

Projet d'option – Génie Civil et Environnement

Promotion 2014



- MURS DE SOUTÈNEMENT -

Comparaison environnementale et
financière de différentes technologies



Tuteur ECL : M. VINCENS Eric

Equipe : DESCAZEAUD Mathieu
FARAGGI Thomas
SOULAGE Julia

Date du rapport : 15 Avril 2014

Remerciements

L'équipe tout entière souhaite remercier l'ensemble des professionnels qui, en acceptant tout au long du projet de donner de leur temps, ont permis de rendre cette étude la plus représentative possible.

En particulier, pour la partie pierres sèches, nous adressons nos remerciements à Cathie O'Neill de l'Association des Bâisseurs en Pierres Sèches pour son aide et sa disponibilité, ainsi que tous les artisans de l'association qui ont accepté de nous donner leurs prix.

Pour la partie gabions et mur en béton nous remercions Baptiste Dally de GFC construction, qui nous a fourni des dimensionnements et une évaluation des coûts de construction.

Enfin, nous remercions Eric Vincens pour son suivi du projet, ses conseils et ses nombreuses pistes.



Sommaire

Résumé	3
Abstract	3
Introduction	4
1. Murs de soutènement des terres	5
1.1. Présentation générale	5
1.2. Murs de soutènement en pierres sèches	5
1.2.1. Structure d'un mur de soutènement en pierres sèches	6
1.2.2. Eléments techniques de la construction d'un mur en pierre sèche	9
1.2.3. Outillage nécessaire à la construction	11
1.2.4. Le rôle indispensable du muraillleur	12
1.3. Murs de soutènement en gabions	13
1.3.1. Réalisation d'un mur de soutènement en gabions	13
1.3.2. Outillages nécessaires à la construction	15
1.4. Murs de soutènement en béton armé	16
1.4.1. Les fondations	16
1.4.2. La structure en béton armé	17
1.4.3. Le rôle des armatures en acier	18
1.4.4. Un autre type de mur en béton : le mur à clous	18
1.5. Notion d'ouvrage élémentaire	19
2. Analyse financière	21
2.1. Principe	21
2.1.1. Principe de l'étude de prix	21
2.2. Technologie béton	22
2.2.1. Dimensionnement du mur	22
2.2.2. Evaluation financière	23
2.3. Technologie pierre sèche	24
2.3.1. Dimensionnement	24
2.3.2. Evaluation financière	25
2.4. Technologie gabion	26
2.4.1. Dimensionnement	26
2.4.2. Evaluation financière	27
2.5. Synthèse et comparaison	28
3. Analyse de Cycle de Vie comparée des trois technologies	30
3.1. Présentation de la méthode	30
3.1.1. L'Analyse de Cycle de Vie	30
3.1.2. Eco-Invent	30
3.1.3. Indicateurs utilisés	31



3.1.4.	Cadre et hypothèses de la démarche.	31
3.2.	Technologie pierres sèches	32
3.2.1.	Obtention et élimination du matériau utilisé	32
3.2.2.	Transport	32
3.2.1.	Fabrication du mur	33
3.2.2.	Entretien du mur	34
3.3.	Technologie gabion	36
3.3.1.	Obtention et élimination du matériau utilisé	36
3.3.2.	Transport	37
3.3.3.	Fabrication du mur	38
3.3.4.	Entretien du mur	38
3.3.5.	Bilan	38
3.4.	Technologie béton	40
3.4.1.	Obtention et élimination des matériaux utilisés	40
3.4.2.	Transport	42
3.4.3.	Construction du mur	42
3.4.4.	Entretien du mur	43
3.4.5.	Démolition du mur	43
3.5.	Synthèse comparative	45
Conclusion		48
Bibliographie		49
Table des figures		50
Annexes		51



Résumé

Cette étude a pour objectif d'établir une comparaison entre trois technologies de réalisation de murs de soutènement : la technologie ancienne des pierres sèches, la technologie béton et la technologie plus innovante des gabions. La comparaison est réalisée selon des critères à la fois financiers et environnementaux, détaillés à chaque étape du cycle de vie d'un mur, de la production et l'acheminement des matières premières jusqu'à la phase de destruction.

L'enjeu est de connaître dans quelles conditions (hauteur du mur, etc.) et dans quelle mesure un mur en béton peut se révéler plus coûteux et plus désavantageux pour l'environnement qu'un mur en pierre sèches ou en gabions. Ces derniers, réalisés à partir de matériaux locaux, présentent en effet a priori un avantage en termes de coût et d'impact sur l'environnement.

Cette étude avait déjà été réalisée une première fois dans le cadre d'un projet d'études, puis actualisée en 2009 par des élèves de l'option Génie civil. Notre objectif est d'actualiser à nouveau et d'améliorer ce qui avait déjà été fait. Il s'agit notamment d'actualiser les prix qui ont évolué depuis 2009 et de préciser certains points qui méritent de l'être.

Abstract

This study aims at comparing three different technologies of retaining walls building: the old technique of dry stone walls, the technique with concrete and the more innovative technology of gabion. The comparison is made using both financial and environmental specifications at each stage of the wall lifecycle, from the production and transportation of raw materials to the wall demolition phase.

The goal is to determine in which conditions and to what extent a concrete wall can reveal to be more expensive and disadvantageous environmentally speaking in comparison with a dry stone or gabion wall. By using local materials, these last two technologies seem to present a financial and environmental advantage.

This study had already been conducted twice: the first time it was achieved by a project group of first-year students and it was actualized in 2009 by Civil Engineering students. Our target is to actualize once again and improve what has been done. Particularly it is to actualize the prices which have changed since 2009 and to precise some points that deserve to.



Introduction

Pendant des siècles, l'état des techniques n'a permis de réaliser que des murs de soutènement avec des matériaux naturels, c'est-à-dire en pierres. Ces ouvrages étaient souvent basés sur la technique des pierres sèches : aucun liant (mortier ou ciment) n'est utilisé pour maintenir les pierres ensemble. De tels murs présentent des avantages sur un plan environnemental, mais aussi culturel. Par la suite, l'avènement du béton a conduit à l'oubli des techniques traditionnelles. Cependant, étant donné les nouvelles problématiques liées à l'environnement, la question se pose aujourd'hui de savoir si la construction en béton est toujours la plus appropriée. Selon le terrain, l'emplacement du mur, son environnement et d'autres facteurs comme la facilité de mise en œuvre et le coût, il se peut que la solution béton s'avère moins adaptée qu'une technique utilisant des matériaux plus naturels. Parmi ces autres méthodes, on distingue en particulier les murs en pierre sèche et les murs en gabions.

C'est dans ce contexte que la Chambre des Métiers et de l'Artisanat du Vaucluse, associée à l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat et au Laboratoire de Tribologie Dynamique des Systèmes de l'Ecole Centrale de Lyon, a demandé une étude comparative entre la technologie béton et celle des pierres sèches. Par la suite, l'étude de la fabrication de murs de soutènement à l'aide de gabions a été ajoutée au projet.

La comparaison demandée se situe au niveau financier mais aussi au niveau des impacts environnementaux des différentes méthodes. Les facteurs étudiés vont être, bien entendu, les matériaux utilisés, mais aussi leur mise en œuvre – c'est-à-dire la main d'œuvre et les machines nécessaires – et l'entretien de l'ouvrage réalisé. En outre, l'influence de ces facteurs doit être pondérée par l'importance de l'ouvrage : selon la hauteur du mur réalisé, certains aspects peuvent devenir plus importants, ou au contraire voir leurs impacts diminuer. Voilà pourquoi l'analyse du cycle de vie de chaque technique doit être le plus exhaustif possible (production des matériaux, transport, construction, entretien...), et concerner des hauteurs de murs représentatives.

Nous commencerons par présenter trois familles de murs de soutènement : les murs en pierres sèches, ceux en gabions, puis ceux en béton. Ensuite, nous procéderons à une analyse financière de chaque méthode, puis à une analyse environnementale. Enfin, une étude comparative sera menée, afin de savoir, selon les cas, quelle méthode est la plus avantageuse, en fonction des critères pris en compte.



1. Murs de soutènement des terres

1.1.Présentation générale

Un mur de soutènement est un ouvrage qui vise à retenir une certaine quantité de terre. Ce type de mur a plusieurs utilisations dont la plus courante est la réalisation de terrasses et de barrages de terre en terrains inclinés.

Les ouvrages de soutènement sont des structures liées au sol pour lesquelles l'action de celui-ci intervient doublement :

- Le matériau derrière le mur (généralement du remblai) exerce des poussées sur l'ouvrage.
- L'ouvrage à son tour sollicite le sol de fondation et y crée des contraintes et éventuellement des tassements.

Les différentes techniques de soutènement sont les suivantes :

- Mur poids : Le principe du mur poids est d'opposer le poids de la maçonnerie du soutènement à la poussée des terres qui tend à le renverser. La poussée des terres est minimale au sommet du mur et croît avec la profondeur en arrière du mur : c'est pourquoi les murs poids s'épaississent vers la base. Les matériaux de base utilisés pour ce type de mur peuvent être la pierre ou le béton armé.
- Les parois ancrées : Elles sont formées d'éléments verticaux (pieux, planches ou tubes) liés entre eux par différents procédés et constituant l'écran du mur. La paroi ancrée est peu épaisse et s'oppose à la poussée du sol par des tirants, le plus souvent en acier, ancrés dans le sol retenu.

Nous détaillerons dans la suite trois technologies de construction de murs de soutènement qui sont celles sur lesquelles la comparaison va s'effectuer dans la suite de l'étude : les murs en pierre sèche, les murs en gabion et les murs en béton.

1.2.Murs de soutènement en pierres sèches

Les techniques de construction des murs de soutènement en pierres sèches sont universelles : bien que quasiment absentes de toute littérature, on les retrouve aux quatre coins de la planète (France, Japon, Portugal...). Ces murs présentent a priori l'avantage de répondre parfaitement à toutes les exigences techniques et environnementales. A l'épreuve du temps, ils peuvent être construits avec des pierres de tout type, ce qui permet dans la plupart des cas d'utiliser des matériaux « in situ ». Cet approvisionnement local en matières premières, allié à une technique facile à mettre en œuvre, permet une construction respectueuse de l'environnement, sur tout type de terrain. C'est une technique artisanale, qui s'appuie sur le savoir-faire et l'expérience des bâtisseurs : le dimensionnement du mur et la méthode de construction sont laissés à l'appréciation de celui-ci. Même si certains principes sont fondamentaux pour la construction en pierre sèche, il n'existe pas de règle ou de norme à ce sujet.



1.2.1. Structure d'un mur de soutènement en pierres sèches

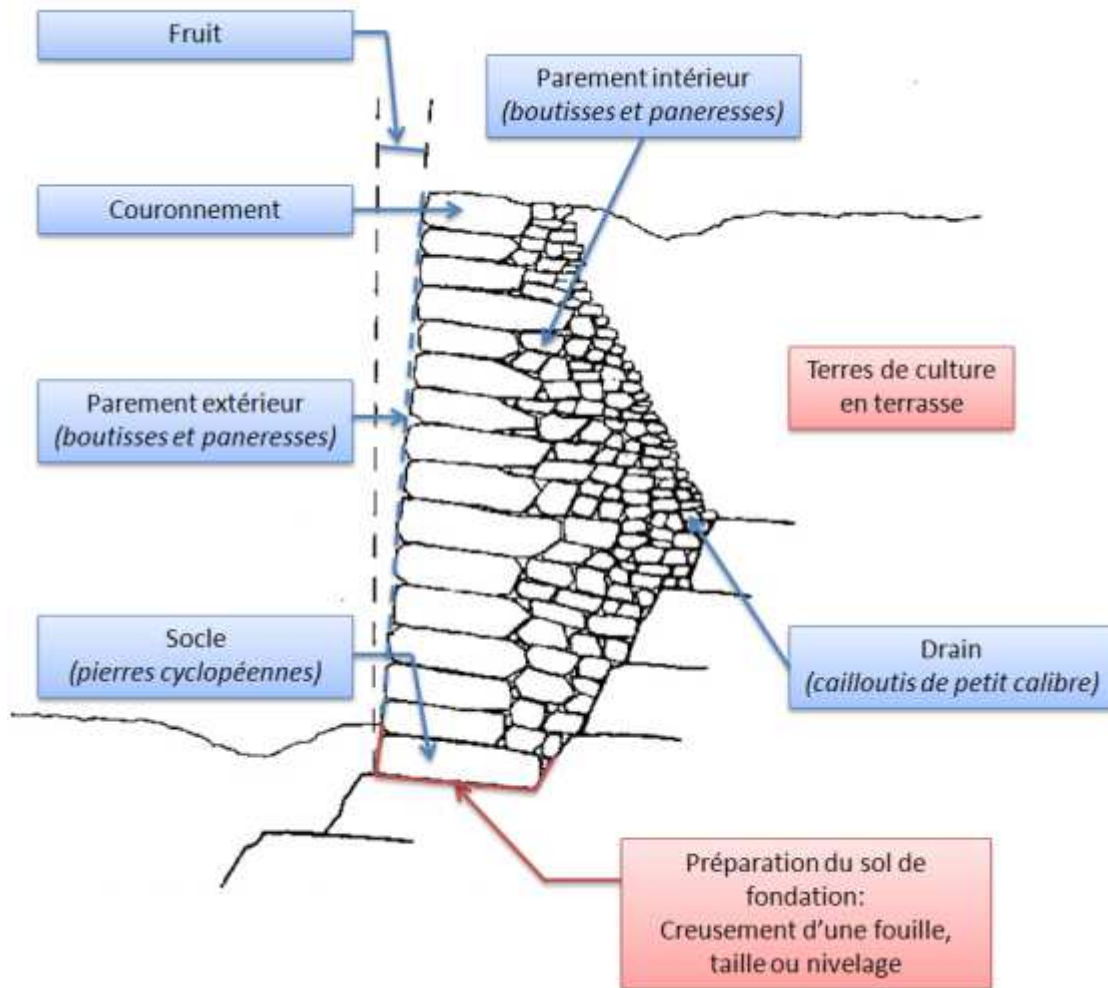


Figure 1: Structure d'un mur de soutènement en pierre sèche - Vue en coupe

Un mur en pierre sèche comporte généralement les cinq parties principales suivantes :

- **Le socle (ou fondation) :** C'est le premier lit de pierre du mur sur lequel ce dernier va reposer. Le socle peut soit s'inscrire dans le prolongement du parement, soit ressortir en saillie par rapport au parement ; on parle alors d'empattement. Les pierres de socle ou d'assise sont des pierres solides de grande taille (*pierres cyclopéennes*) qui vont garnir le fond de la fouille et sont destinées à supporter le poids du mur.



Figure 2: Pose des pierres de socle

- **Le parement extérieur** : C'est la face visible du mur, que le bâtisseur en pierre sèche aura pris soin de travailler en soignant l'alignement.
- **Le parement intérieur** : C'est la face non visible du mur, celle sur laquelle la poussée du sol de remblai vient s'appliquer. Les pierres de bâti, utilisées pour la construction des parements intérieur et extérieur, sont les modules qui constituent la trame du mur et assurent sa bonne tenue.

La *boutisse* est une longue pierre de liaison, la plus massive possible, que l'on couche dans l'épaisseur du mur pour relier les parements extérieur et intérieur et stabiliser l'ensemble de la construction. La boutisse traverse ainsi le mur de bout en bout, du parement jusqu'au drain directement adossé au remblai. L'une de ses extrémités doit donc être correctement facée et placée dans la partie visible du mur. Lorsque les deux extrémités de la boutisse sont facées, on parle alors de *parpaings*.

La *panneresse* (ou *carreau*), à l'inverse de la boutisse, est une pierre dont toute la longueur est présentée en façade du mur, permettant ainsi de relier entre elles plusieurs pierres de parement. La panneresse, comme elle ne pénètre pas dans le mur, peut créer une faiblesse dans le parement qu'il conviendra de compenser au rang suivant en la faisant chevaucher par une boutisse.

Les *pierres de calage* sont des modules servant à caler entre elles les autres pierres. Plates, en forme de coin ou de toute autre forme permettant une bonne stabilisation des pierres à caler, elles sont généralement de petite taille : elles doivent cependant être très résistantes à la compression.

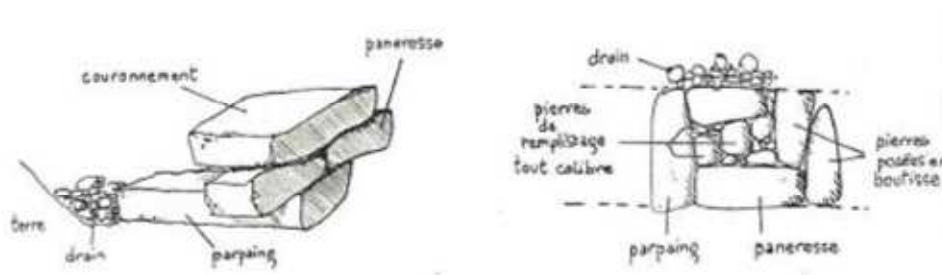


Figure 3: Désignation des pierres de bâti: perspective et coupe horizontale



- Le **drain** est constitué de débris ou de cailloutis de petit calibre, souvent les restes inutilisables issus du démontage d'anciens murs, qui servent au remplissage de l'arrière de l'ouvrage. Elles protègent le parement de l'envahissement progressif par les terres et jouent le rôle de premier filtre entre le talus et le mur, permettant ainsi l'écoulement des eaux de pluies.



Figure 4: Ecoulement des eaux pluviales à travers un mur en pierres sèches

- Le **couronnement (ou arasement)** : C'est le dernier lit de pierre posé sur le mur. Il a pour rôle de bloquer les petites pierres de la cime du mur et de prévenir ainsi contre la dégradation des parties supérieures de l'ouvrage qui pourraient se propager à l'ouvrage entier. On peut réaliser deux types de couronnement, selon les matériaux disponibles sur place, les pratiques locales et le type de mur :
 - le couronnement par des pierres plus lourdes (difficiles à déloger) et plus longues (de sorte à relier les deux parements) posées à plat qui assure le nivellement du dernier rang, garantissant l'aspect fini du mur : on parle alors de couronnement à plat ;
 - le couronnement par pierres de même taille posées en clavade : les pierres ne sont pas empilées en pression les unes sur les autres mais dressées et serrées les unes contre les autres sur leurs strates verticales. Cette solution est souvent utilisée pour empêcher le passage des animaux, qui ont peur de se coincer les pattes entre les pierres.



