : BITUME, DEUXIÈME LIGNE : GRANULATS)

support	forme	fondation+base	liaison	roulement	accotement
-----	-----	<b>1,23.10<sup>12</sup> J</b>	<b>1,48.10<sup>12</sup> J</b>	<b>1,57.10<sup>12</sup> J</b>	<b>283.10<sup>9</sup> J</b>
-	-				
<b>11,5 . 10.<sup>12</sup>J</b>	<b>1,86.10<sup>12</sup>.J</b>	<b>89,7.10<sup>9</sup> J</b>	<b>88,9.10<sup>9</sup> J</b>	<b>93,2.10<sup>9</sup> J</b>	<b>467.10<sup>9</sup> J</b>

**CONTRIBUTION TOTALE DU BITUME :** **4,56 .10<sup>12</sup> J**  
**CONTRIBUTION TOTALE DES GRANULATS :** **14,1.10<sup>12</sup> J**  
**TOTAL GENERAL D'ENERGIE GRISE :** **18,6.10<sup>12</sup> J**

### - 3.4.10- QUELQUES COMMENTAIRES

Le poste "terrassément" est de même importance que le poste relatif aux liants bitumineux, quoi qu'on s'acharne à penser qu'il y a plus d'énergie grise dans les BB que dans les produits terrassés. Or :

- 1 le poste « transport » de matériaux et dépenses d'énergie grise liée au transport est très certainement sous-estimé. Il n'a été tenu aucun compte du transport de produits bitumineux depuis la centrale (où la situer ?), pas plus que pour les granulats. Qui plus est, le chiffre de un litre de diesel par m<sup>3</sup> de matériau transporté semble être assez « forfaitairement » avancé.
- 2 Dans le traitement des sols à la chaux et au ciment, il n'a pas été tenu compte des quantités de matériaux traitants utilisés. Or, c'est environ 6% massiques qui sont employés. Des chiffres complémentaires sont à rechercher, pour affiner ces données.
- 3 En dernier lieu, mais pas en « dernier mot », il n'a été tenu aucun compte du trajet des engins de chantier lors de l'avancement de celui-ci. Or, connaissant, par exemple, le nombre de passes d'un compacteur selon la nature des sols, la longueur réelle du chantier de terrassément, et les trajets accomplis, ainsi que les consommations en carburant, il est évident que l'on conclurait sur la base de chiffres nettement plus importants.

### - 3.5- ANNEXE : LES DIFFÉRENTS TYPES DE COUCHES DE

## CHAUSSÉES, CARACTÉRISTIQUES ET PRÉCONISATIONS D'UTILISATION

La PST est généralement recouverte par une structure plus ou moins complexe adaptant les caractéristiques dispersées, des matériaux de remblai ou du terrain en place, aux caractéristiques mécaniques, géométriques, hydrauliques et thermiques auxquelles doit répondre la chaussée. Il s'agit de la couche de forme.

La partie située au-dessus de la couche de forme se constitue de :

- 1 une couche de fondation,
- 2 une couche de base

Ces deux dernières constituant la couche d'assise

- 3 une couche de liaison
- 4 une couche de roulement

*Ces deux dernières constituant la couche de surface.*

### - 3.5.1- CONSTITUTION DE LA COUCHE DE FORME

Elle peut être :

- 1 inexistante car inutile quand le matériau de remblai ou le sol en place ont eux-mêmes les qualités requises
- 2 limitée à l'apport d'une seule couche d'un matériau ayant les caractéristiques requises
- 3 constituée d'une superposition de matériaux répondant à des fonctions distinctes formant une structure d'adaptation dont la surface présente les qualités requises pour une PST.

Sous l'angle des matériaux utilisés, trois cas se présentent : emploi des matériaux non traités, utilisation du sol fin traité en place à la chaux, au ciment, ou une association des deux, et usage de matériaux grenus traités aux liants hydrauliques éventuellement associés à de la chaux

A noter qu'entre le sol support éventuellement décapé et la PST est prescrite une épaisseur de 1m.

A noter également qu'en France, le Guide Technique de Réalisation des remblais et des couches de forme (SETRA et LCPC, 2000) distingue sept catégories de PST en fonction de la géotechnique et des conditions hydriques des sols. Ensuite, pour chaque cas de PST et pour les différents matériaux de couche de forme, est préconisée une épaisseur de couche de forme.

La structure constituée par la couche de forme et des couches inférieures est appelée plate-forme.

### **Mise en œuvre du déblai et du remblai**

On a vu que des travaux sont effectués pour achever le fond du déblai. Si le matériau ne doit pas être traité, il faut simplement régler, puis compacter ce fond. Si le matériau ne possède pas les qualités requises, il faut le traiter par la chaux, le ciment, ou les deux à la fois.

### **Mise en œuvre de la couche de forme**

Si la couche de forme est constituée de sols traités, sa réalisation fait appel, suivant les cas de chantier, à un plus ou moins grand nombre d'opérations élémentaires, exigeant un ordonnancement précis, un savoir-faire particulier, et des matériels spécifiques variés. A chaque cas de figure différent, un mode opératoire différent, quoi que, dans sa thèse, M.Tung Hoan distingue quatre types les plus courants

### **- 3.5.2- COUCHES SUPÉRIEURES : COUCHES D'ASSISE**

Ces couches en matériaux élaborés, le plus souvent liés (bitume, liants hydrauliques) pour les forts trafics, apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic. Elles répartissent les pressions sur le support, afin de maintenir les déformations à ce niveau dans les limites admissibles

### **Choix Du Type De Couche De Surface. Matériaux Utilisés**

Parmi les techniques les plus couramment utilisées en couches de roulement, mentionnons :

- 1 les enduits superficiels (ES)** constitués d'une alternance de couches de liant bitumineux et de gravillons, en couches de faible épaisseur, et réparties directement sur le support.
- 2 les bétons bitumineux (BB)** qui sont des mélanges de liant hydrocarboné (bitume), de granulats, et éventuellement d'additifs, dosés, chauffés, malaxés dans une centrale d'enrobage, puis transportés et mis en œuvre sur la chaussée.

Plusieurs types sont distingués en fonction de l'épaisseur d'utilisation et la formulation et caractéristiques de surface qui en résultent.

- 3 les BB semi grenus (BBSG, 5 à 9 cm)**, et les BB minces (BBM, 3 à 5 cm) sont les plus classiques
- 4 les BB très minces (BBTM, 2 à 3 cm)** et les **BB ultra minces (BBUM, moins de deux cm)** sont très grenus ( c'est-à-dire que le mélange contient beaucoup de gravillons et peu de sable), et présentent, de ce fait, une forte macro rugosité
- 5 les BB drainants (BBDr), 3 à 4 cm**, sont conçus pour avoir une forte teneur en vides communicants, ce qui permet une évacuation de l'eau de

surface au sein même de la couche, et non à sa surface

- 6 **les enrobés coulés à froid (ECF)** sont des mélanges préparés à froid, de liant hydrocarboné (émulsion de bitume), de granulats, et éventuellement d'additifs, coulés sur la chaussée
- 7 on peut également laisser subsister le **béton de ciment (BC)** en couche de roulement ou de chaussée ; un traitement de surface est alors indispensable (striage dans le béton frais, ou autres procédés).

La couche de liaison est souvent utilisée en association avec une couche de roulement mince ou très mince.

### - 3.5.3- FAMILLES DE STRUCTURES DE CHAUSSÉES.

#### PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

Sur le réseau français routier coexistent plusieurs types de structures de chaussée, que l'on peut classer et caractériser comme suit :

##### 1. Les chaussées souples

Ces structures comportent une couverture bitumineuse mince (<15cm) parfois réduite à un simple ES, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités (couche de 20 à 50 cm)

##### 2. Les chaussées bitumineuses épaisses

Elles comportent une couche de surface en matériaux bitumineux, une couche de matériau bitumineux d'assise, (15 à 40 cm).

Par rapport aux chaussées souples, elles se différencient donc par une épaisseur de matériaux liés par du bitume plus importante. Comportant plusieurs couches bitumineuses, leur décollement fera que chacune d'entre elles sera sollicitée en traction, et donc peut rompre prématurément. La qualité des interfaces y est très importante.

##### 3. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques (dites également semi-rigides)

Elles sont constituées d'une couche de surface bitumineuse (épaisseur de l'ordre de 6 à 14cm) sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une ou deux couches dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50cm

Ces structures comportent une couche de surface bitumineuse sur une assise de matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une ou deux couches, dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 40 cm. La couche de surface en matériau bitumineux a, elle, une épaisseur de 6 à 14 cm

##### 4. Les chaussées à structure mixte.

Ces structures comportent une couche de surface et une couche de base (10 à 20 cm) en matériaux bitumineux, sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm).

les différentes couches ont un rôle fonctionnel distinct ; la couche de fondation traitée aux liants hydrauliques diffuse et atténue les efforts transmis au sol

support, la couche bitumineuse sert à ralentir la remontée des fissures transversales de la couche sous-jacente et réduit les contraintes de flexion à la base de la structure

Nous ne parlerons pas des chaussées à structure inverse, pas plus que des chaussées en béton de ciment, peu présentes dans le réseau routier français.

Mentionnons pour mémoire les couches dites **BAC** (béton armé continu), qui sont comparables à de longues et minces poutres de béton armé, la dimension et le nombre d'armatures dépendant des efforts à soutenir.

## - 4- CHAPITRE 4

# DECHETS ISSUS DES CHANTIERS DE BATIMENT ET DE TRAVAUX PUBLICS: TRAITEMENT, VALORISATION

## - 4.1- TRAITEMENT DES DÉCHETS ISSUS DU BTP



Nous distinguerons, car ces deux types d'industrie du BTP donnent lieu à des déchets de nature totalement différente, le cas des résidus du bâtiment, et les déchets de la filière routière, rendus inévitables par la nécessité d'une réfection des couches supérieures de la chaussée. Les déchets routiers, et les différentes techniques de remise en état et de recyclage, seront traités en dernière partie

## - 4.2- LES SITES D'ACCUEIL DES DÉCHETS DU BTP.

Dans beaucoup de régions de France, il existe un nombre élevé de sites d'accueil des déchets du BTP. Mais ces sites n'accueillent pas n'importe quelle nature de déchet, et dans n'importe quelles conditions. Il est indispensable, avant de se diriger vers une installation, de connaître :

- 1 la nature des déchets dont on dispose
- 2 le volume de ces déchets
- 3 la localisation exacte et les conditions d'accès de l'installation vers laquelle on se dirige

Pour mémoire, signalons que le secteur du Bâtiment produit 65% de déchets inertes (pierres, béton, briques, céramiques...), 30% de déchets industriels banals (emballage et matériaux papier, plastiques, textile, bois non traité) et environ 5% de déchets spéciaux (peintures, solvants, bois traités).

Nous distinguerons, car ces deux types d'industrie du BTP donnent lieu à des déchets de nature totalement différente, le cas des résidus du bâtiment, et les déchets de la filière routière, rendus inévitables par la nécessité d'une réfection des couches supérieures de la chaussée. Les déchets routiers, et les différentes techniques de remise en état et de recyclage, seront traités en dernière partie.

## - 4.3- LES QUATRE GRANDS TYPES D'INSTALLATION

### - 4.3.1- LES CENTRES DE REGROUPEMENT, DE TRI ET DE VALORISATION DES DÉCHETS

- 1 pour les déchets inertes, il s'agit de plates-formes de concassage des matériaux entrant dans la catégorie des DI ; ces installations sont soumises à la législation sur les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement.
- 2 Il existe deux types d'installation de valorisation des inertes :
- 3 les installations disposant d'un concasseur fixe
- 4 les installations ne disposant pas de concasseur et fonctionnant par campagne de concassage avec du matériel mobile.

Hormis la présence du concasseur, ces installations fonctionnent de la même manière. Les matériaux inertes sont déposés par les entreprises via le pont-basculé, un contrôle visuel est effectué pour vérifier la qualité du produit. Les matériaux sont triés si nécessaire, puis concassés et de nouveau triés pour éliminer les dernières impuretés (bois, plastique...)

Pour les déchets en mélange, l'activité BTP produit encore de fortes quantités de déchets en mélange qu'il convient de trier. Lorsque le tri sur chantier est impossible, il est indispensable de diriger ces déchets vers des centres de tris qui acceptent les Déchets Industriels Banals, les inertes en petites quantités, et les

Déchets Industriels Spéciaux.

Les centres de tri sont également des installations classées pour la protection de l'environnement.