Figure 5: Couronnement des murs en pierre sèche: en grosses pierres plates à gauche, en clavade à droite



1.2.2. Eléments techniques de la construction d'un mur en pierre sèche

1.2.2.1. Le fruit du parement

Les murs poids sont des ouvrages qui s'opposent à la poussée des terres, poussée qui augmente avec la profondeur. Le mur a besoin de s'épaissir à mesure que l'on se rapproche de sa base. Il possède donc en général un fruit : c'est à dire une inclinaison du mur par rapport à la verticale. Cependant, cela ne signifie pas que la valeur du fruit est nécessairement imposée par la qualité de la terre retenue ou par la hauteur du mur. En effet, lors de la conception du mur, il est possible d'imposer une valeur de fruit, qui peut être nulle. Connaissant la nature du sol retenu et des pierres constitutives du mur, l'angle formé par le remblai à soutenir et la hauteur du mur à réaliser, l'artisan est alors en mesure d'estimer la profondeur nécessaire pour la base du mur grâce à son savoir-faire et son expérience. Un abaque de référence existe dans l'ouvrage « Pierre sèche, guide de bonnes pratiques de construction de murs de soutènement » publié en 2008, mais tous les artisans ont leur propre méthode pour bâtir leurs fondations et ne se réfèrent pas nécessairement à cet abaque.

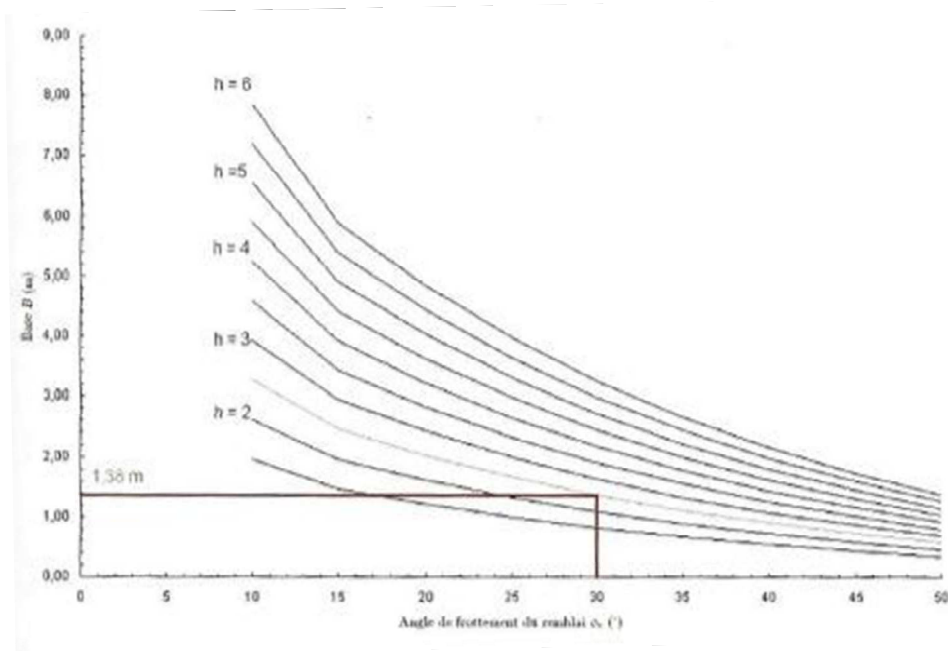


Figure 6: Détermination de la profondeur à donner à la base d'un mur en schiste de 2,5 m de hauteur avec un fruit de 10% soutenant un remblai de sable incliné à 10°

1.2.2.2. La préparation du sol

La fondation d'un mur assure une double mission :

- la transmission et la répartition de l'ensemble des charges au sol (poids du mur et force de poussée du massif de terre),
- la stabilité de la partie inférieure de l'ouvrage.

La préparation de l'assise d'un mur de soutènement est donc fondamentale pour répondre aux contraintes auxquelles cet ouvrage va être confronté ; il est impératif que le support sur lequel



l'ouvrage va reposer soit de bonne tenue. Selon l'environnement géologique, le mur peut reposer soit sur la roche, soit sur le sol. Dans la grande majorité des sites, c'est le rocher en place qui constitue le support du mur : la fondation doit être posée sur une assise rocheuse mise à nu, taillée et nivelée. Le rocher doit être taillé de façon à ce que sa base soit perpendiculaire au fruit choisi, donc incliné vers l'intérieur du mur : ainsi, on s'oppose mieux au glissement du mur et l'inclinaison des lits (couches de pierre) permet d'éviter la stagnation des eaux de ruissèlement sur chaque pierre, ce qui pourrait conduire à leur dégradation par l'action du gel/dégel. Lorsqu'on a à faire à un sol support meuble, on cherche à créer une base ferme pour ancrer le mur : on réalise pour cela une fouille de profondeur supérieure à 20 cm. On aménage ensuite le fond de la fouille afin d'en assurer la planimétrie dans le sens longitudinal du mur. Transversalement, le socle est, comme on l'a vu, en pente vers le talus, c'est-à-dire perpendiculaire au fruit.

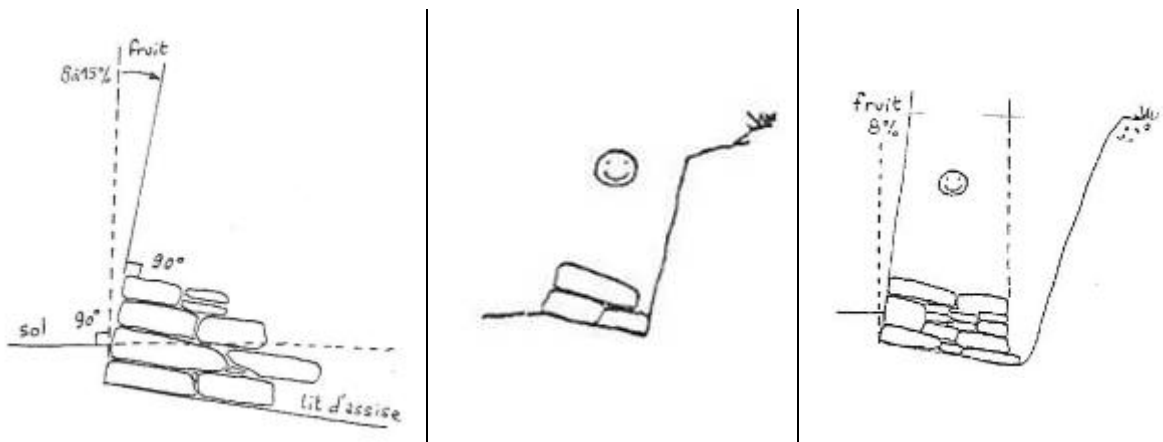


Figure 7: Inclinaison des lits perpendiculaire au fruit (à gauche); Fondation sur support rocheux (au centre); Fondation sur sol dur ou meuble (à droite)

1.2.2.3. Le croisement des pierres

Dans l'arrière bâti, l'artisan s'efforce de réaliser un maillage en trois dimensions, un croisement des pierres afin d'assurer l'unité et la stabilité de la structure (voir figure 8). Ce tricotage est assuré en disposant en angle droit les boutisses et les panneresses. L'artisan place également des petites pierres qui serviront de cales, sur lesquelles viennent s'appuyer dans le sens de la poussée des terres les pierres de taille importante. En outre, l'artisan veille à ce que, d'un lit de pierres à l'autre, les joints ne s'alignent pas verticalement. En croisant et décalant les joints, le muraillier (artisan spécialiste de la pierre sèche) forme la troisième dimension du maillage, qui permet par exemple d'éviter l'apparition de coups de sabre, c'est-à-dire de ruptures du mur du fait de la juxtaposition de plusieurs éléments de bâtisse non solidaires les uns des autres soumis aux poussées et pressions.

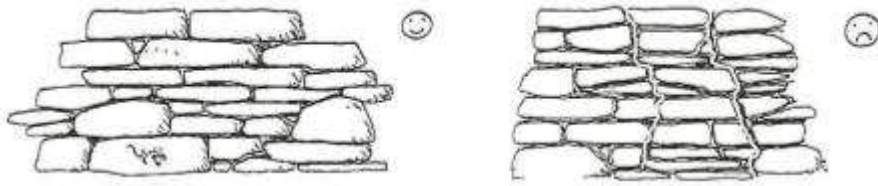


Figure 8: Règle de croisement des joints: privilégier les jointures décalées (à gauche) pour éviter les coups de sabre (à droite)

Lorsque le murailleur dispose les pierres, elles ne sont pas nécessairement dans la meilleure configuration possible : certaines ont du jeu. Mais une fois ces pierres soumises à la contrainte des terres en amont, elles trouvent naturellement une position stable. Cette faculté du mur à s'adapter à la contrainte, cette souplesse, vont contribuer de manière notable à sa longévité.

La construction d'un mur en pierre sèche est donc un puzzle en trois dimensions dans lequel il faut trouver la bonne place de chacune des pierres : c'est au murailleur, fort de son expérience, que revient ce choix parfois délicat.

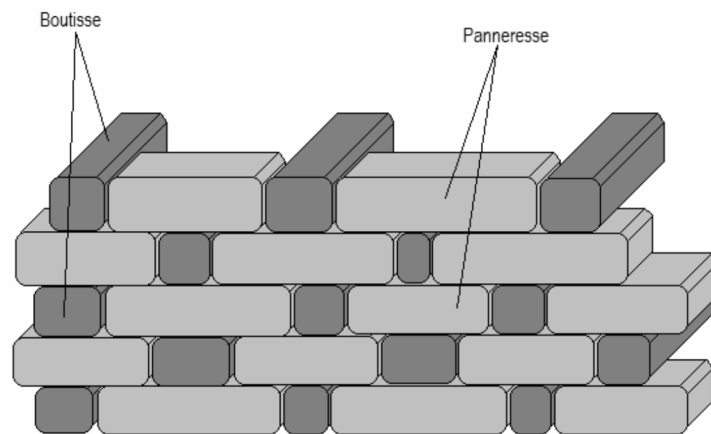


Figure 9: Croisement des pierres dans un maillage 3D, vue en perspective

1.2.3. Outillage nécessaire à la construction

Le bon aspect du parement extérieur d'un mur en pierre sèche vient en partie de son alignement. En effet, la face visible de chaque pierre de parement doit se ranger selon un plan donné, incliné par rapport à la verticale avec pour angle le fruit. Cet alignement est assuré grâce à l'utilisation d'un **gabarit** : il s'agit d'un bâti léger, fabriqué au moyen de lattes en bois ou de tiges métalliques. Constitué de deux pièces de bois obliques et parallèles entre elles qui serviront de guides pour régler le fruit du mur, le gabarit est maintenu à la bonne inclinaison par plusieurs lattes qui s'ancrent dans le sol. Il permet de tendre un fil de maçon ou **cordeau** le long duquel seront posées les pierres. Toujours bien tendu, ce cordeau sera déplacé vers le haut à mesure qu'avancent les travaux.

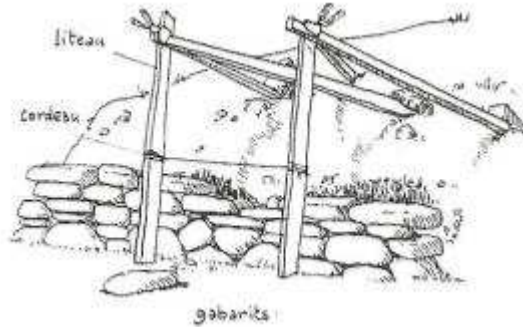


Figure 10: Gabarits et cordes

La **brouette mécanique** : utilisée pour le transport des pierres.

Le **tractopelle** : utilisé pour préparer le terrain au début du chantier.

Les **pioches, pelles, râteaux** : utilisés dans la préparation du sol.

Le **têtu** est une sorte de marteau qui est utilisé pour aider à la mise en place des pierres par chocs successifs. Il est aussi utilisé pour tailler la pierre, quand cela est nécessaire.



Figure 11: Différents types de chasses, d'aiguilles et de têtus

1.2.4. Le rôle indispensable du muraillleur

La technique de construction en pierre sèche, qui peut paraître simple et rudimentaire, exige en réalité de l'artisan un savoir-faire important : il doit être en mesure de réaliser le croisement et le calage des pierres de manière correcte. Il doit également être capable de repérer visuellement quelle pierre conviendra à une place donnée dans le mur. Cette capacité (qui vient avec l'expérience) lui permet de gagner du temps et de se préserver physiquement, en évitant de déplacer inutilement des pierres souvent lourdes. Un artisan porte environ 4 tonnes de pierres par jour : un manque d'expérience peut donc rapidement ralentir l'avancement du chantier, et nuire à la santé de l'artisan.



Ces exemples montrent le rôle fondamental de l'artisan dans le processus de construction en pierres sèches.

1.3. Murs de soutènement en gabions

Les premiers gabions sont apparus en Chine ou en Egypte. Il s'agissait de corbeilles obtenues par tressage d'osier, remplies de pierres et de terre et destinées à protéger les berges de l'érosion. Comme pour les murs en pierres sèches, ces murs semblent remplir toutes les exigences techniques et environnementales. Leur mise en œuvre est rapide, utilisant des pierres de tout type, ce qui permet dans la plupart des cas d'utiliser des matériaux in situ et donc de diminuer sensiblement l'impact environnemental.

1.3.1. Réalisation d'un mur de soutènement en gabions



Figure 12: Chantier en cours de réalisation utilisant la technique du gabion

Un gabion désigne une cage, faite de solides fils d'acier et qui est remplie de pierres. Les ouvrages en gabions ne nécessitent pas de fondation et peuvent être réalisés directement sur le décaissement.

Il existe deux types de grillage de gabions :

- Les **gabions à double torsion**, à mailles hexagonales, qui sont obtenus par tissage de fils métalliques de petits diamètres.
- Les **gabions électrosoudés**, à maille carrée ou rectangulaire, qui sont obtenus par soudage électrique de barrettes d'acier. Ce type de gabion possède une meilleure tenue et une très bonne rigidité. Ils sont plus faciles à mettre en œuvre, leur finition est meilleure, plus soignée. De plus, ils sont facilement récupérables et recyclables.

Pour toutes ces raisons, notre étude se portera sur des gabions électrosoudés.



Figure 13: Gabions à double torsion



Figure 14: Gabions électrosoudés

Les matériaux de remplissage des gabions sont des matériaux pierreux ayant la plus haute densité possible, de forme homogène, non évolutifs et insensibles au gel. Du béton concassé peut aussi être employé. La dimension des pierres est limitée à 250 mm.

Le remplissage des gabions peut être réalisé selon deux techniques :

- Soit les gabions sont montés à part, remplis, fermés, puis disposés à leur place à l'aide d'une grue.
- Soit les gabions sont installés déjà à leur place finale, puis remplis et fermés.

Cette deuxième solution est beaucoup plus efficace, car elle ne nécessite pas de grue, et évite le doublage des côtés et des bases.

Pour plus d'esthétisme, les gabions peuvent être arrangés à la main, afin de donner une mise en place plus uniforme du mur. L'assemblage des panneaux est réalisé à l'aide d'une agrafeuse pneumatique, qui permet d'attacher les gabions entre eux grâce à des agrafes en acier. Pour plus de stabilité, des tirants de renfort, tiges d'acier aux extrémités recourbées, sont placés diagonalement entre les différentes faces de la cage. Quatre tirants sont placés à $\frac{1}{3}$ de la hauteur et quatre autres sur le $\frac{1}{3}$ suivant.

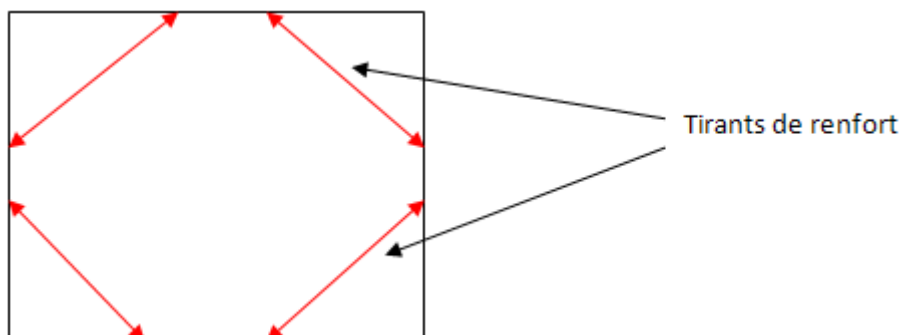


Figure 15: Vue de dessus d'un gabion



Figure 16: Agrafes entre les différents panneaux



Figure 17: Tirants de renfort

Lors du remblaiement du terrain, du géotextile, tissu en matériau synthétique, est placé entre la terre et les gabions, afin de laisser notamment passer l'eau.

La pérennité d'un ouvrage en gabions est liée aux matériaux employés (fils métalliques et pierres) et à la qualité de la mise en œuvre. La durabilité des cages gabions peut être diminuée d'une part par la pollution ou l'agressivité du milieu dans lequel l'ouvrage est réalisé et d'autre part par la qualité du fil et surtout de son revêtement. Un milieu particulièrement chargé en dioxyde de soufre ou dans lequel circulent des eaux polluées, agressives ou abrasives, diminue la durabilité des fils métalliques galvanisés. Le fil non protégé se corrode alors rapidement, puis la rouille forme une protection extérieure. Cette couche de protection ralentit et stabilise le processus de détérioration. Certaines sociétés, comme Aquaterra, utilisent comme revêtement de fils du GalFan (alliage de 95% de zinc et de 5% d'aluminium), qui protègent très efficacement les fils. Un éventuel sur-revêtement de PVC apporte une protection supplémentaire notamment contre l'abrasion.

1.3.2. Outillages nécessaires à la construction

La construction d'un ouvrage en gabions nécessite peu d'outils :

- Le **tractopelle**, qui est utilisé d'une part pour préparer le terrain du chantier, et d'autre part, pour remplir les gabions de pierres.
- Une **semi-remorque**, amenant les pierres depuis la carrière jusqu'au chantier.
- Des **barres d'alignement**, qui permettent le bon alignement du mur. Elles s'accrochent sur les grilles, elles possèdent des crochets.
- Des **agrafeuses pneumatiques**, avec des agrafes pour attacher les panneaux entre eux.



Figure 18: Tractopelle remplissant les gabions



Figure 19: Barres d'alignement



Figure 20: Agrafeuse pneumatique

La technologie gabions semble présenter de réels avantages sur les plans économique et financier. En effet, composée de structures souples et drainantes, sa mise en œuvre est aisée (sans matériels ou savoir-faire spécifique), et s'accompagne de l'utilisation de matériaux pierreux pris localement. Les transports sont ainsi limités et une meilleure intégration dans le paysage est assurée.

1.4.Murs de soutènement en béton armé

1.4.1. Les fondations

La fondation est la partie de l'ouvrage reposant sur un terrain d'assise et à laquelle sont transmises toutes les charges permanentes et variables supportées par cet ouvrage. Elles doivent reprendre les charges supportées par la structure et les transmettre au sol dans de bonnes conditions de façon à assurer la stabilité de l'ouvrage.



La stabilité de mur en L est assurée par la semelle.

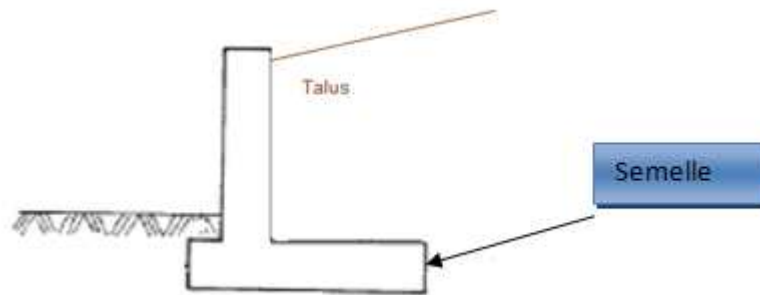


Figure 21: Coupe d'un mur en L

1.4.2. La structure en béton armé

Les murs de soutènement en béton armé, également appelés murs cantilever, sont très couramment employés. Ils sont constitués d'un voile en béton armé encastré sur une semelle de fondation, en béton armé également et généralement horizontale. Celle-ci comprend le patin, situé à l'avant du voile, et le talon, situé à l'arrière. La semelle peut être pourvue d'une bêche pour améliorer la stabilité de l'ouvrage au glissement. C'est le cas notamment lorsque la bonne résistance du sol de fondation et/ou des problèmes d'emprise permettent ou imposent une semelle de largeur plus faible.

Les murs de soutènement en béton armé sont normalement pourvus d'un dispositif de drainage à l'arrière du voile auquel est associé un système d'évacuation des eaux (barbacanes généralement), lorsqu'ils ne sont pas prévus pour maintenir un niveau d'eau à l'amont. Ces murs sont construits par plots de 15 à 30 m de longueur (murs coulés en place). L'eau constitue un véritable danger pour la stabilité de l'ouvrage : l'évacuer est donc une priorité.

Les variantes d'exécution, plus couramment employées lorsque la hauteur de l'ouvrage n'est pas trop importante, portent essentiellement sur le recours à la préfabrication. Celle-ci peut concerner le parement du voile (coffrage intégré à l'ouvrage définitif), le voile lui-même ou encore l'ensemble du mur, semelle comprise (pour les hauteurs qui n'excèdent pas 6 mètres).

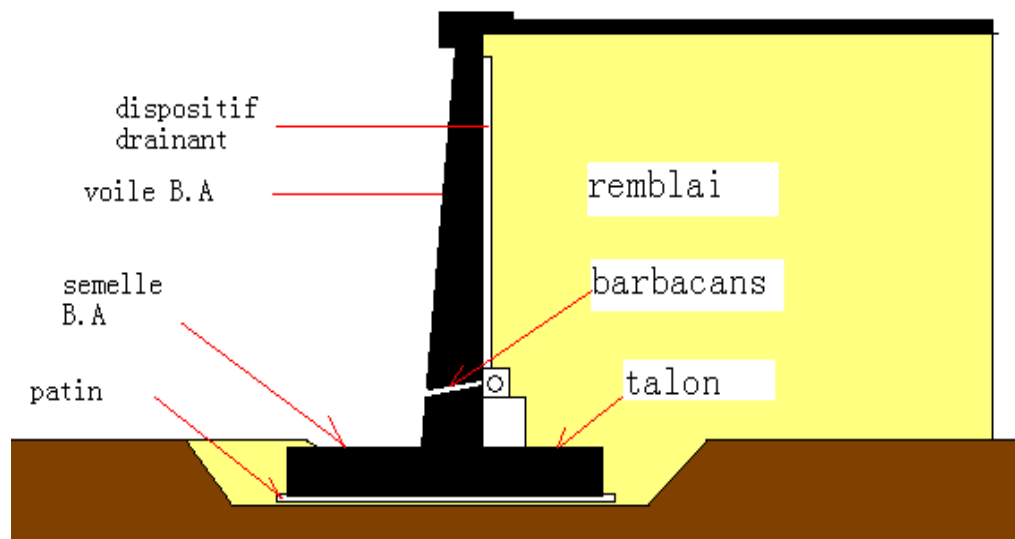


Figure 22: Eléments d'un mur en L

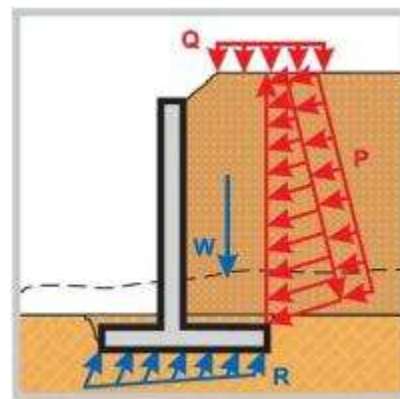


Figure 23: Fonctionnement d'un mur en en béton encastré sur semelle; P: poussée des terres du massif soutenu; W: poids des terres à l'aplomb de la semelle ;
R : réaction du massif d'assise

1.4.3. Le rôle des armatures en acier

Les armatures contribuent à donner à un ouvrage rigidité (en traction), stabilité et résistance aux différentes forces qui sollicitent l'ouvrage. Le diamètre des armatures, barres métalliques crantées, est fonction des charges qui sollicitent l'ouvrage. Elles ont essentiellement pour but de reprendre des contraintes de traction, contraintes pour lesquelles le béton n'a aucune résistance. Ces contraintes sont engendrées par l'action des couches de sols (le mur travaille dans sa globalité en flexion). Des armatures en acier renforcent la structure.

1.4.4. Un autre type de mur en béton : le mur à clous

Dans certains cas, pour des hauteurs et longueurs de mur importantes, il est possible de construire un autre type de mur en béton : le mur à clous.



La technologie de construction des murs cloués consiste à renforcer un sol en déblai, au fur et à mesure de son excavation, par la mise en place de barres passives, peu inclinées sur l'horizontale, travaillant essentiellement à la traction. Ces barres peuvent également travailler partiellement à la flexion et au cisaillement. C'est par le biais du frottement qui s'exerce entre le sol et les barres que ces dernières peuvent se mettre en traction et tenir la structure.

On construit ainsi progressivement et de haut en bas un massif de sol renforcé. Pour éviter que la terre ne s'écroule entre les barres, on doit placer un parement généralement constitué d'un treillis soudé et d'un béton projeté. Ce parement peut être vertical, incliné à des angles très variables ou constitué de redans. Le béton n'a ici aucun rôle de soutien de la structure. Il permet de protéger la terre de l'érosion et empêche des morceaux de terres de tomber.

La construction de ce type d'ouvrage est assez contraignante dans la mesure où elle nécessite des autorisations qui ne sont pas simples à obtenir. En outre, les murs à clous ne sont adaptés que dans certains cas particuliers (murs très hauts et longs). C'est pour cela que nous ne prendrons pas en compte cette technologie dans notre étude.



Figure 24: Exemple de mur cloué

1.5. Notion d'ouvrage élémentaire

Dans un souci de pertinence et de cohérence, il est nécessaire que l'ensemble des études financières et environnementales qui sont détaillées dans la suite du rapport considèrent comme objet d'étude un seul et même système. La notion d'ouvrage élémentaire permet de définir ce système d'étude commun.

Un ouvrage élémentaire (O.E.) est une partie spécifique d'un ouvrage. Chaque O.E. est une portion de l'ouvrage qui exige de la main d'œuvre, des matériaux et du matériel qui lui sont propres et qui produit également un impact sur l'environnement.

Les O.E. choisis correspondent à 1 mètre linéaire de mur pour différentes hauteurs. Le mètre linéaire est un O.E. très utilisé pour les murs, même si on peut parfois manier le mètre carré. Cependant, si l'O.E. est donné pour un mètre carré, il est difficile de prendre en compte l'effet de la hauteur du mur dans son coût, effet qui a une influence capitale. Les hauteurs choisies sont 1 m, 3 m, et 5 m : la majorité des situations in situ sont ainsi couvertes.



Ouvrage élémentaire	O.E.1	O.E.2	O.E.3
Hauteur du mur (m)	1	3	5

Tableau 1: Définition des ouvrages élémentaires

Il sera par la suite nécessaire de caractériser, pour chaque technologie, ces ouvrages élémentaires. Il faudra, par exemple, expliciter la qualité et quantité des matériaux nécessaires à la construction de chaque O.E. Cette description sera faite plus loin dans le rapport.



2. Analyse financière

Le coût d'un ouvrage est un facteur déterminant dans le choix de la technologie utilisée. Cette partie va donc s'intéresser au coût total d'un mur de soutènement, sur tout son cycle de vie. Le coût de fabrication est déterminé à partir d'une étude de prix. Les coûts liés à l'entretien, à la restauration ou à la destruction de l'ouvrage seront également pris en compte.

2.1.Principe

2.1.1. Principe de l'étude de prix

L'étude de prix est un outil utilisé dans le domaine du bâtiment et du génie civil pour estimer le coût global de la construction d'un ouvrage. C'est une étape fondamentale dans la vie d'un chantier, qui s'effectue toujours en amont de la vie d'une affaire.

Une fois le cahier des charges établi, il faut calculer le chiffrage du chantier, qui se décompose en différents types de coûts ou frais.

2.1.1.1. Déboursés secs (D.S)

Les déboursés secs correspondent à la valeur des composants strictement nécessaires et directement affectables à un **ouvrage élémentaire**.

- Le coût des **matériaux** : il dépend de la quantité de matériaux et de leur valeur unitaire (fonction du prix d'achat, des frais de transport, des frais de manutention...)
- Le coût de la **main d'œuvre** : il est fonction du taux unitaire d'exécution et du déboursé horaire.
- Les frais des **matériels** et des **consommables** : Ils dépendent des coûts et des besoins d'utilisation des engins et des machines mécaniques, des installations... Le prix unitaire des machines et de leur entretien sera fonction de l'amortissement, qu'il faudra déterminer.

2.1.1.2. Frais de chantier (F.C.)

Il s'agit des différents frais imputables à la réalisation de l'ouvrage particulier (mais pas à un ouvrage élémentaire). On doit notamment estimer les différents frais tels que : grue, personnel d'encadrement, locaux de chantier...

2.1.1.3. Frais généraux (F.G.)

Les frais généraux sont tous les frais nécessaires au bon fonctionnement de l'entreprise mais qui ne sont pas affectables à un ouvrage précis tels que : service comptable, bureau des méthodes...

2.1.1.4. Frais spéciaux (F.S.)

Ce sont les frais divers spécifiques à un chantier et non prévus en frais de chantier : frais d'adjudication, de bureaux d'études, de tirage de plans...



Ainsi, il est possible de calculer le **prix de revient (P.R.)**. Celui-ci correspond au coût réel, toutes dépenses confondues, relatif à l'exécution d'un ouvrage donné.

$$\text{P.R.} = \text{D.S.} + \text{F.C.} + \text{F.G.} + \text{F.S.}$$

Finalement, on détermine le **prix de vente unitaire (P.V.)** : valeur d'une unité d'ouvrage élémentaire. Ce prix est la base de la facturation.

$$\text{P.V.} = \text{P.R.} + \text{Bénéfices}$$

2.2. Technologie béton

2.2.1. Dimensionnement du mur

L'un des principaux problèmes liés à l'analyse financière concerne le dimensionnement de la structure. Dans le cas du béton, nous avons pu obtenir de GFC un document utilisé par l'entreprise pour dimensionner ses murs en béton. Ce document prend en entrée des paramètres tels que la hauteur de terre, l'inclinaison du terrain, le taux de travail du sol, les dimensions du mur et permet de vérifier ensuite que le mur répond à quatre critères :

- la charge exercée par le mur sur le sol ne dépasse pas le taux de travail du sol,
- une condition de non renversement à l'ELU,
- une condition de non décompression à l'ELS,
- une condition de non glissement à l'ELU.

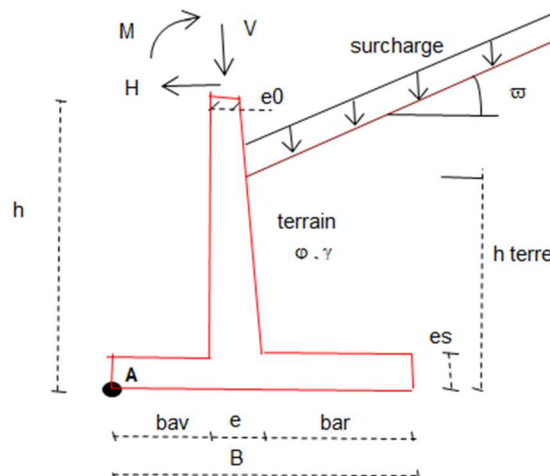


Figure 25 - Quelques paramètres utilisés pour le dimensionnement des murs en T

Nous avons donc dimensionné un mur pour chaque hauteur (1, 3 et 5m) et établi grâce à ce même document la quantité d'armatures nécessaires. Nous avons supposé que nous travaillions sur un sol avec un taux de travail moyen de 10t/m² et avec un béton C30. Suivant les conseils de la personne qui nous a transmis le document, nous avons veillé à ce que la quantité d'armatures ne dépasse pas 150kg/m³. Le tableau suivant résume les volumes de béton et d'armatures trouvés pour chaque mur.



Hauteur (m)	Volume de béton (m^3)	Volume d'armatures (m^3)
1	0.278	0.0020
3	1.07	0.0078
5	2.51	0.0206

Tableau 2 - Volume de béton et d'armatures nécessaire en fonction de la hauteur de mur

Avec ces données, on constate que plus le mur est haut, plus le pourcentage d'armatures est important.

2.2.2. Evaluation financière

Une fois le dimensionnement réalisé, on peut passer à l'évaluation du coût de ce type de mur. Nous avons là encore utilisé un document fourni par *GFC* qui était joint au précédent. Il précise, en fonction des dimensions du mur et de la quantité d'armatures, les fouilles, les remblais, les évacuations, les coffrages, la pose des armatures et le coulage du béton. Ces éléments sont ensuite rapportés à des coûts suivant leur quantité. Ces coûts prennent en compte le matériel, la main d'œuvre ainsi que le transport.

A ce prix total a été appliqué un premier coefficient correspondant aux frais généraux (multiplié par 1.25) ainsi qu'un second coefficient correspondant à la sous-traitance (multiplié par 1.3). Ces valeurs varient suivant les entreprises mais il s'agit là d'un ordre de grandeur représentatif de ce qu'on trouve sur le marché. Les frais généraux correspondent notamment à la tenue du chantier, la location de grue, la présence d'un chef de chantier. Il faut enfin prendre en compte le drainage vertical et la barbacane qui viennent s'ajouter au coût précédent. Le tableau suivant résume les prix TTC (20% de TVA) estimés pour les murs en béton :

Hauteur du mur (m)	Coût global (euros)
1	453
3	1434
5	3179

Tableau 3 - Béton - coût global en fonction de la hauteur de mur

Comme ce projet s'inscrit dans une démarche d'analyse du cycle de vie d'un mur, nous avons cherché à avoir des informations sur l'entretien et la fin de vie d'un mur en béton afin de pouvoir le prendre en compte dans l'estimation du coût. Cependant, nous n'avons pas trouvé d'informations à ce sujet et cet élément constitue un point de développement pour l'amélioration de cette étude.

Pour information, le tableau suivant compare les prix évalués précédemment, lors de la première analyse, avec les prix que nous avons estimés.



Hauteur (m)	Première estimation €	Deuxième estimation €
1	1130	453
3	3210	1434
5	4500	3179

Tableau 4 - Béton - tableau comparatif des prix par rapport à l'autre groupe

Les résultats sont très différents. Les prix trouvés via notre estimation sont beaucoup plus faibles que ceux trouvés par l'autre groupe. Plusieurs éléments peuvent expliquer ces différences. La première estimation s'est fondée sur des considérations géométriques et non structurales, d'où une évaluation des volumes de béton à considérer différente. De plus, notre document nous a permis de prendre en compte le volume d'armatures nécessaire de façon précise. Ce point-là semble ne pas avoir été pris en compte clairement lors de la première estimation. D'après nos résultats, la quantité d'acier n'est pas simplement proportionnelle au volume de béton considéré. Enfin, le groupe précédent, sans doute par manque d'informations fiables, a décidé de découper en étapes très élémentaires la construction du mur pour prendre en compte tous les points. Cependant, il semble que le morcellement conduise à une surévaluation du prix car certains coûts sont partagés sur plusieurs étapes : les économies d'échelle réalisées par les entreprises de BTP ne peuvent pas être prises en compte avec cette méthode. Ces éléments permettent d'expliquer les écarts importants que nous pouvons constater. Cependant, la précision de notre document et le dimensionnement structural du mur font que nous accordons une grande confiance à nos résultats. Sur une échelle de 1 à 3, nous évaluons notre indice de confiance à 3.

2.3. Technologie pierre sèche

2.3.1. Dimensionnement

Le dimensionnement des murs en pierre sèche s'avère un peu plus complexe que celui des murs en béton. En effet, cela dépend beaucoup du savoir-faire de l'artisan et de son expérience dans la réalisation de ce type de mur. Certains livres tels que le *Guide de bonnes pratiques de construction des murs de soutènement* fournissent des informations sur la valeur du fruit ou la taille de la base du mur en fonction de la hauteur du mur que l'on veut construire. Nous nous sommes adressés à deux entreprises spécialisées dans la réalisation de ce type de mur afin d'obtenir une estimation du volume de pierre nécessaire. Les résultats se trouvent dans le tableau suivant :



Hauteur du mur (m)	$V_{\text{pierre}}(\text{m}^3)$
1	0.7
3	3.4
5	8.7

Tableau 5 - Volume de pierre nécessaire en fonction de la hauteur

Il s'agit là d'une moyenne réalisée à partir de la synthèse des informations données par les entreprises. Il est important de noter à ce sujet que si les deux entreprises ont fourni le même volume de pierre pour un mur de 1m de haut, les écarts pouvaient être d'environ 25% sur les murs de 3m et 5m de haut. La largeur de la base ou la profondeur des fondations (en général autour de 30 cm) peuvent expliquer ces écarts.

2.3.2. Evaluation financière

Les informations contenues dans le tableau suivant supposent la construction d'un mur à finition soignée, sur un chantier sans difficultés d'accès particulières, avec une carrière à 60km du chantier et un type de sol terreux. L'accès peut influencer sur la façon dont les fondations seront réalisées par exemple. S'il n'est pas possible de faire venir un engin, les fondations doivent être creusées à la main, ce qui a un impact important sur le coût de la main d'œuvre. Le mur en pierre sèche permet de profiter des matériaux locaux et qui se trouvent donc à proximité du chantier. Une carrière à 60km du chantier est un cas typique. Nous prenons en particulier ici le cas d'un mur en calcaire avec un prix d'achat d'environ 66 euros TTC le m^3 en vrac. Le tableau suivant récapitule ces informations. Les prix sont donnés TTC.

Hauteur du mur (m)	Coût main d'œuvre €	Coût des pierres €	Transport pierres €	Total €
1	277	76	30	381
3	707	432	168	1307
5	1597	1080	420	3097

Tableau 6 - Coût d'un mur en pierre sèche

Il y a quelques remarques à faire au sujet de ces prix. Premièrement, il faut considérer que le coût horaire d'un artisan est à priori un peu plus élevé que celui d'un ouvrier du bâtiment. En l'occurrence pour la construction de murs en pierre sèche il y a tout un savoir-faire à mettre en œuvre.