### **- 4.3.2- LES CENTRES D'ENFOUISSEMENT DES DÉCHETS**

#### **ULTIMES**

Pour chacune des trois catégories de déchets (DI, DIB, DIS), il existe pour chacune trois types de Centre d'Enfouissement Technique. Seuls les déchets dont la part valorisable a été extraite peuvent être envoyés dans ces installations.

### **- 4.4- EXEMPLE DU TRAITEMENT DES DÉCHETS DANS PARIS ET PETITE COURONNE**

#### **- 4.4.1- ÉLABORATION DU PLAN**

Une commission d'élaboration réunissant l'ensemble des acteurs publics et privés concernés par la gestion des déchets du BTP à Paris et en Petite Couronne a été constituée en avril 2001 pour réaliser un diagnostic de la situation et proposer les améliorations nécessaires.

Sept groupes de travail thématiques (gisement ; collecte et filières de traitement ; communication, transport ; clauses à insérer dans les marchés du bâtiment et dans ceux de travaux publics ; valorisation des déchets, on été créés par cette commission.

A la demande de ces groupes, plusieurs études ont été financées par l'ADEME et la DREIF : études quantitatives sur le gisement des déchets et les flux interdépartementaux, mais aussi qualitatives sur la nature du gisement et les pratiques actuelles des professionnels dans la gestion de leur déchets de chantier.

Le projet de plan a été validé par la commission plénière du 24/04/2003, sous réserve de la prise en compte de quelques remarques. La mise au point du plan de communication, à l'époque, était en cours avec l'appui d'une agence de communication

#### **- 4.4.2- L'ÉTAT DES LIEUX DE LA GESTION DES DÉCHETS DU BTP À PARIS ET EN PETITE COURONNE, ET EN ILE-DE-FRANCE.**

La production annuelle a été estimée à 12.7 millions de tonnes par an : voir tableau ci-après.

L'analyse qualitative de la gestion actuelle des déchets dans le BTP met en évidence :

- Le manque fréquent de place sur le chantier et le défaut d'information et/ou de volonté qui conduisent à des mélanges de déchets inertes (gravats, tuiles..)et banals (bois, plastiques, cartons) avec des déchets industriels spéciaux, souvent toxiques (peintures, colles, solvants). Ces mélanges accroissent considérablement les coûts et les difficultés de traitement.
- Le manque d'installation de collecte et de recyclage pouvant réglementairement accepter des DIB et des DIS. Ce manque de découle à la fois de l' »effet NIMBY » (« Not In My Backyard »), particulièrement important en zone urbaine dense, et d'un manque de contrôle.
- Les coûts et les distances de transport sont importants, avec une place très notable de la voie d'eau (2Mt/an). C'est probablement grâce à ces coûts de transport et à la raréfaction de la ressource en granulats naturels que la filière « recyclage de matériaux inertes » est d'ores et déjà bien développée à Paris et en Petite Couronne. Les installations de recyclage recensées sont relativement bien réparties sur l'ensemble du territoire.
- La filière transit/tri utilise déjà, contrairement aux filières concernant les déchets ménagers, une voie d'eau qui dessert bien la zone étudiée.

## - 4.5- VALORISATION DES MATÉRIAUX RECYCLÉS

### Introduction

Production annuelle	TP	B	Total
Paris	0.8	3.4	4.2
Hauts de Seine	1.4	1.9	3.3
Seine Saint Denis	1.3	1.4	2.7
Val de Marne	1.1	1.4	2.5
Paris Petite Couronne	4.7	8.0	12.7
<u>Ile-de-France</u>	<u>9.2</u>	<u>11.4</u>	<u>20.6</u>

La loi du 13 Juillet 1992 limitant le stockage des seuls déchets n'ayant pas fait l'objet de

valorisation « matière » ou énergétique, la réglementation favorise l'emploi de matériaux recyclés, ce qui offre trois avantages :

- 1 L'optimisation des carrières, gisements alluvionnaires et rocheux, qu'il convient de réserver aux usages adaptés à leur qualité,
- 2 Une économie de transport, puisqu'il s'agit de matériaux locaux,
- 3 La limitation des centres de stockage dont on cherche à réduire le nombre

et l'usage.

Après quelques années d'usage (chantiers de mise au point et chantiers pilotes), il apparaît que les matériaux de recyclage offrent une véritable alternative technico-économique dans un secteur tel que le BTP.

Les caractéristiques de ces matériaux permettent maintenant de satisfaire à un large éventail d'exigences, depuis les simples remblais jusqu'aux assises de chaussées à trafic lourd.

Dans la région Rhône-Alpes, l'ensemble des installations implantées constitue la trame d'une filière industrielle qui produit chaque année :

- Au moins 2.2 millions de tonnes de matériau de recyclage de démolition
- 200 000 tonnes de mâchefer d'incinération,

Soit près de 5 à 10% des matériaux utilisés dans le BTP.

### **- 4.5.1- DÉROULEMENT DES OPÉRATIONS DE TRI ET VALORISATION**

L'exploitant établit tout d'abord un Plan d'assurance qualité (PAQ), qui définit les procédures mises en place pour assurer la qualité du produit fournit. En rapprochement des normes et guides géotechniques, l'objectif du PAQ est l'établissement d'une « Fiche technique-produit » caractérisant le matériau sur laquelle l'exploitant s'engage

#### ***-4.5.1.1- Le Matériau De Recyclage Et De Démolition***

*Le PAQ doit comporter les dispositions suivantes :*

a) Contrôle des matériaux entrants : à chaque camion à l'arrivée, pour vérifier la conformité de la matière brute ; détermination des matériaux acceptés pour recyclage (béton, brique, graves, éléments de démolition triés, parpaings de mâchefer de charbon...) ; détection des impuretés prohibées (plâtre, amiante, plastiques, matières putrescibles, métaux.

b) Contrôle d'élaboration : organisation de l'élaboration en fonction des familles de matériaux bruts, préparation avant élaboration, séquences de concassage, criblage, tri, recomposition, et mise en stock.

c) Caractérisation : contrôle et réalisation d'une fiche-produit incluant la classification spécifique, suivant l'usage de destination.

#### ***-4.5.1.2- Les Différents Produits***

##### ***- 4.5.1.2.1- CAS DES GRAVES***

### La grave de mâchefer

Installation de maturation et d'élaboration du mâchefer : le mâchefer produit en usine d'incinération de résidus urbains transite par une installation de maturation et d'élaboration (IME) permettant son stockage temporaire et sa préparation avant utilisation en technique routière.

Élaboration du mâchefer : il fait l'objet d'une élaboration qui résulte de sa maturation naturelle durant le stockage et d'une préparation physique en installation permettant d'obtenir des caractéristiques géotechniques compatibles avec son emploi en technique routière. Cette préparation comprend le scalpage, le concassage, le criblage, la démétallisation (métaux ferreux et non-ferreux).

### Caractéristiques environnementales du mâchefer

Composition des mâchefers en sortie d'usine : Silice, alumine et calcium représentent la base de la structure minérale du mâchefer. Les métaux ferreux constituent alors environ 10% avant défermage, l'eau de l'ordre de 25%.

### Classification environnementale du mâchefer :

le Ministère chargé de l'Environnement a défini des règles qui permettent de classer le matériau en vue d'une utilisation en technique routière. La circulaire du 9 Mai 1994 impose un contrôle des caractéristiques du matériau à l'aide d'un test de lixiviation normalisé, et d'une mesure d'imbrûlés. Il se classe alors dans une des 3 catégories suivantes :

- « V » : valorisable en travaux publics,
- « M » : maturable, valorisable après maturation et élaboration,
- « S » : stockable, non utilisable, destination centre de stockage de déchets.

Pour être « classable », le mâchefer doit présenter moins de 5% d'imbrûlés.

### La GRD: grave recyclée de démolition

La caractérisation géotechnique est établie en référence aux normes :  
Sols pour les matériaux élaborés sommairement,  
Granulats pour les matériaux élaborés par fractions déterminées.

**Laitiers** : ils sont constitués d'un résidu liquide, formé de silicates divers et sont issus des hauts fourneaux. Résidus de la fabrication de l'acier finement broyés, leur diamètre peut descendre jusqu'à quelques microns. Il y a prise du matériau, dès qu'il y a mélange avec l'eau : on trouve couramment des ciments faits uniquement avec des laitiers.

## **- 4.6- LE RECYCLAGE ET LE RETRAITEMENT DES MATÉRIAUX DE SURFACE DANS L'INDUSTRIE ROUTIÈRE: RÉFECTION DES ROUTES**

Ou : une technique d'entretien et de réhabilitation des structures.

Nous incluons deux volets : le retraitement à froid avec liant hydrocarboné, le retraitement à froid avec liant hydraulique, sans aborder, quitte à ne pas être exhaustif, le thermorecyclage, qui est une technique longue à décrire de façon précise.

### **- 4.6.1- RETRAITEMENT EN PLACE À FROID DES ANCIENNES CHAUSSÉES : DESCRIPTION GÉNÉRALE**

Lorsqu'une chaussée n'a plus la qualité d'usage souhaitée, la méthode traditionnelle consiste à apporter des matériaux supplémentaires pour réaliser de nouvelles couches de surface (liaison et / ou roulement), une nouvelle couche de base ou même une réfection totale

La technique du retraitement à froid en place des couches dégradées de chaussées permet de reconstituer une nouvelle couche de qualité et constitue une alternative intéressante à la méthode traditionnelle.

Le procédé de retraitement en place consiste à fragmenter le revêtement bitumineux, soit séparément, soit en même temps qu'une partie des couches sous-jacentes. La valorisation de ce matériau foisonné et homogénéisé est faite par différentes actions, qui se traduisent par les opérations suivantes :

- 1 Une éventuelle correction du matériau recyclé par apport de granulats ayant les caractéristiques correctives requises ;
- 2 Le reprofilage transversal, parfois longitudinal, qui peut se faire soit par rapport de matériaux, soit par reprofilage du matériau de l'ancienne chaussée fragmenté ;
- 3 La valorisation du matériau de l'ancienne chaussée est obtenue
  - en ajoutant un liant qui peut être hydrocarboné (généralement sous forme d'émulsion de bitume), hydraulique ou composé ;
  - en ajoutant éventuellement de l'eau pour obtenir un produit ayant les qualités nécessaires à sa mise en œuvre ;
  - en assurant l'homogénéisation par brassage et / ou malaxage des différents composants.

## - 4.6.2- AVANTAGES ET LIMITES DE LA TECHNIQUE

### 1) **Avantages** : ils sont d'ordre :

- environnementaux (économie de ressources naturelles non renouvelables, et réduction des quantités de matériaux à transporter).  
Economie d'énergie : le retraitement se fait à froid.

- techniques : le retraitement de la chaussée permet une homogénéisation des matériaux en place et l'élimination des fissures présentes dans le revêtement et la partie supérieure de l'assise. Par ailleurs, les réalisations ont mis en évidence une réduction du temps d'intervention, par rapport aux méthodes traditionnelles.

- économiques : la technique du retraitement en place est plus rapide qu'une reconstruction de chaussée, ce qui est source d'économie et de réduction de coûts indirects : il y a une réelle réduction d'apport d'énergie grise par rapport aux méthodes traditionnelles, qu'il est très difficile de chiffrer, mais, qui compte tenu de ce qui a été dit sur la part des consommations de carburant dans les chantiers routiers créés, est plus que non négligeable.

### 2) **Limites** de la technique :

la première limite d'emploi est la dimension maximale (D) du plus gros élément du matériau disponible. On considère que D doit être inférieur à 80 mm. Sont donc exclues les chaussées rigides (béton), sauf si des techniques de fracturation préalable permettent de respecter la règle du (D).

## - 4.6.3- LES MATÉRIELS UTILISÉS, ET LEURS FONCTIONS RESPECTIVES POUR UN CHANTIER DE RETRAITEMENT

Le choix des matériels (engins) adaptés au chantier à réaliser est très important pour la réussite et la qualité de l'ouvrage. Dans les années antérieures, l'utilisation de matériels dérivés du machinisme agricole, peu performants pour le retraitement des chaussées, a pu conduire à l'échec.

Aujourd'hui, les progrès technologiques ont permis de mettre au point des matériels performants

Sur un chantier, on peut trouver tout ou partie des matériels permettant les fonctions suivantes :

- Fonction **enlèvement de matériau** : il s'agit le plus souvent de couches de roulement en béton bitumineux, pour éviter un rehaussement de profil, et pour recycler le produit dans une autre chaîne de revalorisation, ou pour assurer le reprofilage nécessaire avant le passage du matériel de

retraitement.