Un autre point important concerne les pierres. Nous avons pu constater que le prix du m^3 de pierre pouvait presque varier du simple au double. Ici nous avons fait le choix de prendre 55 euros hors taxes pour 1m^3 de calcaire en vrac mais il ne faut pas oublier que cela dépend sensiblement des carrières qui sont aux alentours et des pierres disponibles dans la région. Il y a une grande latitude sur



le prix à ce niveau-là. Enfin, le transport des pierres joue lui aussi un rôle non négligeable et est à prendre en compte.

Ce que nous pouvons dire au sujet de cette estimation financière est qu'elle fournit normalement un bon ordre de grandeur du prix d'un mur en pierre sèche. Cependant, il faut garder à l'esprit tous les paramètres qui rentrent en compte et qui pourraient sensiblement faire augmenter ou diminuer le coût total.

Enfin, en ce qui concerne l'entretien et la restauration, il semblerait qu'un petit peu d'entretien permette de faire durer considérablement ce type de mur. Les coûts étant a priori négligeables comparés aux frais de construction ils n'ont pas été pris en compte dans la modélisation.

Comme pour la technologie béton, voici un tableau comparatif des estimations. On peut constater que pour la pierre sèche, nos résultats sont assez similaires avec ceux trouvés par l'autre groupe. La principale différence apparaît pour le mur de 1m de hauteur. Le groupe précédent considérait un volume de pierre presque deux fois inférieur à celui que nous avons obtenu auprès des artisans contactés (0.34m^3 au lieu de 0.70m^3). D'où l'écart entre les deux estimations pour le mur de 1m de hauteur.

Hauteur (m)	Première estimation €	Deuxième estimation €
1	140	381
3	1295	1307
5	3480	3097

Tableau 7 - Pierre sèche - comparaison de nos résultats avec ceux de l'autre groupe

Nos résultats pour la pierre sèche nous paraissent crédibles car les informations récoltées auprès des artisans étaient **détaillées** et **cohérentes entre elles**. Nous évaluons notre indice de confiance à 3.

2.4. Technologie gabion

2.4.1. Dimensionnement

D'après ce que nous avons trouvé, il semblerait que le dimensionnement des murs en gabion soit très similaire à celui des murs en pierre sèche. Le tableau suivant reprend donc les volumes de pierre :



Hauteur du mur (m)	$V_{\text{pierre}}(\text{m}^3)$
1	0.7
3	3.4
5	8.7

Tableau 8 - Mur en gabions - volume de pierres nécessaires en fonction de la hauteur de mur

Il y a néanmoins un point assez curieux qu'il faudrait certainement approfondir. Les murs en pierre sèche reposent sur une construction ordonnée et un positionnement optimisé des pierres les unes par rapport aux autres. Pour le gabion, il y a deux techniques. La première demande une pose ordonnée des pierres pour des questions esthétiques et donc se rapproche de la pierre sèche. La seconde (qui peut entraîner une pose jusqu'à 40% moins chère que la précédente) consiste simplement à entasser en vrac les pierres dans la cage d'acier. On peut donc a priori supposer que le volume de pierre pour une pose esthétique est plus important que pour une pose en vrac, car il y aura moins de vides. Cela peut avoir une certaine influence sur la quantité de pierre à acheter, le transport, ainsi que la pose.

2.4.2. Evaluation financière

Nous n'avons malheureusement pu recueillir que très peu d'informations sur le gabion. Le seul document dont nous disposons est un REX d'un chantier de GFC qui donne des coûts dans un cas bien précis. Afin de comparer les différentes techniques, nous utiliserons ces valeurs, mais il faudrait très certainement approfondir le sujet et trouver d'autres sources d'informations.

Hauteur (m)	Fourniture gabion terramesh €,HT	Pierre calcaire €, HT	Sous-traitant €, HT	Total €
1	41	38.5	52	158
3	200	187	254	769
5	510	478	651	1967

Tableau 9 - Prix d'un mur en gabions

Le prix tient compte du géotextile et des panneaux électro-soudés avec une distance carrière chantier d'environ 50km. La main d'œuvre correspond en général plus à un ouvrier du bâtiment et non à un artisan. L'entretien est négligeable car les cages métalliques peuvent être efficacement protégées contre la corrosion.

Comme pour la pierre sèche, voici un tableau comparatif par rapports aux résultats trouvés par l'étude précédente :



Hauteur (m)	Première estimation €	Deuxième estimation €
1	130	158
3	970	769
5	2670	1967

Tableau 10 - Gabions - comparaison de nos résultats avec ceux de l'autre groupe

On constate ici des écarts plus importants. Le REX à partir duquel nous avons extrait les informations constitue malheureusement un cas très particulier et ne permet a priori pas d'avoir un recul suffisant sur l'estimation des coûts. Il y avait trop de paramètres définis pour que l'on puisse considérer ces prix comme une estimation générale du prix d'un mur en gabion. Notre indice de confiance pour le mur en gabion est de 2.

2.5.Synthèse et comparaison

Le graphique suivant récapitule ce qui vient d'être vu :

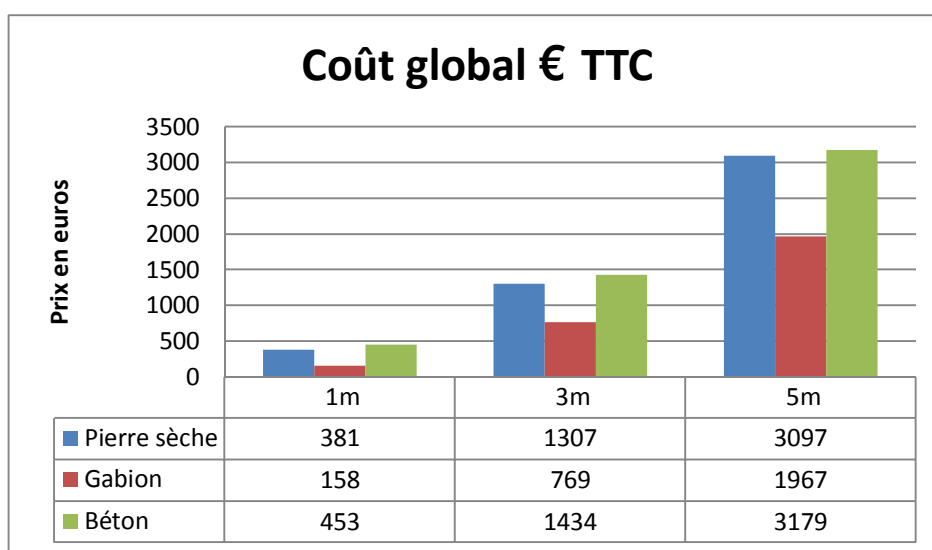


Figure 26 - Synthèse comparative de l'étude de prix

On constate que le gabion semble être la solution la plus économique. Cependant, comme précisé un peu plus haut, le peu d'informations relatives à la construction des murs en gabion demande de considérer avec précautions ces valeurs.

On remarque aussi que, contrairement à ce que l'on pourrait penser, le mur en pierre sèche semble être une technologie compétitive par rapport au béton. En outre, elle possède un rendu esthétique intéressant et permet d'employer des artisans et d'utiliser des produits locaux.

Afin d'améliorer cette évaluation, il faudrait dans un premier temps recueillir plus d'informations au sujet du gabion. Il serait aussi intéressant d'obtenir des informations sur l'acheminement du béton.



Comment les choses se passent-elles en général ? Dans quels cas est-ce qu'il vaut mieux fabriquer son béton sur place ? Enfin, il pourrait être utile d'essayer d'en savoir plus à propos du dimensionnement des fondations pour les murs en pierre sèche et en gabion. Comme précisé un peu plus haut, il semblerait que cela se fasse en fonction du savoir-faire et de l'expérience de l'artisan ou du compagnon.



3. Analyse de Cycle de Vie comparée des trois technologies

Dans une démarche orientée vers le développement durable, il est également très important de prendre en compte les impacts environnementaux des différentes technologies de construction. Pour ce faire, nous allons utiliser une méthode suisse d'ACV.

3.1. Présentation de la méthode

3.1.1. L'Analyse de Cycle de Vie

L'Analyse de Cycle de Vie, ou ACV, est une évolution des méthodes d'écobilan prenant en compte les différentes étapes de la vie d'un produit, de la fabrication de la matière première à l'élimination ou le recyclage du produit. En France, l'ACV est définie et encadrée par des normes telles que la norme ISO 14001. Cette méthode s'appuie sur plusieurs principes :

- Doit être comparé ce qui est comparable. Ainsi, il ne s'agit pas de comparer un produit à un autre mais des fonctions équivalentes. Il s'agit de l'unité fonctionnelle.
Exemple : On ne peut comparer « une canette » et « une bouteille en plastique » puisque les formats peuvent varier. Une unité fonctionnelle pertinente serait « un récipient contenant 1L de liquide ».
- Un résultat ne peut être utilisé qu'au regard des hypothèses prises.
- Le calcul ne pouvant être exact, il convient d'identifier les simplifications pertinentes.

Le choix de la zone géographique, du cadre d'utilisation et des étapes de la vie du produit considérées sont donc déterminants, mais pas seulement. Cette méthodologie s'appuie sur des indicateurs, représentant les impacts qui doivent être quantifiés dans l'étude, dont une bonne compréhension et analyse est primordiale.

Cette méthode suisse a été publiée en 1990 et sa dernière actualisation, effectuée avec la collaboration des milieux de la recherche, de l'industrie et des offices fédéraux, date de 2009. Les données des écobilans se fondent sur les flux de matière et d'énergie, qui sont évalués compte tenu de leur influence sur l'environnement. De ces flux de matière et d'énergie peuvent être tirées une évaluation globale et des évaluations partielles.

3.1.2. Eco-Invent

Eco-Invent est une entreprise à but non lucratif suisse complétant, vérifiant et entretenant la base de données sur laquelle nous nous basons. Elle est utilisée dans de nombreuses analyses de cycle de vie suisses, dont certaines sont automatisées par des outils à destination des professionnels tels qu'Eco-bat. Eco-Invent se base bien évidemment sur la législation suisse en matière de gestion environnementale, et est très reconnue à l'extérieur. Elle présente également l'énorme avantage d'être centrée sur le domaine du Génie Civil, en prenant en compte dans ses 280 entrées des matériaux, des procédés et des activités.



Nous utilisons la version libre d'accès de ces données, dont la dernière mise à jour a été opérée en Janvier 2011. Nous verrons par la suite que cela implique des hypothèses supplémentaires pour estimer l'impact environnemental de certains éléments.

3.1.3. Indicateurs utilisés

L'évaluation globale des impacts environnementaux d'un système est exprimée par l'intermédiaire d'écopoints, indicateur créé par Eco-Invent. Les écopoints (UBP) quantifient les charges environnementales résultant de l'utilisation des ressources énergétiques, de la terre et de l'eau douce, des émissions dans l'air, l'eau et le sol, ainsi que de l'élimination des déchets. Plus le nombre d'écopoints est grand, plus l'effet est négatif sur l'environnement. L'évaluation fondée sur la méthode de la raréfaction des ressources (UBP) fournit une récapitulation complète des répercussions sur l'environnement et se fonde sur la politique environnementale suisse.

Cet indicateur prend en compte d'autres indicateurs, que nous calculerons également. Les voici :

- **Energie grise:** L'énergie grise indique l'énergie cumulée de la consommation énergétique fossile, nucléaire et hydraulique. La charge environnementale due à l'énergie grise est comprise dans l'évaluation globale UBP. L'énergie grise est une valeur connue dans la construction, elle est indiquée séparément.
- **Effet de serre:** L'effet de serre évalue les effets de différents gaz à effet de serre par rapport à la substance principale qu'est le CO₂. La charge environnementale due à l'effet de serre est contenue dans l'évaluation globale UBP. L'évaluation partielle de l'effet de serre est un indice établi politiquement, raison pour laquelle il est mentionné séparément.

3.1.4. Cadre et hypothèses de la démarche.

L'unité fonctionnelle étudiée est, pour chaque technologie, l'ouvrage élémentaire, tout au long de son cycle de vie. Tous les flux d'énergie et de matières, entrants et sortants du système, sont pris en compte, pour chaque étape de la vie de l'ouvrage. Les données concernant les matériaux prennent en compte à la fois la fabrication du matériau et sa destruction. Nous supposons être en France ou en Suisse et que le site ne comporte pas de difficulté d'accès. De plus, le sol est plat en amont du mur de soutènement, avec une pente de 20° en aval et l'entretien ne sera pas pris en compte.

Les différentes étapes du cycle de vie de notre mur seront donc les suivantes :

- Fabrication du matériau
- Transport du matériau jusqu'au chantier – *nous supposons l'approvisionnement à 45km pour le béton et à 60km pour le gabion et la pierre sèche*
- Construction du mur et travaux de terrassement – *dont élimination de la terre excavée*
- Elimination du matériau – *la valorisation n'est pas prise en compte par la méthode, l'élimination étant identique pour un béton que pour une pierre de taille*

Dans cette partie, nous introduisons à nouveau un indice de fiabilité K permettant d'offrir un peu de recul sur les résultats proposés. K varie de 1 à 4 (1 = peu fiable ; 2 = moyennement fiable ; 3 = fiable ; 4 = très fiable). Nous expliquerons systématiquement les sources d'erreurs que nous avons identifiées et les imprécisions de la méthode.



3.2. Technologie pierres sèches

3.2.1. Obtention et élimination du matériau utilisé

Il n'existe pas de données concernant directement les pierres sèches dans le tableau de l'écobilan. Le matériau présent dans le tableau se rapprochant le plus des pierres sèches est le gravier rond. A défaut de données pertinentes et pour ne pas fausser toute l'évaluation de la fiabilité de notre méthode, nous supposons que cette approximation est fiable. Un kilogramme de gravier correspond à l'impact environnemental suivant :

UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
57,8	0,236	0,0113

Tableau 11 : Données Ecobilan – 1kg de gravier rond. K = 3.

Dans la partie 2, nous avons calculé le volume de pierres sèches nécessaires pour la construction des ouvrages élémentaires. En considérant que le matériau utilisé est du calcaire, la masse correspondante est obtenue en multipliant le volume de pierres par la masse volumique du calcaire, soit 2 650 kg/m³.

Le tableau suivant récapitule les impacts du flux de matière pour les différents ouvrages élémentaires :

	Volume (m ³)	Masse de pierres (kg)	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
O.E.1	0,70	1 855	107 219	437,78	20,96
O.E.2	4,00	10 600	612 680	2501,60	119,78
O.E.3	10,00	26 500	1 531 700	6254,00	299,45

Tableau 12 : Impact environnemental du matériau selon l'O.E. pour PS. K = 2.

Notons que ce calcul est très dépendant du volume de pierre considéré, qui varie sensiblement d'un artisan à un autre.

3.2.2. Transport

A partir des différentes informations que nous avons pu récupérer auprès des professionnels de la pierre sèche, une distance carrière-chantier de 60 km semble tout à fait raisonnable. Les données choisies correspondent à un camion de 28 tonnes. C'est le moyen de transport plus largement utilisée pour ce type de matériau et ce type d'ouvrage.

Les valeurs données par le tableau pour un camion de 28 tonnes (en t.km) sont les suivantes :

UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
215	3,27	0,195

Tableau 13 : Données Ecobilan - Transport 28 tonnes. K = 4.



Le tableau suivant récapitule les impacts du transport des pierres jusqu'au chantier pour les différents ouvrages élémentaires :

	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
O.E.1	23 929	363,95	21,70
O.E.2	136 740	2 079,72	124,02
O.E.3	341 850	5 199,30	310,05

Tableau 14 : Impact environnemental du transport selon l'O.E. pour PS. K = 2.

Là encore, le calcul dépend énormément du volume de pierres considéré. Notons aussi que la distance indicative du chantier à la carrière n'est qu'une moyenne.

3.2.1. Fabrication du mur

Lors de la fabrication d'un mur en pierre sèche, seule l'étape de terrassement mécanique du talus est à prendre en compte pour l'évaluation des impacts environnementaux. En effet, toutes les autres étapes sont effectuées manuellement par les ouvriers.

Les données 2011 de l'écobilan présentent dans la partie « transport de marchandises » des valeurs concernant les excavations mécaniques. Elles s'expriment en fonction du volume excavé (en m³).

UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
664	8,07	0,534

Tableau 15 : Données Ecobilan - Excavation

Nous considérerons les volumes excavés et remblayés identiques dans les trois technologies, ce qui est une approximation crédible. Les guides de bonnes pratiques nous recommandent d'excaver, derrière un mur de soutènement, une quantité de terre selon un rapport 3 : 2 (2 mètres de longueur pour 3 mètres de hauteur). Doivent donc être excavées les zones T1 et T2 indiquées en Figure 27. Seule la zone T2 devra être remblayée. Rappelons que dans nos hypothèses, le sol est bien plat en amont du mur, et avec une pente de 20° en aval. Le volume déplacé correspond à la somme de ces deux volumes de terre.

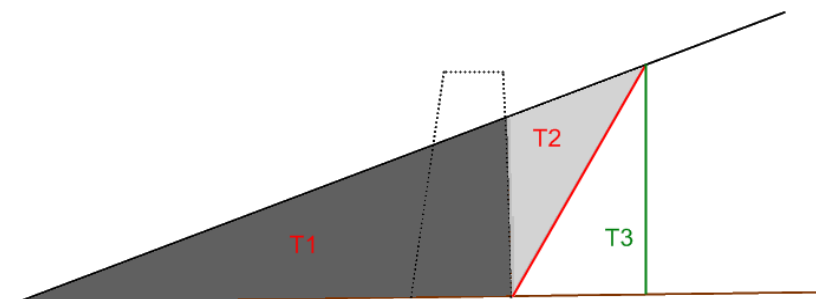


Figure 27 : Volumes excavés et remblayés.

Voici donc l'impact de l'excavation :



	Volume déplacé (en m ³)	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
O.E.1	2,65	1 761,28	21,41	1,42
O.E.2	23,87	15 851,50	192,65	12,75
O.E.3	66,31	44 031,95	535,15	35,41

Tableau 16 : Impact environnemental de l'excavation et du remblaiement selon l'O.E. pour PS. K = 3.

Bien que variable suivant les habitudes des artisans, la règle du 3 : 2 est très facile à mémoriser donc largement répandue. Ce calcul est donc fiable.

3.2.2. Entretien du mur

L'entretien du mur consiste principalement à surveiller le mur, à enlever la végétation se développant dans ou autour du mur et à remplacer quelques pierres dans le cas où le mur s'effondre partiellement. La première action n'a bien évidemment aucun impact environnemental. Par ailleurs, la végétation peut être enlevée à la main, ou à la scie pour les troncs d'arbres plus conséquents. Enfin, les quelques pierres remplaçantes sont très souvent recueillies sur le terrain, et posées à la main. Par conséquent, l'impact environnemental de la phase d'entretien du mur est nul.