- Fonction **apport de matériau complémentaire**, et éventuellement correcteur : il se fait, soit directement sur la chaussée permettant ainsi son reprofilage, soit par déversement dans une trémie de réception d'une trémie de réception d'une machine de retraitement.
- Fonction **fragmentation de la chaussée** : elle est assurée par un rotor à arbre horizontal équipé de pics ou d'outils du type marteau. La chambre du rotor est équipée d'une ou plusieurs rampes permettant d'ajouter de l'eau et un liant liquide.
- Fonction de **brassage et de malaxage** (homogénéisation) : la fonction de brassage vertical est obtenue avec le rotor de la machine de fragmentation, mais ce type de matériel (fraiseuse ou pulvérisateur) ne peut assurer le mélange avec les ajouts que dans l'épaisseur de la couche. La fonction malaxage intervient quand, après fragmentation, le matériau est repris et passe dans un malaxeur à un ou plusieurs arbres horizontaux. Fonction dosage du liant : lorsque le liant est pulvérulent, cette fonction est assurée généralement par un matériel du type épandeur, mais il existe des matériels qui permettent la dépose du liant, immédiatement, dans la préchambre du rotor, dans le but d'éviter des émissions de poussières entre épandage et malaxage. Lorsque le liant est liquide, il est dosé comme dans une centrale fixe, au moyen de pompes doseuses.
- **Mise en œuvre du matériau retraité** (réglage et compactage). Il s'agit là d'une fonction classique dans la construction routière, sans spécificité majeure sur un chantier de retraitement. En général, dans le cas de machines multifonctions, elles assurent un premier réglage dans la largeur de travail, et parfois également un précompactage. Au niveau de la conduite des travaux, la particularité du chantier de retraitement réside dans le fait que le travail est réalisé par bandes successives (recouvrement de bandes, fin réglage, etc.) et en forte épaisseur dans le cas de réhabilitation structurelle. Pour ces deux raisons, le dimensionnement de l'atelier de compactage doit être conçu avec soin, ainsi que doit être respecté le délai de maniabilité quand le retraitement se fait avec un liant hydraulique.

#### - 4.6.4- DOMAINE D'EMPLOI DE LA TECHNIQUE



*Le marché actuel se situe essentiellement sur les chaussées des routes départementales dont les structures traditionnelles ont besoin d'être remises à un niveau de qualité d'usage supérieur. Mais toute structure routière (routes nationales, autoroutes, chaussées urbaines, zones portuaires, ...) peut être concernée par la technique de retraitement en place.*

*Il est également un marché pour la réhabilitation des aires aéronautiques pour lesquelles l'étude doit tenir compte des objectifs et des contraintes spécifiques à ces structures. Sur ces sites aéronautiques, des exemples de retraitement à l'émulsion ont donné satisfaction vis-à-vis d'un objectif de suppression de fissures dans les couches de surface bitumineuses recouvrant une assise rigide (joints ou fissures de retrait).*

#### **- 4.6.5- RETRAITEMENT AUX LIANTS HYDROCARBONÉS. PRINCIPES DE LA TECHNIQUE, OBJECTIFS ET MODE D'EMPLOI**

Cette technique consiste à retraiter tout ou partie d'une chaussée avec de l'émulsion de bitume, régénérant ou non, avec ou sans apport complémentaire de matériaux granulaires.

On distingue principalement :

- Le retraitement de chaussée essentiellement constituée de matériau non traité et dont la couverture bitumineuse est faible (souvent plusieurs enduits d'usure, d'épaisseur inférieure ou égale à 4 cm) ;
- Le retraitement d'enrobés bitumineux d'épaisseur supérieure à 4 cm sur chaussée dont les assises sont non traitées ou traitées au bitume ou aux liants hydrauliques.

Ces différents retraitements aboutissent, suivant le cas, à la réalisation d'une couche de base ou de liaison qui nécessite une couche de roulement adaptée aux conditions de trafic et de site : enduit, enrobé coulé à froid, béton bitumineux...

##### ***-4.6.5.1- Domaine D'emploi***

Cette technique est applicable dans tous les cas de réhabilitation de corps de chaussées, plus particulièrement en rase campagne, mais aussi en traversée d'agglomération.

##### ***-4.6.5.2- Avantages Et Limites De La Technique***

###### **1. Avantages**

- **avantages environnementaux** : ce sont, grosso modo, ceux décrits en V.5.2.

**- avantages techniques :**

- Comme toutes les techniques bitumineuses à froid, le retraitement à l'émulsion accepte certaines variations de compositions, d'épaisseurs, sans évolution ultérieure des profils et s'oppose très efficacement à la remontée des fissures de retrait des couches sous-jacentes.
- Restructuration de couches dégradées conduisant à :
  - un traitement de l'interface, des fissures, du faïençage,
  - la régénération éventuelle du liant. Un simple chargement ne permettrait pas de régler tous ces défauts
- Homogénéisation des caractéristiques mécaniques de la couche traitée
- Traitement à base de liant bitumineux conduisant à des matériaux de comportement dit « souple ».
- Amélioration de l'uni longitudinal, du profil transversal et de l'homogénéité de la chaussée

**- avantages économiques : même remarques qu'en V.5.2.**

**2. Limites de la technique**

- Conditions climatiques et période de réalisation ne permettant pas un mûrissement correct du matériau traité à l'émulsion de bitume.
- Matériaux non adaptés aux critères de faisabilité : pavés, bétons de ciment, incompatibilité émulsion / matériaux (test d'enrobage)
- Présence de nombreuses émergences de réseaux en surface.

***-4.6.5.3- Les Matériels Utilisés Et Leurs Fonctions***

- Fonction **fragmentation** : la vitesse linéaire des outils, leur forme, leur nombre, leur disposition sur le tambour de fraisage, leur usure, interviennent dans la fragmentation des matériaux. Suivant la dureté des matériaux rencontrés, il est nécessaire de changer périodiquement les outils du rotor de fraisage : la régularité de l'épaisseur de retraitement et la qualité de la fragmentation en dépendent. Pour atteindre les objectifs de granularité du matériau fragmenté (valeur de D), certains matériels disposent d'une grille d'écrêtage ou crible qui permet de recycler les éléments trop gros ou plaques d'enrobés issus de la fragmentation de la chaussée (cas de non collage de la couche de roulement à retraiter)
- Fonction **apport d'ajouts liquides** : l'apport d'eau est correctement réalisé et maîtrisé lorsqu'il se fait, comme pour un liant liquide, au moment du

malaxage. L'introduction du liant (émulsion de bitume) se fait directement par une rampe située dans la chambre de la machine de fragmentation ou dans le malaxeur associé. Pour chaque ajout liquide, le débit est assuré par une pompe volumétrique asservie à la vitesse de translation de la machine de fraisage ou de malaxage, ou au poids de matériau retraité mesuré sur un tapis peseur.

- Fonction **malaxage** : la fonction malaxage (homogénéisation) est nécessaire pour mélanger intimement les matériaux, l'eau d'apport et l'émulsion. Elle peut être obtenue par le brassage vertical de l'outil de fragmentation et :
  - soit par un brassage transversal réalisé par les différents transferts du produit,
  - soit par le passage dans un malaxeur associé du type centrale.
- Fonction **compactage** : celle-ci peut être assurée par des cylindres vibrants et des compacteurs pneumatiques.

On peut aussi réaliser, si nécessaire, un enduit de scellement. Cette opération n'est pas indispensable en saison chaude, lorsque le dosage en liant est élevé, ou s'il n'y a pas de risque de pluie forte dans les deux jours suivant la mise sous trafic.

Pour mémoire, mentionnons le fait que la teneur en liant d'ajout peut varier de 1 à 7% de bitume résiduel.

## **- 4.6.6- RETRAITEMENT À FROID PAR DES LIANTS HYDRAULIQUES**

### Principe – Définition

Le retraitement de chaussée par un liant hydraulique consiste à incorporer, au sein du matériau obtenu par fragmentation de l'ancienne chaussée, un liant hydraulique, de l'eau, et éventuellement un matériau complémentaire correcteur, et de les mélanger intimement, en place, jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène. Le mélange, après le phénomène de prise, acquiert des performances à l'usage auquel il est destiné.

L'exécution des travaux intègre différentes opérations faisant appel une ou plusieurs machines. L'énumération suivante correspond à un ordre chronologique ou à une réalisation obligatoire :

1. reprofilage de la chaussée à retraiter,
2. ajout de matériaux pour apport complémentaire,
3. apport de liants hydrauliques sous forme pulvérulente ou sous forme de suspension (eau + liant hydraulique),
4. fragmentation de l'ancienne chaussée,

## 5. malaxage des matériaux et du liant avec apport d'eau

On réalise ainsi une nouvelle assise de chaussée sur laquelle on applique, soit une couche de roulement seule, soit une couche de base et une couche de roulement, si la partie retraitée ne peut à elle seule supporter les sollicitations induites par le trafic

### **Domaines d'emploi**

La technique du retraitement de chaussée par un liant hydraulique est utilisée pour la réhabilitation des chaussées anciennes présentant un déficit structurel.

Toutes les structures routières (route nationale, aéroportuaire, départementale, voiries rurales et communales, autoroute, zone portuaire...) peuvent être concernées par cette technique.

### **Avantages et limites de la technique**

Le retraitement en place aux liant hydrauliques est une technique connue depuis les années 1950. Elle présente de nombreux avantages environnementaux, techniques et économiques, mais aussi quelques limites

#### **Avantages**

*avantages environnementaux* : même remarque qu'au chapitre précédent

*avantages économiques* :

1. Une technique à l'échelle locale : les liants hydrauliques sont disponibles localement et la plupart des entreprises routières disposent de matériels adaptés à ce type de travaux.
2. Economie de transport de matériaux : c'est une technique qui valorise les matériaux du site. Elle réduit l'apport de granulats (coût de fabrication et de transport). Elle évite le rehaussement des abords (accotements et trottoirs)
3. Préservation du réseau routier situé au voisinage du chantier : réduction du tonnage de granulats transportés.

#### **Limites de la technique**

Les limites de la technique de retraitement, si les matériaux suivants ne sont pas éliminés par purge, sont :

- la présence de pavés ou de structures en béton, ou de matériaux trop gros, constitue des obstacles pour le passage des machines de retraitement. Les technologies actuelles permettent le retraitement de matériaux dont la dimension du plus gros

élément est inférieure à 80 mm.

- la présence de produits qui pourraient perturber la prise des liants hydrauliques ou qui génèreraient des gonflements (les nitrates, les sulfures, les sulfates...).

#### **-4.6.6.1- Les Matériels Et Leur Fonctions**

##### Fonction fragmentation

- La vitesse linéaire des outils, leur forme, leur nombre, leur disposition sur le tambour de fraisage, leur usure, interviennent dans la fragmentation des matériaux. Suivant la dureté des matériaux rencontrés, il est nécessaire de changer plus ou moins fréquemment les outils du rotor de fraisage : la régularité de l'épaisseur de retraitement en dépend.
- Pour atteindre les objectifs de granularité du matériau fragmenté (valeur de D), certains matériels disposent d'une grille d'écrêtage ou crible qui permet d'éliminer les éléments > D.

##### Fonction apport de liant

La fonction apport de liant peut être réalisée de trois manières différentes :

- Par apport de liant pulvérulent à la surface de la chaussée à l'aide d'un épandeur devant la machine de fragmentation,
- Par apport de liant pulvérulent à l'aide d'une trémie installée sur la machine multifonctions immédiatement devant le rotor de fragmentation,
- Par introduction du liant sous forme de suspension (eau + liant hydraulique) préparée dans un mélangeur mobile et injectée directement par une rampe, soit dans la chambre du rotor de fragmentation, soit dans la chambre de malaxage de la machine multifonction. Dans ce cas, la quantité d'eau est contrôlée par un débitmètre, le liant hydraulique par contrôle pondéral, et la suspension par une pompe volumétrique.

Quelque soit la méthode, la protection de l'environnement aux poussières de liant doit être assurée par des dispositifs appropriés sur le matériel ou sur le liant (par exemple : liant à émission de poussières réduite...).

##### Fonction malaxage

La fonction malaxage peut être réalisée verticalement dans le sens de l'épaisseur de la chaussée (rotor de fraisage).

Elle peut être réalisée suivant le sens vertical et le sens horizontal de la chaussée, dans le cas où un malaxeur du type centrale de fabrication de grave traitée est associé au rotor de fraisage (machine multifonction).

## Fonction apport d'eau

Si une humidification des matériaux à retraiter est nécessaire :

- l'apport d'eau totale ou complémentaire au mélange (matériau + liant hydraulique) par une aroseeuse devant la machine de fragmentation ou de malaxage est interdit, car il est générateur d'hétérogénéités (mauvaise homogénéité du mélange, ruissellements, mauvaise maîtrise du dosage en eau...).
- l'introduction d'eau se fait directement par une rampe de pulvérisation située au dessus du rotor de fraisage de la machine de fragmentation ou dans le malaxeur associé dans le cas de la machine multifonction.
- Le débit d'eau est assuré par une pompe volumétrique asservie à la vitesse de translation de la machine.

Sur les machines de fragmentation, il est nécessaire de disposer d'une rampe à largeur de pulvérisation variable et à contrôle de fonctionnement des jets afin d'éviter les sur- ou sous- dosages en eau lorsque le profil transversal hydrique du matériau est hétérogène ou en cas de recouvrement de bandes de retraitement.

## **- 4.7- L'EAU DANS LES TERRASSEMENTS ET SUR LES CHAUSSÉES**

L'examen de ces points doit être fait lors de l'étude hydrogéologique, géotechnique, et géologique, lors des études d'avant-projet sommaire et d'avant-projet détaillé. Les résultats conditionnent, et le coût des travaux, et la structure de chaussée retenue, ainsi que le tracé routier.

### **- 4.7.1- L'EAU DANS LES SOLS:**

Que ce soient pour des raisons météorologiques, ou hydrogéologiques, l'eau rend très vite un chantier impraticable, et, outre la gêne occasionnée par la boue et les enlissements, conduit l'ingénieur de chantier à utiliser, par exemple, de la chaux pour assécher la zone de travail. Ne seront abordées dans ce chapitre que l'impact de l'eau sur les sols et les chaussées en examinant :

- 1 L'action mécanique de l'eau,
- 2 Les moyens de traiter les eaux de ruissellement par l'assainissement,
- 3 Les moyens de capter les eaux infiltrées par le drainage,

## **- 4.8- ACTION DE L'EAU SUR LES SOLS**

Elle peut favoriser le compactage des sols, en leur conférant une teneur en eau optimale (essai Proctor). Les conséquences pour les chaussées sont importantes car les couches inférieures au contact d'un sol partiellement argileux peuvent être

polluées par des remontées de matériaux fins de ce sol, sous l'effet du trafic et de l'eau.

- Les chaussées de type souple (qui constituent l'essentiel du réseau secondaire) sont souvent sous-dimensionnées par rapport au trafic qui les emprunte aujourd'hui et très sensibles à des variations de portance du sol support. Elles peuvent alors se déformer (affaissement, orniérage) ou se fissurer suite à un phénomène de fatigue dû à une déformabilité excessive du sol support en présence d'eau
- Les chaussées de type rigide (graves hydrauliques, béton), correctement dimensionnées, sont moins sensibles aux variations de portance du sol, mais leur durée de vie s'en trouve diminuée

#### **- 4.8.1- ACTION DE L'EAU SUR LES MATÉRIAUX DE CHAUSSÉES**

Outre son effet sur la portance des sols, l'eau peut nuire au comportement des matériaux constitutifs des chaussées:

- Attrition des granulats : sous l'action des charges circulant sur la chaussées, il se produit des (faibles) déplacements des granulats les uns par rapport aux autres, dans les couches de graves non traitées. Une usure par frottement en résulte, appelée attrition, qui entraîne la production de matériaux fins, arrondit les arêtes des granulats, et diminue la stabilité de la couche. Des essais en laboratoire (essai Deval « sec » et Deval « humide »), et les constats effectués sur le terrain montrent que cette attrition est accentuée par la présence d'eau
- Influence sur l' « adhésivité » des liants bitumineux : les couches de chaussée utilisant des liants « noirs » comme le bitume présentent une autre faiblesse en présence d'eau. De manière générale, l'eau a un pouvoir mouillant supérieur à celui du bitume, qui est un liquide à viscosité élevée. Elle peut se glisser à l'interface entre granulat et liant, et conduire au désenrobage des granulats. L'eau, par ce mécanisme, provoque une perte de résistance mécanique de la couche liée (parce les granulats ne sont précisément plus liés. La tendance actuelle est l'emploi de dopes d'adhésivité, et la mise en œuvre de granulats très compacts pour empêcher la pénétration de l'eau.

#### **- 4.8.2- ORIGINES DE L'EAU PRÉSENTE**

La conduite à tenir est de diminuer l'arrivée d'eau, et de faciliter son départ. Encore faut-il savoir par quelle voie elle pénètre.

##### ***a) Infiltration par le haut***

Contrairement à ce qui a longtemps été pensé, c'est l'origine la plus fréquente et souvent la plus importante des venues d'eau. Bien que, de visu, les revêtements semblent imperméables, leur étanchéité n'est approximative. Il existe presque partout de petites ou grosses fissures laissant pénétrer l'eau.

##### ***b) Infiltration et capillarité latérale***

Il arrive fréquemment que les écoulements des fossés ne soient pas convenablement assurés ou momentanément obstrués (accumulation de neige, par exemple). L'eau qui stagne dans le fossé peut d'autant plus facilement s'infiltrer jusqu'à la chaussée ou juste sous elle, que le projecteur a prévu des dispositifs évacuant vers le fossé, les eaux qui pourraient avoir atteint la chaussée. Autrement dit, si le fossé ne joue pas son rôle évacuateur, et si au contraire de l'eau y séjourne, le drainage fonctionne « à l'envers ».

#### c) Capillarité à partir de la nappe

Un sol suffisamment fin (limon, argile) possède de fortes propriétés capillaires, qui font remonter l'eau de la nappe phréatique. Cette ascension est créée par l'existence de la tension inter faciale. La hauteur totale d'ascension capillaire dépend de la granulométrie et de l'indice des vides

:

### **- 4.8.3- COMMENT EMPÊCHER L'EAU D'ENTRER DANS LES CHAUSSÉES ?**

La protection de la chaussée doit être recherchée :

- Dans les dispositions générales du projet
- Dans la conception de la chaussée
- Dans le choix des ouvrages d'évacuation des eaux superficielles, et des eaux internes.

On évitera, par exemple, d'implanter une chaussée au niveau du sol si les écoulements sont difficiles et le terrain humide, ou proche d'une nappe.

On retiendra des pentes de terrassement plus importantes dans le cas des sols sensibles à l'eau.

#### a) Imperméabiliser la surface de la chaussée

Les chaussées souples ou semi-rigides comportent à leur surface, soit un enduit superficiel, soit une couche de surface plus ou moins épaisse en enrobés. L'enduit superficiel utilisé sur les chaussées les moins circulées, s'il repose sur des matériaux peu déformables, et s'il est assez fréquemment renouvelé (au moins tous les sept ans), est en général imperméable ; le vieillissement du liant, le décrochage de certains gravillons (plumage) le rendent cependant peu à peu poreux, d'où la nécessité d'un renouvellement ?

Pour les chaussées plus circulées, on utilise souvent en technique de couche de surface des enrobés à chaud. Ces matériaux sont considérés comme étanche lorsque la teneur en vide n'excède pas 5 à 6% (soit une compacité de l'ordre de 95%). Dans le cas de chaussées très circulées, cette exigence peut remettre en cause la tenue à l'orniérage du mélange, ou encore ses caractéristiques vis-à-vis de la glissance. On peut alors être amené à réaliser la couche de surface en deux sous-couches, avec une couche de roulement très rugueuse (mais pas toujours étanche), reposant sur une couche étanche constituée par un enrobé à chaud, ou par une étanchéité de type enduit superficiel (couche de liant bitumineux de 1 à 1.2 mm d'épaisseur.

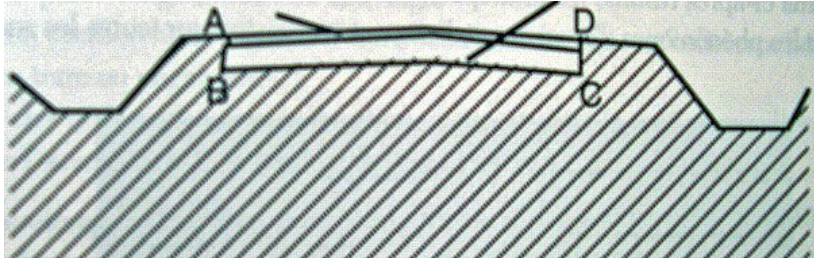
#### b) Imperméabiliser les accotements



Cette pratique onéreuse est intéressante est fort utile. Faut de pouvoir imperméabiliser la totalité de l'accotement, on peut utilement revêtir une petite partie (de 0.50 à 1m). En tout état de cause, la pente transversale de l'accotement est en général de 4%, pour faciliter l'écoulement des eaux de pluie.

c) Eviter les « pièges à eau »

On construit un tel piège lorsque l'on établit, comme autrefois, la chaussée dans un encaissement (figure ci-dessous). Il faut aux points C et B trouver une évacuation vers le fossé



## - 4.9- RÉCUPÉRER ET ÉVACUER LES EAUX DE SURFACE: L'ASSAINISSEMENT ROUTIER

Tout ouvrage routier comporte un réseau d'assainissement dont le rôle est de récupérer et d'évacuer toutes les eaux de ruissellement. Ce réseau pourra aller du simple fossé jusqu'à des installations très sophistiquées, capables de traiter des eaux provenant de la plate forme, ou de récupérer une éventuelle pollution accidentelle.

Deux principes guident le projecteur :

- Rejeter, autant que possible, les eaux hors de la plate forme afin de diminuer le débit à faire passer dans les ouvrages
- Utiliser, au maximum, les ouvrages superficiels aux coûts d'investissement et d'entretien plus faibles que les ouvrages enterrés.

En outre, il tient compte d'un certain nombre d'autres impératifs :

Des impératifs hydrauliques : dans le cas de pentes faibles (1%) ou fortes (3.5-4%), on emploiera de préférence des ouvrages revêtus ainsi que dans toutes les zones où l'on désire éviter les infiltrations. La capacité d'écoulement des différents types d'ouvrages fait appel à la formule de Manning-Strickler qui permet de calculer un débit à partir de :

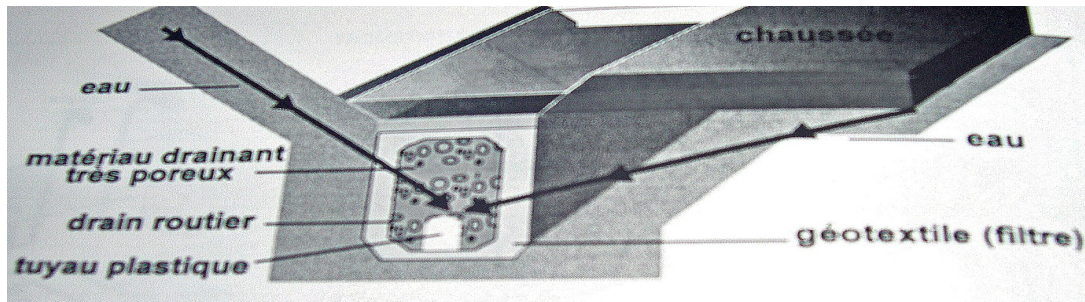
1. La pente longitudinale de l'ouvrage,
2. Un coefficient de rugosité (l'eau s'écoule mieux dans un collecteur bétonné que dans un fossé en terre
3. Des notions de rayon hydraulique (rapport entre la section mouillée et le périmètre mouillé de l'ouvrage) et de la section de l'écoulement.

Les « Abaques de Calcul des Ouvrages Superficiels et Enterrés » (ACOSE) diffusés par le CETE de Lyon permettent de réaliser simplement ces calculs.