Cet entretien n'étant pas pris en compte dans notre étude, nous n'avons pas de calcul supplémentaire à mener.

3.2.2.1. Comparaison des différentes étapes du cycle de vie

La comparaison des apports des différentes phases du cycle de vie du mur en pierres sèches montre que c'est le flux de matière qui a le plus grand impact global environnemental. Il représente 80 % de l'impact environnemental total. Vient ensuite le transport, avec 18 %. L'excavation représente seulement 2% de l'impact total. En revanche, d'un point de vue de l'énergie grise ou de l'émission de CO₂, l'impact du transport et du matériau sont comparables.

	Matériau	Transport	Excavation
O.E.1	1,07E+05 (81 %)	2,39E+04 (18 %)	1,76E+03 (1 %)
O.E.2	6,13E+05 (80 %)	1,37E+05 (18 %)	1,59E+04 (2 %)
O.E.3	1,53E+06(80 %)	3,42E+05 (18 %)	4,40E+04 (2 %)

Tableau 17 : UBP des étapes du cycle de vie pour les murs PS. K = 2.

	Matériau	Transport	Excavation
O.E.1	437,78 (53 %)	363,95 (44 %)	21,41 (3 %)
O.E.2	2 501,60 (52 %)	2 079,72 (44 %)	192,65 (4 %)
O.E.3	6 254(52 %)	5 199,30 (43 %)	535,15 (5 %)

Tableau 18 : Energie Grise (MJ) des étapes du cycle de vie pour les murs PS. K = 2.

	Matériau	Transport	Excavation
O.E.1	20,96 (48 %)	21,70 (49 %)	1,42 (3 %)
O.E.2	119,78 (47 %)	124,02 (48 %)	12,75 (5 %)
O.E.3	299,45(47 %)	310,05 (48 %)	35,41 (5 %)

Tableau 19 : Emission de CO₂ (kg) des étapes du cycle de vie pour les murs PS. K = 2.



La fiabilité générale est ici grevée par la variabilité du volume de pierres, étant donné l'importance du volume de matériau dans les deux postes influant sur le bilan.

3.2.2.2. Comparaison de l'impact environnemental en fonction de l'ouvrage élémentaire

Les impacts globaux et partiels en fonction de l'ouvrage élémentaire sont donnés dans le tableau ci-dessous :

	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
O.E.1	1,33E+05	823,14	44,08
O.E.2	7,65E+05	4 773,97	256,55
O.E.3	1,92E+06	11 988,45	644,91

Tableau 20 : Impacts environnementaux en fonction des O.E. pour les murs PS. K = 2.

Les courbes suivantes récapitulent ces résultats et permettent de voir l'évolution des impacts en fonction de l'ouvrage élémentaire. Nous constatons que ces impacts ne dépendent pas linéairement, dans la majorité des cas, de la hauteur.

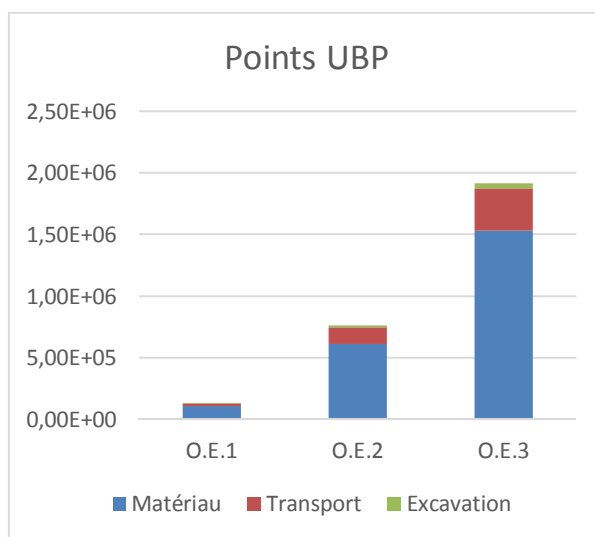
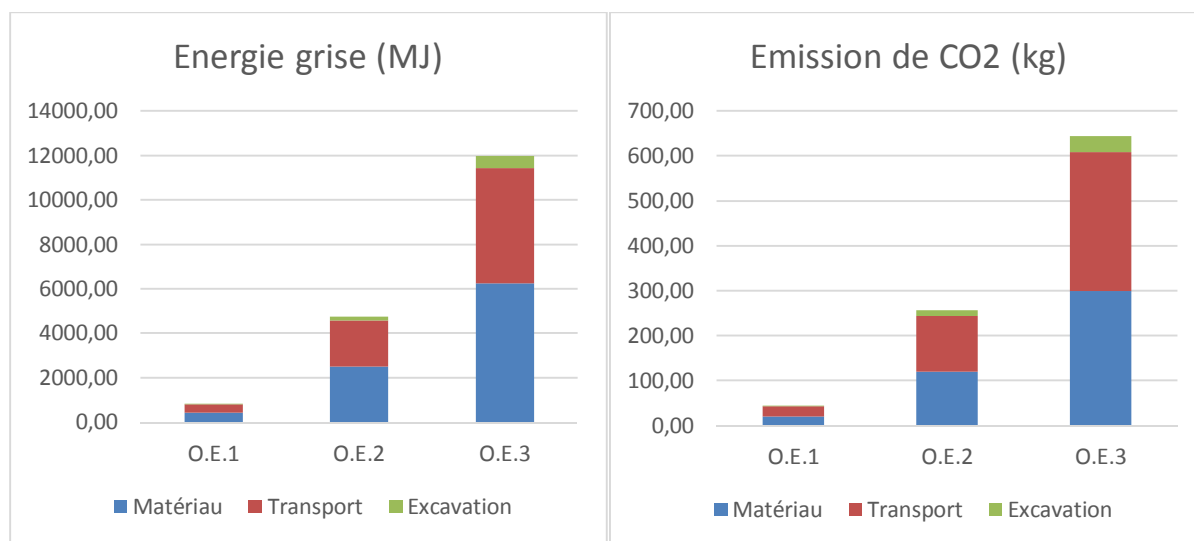


Figure 28 : Points UBP pour la PS selon l'O.E. et les différents postes

Figure 29 : Energie grise et émission de CO₂ pour la PS selon l'O.E. et les différents postes

3.3.Technologie gabion

3.3.1. Obtention et élimination du matériau utilisé

De même que pour la technologie pierre sèche, nous choisissons de représenter les pierres remplissant les cages métalliques par un matériau proche, du gravier concassé. Le concassage est une opération très importante dans le procédé de fabrication de la garniture des cages, ce qui représentera bien la différence entre la pierre sèche et le matériau de gabion.

Mais nous devons également considérer l'impact des cages en acier. Pour cela, nous choisissons les données correspondant à l'acier d'armature.

	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO2 _{eq} (kg)
Gravier concassé	62	0,316	0,0133
Acier d'armatures	2430	14	0,705

Tableau 21: Données EcolInvent – 1kg de gravier concassé et 1kg d'acier d'armatures. K = 4.

Les masses de pierre et d'acier nécessaires pour chaque O.E. nous permettent de calculer les impacts des flux de matière pour cette technique des gabions. Nous considérons que les pierres sont en calcaire, ce qui nous donne une masse volumique de 2 650 kg/m³, tandis que nous considérons qu'il faut 13 kg d'acier par m³ de gabion. Voilà tout d'abord un tableau présentant le nombre de mètre-cube de gabions nécessaires pour chaque ouvrage. Rappelons que nous n'avons pu qu'estimer les quantités de gabion nécessaires.



	Volume de gabion nécessaire (m ³)
O.E.1	0,7
O.E.2	4,0
O.E.3	10

Tableau 22: Volumes de gabions nécessaires pour chaque O.E. K = 2.

Nous présentons maintenant l'influence de ces deux matériaux.

	Masse de pierres (kg)	Masse de l'acier (kg)	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
O.E.1	1 855	9,10	1,37E+05	713,58	31,09
O.E.2	10 600	52,00	7,84E+05	4 077,6	177,6
O.E.3	26 500	130,00	1,96E+06	10 194	444,1

Tableau 23: Impact environnemental du matériau selon l'O.E. pour les gabions. K = 2.

Il est intéressant de noter que l'impact de l'acier est très important : alors qu'il ne représente que 0,5% du poids total d'un gabion (cage et pierres), sa part représente de 16 à 20% des points UB. Cela est dû au fait que la production d'acier est très gourmande en énergie. Le calcul est toutefois sujet à variations, la quantité de matériau pouvant varier suivant le constructeur.

3.3.2. Transport

En ce qui concerne le transport de la pierre pour les gabions, nous reprenons les données considérées pour la pierre sèche.

Les valeurs données par le tableau pour un camion de 28 tonnes (en t.km) sont les suivantes :

UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
215	3,22	0,19

Tableau 24: Données Ecoinvent - Transport 28 tonnes

Le tableau suivant récapitule les impacts du transport des pierres et des cages jusqu'au chantier pour les différents ouvrages élémentaires. Nous considérons aussi que l'acier doit être transporté sur 60 km.

	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
O.E.1	24 047	365,74	21,81
O.E.2	137 410	2 089,92	124,63
O.E.3	343 527	5 224,81	311,57

Tableau 25: Impact environnemental du transport selon l'O.E. pour les gabions. K = 3.



3.3.3. Fabrication du mur

Pour la construction d'un mur en gabion, il faut une fois encore considérer l'étape de terrassement. Une fois les cages installées, il faut remblayer l'espace situé derrière avec de la terre : là aussi, on considère un terrassement, avec le volume correspondant.

De même que pour le mur en pierres sèches, on reprend les données de 2011. Rappelons que nous considérons que le volume excavé et remblayé est identique dans les trois cas. Les volumes de pierre (et donc de cage) étant presque identiques entre la pierre sèche et les gabions, cette hypothèse est très crédible.

UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
665	8,03	0,53

Tableau 26: Données Ecobilan - Excavation

Le tableau suivant récapitule les impacts de l'excavation pour les différents ouvrages élémentaires :

	Volume déplacé (en m ³)	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
O.E.1	2,65	1 761,28	21,41	1,42
O.E.2	23,87	15 851,50	192,65	12,75
O.E.3	66,31	44 031,95	535,15	35,41

Tableau 27 - Impact environnemental de l'excavation selon l'O.E. pour les gabions. K = 3.

3.3.4. Entretien du mur

Les murs en gabions ne nécessitent aucun entretien.

3.3.5. Bilan

3.3.5.1. Comparaison des différentes étapes du cycle de vie

Lorsque l'on s'intéresse au bilan global de la construction de murs de soutènement en gabion en termes d'écopoints UBP, on remarque que c'est le poste matériaux qui a le plus grand impact, comme c'était le cas pour les murs en pierre sèche. Cette tendance s'affirme aussi pour les deux autres indicateurs, bien que moins nette. Il s'agit bien évidemment de l'impact des armatures : représentant peu de masse (totale) et ne changeant rien aux travaux d'excavation, les postes transport et excavation sont quasiment identiques à ceux de la pierre sèche. Seul celui du matériau change, ce qui se traduit sur un impact fort supplémentaire : la production des aciers d'armature.

	Matériau	Transport	Excavation
O.E.1	1,37E+05 (84 %)	2,40E+04 (15 %)	1,76E+03 (1 %)
O.E.2	7,84E+05 (84 %)	1,37E+05 (15 %)	1,59E+04 (1 %)
O.E.3	1,96E+06(83 %)	3,44E+05 (15 %)	4,40E+04 (2 %)

Tableau 28 : UBP des étapes du cycle de vie pour les murs gabion. K = 1.



	Matériau	Transport	Excavation
O.E.1	713,58 (65 %)	365,7 (33 %)	21,41 (2 %)
O.E.2	4 078 (64 %)	2 090 (33 %)	192,65 (3 %)
O.E.3	10 194 (64 %)	5 225 (33 %)	535,15 (3 %)

Tableau 29 : Energie Grise (MJ) des étapes du cycle de vie pour les murs gabion. K = 1.

	Matériau	Transport	Excavation
O.E.1	31,09 (57 %)	21,81 (40 %)	1,42 (3 %)
O.E.2	177,64 (56 %)	124,63 (40 %)	12,75 (4 %)
O.E.3	444,10 (56 %)	311,57 (39 %)	35,41 (5 %)

Tableau 30 : Emission de CO₂ (kg) des étapes du cycle de vie pour les murs gabion. K = 1.

La fiabilité dépend ici énormément de la quantité de pierre choisie, puisque la quantité d'armatures en découle.

3.3.5.2. Comparaison de l'impact environnemental en fonction de l'ouvrage élémentaire

Les impacts globaux et partiels en fonction de l'ouvrage élémentaire sont donnés dans le tableau ci-dessous :

	UBP	Energie grise (MJ _{eq})	Emissions de CO _{2eq} (kg)
O.E.1	1,63E+05	1100,72	54,31
O.E.2	9,37E+05	6360,18	315,02
O.E.3	2,35E+06	15953,95	791,08

Tableau 31 - Impacts environnementaux en fonction des O.E. pour les murs en gabions

Les courbes suivantes récapitulent ces résultats et permettent de voir l'évolution des impacts en fonction de l'ouvrage élémentaire. Nous constatons une fois de plus que ces impacts ne dépendent pas linéairement, dans la majorité des cas, de la hauteur de mur.

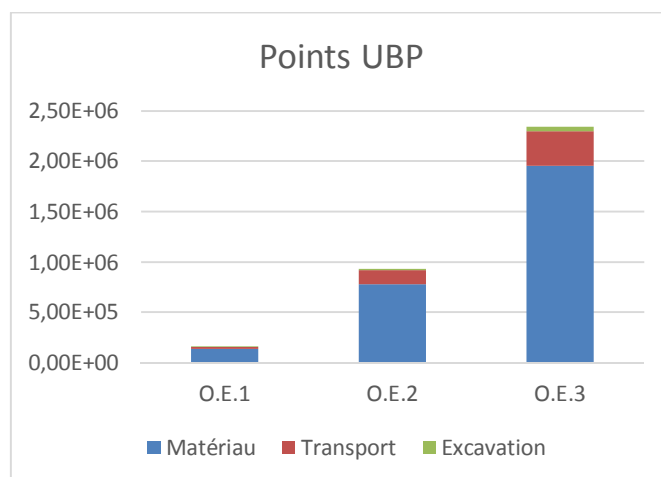


Figure 30 : Points UBP pour le gabion selon l'O.E. et les différents postes

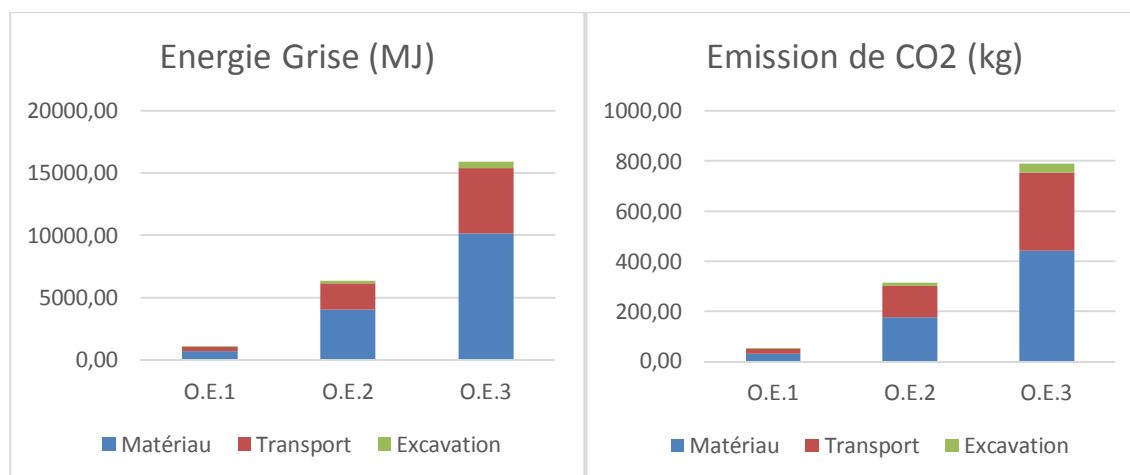


Figure 31 : Energie grise et émission de CO₂ pour le gabion selon l'O.E. et les différents postes

3.4. Technologie béton

3.4.1. Obtention et élimination des matériaux utilisés

3.4.1.1. Production du béton

La production du béton est une activité qui dégage énormément de CO₂ et l'industrie cimentière française a contribué en 2003 à 2,7% des rejets nationaux de gaz à effet de serre. La production du béton est donc une activité à fort impact environnemental.

Différents types de béton sont répertoriés dans le tableau récapitulatif de l'écobilan, du béton maigre C 8/10 jusqu'au béton C 50/60. Les murs étant soumis à des charges très importantes, on choisit un béton suffisamment résistant : le béton 25/30.

Pour chaque kg de béton produit et détruit, nous avons les données suivantes :

UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO _{2eq} (kg)
664	8,07	0,534

Tableau 32: Données Ecolinvent – 1kg Béton C25/30

Les volumes et masses de béton correspondantes sont calculés à partir de notre outil de dimensionnement, ce qui nous permet de chiffrer très précisément les impacts environnementaux de l'utilisation du béton :



	Masse de béton (kg)	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
O.E.1	672	64 512	484,51	52,08
O.E.2	2580	247 680	1860,18	199,95
O.E.3	6084	584 064	4386,56	471,51

Tableau 33: Impacts environnementaux de la production du béton pour chaque O.E. ; K = 4.

3.4.1.2. Production de l'acier

L'acier est un composant essentiel dans les murs en béton. Il est produit par fusion de différents composants dans de grosses usines.

Les données de l'écobilan pour l'acier sont relatives à l'acier sans zinc pour l'armature (le plus fréquemment utilisé dans la construction):

UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
2430	14	0.705

Tableau 34: Données Ecolinvent– Acier d'armatures

Elles nous permettent, là encore, grâce à notre dimensionnement, d'établir les impacts environnementaux de la production de ces armatures :

	Masse d'acier nécessaire (kg)	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
O.E.1	16,73	40 651	234,21	11,79
O.E.2	99,74	242 356	1 396,29	70,31
O.E.3	328,65	798 619	4601,10	231,70

Tableau 35: Impacts environnementaux de la production d'acier par O.E. ; K = 4.

3.4.1.3. Bilan production et destruction

Voici le bilan total pour la production et la destruction des deux composants :

	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
O.E.1	1,05E+05	719	63,87
O.E.2	4,90E+05	3 256	270,26
O.E.3	1,38E+06	8 988	703,21

Tableau 36: Bilan de l'impact environnemental de la production et de la destruction des matériaux pour la technologie béton. K = 4.



L'acier influe pour environ 50% de ce bilan pour les indicateurs UBP et Energie Grise, et pour 25% dans le cas des émissions de CO₂. Notons que son impact est systématiquement bien plus faible dans l'O.E.1, qui demande très peu d'armatures.