## - 4.10- ÉVACUER L'EAU QUI EST ENTRÉE: LE DRAINAGE

### - 4.10.1- PRINCIPE ET CONCEPTION DU DRAIN

Il est connu depuis très longtemps avec la réalisation de pierres sèches ou des galets. En fait, ce système qui fonctionne remarquablement bien au début a pour inconvénient de se colmater avec les matériaux fins circulant avec l'eau. Un progrès décisif a été réalisé avec l'invention des géotextiles il y a une trentaine d'années. Il consiste en une « couverture » de fibres synthétiques, en général non tissées, qui a le pouvoir de laisser passer l'eau, mais de retenir les fines à la manière d'un filtre. Ceci est illustré par la figure ci-dessous



Principe du drain. Il permet de récupérer les eaux circulant à l'intérieur des sols

## **- 5- CHAPITRE 5**

**LES MATERIAUX INNOVANTS ET A  
HAUTE PERFORMANCE**

**OU**

**POUR UNE PLUS GRANDE DURABILITE  
DES OUVRAGES EN BETON DANS LE  
DOMAINE DU BTP**

## - 5.1- LES BÉTONS HAUTES PERFORMANCES (BHP)

### - 5.1.1- GÉNÉRALITÉS

Le béton a suscité au cours de ces quinze dernières années un vaste élan de recherche technologique et scientifique, notamment en France dans le cadre des projets nationaux. Les BHP ont aussi connu leurs premières applications sur le territoire au milieu des années 1980, dans le domaine des ouvrages d'art. Pionnière en la matière, la France s'est illustrée dès l'origine par la réalisation de structures exceptionnelles, mais aussi par la volonté de banaliser l'emploi des BHP à travers la réalisation d'ouvrages courants, et d'exploiter la totalité des propriétés physico mécaniques de ce nouveau matériau.

En effet, les bétons à haute performance possèdent de nombreux avantages par rapport aux bétons traditionnels :

- 1 Durabilité supérieure vis-à-vis des agressions physico-chimiques : moindre perméabilité, protection des armatures contre la corrosion, pénétration réduite des ions chlorures, moindre développement de l'alcali réaction, résistance aux cycles de gel-dégel...offrant des gains substantiels sur la maintenance à long terme .
- 2 Fluidité du béton à l'état frais facilitant généralement la mise en œuvre, notamment pour l'enrobage de zones à fort taux d'armatures
- 3 Résistance levée au jeune âge, favorisant l'optimisation des cycles de décoffrage et de mise en tension des câbles de précontrainte : donc, gain significatifs sur les délais de construction, générateur d'économies.
- 4 Haute résistance en compression, permettant de diminuer les sections de béton.
- 5 Fluage réduit et plus rapide, propice à un meilleur contrôle géométrique de l'ouvrage.

### - 5.1.2- PRINCIPE GÉNÉRAL, VOIES D'OBTENTION.

L'eau joue deux rôles essentiels dans le béton :

1. Elle participe activement à la maniabilité du béton frais, en lui donnant une rhéologie satisfaisante ;
2. Elle assure l'hydratation du ciment.

Dans les bétons ordinaires, la forte tendance à la floculation des particules de ciment impose une teneur en eau supérieure à celle requise pour l'hydratation du ciment (20 à 40% en plus du volume d'eau initial). Cependant, le retour d'expérience a démontré les conséquences néfastes d'un excès d'eau qui conduit à une perte de résistance et une augmentation de la perméabilité. En effet, selon la formule de Féret, la résistance du béton diminue lorsque augmentent le rapport E/C (eau/ciment) et le volume des vides. La faible valeur de ces deux paramètres conditionne la résistance du béton. C'est pourquoi, pour une meilleure formulation, deux voies d'obtention de nature physico-chimique différentes ont été explorées. La voie des BHP s'est ouverte, d'une part, grâce à l'évolution de la chimie organique (super plastifiants) qui réduisent le dosage en

eau. D'autre part, la reconstitution d'une roche massive a été recherchée à partir de la formulation d'un mélange de très haute compacité incluant des ultrafines. Cette nouvelle génération de bétons se caractérise par un faible rapport pondéral eau/liant ( inférieur à 0.40) et par une microstructure densifiée, dotée d'une porosité très fine et d'un réseau capillaire non connecté.

## - 5.2- LES DEUX DIFFÉRENTES VOIES D'ACTIVITÉ PHYSICO-CHIMIQUES DANS LES BHP

### - 5.2.1- PREMIÈRE VOIE : DÉFLOCCULATION DES GRAINS DE CIMENT

La diminution du rapport E/C nécessite l'adjonction d'adjuvants super plastifiants afin de défloculer des grains de ciment en suspension dans l'eau, qui retrouvent ainsi leur granularité originelle (entre 1 et 50 microns). Leur dispersion contribue à libérer l'eau piégée au sein des flocculats, inutile à la maniabilité du béton. Cette première voie engendre dès lors une réduction sensible de la quantité d'eau de gâchage nécessaire à l'hydratation du ciment, tout en garantissant une ouvrabilité égale ou supérieure à celle des bétons classiques.

### - 5.2.2- DEUXIÈME VOIE: EXTENSION DU SQUELETTE GRANULAIRE

Les performances du matériau peuvent encore être optimisées par l'extension du spectre du mélange granulaire. Celle-ci est rendue possible par l'ajout de particules ultrafines (fumées de silice, additions finement broyées...), souvent chimiquement actives, dont le rôle consiste à remplir les micro vides inter granulaires. Leur emploi aboutit à une plus grande compacité du mélange, tout en assurant une amélioration de sa rhéologie à l'état frais. Ces éléments génèrent par voie de conséquence une réduction supplémentaire de la quantité d'eau. Les fumées de silice (100 fois plus petites que les grains de ciment) constituent l'addition la plus efficace, dans la mesure où elles possèdent également des propriétés pouzzolaniques qui accroissent la résistance du béton.

## - 5.3- LES BHP: FORMULATION ET PROPRIÉTÉS.

### - 5.3.1- LES CONSTITUANTS

**Granulats** : Dans la majorité des cas, les granulats locaux peuvent être utilisés. Si l'on recherche des résistances élevées ( $f_{c28} > 80\text{MPa}$ ), il est recommandé de vérifier par des essais en laboratoire que les exigences sont satisfaites. Selon des recherches les plus récentes, le granulats influence la résistance au travers

de sa forme (qui joue sur la demande en eau), de son adhérence avec la matrice, ainsi que de sa résistance mécanique propre. Souvent, une bonne adhérence est accompagnée d'une résistance du granulat limitée, et vice-versa.

**Ciments** : Sans rentrer dans une terminologie et une nomenclature trop technique, nous nous bornerons à signaler que les ciments utilisés pour les BHP sont généralement des ciments dits de haute performances, de classe 52.5 (ex CPA-CEL I 52.5 ET 52.5 R) . Les hautes résistances mécaniques de ces ciments sont obtenues grâce à une finesse de mouture élevée, compte tenu de la grande surface de contact et de la surface libre qu'ils présentent. Notons que lorsque ces ciments sont fortement dosés ( $>400\text{kg/m}^3$ ), ils entraînent un dégagement de chaleur important au cours du processus d'hydratation (rappelons qu'un ciment Portland dégage approximativement 350 à 400 J/g à 5jj) . Dans le cas de pièces massives, les températures peuvent atteindre 60 à 80°C occasionnant lors du refroidissement un retrait thermique important, d'où la nécessité de précautions spécifiques.

**Additions** : elles peuvent être avantageusement utilisées en remplacement des ciments, de manière à augmenter les performances des BHP. De façon générale, ce sont des poudres plus ou moins réactives de finesse équivalente ou supérieure à celles des ciments courants. On distingue : les cendres volantes (silico-alumineuses), les fillers calcaires, les fillers siliceux, le laitier granulé broyé, les fumées de silice. Leur introduction permet de moduler, à même niveau de résistance mécanique

- le retrait du BHP et sensibilité à la fissuration,
- la durabilité du BHP,
- la résistance au jeune âge,
- la rhéologie,
- l'aspect des parements,
- l'élévation de température.

*Courte remarque sur ce qui est appelé « réactions pouzzolaniques » (du matériau pouzzolane, d'origine volcanique)*

*Il traduit en général la formation de silicate de calcium hydraté (C-S-H) par la combinaison de la silice avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment. Cette réaction permet de remplacer du ciment par les particules d'additions (à dosage en eau fixe puisque l'on forme le même taux d'hydrates). L'effet pouzzolanique est quantifié par un coefficient qui détermine sa contribution à la résistance. Il varie de 0.1 pour les fillers siliceux (très faible activité pouzzolanique) à 2 pour les fumées de silice (1 kg de silice « remplace » 2 kg de ciment).*

**Adjuvants** : Ce sont en général des superplastifiants (appelés aussi fluidifiants), éventuellement associés à des retardateurs. Trois grandes catégories co-existent : les naphthalènes sulfonates, les résines mélamines, et plus récemment les poly-carboxylates.

Ces résines de synthèses, qui sont dopées entre 1 et 3% de la masse de ciment, ont pour effet de défloculer les particules fines (grains de ciment) et ultrafines (fumées de silice). Lors du choix de l'adjuvant, on évitera les produits

trop concentrés ( à 40% d'extraits secs) qui deviennent visqueux en hiver, et difficiles à disperser dans les malaxeurs. Les superplastifiants présentent fréquemment un effet retardateur de prise Ils ont une durée d'action limitée et peuvent donner lieu, dans certain cas, à un raidissement prématuré du matériau frais ; ce phénomène, appelé incompatibilité ciment/adjuvant, pourrait l'expliquer par une perte d'efficacité du gypse chargé de contrôler l'hydratation des aluminates tricalciques. Le raidissement peut être aussi imputable à la nature des éléments fins de certains granulats. Doc, il est fortement recommandé de réaliser une étude préalable de compatibilité ciment / adjuvant afin de prévenir ces inconvénients

## **- 6- CHAPITRE 6**

# Deux outils d'évaluation de la durabilité d'un bâtiment: Le GBTool et la méthode CASBEE

## - 6.1- LE GBTOOL

Il consiste en un outil d'appréciation des performances d'un outil, c'est également un software du GBC(Green Building Challenge), créé en tant que livre de travail dans l'application Microsoft Excel. Il a été développé depuis 1996, et a bénéficié du support, de l'International Initiative for a Sustainable Built Environment (IISBE), au Canada.

Il consiste en critères dans les domaines principaux environnementaux, sociaux, et économiques, et est utilisé dans les phases-clés de la préconception, de la conception, de la construction. La consommation de ressources, les charges



environnementales et la qualité de l'environnement intérieur sont le « noyau dur » de l'outil

Il s'agit d'une notation par critères, avec pondération. Le score final dérive de l'agrégation pondérée de quatre niveaux, sous critères, critères, catégories et zones de performance, qui font partie des exigences centrales :

D. Qualité de l'environnement intérieur – Zone de performance

D4 Eclairage journalier et bonne luminosité – Catégorie

D4.1 Facteur « lumière du jour » - Critère

Pourcentage de DF ( Daylight factor » - Sous critère)

Naturellement, les critères donnés précédemment ne sont pas les seuls, mais tiennent beaucoup à cœur des gouvernements suédois et canadien qui utilisent cet outil. Pour avoir une idée générale du fonctionnement de GBTool, considérons le cas du complexe de logement de plusieurs familles, en en donnant la grille d'appréciation dont la synthèse est donnée page suivante.

Aspects	Poids de pondération	Scores pondérés
A Choix du site, planification du projet et développement	13%	-0.3
B Consommation d'énergie et de ressources	21%	0.0
C Charges environnementales	21%	4.1
D Qualité environnementale intérieure	21%	1.7
E Fonctionnalité et contrôlabilité du système construit	13%	1.7
F Performance à long terme	13%	5.0
G Aspects socio-économiques	-	-
SCORE DE CONSTRUCTION PONDERE		2.0

Il a été procédé par questionnaires, interviews, observation sur le terrain, et mesures. Pour ce qui concerne les questionnaires, une centaine ont été distribuées. Les interviews ont été menées avec les architectes, les constructeurs, et un représentant du maître d'ouvrage.

## - 6.2- CASBEE (COMPREHENSIVE ASSESSMENT SYSTEM FOR BUILDING ENVIRONMENT EFFICIENCY)

L'outil CASBEE a été développé dès 1990 par le Japan Sustainable Building

Consortium (JSBC), et appliqué principalement pour des projets domestiques japonais. Il ne s'applique pas qu'à la construction nouvelle : la boîte à outils qu'il constitue va de l'avant-projet de construction à la rénovation de bâtiments.

Par souci de concision, nous ne nous intéresserons ici qu'à l'outil applicable à la construction nouvelle.