3.4.2. Transport

3.4.2.1. Transport du béton et de l'acier.

On considère comme plus économique l'achat du béton directement fini (mélange fait en usine, et non sur le chantier). La distance de transport a été fixée à 45 km entre le lieu de la production et le chantier. Cette supposition a été déduite du choix effectué pour la pierre sèche et le gabion, en supposant donc les filières béton implantées plus régulièrement et donc plus accessibles que les carrières. Les camions bétonnières 28 tonnes étant suffisants, ils ont été pris pour le calcul du bilan environnemental. Ce qui permet d'obtenir les impacts suivants pour le transport du béton :

	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO _{2eq} (kg)
O.E.1	6 663	101,35	6,04
O.E.2	25 926	394,32	23,51
O.E.3	62 042	943,62	56,27

Tableau 37: Calcul des impacts environnementaux du transport de béton armé pour chaque O.E. ; K = 2.

Ce calcul n'est donc qu'une estimation. Nous verrons en revanche par la suite qu'il influera peu sur le total.

3.4.3. Construction du mur

Le mode de construction des murs en béton consiste en plusieurs étapes successives : le terrassement, le ferrage de la semelle et de la voile, puis le coulage du béton.



Figure 32: Etapes de la construction d'un mur de béton en L

Nous ne prendrons en compte que l'impact environnemental du terrassement. Les calculs faits par le groupe précédent montrent que les machines spécifiques représentent une part négligeable de l'impact total de l'étape de construction. Cette étape donne les mêmes résultats que l'impact environnemental du terrassement pour les murs en pierres sèches.



3.4.4. Entretien du mur

L'entretien des murs en béton est assez simple. En effet, il suffit de faire un nettoyage complet du dispositif de drainage, pour que l'écoulement d'eau puisse être suffisant. Ce traitement des murs en béton n'emploie pas d'outils polluants ni de nouveaux matériaux. La pollution engendrée par l'entretien des murs en béton est donc très faible.

Ne disposant pas de données sur la question, nous pouvons donc toutefois affirmer que la prise en compte de cet entretien est négligeable.

3.4.5. Démolition du mur

Ne disposant pas de critères pertinents, aucune évaluation chiffrée de ces impacts n'a été prise en compte en dehors des impacts d'élimination des matériaux inclus dans la base de données Eco-invent (dans le bilan même des matériaux). Néanmoins, constatant qu'un béton représente la même pollution lors de l'élimination qu'un gravier rond, force est de constater que l'élimination n'est ici qu'une mise en décharge, directement liée donc à la quantité de matériaux. Cette lacune dans les données dont nous disposons est très gênante pour le béton, puisque la réutilisation intégrale de la garniture des gabions et des pierres sèches est une force de ces deux méthodes sur le plan environnemental.

3.4.5.1. Comparaison de l'impact environnemental en fonction de l'ouvrage élémentaire

Après les calculs de toutes les étapes du cycle de vie, un bilan total est nécessaire, selon les différents indicateurs. Notons que la fiabilité est entachée par la faiblesse du modèle en termes d'élimination ou de réutilisation du matériau. Néanmoins, dans le cadre d'une étude où cette fin de vie ne serait pas prise en compte, les résultats sont assez fiables. Le seul axe à développer serait éventuellement celui du poste chantier (limité actuellement à l'excavation).

	Matériau	Transport	Excavation
O.E.1	1,05E+05 (93 %)	6,66E+03 (6 %)	1,76E+03 (1 %)
O.E.2	4,90E+05 (92 %)	2,59E+04 (5 %)	1,59E+04 (3 %)
O.E.3	1,38E+06(93 %)	6,20E+04 (4 %)	4,40E+04 (3 %)

Tableau 38 : UBP des étapes du cycle de vie pour les murs béton. K = 3.

	Matériau	Transport	Excavation
O.E.1	718 (85 %)	101,35 (12 %)	21,41 (3 %)
O.E.2	3 256 (85 %)	394,32 (10 %)	192,65 (5 %)
O.E.3	8 988(86 %)	943,62 (9 %)	535,15 (5 %)

Tableau 39 : Energie Grise (MJ) des étapes du cycle de vie pour les murs gabion. K = 3.

	Matériau	Transport	Excavation
O.E.1	63,87 (90 %)	6,04 (8 %)	1,42 (2 %)
O.E.2	270,26(88 %)	23,51 (8 %)	12,75 (4 %)
O.E.3	703,21(88 %)	56,27 (7 %)	35,41 (5 %)

Tableau 40 : Emission de CO₂ (kg) des étapes du cycle de vie pour les murs gabion. K = 3.



Ces calculs nous confirment que le transport a une importance minime dans le cas du béton armé. Cela s'explique par le fait que les volumes de béton et d'armature pouvant être optimisés, leur masse totale est bien moindre que celle des pierres à transporter dans les deux autres technologies.

	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
O.E.1	1,14E+05	841	71,33
O.E.2	5,32E+05	3 843	306,53
O.E.3	1,49E+06	10 466	794,89

Tableau 41: Bilan final - UBP, énergie grise et émissions de CO₂ pour chaque O.E. pour le béton

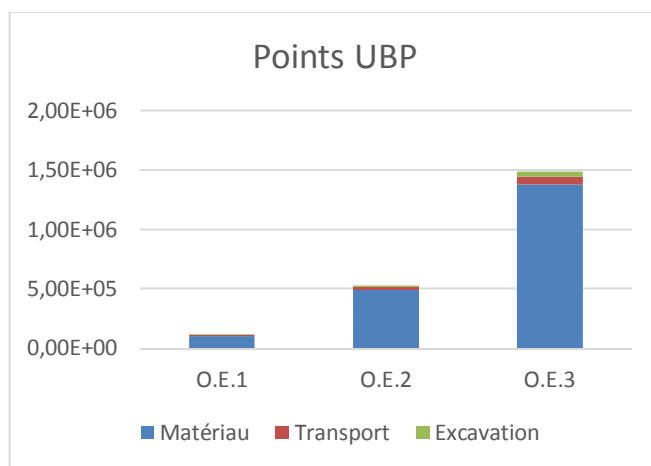


Figure 33 : Points UBP pour le béton armé selon l'O.E. et les différents postes

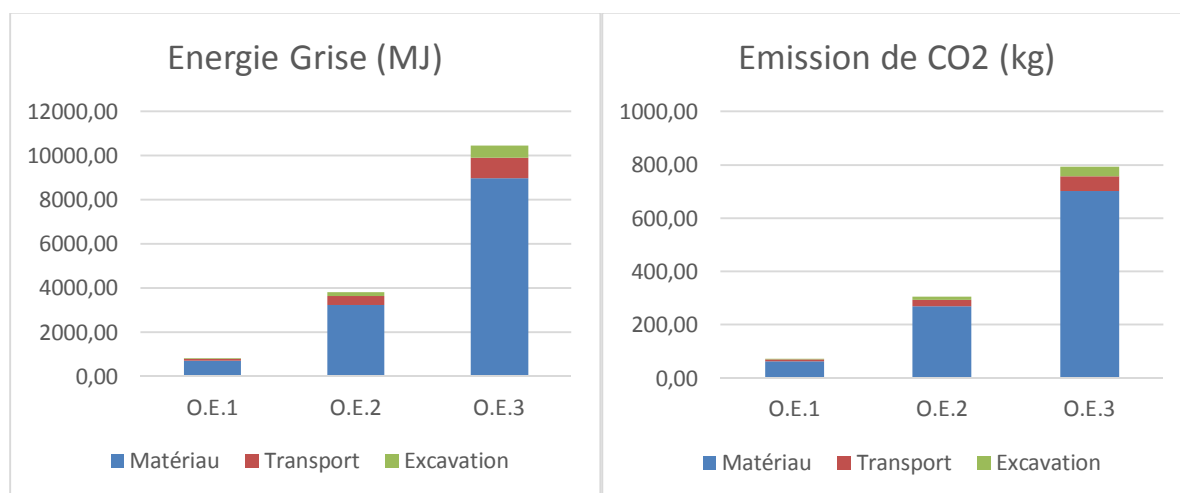


Figure 34 : Energie grise et émission de CO₂ pour le béton armé selon l'O.E. et les différents postes



3.5. Synthèse comparative

Les graphes suivants présentent la comparaison des résultats de l'ACV, par indicateur, entre les trois technologies suivant l'O. E. considérée.

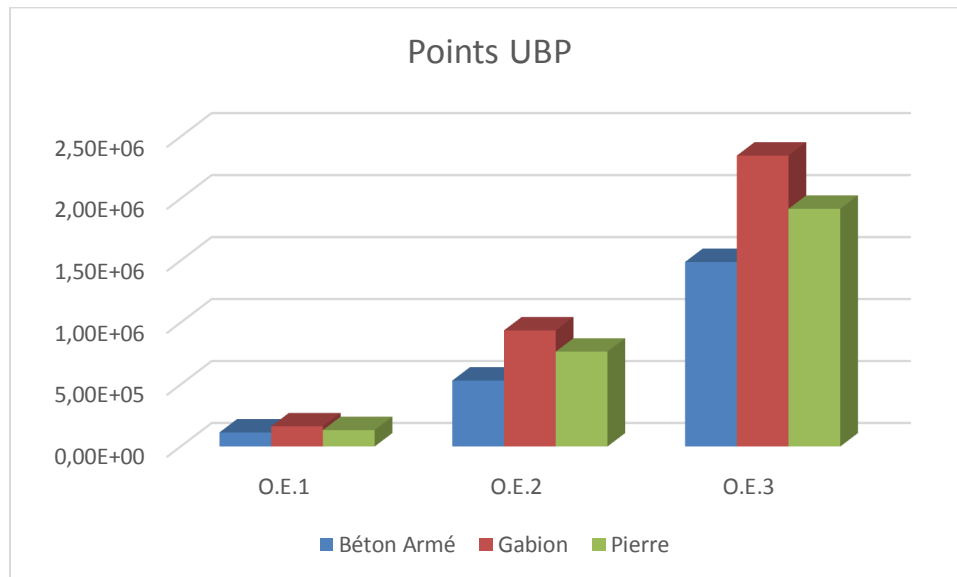


Figure 35 : Comparaison des points UBP pour les trois technologies

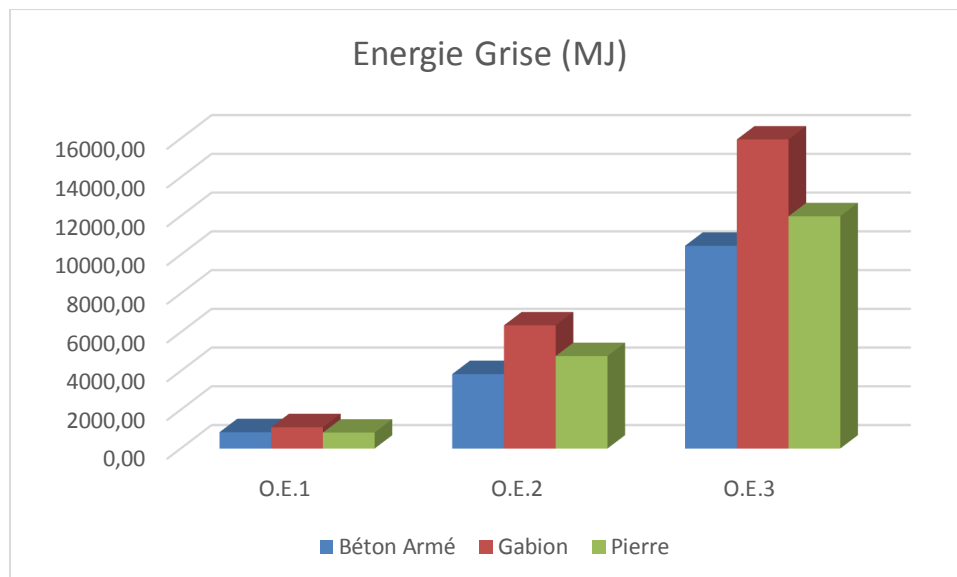


Figure 36 : Comparaison de l'énergie grise équivalente pour les trois technologies

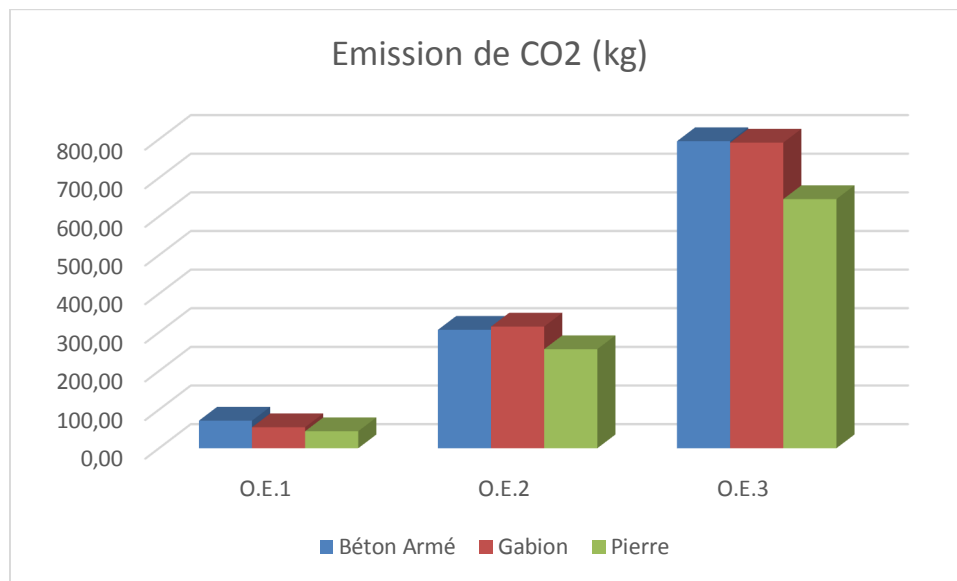


Figure 37 : Comparaison de l'émission de CO2 équivalente pour les trois technologies

La différence de tendances entre les indicateurs, déjà observée précédemment, devient ici flagrante. Il apparaît notamment que les fameux points UBP ne traduisent pas du tout l'impact environnemental de la même façon que les deux autres indicateurs, bien que les UBPs soient censés intégrer l'émission de CO₂ et l'énergie grise. Etant donné les tendances très surprenantes que les points UBP engendrent, nous avons des doutes sur sa pertinence.

Nous pouvons constater que la technologie gabion est la plus dévalorisée par cette démarche ACV. Notons néanmoins quelques points :

- Les postes les plus importants (matériaux et transports) dépendent directement de la quantité de matériau.
- Il est possible d'optimiser, sur le papier au moins, un mur en L en terme de matériaux. C'est bien plus difficile pour de la pierre sèche ou du gabion, sinon impossible. D'autant plus que les quantités prises sont sujettes à variation.
- Le gabion est défavorisé par rapport au béton armé vis-à-vis du transport, alors qu'il contient une masse d'acier comparable au béton (bien que moindre).
- La fin de vie est identique pour les différents matériaux.

Nous comprenons donc que, bien que nécessaires pour poursuivre la démarche, les hypothèses prises désavantagent le gabion et la pierre sèche. Le béton est aussi avantage par le fait que l'optimisation de la quantité de béton nécessaire compense le fort impact du béton à la production (impact néanmoins moindre, selon la base de donnée, que celui d'une même quantité d'acier).

Il est donc malheureusement difficile de tirer une réelle leçon d'une telle analyse. Nous pouvons toutefois remarquer que, sans prendre en compte la fin de vie, le béton n'est pas si sanctionné d'un point de vue environnemental étant donnée la possibilité de faire dans l'économie, par un dimensionnement précis... des ressources.



Une dernière remarque importante : ces chiffres sont dans une vision court-terme. En prenant en compte une vie complète pour ses ouvrages, il faut songer que le mur en béton armé ne tiendra guère plus de 30 ans. De bons murs en pierre sèche ou en gabion, installés par des professionnels, peuvent durer deux ou trois fois plus longtemps avant de devoir être reconstruits, et pour un entretien négligeable.



Conclusion

Un des objectifs principaux de ce projet était de déterminer si le choix de technologies alternatives au béton, comme les pierres sèches ou les gabions, pour la construction de murs de soutènement, pouvait s'avérer avantageux, aussi bien d'un point de vue financier qu'environnemental. L'analyse du cycle de vie de chacune des technologies permet d'aboutir à plusieurs conclusions.

D'un point de vue financier tout d'abord, il apparaît que, contrairement à ce que l'on pourrait penser, la pierre sèche est compétitive. En effet, le coût d'un mur en pierre sèche est équivalent à celui d'un mur en béton. La technologie gabion est la moins chère pour les trois hauteurs de mur considérées. Ceci est dû au fait que l'on n'a pas besoin de main d'œuvre qualifiée pour de tels ouvrages, mais aussi au fait que les données que nous avons pu recueillir proviennent d'un cas particulier et ne sont pas nécessairement représentatives de la réalité.

L'analyse environnementale, en revanche, n'est pas si avantageuse pour la pierre que ce que l'on pourrait penser. En effet, la construction de murs en pierre sèche nécessite une quantité importante de matériaux, et par conséquent le transport est un poste très énergivore, beaucoup plus que dans le cas du béton où la quantité de matériau est moindre et peut être optimisée. La technologie gabion présente le même problème. Ceci dit, l'entretien et la fin de vie du mur entrent peu en compte dans notre étude faute de données. Or les murs en pierre sèche et gabions ont une durée de vie très grande lorsqu'ils sont bien réalisés, ce qui n'est pas le cas du béton qui est rapidement endommagé par les écoulements d'eau. En outre, les pierres constitutives d'un mur en pierre sèche ou gabion peuvent être quasiment intégralement réutilisées. La valorisation du béton est plus complexe et peu maîtrisée à l'heure actuelle.



Bibliographie

Technologie pierres sèches

- CORNU C., *Pierre Sèche, guide de bonnes pratiques de construction de murs de soutènement*, 2007, édité par la CAPEB (Confédération de l'Artisanat et des Petites Entreprises du Bâtiment)
- COSTE P., CORNU C., *Pierre sèche*, 2008, Editions Le bec en l'air

Technologie gabion

- Site de la société France Maccaferri, qui offre des solutions techniques et des produits du type gabions, fibres à bétons, géosynthétiques, pour des aménagements génie civil et environnementaux.
<http://www.maccaferri.fr/index.php>
- Site de la société Aquaterra Solutions, spécialisée dans le soutènement, la stabilité des sols et des berges, les aménagements hydrauliques et paysagers.
www.aquaterre-solutions.fr

Technologie béton

- Site de la SARL Construction Equipement, qui s'occupe de génie civil, bâtiment, rénovation, travaux hydrauliques.
<http://www.construction-equipements.fr/repartition-de-murs.html>
- Site du Département d'ingénierie des structures, EESC – USP, Brésil
<http://www.set.eesc.usp.br/mdidatico/concreto/Textos/03%20Acos.pdf>
- Site du ministère de l'économie, de l'industrie et de l'emploi
<http://www.industrie.gouv.fr/energie/sommaire.htm>
- http://www.hirlimann.net/Charles/journal/2007/06/beton_et_eoliennes.html



Table des figures

Figure 1: Structure d'un mur de soutènement en pierre sèche - Vue en coupe.....	6
Figure 2: Pose des pierres de socle.....	7
Figure 3: Désignation des pierres de bâti: perspective et coupe horizontale.....	7
Figure 4: Ecoulement des eaux pluviales à travers un mur en pierres sèches.....	8
Figure 5: Couronnement des murs en pierre sèche: en grosses pierres plates à gauche, en clavade à droite.....	8
Figure 6: Détermination de la profondeur à donner à la base d'un mur en schiste de 2,5 m de hauteur avec un fruit de 10% soutenant un remblai de sable incliné à 10°	9
Figure 7: Inclinaison des lits perpendiculaire au fruit (à gauche); Fondation sur support rocheux (au centre); Fondation sur sol dur ou meuble (à droite)	10
Figure 8: Règle de croisement des joints: privilégier les jointures décalées (à gauche) pour éviter les coups de sabre (à droite)	11
Figure 9: Croisement des pierres dans un maillage 3D, vue en perspective	11
Figure 10: Gabarits et cordeaux.....	12
Figure 11: Différents types de chasses, d'aiguilles et de têtus.....	12
Figure 12: Chantier en cours de réalisation utilisant la technique du gabion.....	13
Figure 13: Gabions à double torsion	14
Figure 14: Gabions électrosoudés.....	14
Figure 15: Vue de dessus d'un gabion	14
Figure 16: Agrafes entre les différents panneaux.....	15
Figure 17: Tirants de renfort.....	15
Figure 18: Tractopelle remplissant les gabions.....	16
Figure 19: Barres d'alignement.....	16
Figure 20: Agrafeuse pneumatique.....	16
Figure 21: Coupe d'un mur en L.....	17
Figure 22: Eléments d'un mur en L.....	18
Figure 23: Fonctionnement d'un mur en en béton encastré sur semelle; P: poussée des terres du massif soutenu; W: poids des terres à l'aplomb de la semelle ; R : réaction du massif d'assise	18
Figure 24: Exemple de mur cloué.....	19
Figure 25 - Quelques paramètres utilisés pour le dimensionnement des murs en T	22
Figure 26 - Synthèse comparative de l'étude de prix.....	28
Figure 27 : Volumes excavés et remblayés.	33
Figure 28 : Points UBP pour la PS selon l'O.E. et les différents postes.....	35
Figure 29 : Energie grise et émission de CO ₂ pour la PS selon l'O.E. et les différents postes	36
Figure 30 : Points UBP pour le gabion selon l'O.E. et les différents postes.....	39
Figure 31 : Energie grise et émission de CO ₂ pour le gabion selon l'O.E. et les différents postes	40
Figure 32: Etapes de la construction d'un mur de béton en L.....	42
Figure 33 : Points UBP pour le béton armé selon l'O.E. et les différents postes.....	44
Figure 34 : Energie grise et émission de CO ₂ pour le béton armé selon l'O.E. et les différents postes	44
Figure 35 : Comparaison des points UBP pour les trois technologies.....	45
Figure 36 : Comparaison de l'énergie grise équivalente pour les trois technologies.....	45
Figure 37 : Comparaison de l'émission de CO ₂ équivalente pour les trois technologies	46



Annexes

<i>Annexe 1 : Retour d'Expérience Technique (Gabions).....</i>	<i>52</i>
<i>Annexe 2 : Données Eco-Bau pour l'ACV (EcoInvent)</i>	<i>54</i>
<i>Annexe 3 : Dossier Annexe (Fourni avec le rapport).</i>	

Famille : ECRANS ACOUSTIQUES
Entité opérationnelle : Agence Ile de France

Chantier concerné : ECRANS DU LUTH (92)
Date de réalisation : 2002
Responsable chantier : P. HARIOT (bytrp) - L. DAUVOIS

Descriptif du chantier : Le chantier consiste en la réalisation d'un merlon arboré soutenu par des murs en gabions et surmonté d'un écran en béton préfabriqué de longueur 885 ml.

Techniques : Ecran préfa. en trois partie
une comprenant deux rangées de gabions et l'écran (386 ml)
Une étant composée d'une seule rangée de gabions et de l'écran (178 ml)
Une qui ne comprend que l'écran béton (191 ml).



OBJET DU REX :

MURS EN GABIONS

OBSERVATIONS SUR LA TECHNIQUE UTILISEE

les cages de gabion : Les cages de gabions étaient fournies par France Gabion. Elles étaient livrées pliées et en fardeaux, ces derniers étant étiquetés pour visualiser les différents modèles à utiliser avant ouverture. Il y avait ainsi 20 modèles différents qui ont été utilisés sur le chantier suivant les dimensions et la présence ou non de nappe de Terramesh. Les accessoires, fil d'attache et agrafes étaient livrés également par le même fournisseur

Les matériaux de remplissage

Pour le remplissage des cages de gabions, le choix s'était porté sur une pierre issue des carrières de Gudmont dans la Haute Marne (entre Troyes et Nancy), le négoce étant assuré par les établissements Morillon Corvol. Cette pierre en calcaire dur concassé en 100/200 mm, de couleur blanche, correspondait aux prescriptions du Marché du point de vue gélivité et dureté



Avant remplissage, un cadre de guidage est mis en place sur les faces vues. Ce cadre en tube métallique permet un maintien plan de ces faces et évite qu'elles soient bombées. Les pierres sont ensuite disposées manuellement sur les face vue afin d'assurer un aspect soigné, régulier et avec le moins de vides possible. L'opération est ainsi renouvelée pour chaque couche, la dernière étant remplie en léger excédent afin que le couvercle soit bien tendu

La fermeture des couvercle était réalisé par l'équipe qui mettait en place les cages et le Terramesh { en b) et c) }. En général, cette opération était faite une fois que toutes les cages nécessaires au travail de la journée pour l'équipe de remplissage étaient en place

Date	Rédigé par	Visa	Validé par	Visa
29.07.04	B. RUET		CA	

DESCRIPTIF DU RETOUR D'EXPERIENCE

Le chantier du Luth a représenté **6400 m3 de gabions**, soit 9673t de pierres.

Fourniture des gabions et des terramesh (France Gabion) : 278.600,75 euros / 6.399,50 m3 = 43,53 euros/m3

Pierre (Morillon Corvol) : 182.817,82 euros/ 6.399,50 m3 = 28,56 euros/m3 (densité = 9.673 tonnes/6.399 m3 = 1,51)

Sous traitant Centralpose : 55,64 euros/m3

Total gabion : 127,73 euros/m3

Concernant le montant de la prestation du sous traitant, le véritable coût est d'environ 20% plus élevé soit 66,77 euros/m3.

De ce fait le coût réel de la prestation gabion s'élève à 138,86 euros/m3.

DIFFICULTES PARTICULIERES



Date	Rédigé par	Visa	Validé par	Visa
29.07.04	B. RUET		CA	

Auf www.kbob.ch, Publikationen, Empfehlungen nachhaltiges Bauen, sind zwei Dateien platziert:

Die pdf-Datei "Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1" soll den Planenden den Einstieg in diese Thematik erleichtern. Sie enthält Daten für Baustoffe und Gebäudetechnik (Herstellung, Entsorgung), Energie und Transporte (Betrieb, Fahrzeug, Infrastruktur).

Die Excel-Datei "Liste Oekobilanzdaten im Baubereich 2009/1" dient zur Weiterverwendung als Arbeitsinstrument. Die Excel-Liste wird periodisch aktualisiert und ergänzt.

Gesamtbewertung	Teilbewertung		
UBP	Primärenergie		Treibhausgasemissionen
	Gesamt	nicht erneuerbar graue Energie	
Die UBP 2006 quantifizieren die Umweltbelastungen durch die Nutzung von Energieressourcen, von Land und Süsswasser, durch Emissionen in Luft, Gewässern und Boden sowie durch die Beseitigung von Abfällen.	Die gesamte Primärenergie quantifiziert zusätzlich zur nicht erneuerbaren Primärenergie den kumulierten Energieaufwand der erneuerbaren Energieträger. Die erneuerbaren Energieträger umfassen Wasserkraft, Holz / Biomasse (ohne Kahlschlag von Primärwäldern), Sonnen-, Wind-, geothermische und Umgebungsenergie.	Die nicht erneuerbare Primärenergie quantifiziert den kumulierten Energieaufwand der fossilen und nuklearen Energieträger sowie Holz aus Kahlschlag von Primärwäldern. Diese Definition weicht von der BAFU Schriftenreihe Umwelt 307 (Ökologische Bewertung mit Hilfe der Grauen Energie) ab.	Die Treibhausgasemissionen quantifizieren die kumulierten Wirkungen verschiedener Treibhausgase bezogen auf die Leitsubstanz CO ₂ .
Die Umweltauswirkungen der Teilbewertungen sind in der Gesamtbewertung UBP enthalten.	Mit dieser Kenngrösse wird die dem Gebäude zugeführte Energiemenge (Endenergie) gemäss Merkblatt SIA 2031 "Energieausweis für Gebäude" bewertet.	Mit dieser Kenngrösse wird die Bezugsgrösse gemäss Merkblatt SIA 2032 "Graue Energie von Gebäuden" bewertet.	Mit dieser Kenngrösse werden die dem Gebäude zugeführte Energiemenge gemäss Merkblatt SIA 2031 "Energieausweis für Gebäude" sowie die Bezugsgrösse gemäss Merkblatt SIA 2032 "Graue Energie von Gebäuden" bewertet.
Die Beurteilung mit der Methode der ökologischen Knappheit (UBP) zeigt ein vollständiges Bild der Umweltauswirkungen auf und basiert auf der Schweizerischen Umweltpolitik.		Die Graue Energie ist ein im Baubereich etablierter Kennwert. Die Instrumente des Vereins eco-bau (eco-devis, ECO-BKP-Merkblätter) stützen sich für eine gesamtheitliche Beurteilung neben zusätzlichen ökologischen Merkmalen auf diese Teilbewertung ab.	Die Treibhausgasemissionen sind ein Kennwert für die Klimaerwärmung. Nicht gleichzusetzen mit dem standortgebundenen CO₂-Ausstoss, welcher Gegenstand von Zielvereinbarungen mit dem Bund im Rahmen des CO₂-Gesetzes ist.

Ökobilanzen basieren auf Modellen, die von Wertvorstellungen geprägt sind. Somit sind die Ergebnisse nicht wertfrei. In dieser Empfehlung wurde für alle Materialien dieselbe Modellierungsmethode verwendet. Werden andere Modellierungsmethoden verwendet, können die Ergebnisse anders aussehen.

Diese Informationen stammen aus zuverlässigen Quellen. Die Autoren oder ihre Organisationen lehnen jedoch jegliche Haftung für Schäden oder Verluste ab, die durch die Verwendung dieser Angaben entstehen könnten. Die Verwendung der Informationen liegt ausschliesslich in Ihrer eigenen Verantwortung.

A l'adresse www.kbob.ch, publications, recommandations sur la construction durable, se trouvent deux fichiers:

Le fichier pdf «Données des écobilans dans la construction 2009/1» doit permettre aux planificateurs de mieux aborder ce thème. Il contient des données sur les matériaux et la technique du bâtiment (fabrication, élimination) ainsi que sur l'énergie et les transports (exploitation, véhicule, infrastructure).

Le fichier excel "Liste Oekobilanzdaten im Baubereich 2009/1" sert d'instrument de travail. Il est périodiquement actualisé et complété.

Evaluation globale	Evaluation partielle		
UBP	Energie primaire		Emissions de gaz à effet de serre
	globale	non renouvelable énergie grise	
Les Ecopoints (UBP) quantifient les charges environnementales résultant de l'utilisation des ressources énergétiques, de la terre et de l'eau douce, des émissions dans l'air, l'eau et le sol, ainsi que de l'élimination des déchets.	Le total de l'énergie primaire indique l'énergie cumulée des sources d'énergie non renouvelables et renouvelables. Les sources d'énergie renouvelables comprennent la force hydraulique, le bois/la biomasse (sans déboisement de forêts primaires), l'énergie solaire, éolienne, géothermique et environnementale.	L'énergie non renouvelable indique l'énergie cumulée de la consommation énergétique fossile et nucléaire ainsi que le bois issu du déboisement de forêts primaires. Les différences dans l'appréciation des vecteurs énergétiques provoquent des écarts dans les données, déterminées selon la série de publication Environnement 307 de l'OFEV (appréciation écologique à l'aide de l'énergie grise).	L'effet de serre évalue les effets cumulés de différents gaz à effet de serre par rapport à la substance principale qu'est le CO ₂ .
Les répercussions sur l'environnement des évaluations partielles sont prises en compte dans l'évaluation globale UPB.	Cette valeur permet d'évaluer la consommation totale d'un bâtiment (énergie finale) selon le fichier technique SIA 2031 "Certificat énergétique des bâtiments".	Cette valeur permet d'évaluer l'énergie grise selon la fiche technique SIA 2031 "Energie grise".	Cette valeur permet d'évaluer la consommation totale d'un bâtiment selon la fiche technique SIA 2031 "Certificat énergétique des bâtiments" ainsi que les émissions de gaz à effet de serre des matériaux selon la fiche technique SIA 2032 "Energie grise des bâtiments".
L'évaluation fondée sur la méthode de la raréfaction des ressources (UBP) fournit une récapitulation complète des répercussions sur l'environnement et se fonde sur la politique environnementale suisse.		L'énergie grise est une valeur connue dans la construction, elle est indiquée séparément. Plusieurs instruments de l'association eco-bau (eco-devis, feuilles CFC-ECO) s'appuient aujourd'hui, pour une évaluation générale, sur cette évaluation partielle, en plus des caractéristiques écologiques.	L'effet de serre est un indice du réchauffement climatique. Il n'est pas comparable avec l'émission de CO ₂ liée à l'emplacement et dont les objectifs doivent être convenus avec la Confédération en relation avec la loi sur le CO ₂ .

Les éco-bilans se fondent sur des modèles empreints de valeurs. Par conséquent, les résultats ne sont pas neutres. Dans la présente recommandation, tous les matériaux se basent sur la même méthode de modélisation. Si d'autres méthodes sont utilisées, les résultats peuvent différer.

Ces informations ont été obtenues de sources jugées fiables. Toutefois, les auteurs ou leurs organisations déclinent toute responsabilité pour des dégâts ou pertes résultant de l'utilisation de celles-ci. Vous êtes entièrement responsables de l'utilisation de ces informations.