## - 6.2.1- TYPES DE BÂTIMENTS TRAITABLES PAR L'ÉVALUATION CASBEE POUR LA CONSTRUCTION NOUVELLE

les types de bâtiment concernés sont divisés grossièrement en « non-résidentiels » et en « résidentiels », selon leur fonction. **A noter, en ce qui concerne les immeubles résidentiels, que les domiciles ne sont pas concernés.**

## - 6.3- CRITÈRES DE NOTATION (SCORE)

CASBEE différencie les scores pour Q (Qualité : la qualité environnementale et les performances, en ce sens, du bâtiment), et L (pour loadings= charges environnementales pesant sur le bâtiment), et donne une évaluation de l'efficacité environnementale du bâtiment (BEE), comme indicateur fondé sur les résultats obtenus pour Q et L. L est d'abord évalué comme LR (Load Reduction) Cette approche est employée parce que des notes plus élevées pour améliorer la qualité de réduction de la charge sont plus facile à comprendre que des notes plus élevées pour la réduction de la charge » comme système d'évaluation, de la même manière que des amélioration dans la qualité et la performance font gagner des points

## - 6.4- CONFIGURATION DE BASE DE CASBEE

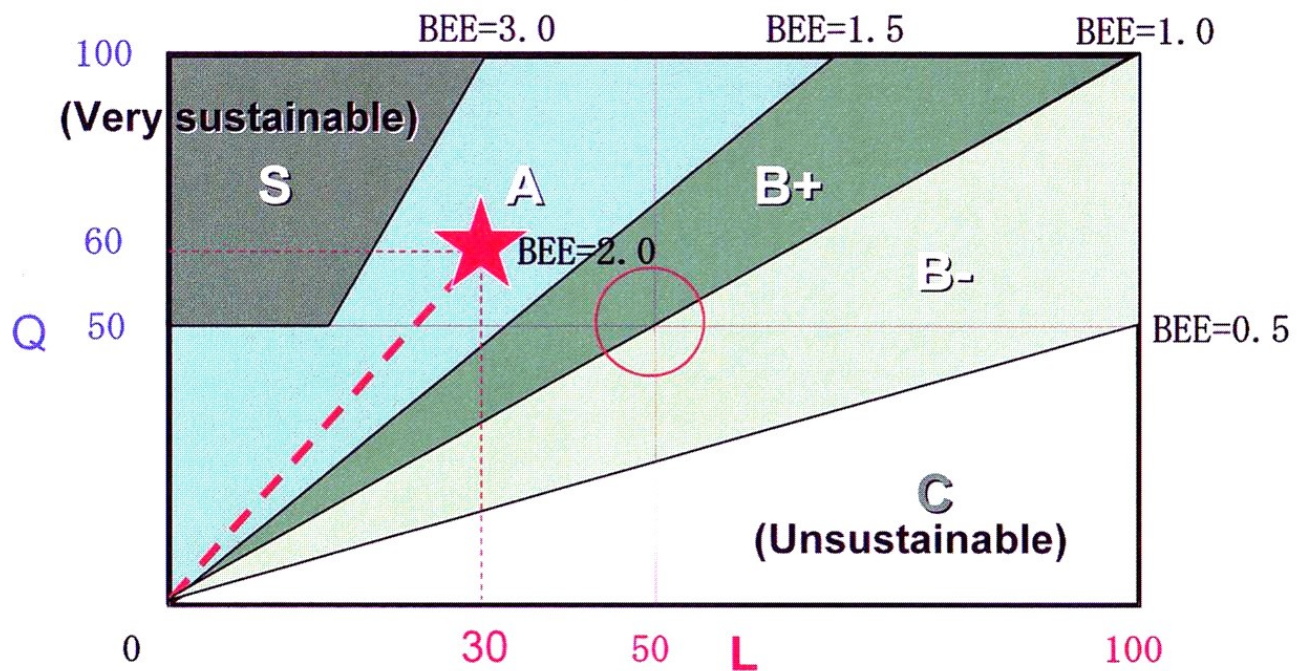
(N.B. : pour chacune des catégories –Q.1, Q.2- mentionnées, beaucoup de sous-catégories existent, dont nous ne ferons que signaler l'existence)

Le BEE (Building Environmental Assessment) est calculé à partir de Sq et de Slr, les notes pour Q et LR, suivant la formule:

$$\text{BEE} = \frac{\text{Q: qualité et performance environnementale}}{(\text{Sq} - 1)} = \frac{25 \times \text{L}}{25 \times (5 - \text{Slr})}$$

Pa

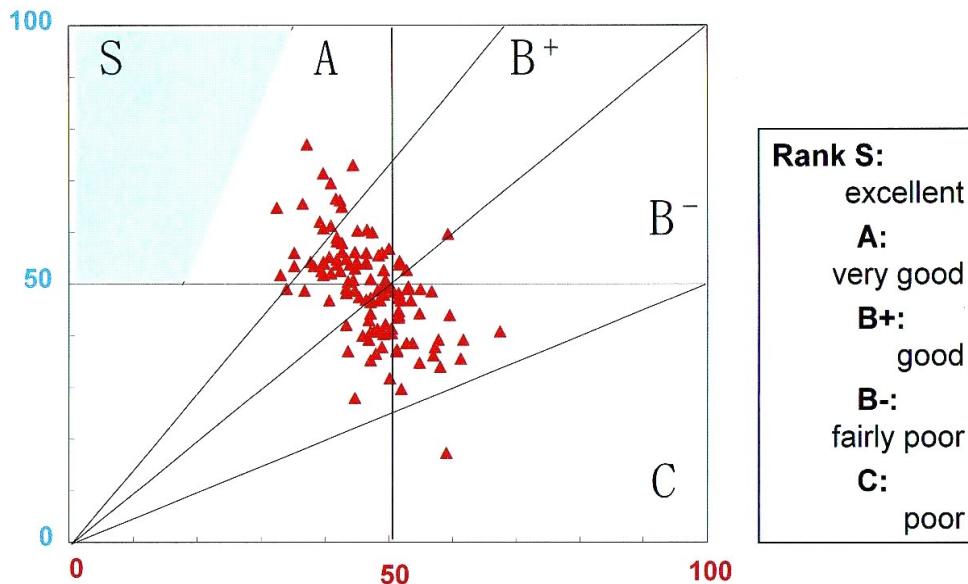
Avec L sur l'axe des x et Q sur l'axe des y, on obtient le graphique page suivante, délimitant les zones d'intérêt particulier



Graphique indiquant les zones de « durabilité » et de « non durabilité » du bâtiment. La zone C ( $BEE < 0.5$ ) correspond à une situation non durable, tandis que la zone S ( $Q > 50$ , c'est-à-dire, avec les conventions utilisées par l'auteur,  $Q > 2.5$ ) et  $BEE > 3.0$ , à une zone très favorable à la durabilité du bâti.

Remarquons que Q prend les valeurs de 1 à 5, de même que L. La structure de la formule en fraction donnant BEE montre qu'il est croissant selon que Sq (score de bonne qualité environnementale) augmente, et qu'il croît également, à Sq donné, quand 5 - Slr est grand, c'est-à-dire que la réduction des nuisances environnementales du site fait l'objet d'efforts soutenus.

Il existe évidemment un champ, le champ Q1, concernant l'environnement intérieur, mais il semblerait, si l'on en croît la documentation en ligne sur internet, que cet aspect fait figure de parent pauvre, face aux autres. Peut-être est-ce là une spécificité locale, et la volonté de laisser aux occupants des logements (pour ce secteur, du moins), d'être responsable de l'aménagement de leur intimité .



Ce graphique illustre le résultat de 80 projets soumis, pour des surfaces au sol de plus de 2000 m<sup>2</sup>

**En conclusion**, nous dirons que :

- le GBTool paraît être une analyse multicritère déguisée, avec des coefficients de pondération difficiles à justifier, mais présente deux avantages :
- Il y a enquête tripartite, qui permet de tirer des conclusions pertinentes, si les coefficients dont il est fait mention plus haut n'altèrent pas le résultat final
- Il y a une réelle préoccupation pour le confort de l'habitat (lumière du jour, éclairage, etc.).

la méthode CASBEE paraît plus solide, et se fonde sur un outil qui est astucieux, mais on peut lui adresser deux reproches :

- 1 L'évaluation se fait par des experts, sans que dialogue il y ait entre les enquêteurs et les utilisateurs.
- 2 Peu de place est faite, dans l'évaluation, sur le confort intérieur D'ailleurs, les quatre sous rubriques composant la catégorie Q1 se bornent à évaluer :

- les nuisances acoustiques
- le confort thermique
- l'éclairage
- la qualité de l'air,

et le champ d'investigations laissées pour chacune de ces sous-catégories est plus que laconique.

Il serait plus que souhaitable qu'une méthode s'inspirant de CASBEE, et adaptée à nos climats, notre typologie très variée d'habitats et de bâtiments publics, voie le jour en Europe, et puisse faire l'objet d'un outil de travail qui serait une aide essentielle pour le concepteur, l'architecte, le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage. En effet, un résultat d'évaluation jugé plus que moyen par cette méthode serait une incitation à plus de prudence dans la construction.

## **- 7- CHAPITRE 7**

# CONCLUSIONS GENERALES SUR L'ENSEMBLE DES POINTS TRAITES ET SYNTHESE

## **- 7.1-** REMARQUES SUR LA DÉFINITION DE L'ÉNERGIE GRISE

### **- 7.1.1-** L'ÉNERGIE GRISE COMME REFLET DE L'ACTIVITÉ HUMAINE, ET DU MODE ET DES HABITUDES DE VIE ET DE CONSOMMATION

Hors de sa vie « sociale », l'individu conçoit ou choisit son mode d'hébergement en

fonction de son niveau social et de la culture dont il est imprégné : on ne peut pas systématiser un jugement entre les modes de vie à l'européenne, à la japonaise, ou outre-Atlantique. A chaque culture son mode d'habitat, son mode d'alimentation, son « empreinte écologique », et son respect de l'environnement.

Toutefois, deux limites ont été atteintes, voire franchies :

- d'une part, et chacun en est conscient, ou devrait l'être, le temps n'est plus aux propos s'inspirant d'une autre époque - « après moi, le déluge »- depuis la diffusion et la pérennisation du rapport Brundtland. Chacun doit avoir conscience de la valeur ajoutée possible qu'il est en mesure d'apporter pour laisser, dans une planète qui se peuple de façon critique, un cadre de vie « acceptable » aux générations à venir.

- d'autre part, le mode ultra-consumériste en énergies fossiles nous fait aujourd'hui atteindre un niveau qui nous oblige à repenser radicalement nos habitudes d'usage et d'économies de celles-ci.

Le concept d'énergie grise contient un épithète qui traduit assez bien ce qu'elle est : c'est cette énergie cachée, discrète, qui, en fin de compte, traduit la véritable valeur d'un produit.

Le vice de forme de la question : « quelle est l'énergie grise de ceci », qu'on ne peut qu'admettre que parce que, comme toute grandeur physique extensive, l'énergie est somme des énergies de ses constituants. On est alors tenté d'oublier l'hétérogénéité de ceux-ci, dont la durée de vie n'est pas la même. Aussi ne convient-il pas vraiment – même si la pratique est courante – d'associer des matériaux temporellement « durables » à d'autres, qui nécessitent un renouvellement et une maintenance soutenue. Naturellement, pour certaines de leurs qualités (isolation thermique, acoustique, résistance mécanique), certains matériaux méritent d'être utilisés, tels le bois dans la construction pavillonnaire. Mais associer des matériaux performants (donc à priori coûteux en énergie grise) à des produits peu onéreux, mais de qualité inférieure, est une mauvaise pratique.

### **- 7.1.2- L'ÉNERGIE GRISE : UN CONCEPT NON MONÉTARISABLE**

POUR ILLUSTRER CET ASPECT PARTICULIER, NOUS NOUS SOMMES PERMIS DE REPRODUIRE ICI UN TEXTE ISSU D'UNE RECHERCHE INTERNET :

#### ***ANALYSE ANECDOTIQUE – AUTRE APPROCHE DE L'ENERGIE GRISE***

## « Qu'est-ce que l'énergie grise? »

« L'énergie grise d'un produit (ou d'un service), c'est l'énergie cachée, c'est l'énergie qu'il a fallu pour fabriquer, emballer, distribuer puis éliminer un produit. L'énergie grise est omniprésente, même dans un légume puisqu'il a été transporté jusqu'au lieu de vente. Un kilo de haricots frais d'Égypte est peut-être moins cher que le même kilo venant de Suisse mais l'énergie grise qu'il contient due au transport par avion est douze fois plus élevée.

Faut-il jeter ses vieux appareils ?

Pas forcément, car plus longtemps nous nous servons des vieux appareils, plus l'énergie grise contenue dans ces derniers sera rentabilisée. Les marchés de l'occasion, les puces, les magasins de 'second hand', sont autant de lieux qui favorisent la réutilisation des produits. Aussi, un objet récupéré pendant les encombrants verra son énergie grise et sa matière sauvées de l'incinération. Cependant, si l'appareil neuf consomme beaucoup moins d'énergie que l'ancien, cela peut valoir la peine d'acheter du neuf, car même s'il faut de l'énergie grise pour fabriquer le nouvel appareil, elle sera amortie (énergétiquement) après un certain temps par les économies faites sur la consommation. »

Vieil appareil	Nouvel appareil	Durée de l'amortissement
Frigo	Frigo moderne	6 mois
Ampoule à incandescence	Ampoule économique	150 heures
Aspirateur	Aspirateur moderne	19 ans

Il convient toutefois de nuancer cette analyse par approche d' « amortissement ». En effet, si un logement représente un investissement en énergie grise I, et si, pour simplifier les choses, les coûts concomitants en énergie (chauffage, réfection, réparation, maintenance) représentent une dépense énergétique moyenne C annuelle, il est clair qu'on peut définir une durée de vie du logement par la simple relation : **Durée de vie = I/C.**

On ne doit pas s'obstiner à réhabiliter ce qui n'est, d'un point de vue matériel et physique, plus réhabilitable, sauf cas exceptionnels (patrimoine, monuments classés, qui font partie de ce dont nous avons hérité et que nous laisserons comme héritage).



### ***-7.1.2.1- Remarques Sur Le Cycle De Vie D'un Logement***

En examinant une structure telle qu'un bâtiment comme un système clos, et en le suivant « from cradle to grave » (du berceau au tombeau), on peut distinguer trois phases:

1. la naissance, au cours de laquelle la quasi-totalité de l'énergie grise est incluse dans la structure bâtie,
2. l'usage normal du bâtiment, avec injections d'intrants, plus ou moins riches en énergie grise,
3. la mort du bâtiment, avec une démolition et des techniques de plus en plus sophistiquées de tri et de matériaux-déchets orientés sur un recyclage quasiment complet.

On pourrait rêver d'injecter à nouveau ces matériaux recyclés, mais il existe un stade dit de déchets ultimes, ou les propriétés physico-chimiques de ceux-ci empêchent toute réutilisation. Dans le meilleur des cas, ils représentent au moins 10% de la masse totale de matériaux recyclés initiaux.

Il y a donc nécessairement utilisation des ressources du sous-sol, même en quantités allant décroissant, pour construire dans les règles de l'art.

### **- 7.1.3- REMARQUES SUS LES TENDANCES CONTEMPORAINES DE L'URBANISME ET SUR LES DÉPENSES EN ÉNERGIE GRISE**

Posséder et occuper, à titre de résidence principale, un logement dans une capitale, devient un luxe que de moins en moins de « happy few » peuvent s'offrir. On assiste à la formation, douce ou discontinue, de zones péri-urbaines, de banlieues, dont certaines sont des poches de relégation. Indépendamment des problèmes sociaux ou sécuritaires que cette situation pose, et posera encore, on constate (peut-être conformément aux souhaits des élus locaux, la création d'une véritable toile d'araignée qui se tisse plus rapidement que ne croît l'accessibilité à certains lieux (centres commerciaux, lieux de travail...); le recours à la voiture est nettement plus accentué devient alors beaucoup plus net que dans les capitales, où les conditions de circulation ont empiré au point de rendre la majorité des citoyens adeptes des transports en commun.

Cette grande liberté de l'emploi du véhicule ne va pas sans consommation de carburant (donc d'énergie grise), et cette tendance va croissant...jusqu'où ?

### **- 7.1.4- REMARQUE CARICATURALE SUR LES LIMITES D'ENTRETIEN D'UNE CHAUSSÉE MAL CONÇUE.**

Ce paragraphe ne vise qu'à montrer, sous forme de cas d'école, l'importance de la conception en bureau d'étude d'une chaussée, et l'exemple choisi ne saurait être issu du catalogue des routes du SETRA !

Prenons l'exemple d'une couche de surface en béton bitumineux, reposant sur une couche d'assise en grave non traitée. En présence d'infiltration d'eau, autant en

surface que par les accotements, la couche de surface ne va pas tarder à se lézarder sous l'effet du trafic, ce qui augmente la tendance à l'infiltration. La grave humide va « jouer », ce qui accroît la déformation de la chaussée, et les contraintes induites endommageront de plus belle la couche de surface en béton bitumineux. Un recours peut exister, par réfection à froid – que nous avons tenté de décrire – mais cette réfection ne sera, si les choses restaient en état, que le début d'une longue série de réhabilitations.

Ainsi, l'entretien (coûteux en énergie grise), de la chaussée, sera cumulativement ruineux. De sorte que tous les arguments sont alors favorables à la destruction de la chaussée, et à la reprise, à l'état initial, d'un chantier destiné à la réalisation d'une chaussée bien conçue.

### **- 7.1.5- REMARQUES SUR L'ASSAINISSEMENT ET LE DRAINAGE DES ROUTES ET AUTOROUTES.**

Il a été vu, dans un précédent chapitre, l'importance et le grand nombre de dispositions et équipements à réaliser, pour qu'un chantier soit praticable malgré la présence d'eau, et pour qu'une route reste le plus longtemps possible praticable malgré les pluies ou autres apports d'eau. Les dimensionnements et la construction des chaussées s'en trouvent modifiées, souvent avec usage de matériaux riches en énergie grise (bitume pour les accotements, béton et géotextiles pour les drains, contraintes d'épuration des bassins récoltant les eaux chargées en substances polluantes, consommation d'énergie grise pour les engins de chantier appropriés dévolus à cette tâche).

L'exemple que nous avons donné pour en faire ressortir sinon des données chiffrées acceptables, du moins des ordres de grandeur, était un cas d'école ne prenant pas en compte l'ensemble des contraintes pesant sur la construction de la route. C'est pourquoi le chiffre avancé pour l'énergie grise par km de route est nettement sous-évalué.

## **- 8- ANNEXE 1**

# ANNEXE D'APPROFONDISSEMENT SUR UNE VISION D'ENSEMBLE DES TECHNIQUES D'ANALYSE DU CYCLE DE VIE

## **- 8.1-** L'INTERPRÉTATION DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE

L'interprétation vise retirer des conclusions sûres de l'analyse. Il faut donc analyser les résultats, établir des conclusions et expliquer les limites de l'analyse réalisée.

Il faut également fournir des résultats transparents, conformes à la définition du champ d'études, complets et aisés à comprendre.

Dans le cadre d'une analyse du cycle de vie, le processus employé est aussi important que le résultat final, il faut donc laisser ce processus ouvert et compréhensible pour laisser au lecteur la possibilité de juger de l'apport de l'analyse réalisée.

L'interprétation doit également mettre en avant les méthodes de vérification employées et doit clairement établir les limites de l'étude.

### **- 8.1.1-** OUTILS D'ANALYSE DES RÉSULTATS

#### **-8.1.1.1-** *Analyse De Contribution*

Calcul la contribution d'un paramètre d'entrée par rapport à un paramètre de sortie. Cette analyse peut se faire par rapport à l'inventaire, à la caractérisation ou à l'indicateur unique s'il a été calculé. Il va ainsi être possible de ressortir des pourcentages de contribution, permettant de s'assurer que les résultats sont cohérent et de ressortir les processus et les éléments qui contribuent le plus au cycle de vie.

Ceci va permettre d'évaluer quels intrants et quels processus sont les principales sources de l'impact environnemental. Il n'est pas rare que parmi des centaines de processus élémentaires, quelques uns seulement représentent plus de 80% des impacts, se rapprochant ainsi de la loi de [Pareto](#). Ressortir ces processus fourni des indication précieuses sur les éléments à améliorer dans le système étudié.

#### **- 8.1.1.1.1- ANALYSE DE DOMINANCE**

Calcul utilisant des outils statistiques ou de ranking permettant de ressortir les contributions significatives ou remarquables (consiste généralement à faire des catégorie de contribution allant de forte à faible et de classer chaque étape du processus dans ces catégories.)

#### **- 8.1.1.1.2- ANALYSE D'INFLUENCE**

Analyse visant à voir la possibilité d'influencer un aspect environnemental et son impact sur l'analyse complète.

### **-8.1.1.2- Outil De Vérification**

L'objectif est d'assurer le complétude, la cohérence et la stabilité des résultats. Pour cela, plusieurs étapes sont à réaliser :

#### **- 8.1.1.2.1- ÉTUDE DES SOURCES D'INCERTITUDES**

Il faut regarder la variabilité des paramètres en fonction de l'espace, du temps, des relations entre sources et objets. La précision des données, le fait d'avoir des données manquantes doit également être étudié de près tout comme le modèle utilisé et les simplifications qui sont faites.

Enfin, il faut également évaluer l'incertitude liée aux choix et hypothèses réalisées tout au long du processus ainsi que les incertitudes propres aux prises de données et à la limite des connaissances sur les sujets traités.

#### **- 8.1.1.2.2- CONTRÔLE DE COMPLÉTUDE**

Rares sont les AVC pouvant obtenir toutes les données nécessaires. Souvent des approximations sont nécessaires. Il faut alors justifier les choix fait et vérifier l'impact de ces choix si les données sont importantes et justifier en quoi ces données ne sont pas importantes si elles sont jugées comme tel.

#### **- 8.1.1.2.3- CONTRÔLE DE SENSIBILITÉ**

L'objectif est de valider la fiabilité des résultats finaux en déterminant l'influence sur ceux-ci de variation dans les hypothèses, les donnees sources et la méthodologie.

Le contrôle de sensibilité peut s'appliquer à n'importe quel élément de l'analyse : imputation, critère d'exclusion, frontière du système, catégories d'impact choisies, données de normalisation, etc.

deux type d'analyse de sensibilité sont possibles :

- Sensibilité à un critère continu (résultat de sortie en fonction d'un paramètre d'entrée). Il est alors possible de faire une analyse de perturbation.

Dans ce cas, il est possible d'étudier l'impact d'une variation de x% d'un flux élémentaire sur l'inventaire, d'un facteur de pondération sur le score final, etc. À partir de là, il est possible d'extrapoler des facteurs de dépendance (ou de corrélation). Les inputs ayant un fort pouvoir de corrélation sur l'output doivent alors être regardé de près pour assurer que ces valeurs, dont l'impact est majeur, sont aussi précises que possibles.

Cette analyse peut amener à revoir le champ d'étude et les objectifs en fonction de la sensibilité de certaines données.

- Sensibilité à un critère discret c'est à dire à des choix. Il faut alors, dans la mesure du possible, analyser les autres choix que ceux fait et s'assurer que les résultats obtenus selon les différents scénarios demeurent dans une fourchette admissible.

#### **- 8.1.1.2.4- CONTRÔLE DE COHÉRENCE**

L'objectif de ce contrôle est de s'assurer que les résultats obtenus sont conformes au champ de l'étude initialement formulé. Dans le cas de comparaison entre différents scénarii, il est également conseillé de démontrer que les hypothèses choisies dans chacun des scénarii sont cohérentes les unes par rapport aux autres. Ces différences entre les scénarii peuvent venir de différences dans les sources des données, dans la précision des données, dans les représentations technologiques. Les différences liés au facteur temps, au facteur géographique, à l'âge des données, et aux indicateurs sont également à prendre en compte.

### **-8.1.1.3- Évaluation De La Qualité Des Données**

Normalement, dès les premières étapes de l'inventaire, les praticiens doivent établir des recommandations concernant la qualité des données, notamment les couvertures temporelles et géographiques, la précision, la représentativité, la cohérence et la reproductibilité des mesures, les sources des données et les niveaux d'incertitude.

Durant la phase de vérification, les données utilisées doivent être comparées aux recommandations initiales. Les écarts doivent être documentés et justifiés.

#### **- 8.1.1.3.1- ANALYSE D'INCERTITUDE**

Vise à vérifier l'impact de l'incertitude des données principales sur les résultats du modèle. Ceci se fait habituellement avec des outils informatiques en utilisant par exemple un Méthode de Monte-Carlo. Certains des outils d'analyse du cycle de vie permettent d'entrer l'incertitude d'une valeur avec une distribution. Le programme va alors ressortir une distribution de résultat qui permettra soit de s'assurer que la variabilité n'a pas d'impact trop important, soit que le résultat d'un comparatif entre plusieurs scénario est valide dans les conditions d'incertitude.

### **- 8.1.2- STANDARDISATION DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV)**

La série de la norme ISO 14040 fournit de la documentation pour chacune des étapes de l'ACV:

- ISO 14040 : Principes et cadre de la série ISO 14040
- ISO 14041 : Définition de l'objectif, du champ d'étude et analyse de l'inventaire
- ISO 14042 : Évaluation de l'impact du cycle de vie
- ISO 14043 : Interprétation du cycle de vie
- ISO 14048 : Formats d'échanges de données
- ISO 14049 : Rapports techniques sur des exemples d'analyse des inventaires selon ISO 14041

#### **- 8.1.2.1.1- IMPUTATION ET EXCLUSION**

Souvent l'enchevêtrement des processus rend les sources et les destinations des flux difficiles à déterminer. C'est notamment le cas pour les processus multi-fonctionnels dans lesquels un seul processus va générer plusieurs produits. C'est par exemple le cas du raffinage du pétrole qui va produire différents carburants (diesel, essence, gaz naturel), d'autres co-produits comme l'asphalte.

À supposer l'étude d'un seul de ces co-produits, par exemple l'asphalte, comment répartir l'impact des étapes précédentes (extraction du pétrole, raffinage transport, etc.) entre le produit étudié et les autres coproduits.

Plusieurs approches sont possibles et sont ici présentées par ordre de priorité selon ISO :

#### **- 8.1.2.1.2- APPROCHE DE DIVISION**

C'est la solution la plus simple, mais rarement applicable au complet. Elle consiste à séparer les processus multi-fonctionnels en processus mono-fonctionnels et à exclure les processus qui n'entrent pas directement dans la chaîne du produit étudié.

#### **- 8.1.2.1.3- APPROCHE PAR EXTENSION DES FRONTIÈRES**

Cette méthode est assez efficace lors qu'un processus abouti sur un co-produit qui peut être réalisé par un processus mono-fonctionnel. Dans ce cas, il est possible d'étendre les frontières du système à ce processus mono-fonctionnel et ensuite de soustraire les impacts de ce dernier au processus multi-fonctionnel.

Toutefois ceci oblige à réaliser une analyse plus complexe prenant en compte un processus supplémentaire.

#### **- 8.1.2.1.4- APPROCHE PAR IMPUTATION**

L'imputation est la méthode ultime pour résoudre des problèmes de processus multi-fonctionnels mais souvent entrent en jeu des choix méthodologiques qui ne vont pas refléter pleinement la réalité. C'est le cas pour le raffinage du pétrole.

L'imputation consiste à répartir les entrants et les sortants de manière à refléter le degré de responsabilité de chaque co-produit dans la génération de ces flux.

Pour ceci, il faut faire un choix sur la contribution de chaque produit en fonction d'une mesure. La méthode la plus simple est souvent celle de la masse. On

attribuera à chaque sous-produit une portion des entrants et sortant en fonction de la masse produit de sous-produit par rapport à la masse totale de produits issus du processus. Il devient ainsi possible de ne prendre en compte dans l'analyse réalisée qu'une portion des entrants et sortants du processus.

Les critères utilisés pour l'imputation doivent dépendra de la valeur, et quelque part de la raison, qui pousse à réaliser un processus. Ainsi pour un procédé de raffinage produisant plusieurs sources d'énergie différentes, le critère d'imputation pourra être la valeur énergétique de chacun des co-produit. Il est également envisageable de

prendre la valeur monétaire comme facteur d'imputation.

La question de l'imputation, qui est quasi-inévitable dans une ACV, est une des critiques récurrentes de cette méthode car elle peut amener à une variation importante dans la contribution d'un processus en fonction de la méthode et du critère choisi.

### **- 8.1.3- LE CAS DU RECYCLAGE**

Le processus du recyclage est un exemple typique de processus multi-fonctionnel dont les impacts vont devoir être répartis ; au point que les normes ISO ont édité une série de recommandations à ce sujet.

#### **-8.1.3.1- Recyclage En Boucle Fermée**

Le recyclage en boucle fermé est un processus qui permet de récupérer un nombre de fois virtuellement infini un matériau, sans en altérer sa qualité. C'est le cas de certains métaux ainsi que de catalyseur pour des réactions chimiques.

Ce cas est relativement simple, il suffit de considérer qu'un pourcentage donné de matière est recyclée et réinjecté dans le processus étudié. Il faut ensuite ajouter le processus de recyclage dans l'analyse du cycle de vie et ôter la quantité de matière recyclée du flux de matière entrant dans le processus.

Au global, il n'est pas nécessaire de faire entrer en jeu des imputations, tout reste dans les frontières du système.

#### **-8.1.3.2- Recyclage En Boucle Ouverte**

Dans le cas du recyclage en boucle ouverte, dans lequel le produit recyclé va théoriquement être dégradé et servir à autre chose, il faut être en mesure de répartir les impacts du recyclage entre les différents processus en jeu. Ainsi quand on recycle des bouteilles en plastique pour en faire des bacs à poubelle, comment répartir le processus de recyclage entre le processus des bouteilles sachant que

- sans les bouteilles, il ne serait pas utile de faire de ce processus
- le recyclage évite des entrants au processus pour faire des bacs à poubelles.

ISO propose plusieurs voies :

- Approximer une boucle fermée : Si la modification dans les caractéristiques du produit sont mineurs, on peut supposer un processus fermé. Il en va ainsi pour le papier qui, une fois recyclé va généralement avoir une qualité un peu moindre, mais qui pourrait toujours servir de papier.

On se retrouve ainsi dans le cas simple du recyclage en boucle fermée

- Méthode basée sur la qualité des matières : Cette méthode d'imputation consiste à imputer chaque étape utilisant des matières recyclées en fonction de la qualité du produit. Ceci correspond à établir un facteur de dégradation du matériau durant le recyclage et d'imputer chaque processus en fonction de ce facteur.
- Méthode basée sur le nombre d'utilisation : cette fois le facteur d'imputation est calculé simplement en divisant l'impact des étapes de recyclage par le nombre d'utilisation.
- Méthode d'imputation économique : Cette méthode d'imputation consiste à calculer un facteur d'imputation en fonction de la valeur économique. Ceci est particulièrement utile quand le recyclage fait ressortir plusieurs produits (par exemple des métaux séparés ou un même métal avec des qualités différentes).

- Méthode 50/50 : méthode la plus simple qui consiste à attribuer 50% de l'impact d'un recyclage à chacun des processus qui "entoure" le recyclage.
- Méthode d'extension des frontières : Même méthode que celle utilisée pour éviter d'avoir à faire une imputation et qui consiste à inclure dans le système le processus bénéficiant du recyclage ainsi que le processus éviter par le recyclage, et de soustraire les impacts évité au nouveau système.

#### **- 8.1.4- AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS**

L'analyse du cycle de vie permet avant d'avoir une vision globale de l'impact environnemental d'une filière, de prévoir le déplacement de pollution, d'évaluer quel type d'impact environnemental est dominant dans la réalisation d'un produit et quelles étapes (étape de production, utilisation, mise au rebut) ou quels éléments particuliers du produit contribuent le plus en terme d'impact environnementaux. Ceci est obtenu par une démarche aussi exhaustive que possible et selon une démarche clairement documentée. Cette méthode permet également une mise en perspective des différents types d'impact plutôt que de se limiter à un type d'impact particulier. C'est également un outil très utile pour faire des choix autant à portée globale (choix d'une politique environnementale, comme l'intérêt du recyclage de certains produits) que locale (choix de design et de production pour un produit).

Cependant nombre d'obstacles font que l'analyse du cycle de vie ne sera jamais un outil universel. D'abord il est quasi-impossible d'obtenir l'intégralité des flux utilisés pour un produit, il faut donc se contenter de données parfois limitées et faire appel à des données génériques, donc manquant de précision.

Se pose également le problème de la représentativité géographique, les impacts étant différent d'une région à une autre. Par conséquent, souvent une ACV n'est pas transportable. Sachant qu'une ACV est un processus long et fastidieux, ceci nécessiterait de multiplier les analyses ce qui est difficilement réalisable.

Par ailleurs, plusieurs choix méthodologiques demeurent assez subjectifs comme les choix d'imputation et les méthodes de caractérisations des impacts, et des normalisation et de pondération s'ils sont utilisés. Il n'est pas rare, dans le cadre d'une comparaison, de voir le classement entre plusieurs produits être inversé selon la méthode d'évaluation choisie et ce, juste au niveau de la caractérisation.

En conclusion, l'analyse du cycle de vie présente de nombreux intérêt. Toutefois les résultats à eux-seuls peuvent toujours être contestables selon les choix méthodologiques réalisés. Par conséquent les valeurs obtenues peuvent difficilement être utilisées par le grand public et nécessitent d'être étudiées en détail.

#### **- 8.1.5- DEUX TYPES D'ACV**

Il existe deux types d'analyse :

- L'ACV-A, ou analyse par attributs : Le système à l'étude est composé de processus élémentaires liés par des flux économiques.
- L'ACV-C, ou analyse par conséquences : Le système à l'étude est composé de processus affecté par le cycle de vie d'un produit ou par son changement.

Dans les faits, la méthode est la même, la seule différence se fait au niveau des



frontières du système étudié.

## **- 8.1.6- LES FLUX ET LA MÉTHODE MATHÉMATIQUE DE L'ACV\_**

### **-8.1.6.1- Ecosphère, Technosphère Et Définition Des Flux**

Selon la logique de l'ACV, les flux constitutifs d'un produit se décomposent selon deux dimensions, deux sphères :

- La technosphère représente l'ensemble des activités et produits humains (production, transformation, consommation)
- L'écosphère représente principalement l'environnement naturel. D'une certaine manière l'écosphère englobe la technosphère et est donc source de toutes les matières premières et receptacle de tous les déchets de la technosphère.

Afin de réaliser une ACV, tout système est décomposé en processus élémentaires et chaque processus élémentaire reçoit et émet des flux. À l'image des deux sphères (eco et techno), il existe deux types de flux :

- Les flux élémentaires qui proviennent (ressources) ou sont à destination (déchets) de l'écosphère.
- Les flux économiques qui proviennent (intrans) ou sont à destination (extrans/produit) de la technosphère.

Idéalement, seuls des flux élémentaires devraient entrer et sortir du système, les flux économiques ne devraient que servir à joindre les processus élémentaires entre eux (hormis le produit final qui est un flux économique qui sort du système). Cependant ceci nécessiterait de prendre en compte trop de sous-système comme par exemple tout ce qui sert à produire l'électricité nécessaire à un processus élémentaire. Par conséquent, il est fréquent que des processus élémentaires, comme l'approvisionnement d'électricité, soit simplifié comme un processus économique dont on connaît les impacts environnementaux agrégés (on ne connaît pas les impacts de chaque processus élémentaire de la production d'électricité, mais les impacts globaux).

## **- 8.1.7- OUTILS D'ACV**

Quelques logiciels permettant de faire des ACV :

- [Gabi](#), Allemagne
- [SimaPro](#), Pays-Bas
- [TEAM](#), Europe

Ces logiciels permettent en général de réaliser des modèles de cycle de vie en plus de contenir des bases de données importantes de flux de références et d'intégrer des méthodes d'évaluation des impacts. Ceci permet de calculer les impacts potentiels à partir des modèles réalisés.

## EXEMPLE DE RÉSULTATS

Voici quelques chiffres comparés des impacts entre les infrastructures et les procédés (selon Éco-indicator 99, score unique (en partie hiérarchisé))

	Impact infrastructures	Impact procédé utilisation
Fonte	7%	93%
Papier journal	13%	87%
Contre-plaqué	3%	97%
Patate bio	96%	4%
Électricité éolienne	99%	1%
Hydro-électricité	92%	8%
Électricité charbon	5%	95%
Nucléaire	32%	68%
Énergie diesel	4%	96%
Énergie gaz naturel	1%	99%
Camion	33%	67%
Voiture	24%	76%
Incinération	3%	97%
Recyclage	19%	81%
Enfouissement	96%	4%

### - 8.2- LES LABELS

Il existe plusieurs labels ou éco-étiquettes.

En [Europe](#) :

- [Éco-label](#) (Union Européenne)
- [Blue Angel](#) (Allemagne)

Dans le reste du monde :

- Environmental choice (Canada)
- Green Seal (U.S.A)
- Programme Eco-Mark (Japon)
- Nordic Swan (Scandinavie)



## **ANNEXE 2**

# **TABLEAU DONNANT L'ENERGIE GRISE DE LA PLUPART DES MATERIAUX UTILISES DANS LE BTP**

---

**CLASSEMENT PAR MASSE , PAR  
VOLUME, ET PAR ORDRE  
ALPHABETIQUE**