Okobilanzdaten im Baubereich					KBOB / eco-bau / IPB 2009/1							Données des écobilans dans la construction				
Stand Januar 2011					Etat de janvier 2011											
BAUSTOFFE [Literatur EMPA, Version 2.2]	Bezug		UBP			Primärenergie Energie primaire						Treibhaus- gasemissionen Emissions de gaz à effet de serre			Référence	MATÉRIAUX [Bibliographie EMPA, version 2.2]
	Grösse	Einheit Unité				gesamt globale			nicht erneuerbar non renouvelable							
			Total total	Herstellung Fabrication	Entsorgung Elimination	Total total	Herstellung Fabrication	Entsorgung Elimination	Total total	Herstellung Fabrication	Entsorgung Elimination	Total kg	Herstellung kg	Entsorgung kg		
Beton (ohne Bewehrung)																Béton (sans armature)
Beton C 8/10 (Magerbeton)	Masse	kg	87,3	63,5	23,8	0,544	0,366	0,178	0,517	0,345	0,172	0,0646	0,0557	0,00890	Masse	Béton C 8/10 (béton maigre)
Beton C 25/30 speziell für Fundamente / Bodenplatten	Masse	kg	96,0	70,2	25,8	0,721	0,519	0,202	0,680	0,484	0,196	0,0775	0,0670	0,0105	Masse	Béton C 25/30 spécialement pour fondations / dalles
Beton C 30/37	Masse	kg	116	90,6	25,8	0,811	0,609	0,202	0,771	0,575	0,196	0,120	0,110	0,0105	Masse	Béton C 30/37
Beton C 50/60 (hoch belastbar)	Masse	kg	129	103	25,8	0,933	0,730	0,202	0,887	0,691	0,196	0,144	0,133	0,0105	Masse	Béton C 50/60 (pour charge élevée)
Mauersteine																Pierres de taille
Backstein	Masse	kg	178	154	24,2	3,02	2,83	0,189	2,76	2,57	0,183	0,248	0,239	0,00907	Masse	Brique en terre cuite
Kalksandstein	Masse	kg	134	111	23,7	1,58	1,40	0,180	1,45	1,28	0,174	0,139	0,130	0,00873	Masse	Grès
Porenbetonstein	Masse	kg	289	265	24,2	3,64	3,45	0,189	3,43	3,25	0,183	0,421	0,412	0,00907	Masse	Béton cellulaire
Zementstein	Masse	kg	134	110	23,8	1,01	0,831	0,178	0,930	0,758	0,172	0,130	0,121	0,00890	Masse	Plot de ciment
Leichtzementstein, Blähton	Masse	kg	387	362	24,2	5,61	5,42	0,189	5,44	5,26	0,183	0,409	0,400	0,00907	Masse	Pierre en béton léger: argile expansée
Leichtzementstein, Naturbims	Masse	kg	182	158	24,2	1,64	1,45	0,189	1,54	1,36	0,183	0,224	0,215	0,00907	Masse	Pierre en béton léger: pierre ponce naturelle
Leichtlehmstein	Masse	kg	224	200	24,2	5,67	5,49	0,189	2,83	2,64	0,183	0,170	0,161	0,00907	Masse	Brique en argile léger
Andere Massivbaustoffe																Autres matériaux massifs
Betonziegel	Masse	kg	205	181	24,2	2,00	1,81	0,189	1,89	1,70	0,183	0,218	0,209	0,00907	Masse	Tuiles en béton
Tonziegel	Masse	kg	254	230	24,2	4,10	3,91	0,189	4,01	3,83	0,183	0,367	0,358	0,00907	Masse	Tuile en terre cuite
Faserzement-Dachschindel	Masse	kg	682	651	30,9	10,7	10,4	0,297	9,06	8,77	0,295	0,745	0,731	0,0134	Masse	Bardeau de fibrociment
Faserzementplatte gross	Masse	kg	912	881	30,9	14,2	13,9	0,297	12,1	11,8	0,295	1,10	1,09	0,0134	Masse	Dalle de fibrociment, grande
Faserzement-Wellplatte	Masse	kg	652	621	30,9	9,48	9,19	0,297	7,64	7,35	0,295	0,697	0,683	0,0134	Masse	Plaque ondulée en fibrociment
Flachglas unbeschichtet	Masse	kg	913	898	14,9	13,0	12,7	0,247	12,6	12,4	0,245	0,990	0,980	0,0101	Masse	Verre plat, non enduit
Flachglas beschichtet	Masse	kg	1050	1040	14,9	15,1	14,8	0,247	14,6	14,4	0,245	1,10	1,09	0,0101	Masse	Verre plat, enduit
Gipsfaserplatte	Masse	kg	382	296	85,6	5,16	4,87	0,292	5,02	4,73	0,290	0,320	0,293	0,0273	Masse	Plaque de plâtre armé de fibres
Gipskartonplatte	Masse	kg	392	353	39,1	6,36	6,07	0,292	6,03	5,74	0,289	0,368	0,354	0,0133	Masse	Plaque de plâtre cartonné
Vollgipsplatte	Masse	kg	326	296	30,3	5,16	4,87	0,287	5,01	4,73	0,285	0,306	0,293	0,0130	Masse	Carreaux de plâtre massifs
Keramik-/Steinzeugplatte	Masse	kg	2420	2400	24,2	15,0	14,8	0,189	14,3	14,1	0,183	0,791	0,782	0,00907	Masse	Dalle de céramique/grès
Sanitärkeramik	Masse	kg	2940	2920	24,2	43,2	43,0	0,189	42,0	41,9	0,183	2,35	2,34	0,00907	Masse	Céramique sanitaire
Sand	Masse	kg	61,4	34,0	27,4	0,294	0,0579	0,236	0,285	0,0537	0,232	0,0136	0,00241	0,0112	Masse	Sable
Rundkies	Masse	kg	57,9	34,0	23,8	0,236	0,0579	0,178	0,226	0,0537	0,172	0,0113	0,00241	0,00893	Masse	Gravier rond
Kies gebrochen	Masse	kg	62,0	38,2	23,8	0,316	0,138	0,178	0,297	0,124	0,172	0,0133	0,00440	0,00893	Masse	Gravier concassé
Mörtel und Putze																Mortiers et enduits
Anhydritunterlagsboden	Masse	kg	124	93,5	30,3	1,52	1,23	0,287	1,34	1,06	0,285	0,0556	0,0426	0,0130	Masse	Chape d'anhydrite
Zementunterlagsboden	Masse	kg	161	136	24,9	1,35	1,15	0,197	1,18	0,984	0,192	0,180	0,170	0,00963	Masse	Chape de ciment
Kunststoffmörtel	Masse	kg	1400	1380	19,0	24,6	24,5	0,120	23,8	23,7	0,114	1,11	1,10	0,00503	Masse	Mortier adhésif à base synthétique
Zementmörtel	Masse	kg	176	151	24,9	1,73	1,53	0,197	1,52	1,33	0,192	0,200	0,191	0,00963	Masse	Mortier de ciment
Gips-/Weissputz	Masse	kg	160	141	18,8	1,85	1,73	0,118	1,65	1,54	0,112	0,0854	0,0805	0,00489	Masse	Enduit minéral
Kunststoffputz	Masse	kg	226	207	19,0	5,32	5,20	0,120	5,19	5,08	0,114	0,196	0,191	0,00503	Masse	Enduit en matière synthétique
Lehmputz	Masse	kg	59,1	40,3	18,8	0,641	0,523	0,118	0,594	0,482	0,112	0,024	0,019	0,00489	Masse	Enduit de glaise
Zementputz	Masse	kg	180	161	18,8	1,79	1,67	0,118	1,57	1,46	0,112	0,218	0,213	0,00489	Masse	Enduit de ciment
Wärmedämmputz EPS	Masse	kg	524	505	19,0	8,72	8,60	0,120	8,36	8,25	0,114	0,775	0,770	0,00503	Masse	Enduit d'isolation thermique EPS
Fenster und Metall-Glas-Fassaden																Fenêtre et façades verre/métal
2-IV Verglasung	Fläche ¹	m2	35400	31800	3590	476	470	6,18	454	448	6,11	32,8	31,2	1,65	Surface ¹	Vitrage 2-IV
2-IV Verglasung, VSG	Fläche ¹	m2	49800	43600	6190	726	718	8,26	692	684	8,13	48,7	43,7	5,00	Surface ¹	Vitrage 2-IV, vsf
3-IV Verglasung	Fläche ¹	m2	63600	58200	5400	929	920	9,30	881	872	9,19	59,4	56,9	2,49	Surface ¹	Vitrage 3-IV
Fensterrahmen Aluminium	Rahmenfläche ¹	m2	495000	495000	0	8280	8280	0	7220	7220	0	491	491	0	Surf. des cadres ¹	Cadre de fenêtre en aluminium
Fensterrahmen Holz	Rahmenfläche ¹	m2	258000	195000	63300	4760	4730	28,4	2350	2320	28,0	151	132	19,2	Surf. des cadres ¹	Cadre de fenêtre en bois
Fensterrahmen Holz-Aluminium	Rahmenfläche ¹	m2	375000	314000	61200	6470	6440	27,8	3980	3950	27,3	273	247	25,3	Surf. des cadres ¹	Cadre de fenêtre bois-aluminium
Fensterrahmen Kunststoff (PVC)	Rahmenfläche ¹	m2	472000	342000	130000	6560	5850	711	6290	5620	668	378	246	132	Surf. des cadres ¹	Cadre en matière synthétique (PVC)
Pfosten-Riegel-Fassade, Alu/Glas	Fläche	m2	201000	201000	0	2650	2650	0	2420	2420	0	153	153	0	Surface	Façades montants et traverses, aluminium/verre
¹ soweit Teil der Fensterfläche gemäss SIA 416/1																¹ pour autant qu'elle fasse partie de la surface des fenêtres selon SIA 416/1

4

Okobilanzdaten im Baubereich															KBOB / eco-bau / IPB 2009/1															Données des écobilans dans la construction														
Stand Januar 2011																														Etat de janvier 2011														
BAUSTOFFE [Literatur EMPA, Version 2.2]	Bezug		UBP			Primärenergie Energie primaire						Treibhaus- gasemissionen Emissions de gaz à effet de serre			Référence	MATÉRIAUX [Bibliographie EMPA, version 2.2]																												
	Grösse	Einheit Unité				gesamt globale			nicht erneuerbar non renouvelable																																			
			Total total	Herstellung Fabrication	Entsorgung Elimination	Total total	Herstellung Fabrication	Entsorgung Elimination	Total total	Herstellung Fabrication	Entsorgung Elimination	Total total	Herstellung Fabrication	Entsorgung Elimination			Dimension																											
			-	-	-	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	kg	kg	kg																														
Wärmedämmstoffe																	Produits d'isolation thermique																											
Glaswolle	Masse	kg	2240	2210	26,9	49,7	49,4	0,247	45,8	45,5	0,245	1,51	1,50	0,0101	Masse	Laine de verre																												
Korkplatte	Masse	kg	2020	1560	456	52,3	52,1	0,164	25,0	24,8	0,160	1,27	1,16	0,114	Masse	Panneau de liège																												
Phenolharz (PF)	Masse	kg	11600	10000	1640	125	124	0,712	123	123	0,679	6,51	4,16	2,35	Masse	Résine phénolique (PF)																												
Polystyrol expandiert (EPS)	Masse	kg	5220	3220	2000	106	106	0,269	105	105	0,263	7,36	4,21	3,15	Masse	Polystyrène expansé (EPS)																												
Polystyrol extrudiert (XPS)	Masse	kg	8490	6490	2000	101	101	0,269	100	99,3	0,263	14,3	11,1	3,15	Masse	Polystyrène extrudé (XPS)																												
Polyurethan (PUR/PIR)	Masse	kg	6100	4300	1800	104	103	1,36	101	100	1,32	6,79	4,32	2,47	Masse	Polyuréthane (PUR/PIR)																												
Rohrisolierung (Gummi EPDM)	Masse	kg	7000	5000	2000	127	126	0,782	124	123	0,742	7,63	4,49	3,14	Masse	Isolant pour tuyaux (caoutchouc EPDM)																												
Schaumglas	Masse	kg	903	888	14,9	26,5	26,2	0,247	19,7	19,4	0,245	1,17	1,16	0,0101	Masse	Verre cellulaire																												
Steinwolle	Masse	kg	1970	1940	26,9	17,1	16,8	0,247	15,4	15,1	0,245	1,06	1,05	0,0101	Masse	Laine de pierre																												
Weichfaserplatte	Masse	kg	966	553	413	36,2	36,0	0,130	11,0	10,9	0,128	0,436	0,398	0,0384	Masse	Panneau de fibres mou																												
Zellulosefasern (eingebblasen)	Masse	kg	1270	536	736	10,0	9,69	0,292	7,43	7,14	0,285	0,392	0,368	0,0240	Masse	Fibres de cellulose (soufflées)																												
Bodenbeläge																	Revêtements de sol																											
Asphalttragschicht	Masse	kg	820	94,0	726	3,31	2,99	0,324	3,28	2,96	0,319	0,0921	0,0744	0,0177	Masse	Couche porteuse en asphalte																												
Asphaltdeckschicht	Masse	kg	831	105	726	4,37	4,04	0,324	4,34	4,02	0,319	0,104	0,0861	0,0177	Masse	Couche de couverture en asphalte																												
Gussasphalt	Masse	kg	920	195	726	7,37	7,05	0,324	7,22	6,90	0,319	0,228	0,210	0,0177	Masse	Asphalte coulé																												
Keramik-/Steinzeugplatte	Masse	kg	2420	2400	24,2	15,0	14,8	0,189	14,3	14,1	0,183	0,791	0,782	0,00907	Masse	Dalle de céramique/grès																												
Kunststeinplatte	Masse	kg	191	167	24,2	1,55	1,36	0,189	1,44	1,26	0,183	0,236	0,227	0,00907	Masse	Dalle de pierre artificielle																												
Natursteinplatte geschnitten	Masse	kg	446	422	24,2	8,19	8,00	0,189	7,41	7,23	0,183	0,240	0,230	0,00907	Masse	Dalle de pierre naturelle coupée																												
Natursteinplatte geschliffen	Masse	kg	635	611	24,2	11,7	11,5	0,189	10,5	10,3	0,183	0,322	0,313	0,00907	Masse	Dalle de pierre naturelle rectifiée																												
Natursteinplatte poliert	Masse	kg	1240	1220	24,2	14,7	14,5	0,189	13,2	13,0	0,183	0,389	0,380	0,00907	Masse	Dalle de pierre naturelle polie																												
Türen																	Portes																											
Aussentüre, Holz, aluminiumbeplankt	Fläche	m2	168200	146000	22200	1920	1890	32,5	1320	1290	32,1	90,9	87,7	3,20	Surface	Portes extérieures bois, doublées alu																												
Aussentüre, Holz, Glaseinsatz	Fläche	m2	164300	147000	17300	1780	1750	31,7	1370	1340	31,3	95,0	90,3	4,76	Surface	Portes extérieures bois, avec vitrage																												
Innentüre, Holz	Fläche	m2	72200	49600	22600	1810	1800	14,7	734	720	14,3	44,2	36,9	7,28	Surface	Portes intérieures bois																												
Innentüre, Holz, Glaseinsatz	Fläche	m2	82700	60300	22400	1840	1760	75,5	947	872	74,5	59,2	48,7	10,5	Surface	Portes intérieures bois, avec vitrage																												
Rohre																	Tuyaux																											
Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	Masse	kg	5060	3420	1640	108	107	0,712	107	106	0,679	7,13	4,78	2,35	Masse	Acrylonitril-butadiène-styrène (ABS)																												
Polyethylen (PE)	Masse	kg	3630	1720	1910	85,6	85,3	0,257	83,8	83,5	0,252	5,32	2,33	3,00	Masse	Polyéthylène (HDPE)																												
Polypropylen (PP)	Masse	kg	3650	1740	1910	83,4	83,2	0,257	82,0	81,7	0,252	5,36	2,36	3,00	Masse	Polypropylène (PP)																												
Polyvinylchlorid (PVC)	Masse	kg	4000	1990	2010	81,2	68,9	12,3	78,6	67,0	11,6	4,64	2,38	2,26	Masse	Chlorure de polyvinyle (PVC)																												
Anstrichstoffe, Beschichtungen																	Enduits et revêtements																											
Acrylharzdispersion	Masse	kg	4880	2960	1920	52,8	52,5	0,293	51,3	51,0	0,284	4,53	2,15	2,38	Masse	Dispersion acrylique																												
Acrylharzlack, wasserverdünnbar	Masse	kg	4450	2530	1920	46,6	46,3	0,293	45,2	44,9	0,284	4,26	1,88	2,38	Masse	Laque de résine acrylique, diluable à l'eau																												
Alkydharzlack, wasserverdünnbar	Masse	kg	5790	3870	1920	57,9	57,6	0,293	53,8	53,5	0,284	5,13	2,74	2,38	Masse	Laque de résine alkyde, diluable à l'eau																												
Alkydharzlack, lösemittelverdünnt	Masse	kg	6640	4720	1920	83,6	83,3	0,293	78,4	78,1	0,284	5,25	2,87	2,38	Masse	Laque de résine alkyde, diluable par solvant																												
Bitumenemulsion	Masse	kg	2900	1290	1610	27,7	27,1	0,602	27,5	26,9	0,582	2,75	0,406	2,34	Masse	Emulsion de bitume																												
Emaillieren, Metall	Oberfläche	m2	11000	11000	0	183	183	0	172	172	0	8,68	8,68	0	Surface	Emalliage, métal																												
Pulverbeschichten, Aluminium	Oberfläche	m2	3770	3770	0	66,8	66,8	0	65,1	65,1	0	3,78	3,78	0	Surface	Revêtement pulvérisé, aluminium																												
Pulverbeschichten, Stahl	Oberfläche	m2	4840	4840	0	85,4	85,4	0	83,3	83,3	0	4,57	4,57	0	Surface	Revêtement pulvérisé, acier																												
Verchromen, Stahl	Oberfläche	m2	4850	4850	0	20,6	20,6	0	18,4	18,4	0	0,645	0,645	0	Surface	Chromage, acier																												
Verzinken, Stahl	Oberfläche	m2	30400	30400	0	104	104	0	95,0	95,0	0	6,21	6,21	0	Surface	Zincage, acier																												
Kunststoffe																	matières plastique																											
Plexiglas (PMMA, Acrylglas)	Masse	kg	8220	6580	1640	146	145	0,712	145	144	0,679	10,7	8,40	2,35	Masse	Plexiglas (PMMA, verre acrylique)																												
Polyamid (PA) glasfaserverstärkt	Masse	kg	7380	6570	809	148	148	0,445	145	145	0,439	9,51	8,81	0,709	Masse	Polyamide (PA) renforcé par des fibres de verre																												
Polycarbonat (PC)	Masse	kg	7500	5860	1640	116	116	0,712	115	114	0,679	10,5	8,17	2,35	Masse	Polycarbonate (PC)																												
Polyester (UP) glasfaserverstärkt	Masse	kg	7510	6700	809	83,0	82,6	0,445	81,1	80,6	0,439	5,59	4,88	0,709	Masse	Polyester (UP) renforcé par des fibres de verre																												
Polystyrol (PS)	Masse	kg	3890	2250	1640	89,0	88,2	0,712	88,6	87,9	0,679	5,85	3,50	2,35	Masse	Polystyrène (PS)																												

Ökobilanzdaten im Baubereich			KBOB / eco-bau / IPB 2009/1									Données des écobilans dans la construction				
Stand Januar 2011			Etat de janvier 2011													
GEBÄUDETECHNIK [Literatur B&H, Rev. 4]	Bezug		UBP			Primärenergie Énergie primaire						Treibhaus- gasemissionen Émissions de gaz à effet de serre			Référence	TECHNIQUE DU BÂTIMENT [Bibliographie B&H, rev. 4]
	Grösse	Einheit Unité				gesamt globale			nicht erneuerbar non renouvelable							
			Total total	Herstellung Fabrication	Entsorgung Elimination	Total total	Herstellung Fabrication	Entsorgung Elimination	Total total	Herstellung Fabrication	Entsorgung Elimination	Total total	Herstellung Fabrication	Entsorgung Elimination	Dimension	
			-	-	-	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	kg	kg	kg		
Heizungsanlagen			Installations de chauffage													
Wärmeerzeuger, spez. Leistungsbedarf 10 W/m2	EBF	m2	1100	1 088	12,2	9,42	9,35	0,0674	8,78	8,72	0,0664	0,535	0,525	0,0101	SRE	Prod. de chaleur, besoins en puissance 10 W/m2
Wärmeerzeuger, spez. Leistungsbedarf 30 W/m2	EBF	m2	3 300	3 260	36,6	28,3	28,1	0,202	26,4	26,2	0,199	1,60	1,57	0,0304	SRE	Prod.de chaleur, besoins en puissance 30 W/m2
Wärmeerzeuger, spez. Leistungsbedarf 50 W/m2	EBF	m2	5 500	5 440	61,0	47,1	46,8	0,337	43,9	43,6	0,332	2,67	2,62	0,0507	SRE	Prod.de chaleur, besoins en puissance 50 W/m2
Erdsonden, spez. Leistungsbedarf 10 W/m2	EBF	m2	4 370	4 080	288	69,4	68,9	0,526	68,6	68,1	0,452	3,81	3,47	0,336	SRE	Sondes géothermiques, besoins en puissance 10 W/m2
Erdsonden, spez. Leistungsbedarf 30 W/m2	EBF	m2	13 100	12 200	865	208	207	1,58	206	204	1,35	11,4	10,4	1,01	SRE	Sondes géothermiques, besoins en puissance 30 W/m2
Erdsonden, spez. Leistungsbedarf 50 W/m2	EBF	m2	21 800	20 400	1 440	347	344	2,63	343	341	2,26	19,0	17,3	1,68	SRE	Sondes géothermiques, besoins en puissance 50 W/m2
Flachkollektor für Warmwasser EFH	Kollektorfläche	m2	639 000	639 000	inkl.	5 060	5 060	inkl.	4 520	4 520	inkl.	289	289	inkl.	Surf. collecteurs	Collecteurs solaires plan, eau chaude maison individuelle
Flachkollektor für Raumheizung und Warmwasser EFH	Kollektorfläche	m2	432 000	432 000	inkl.	3 740	3 740	inkl.	3 330	3 330	inkl.	215	215	inkl.	Surf. collecteurs	Collecteurs solaires plan, chaleur et eau chaude maison individuelle
Flachkollektor für Warmwasser MFH	Kollektorfläche	m2	357 000	357 000	inkl.	2 900	2 900	inkl.	2 600	2 600	inkl.	169	169	inkl.	Surf. collecteurs	Collecteurs solaires plan, eau chaude immeuble locatif
Röhrenkollektor für Raumheizung und Warmwasser EFH	Kollektorfläche	m2	437 000	437 000	inkl.	3 850	3 850	inkl.	3 500	3 500	inkl.	216	216	inkl.	Surf. collecteurs	Collecteurs solaires à tubes, chaleur et eau chaude maison individuelle
Wärmeverteilung, Radiatoren, spez. Leistungsbedarf 10 W/m2	EBF	m2	8 180	8 100	79,9	94,2	94,2	0,0536	91,0	91,0	0,0523	5,50	5,38	0,121	SRE	Distribution de chaleur, radiateurs, besoins en puissance 10 W/m2
Wärmeverteilung, Radiatoren, spez. Leistungsbedarf 30 W/m2	EBF	m2	13 400	13 300	131	154	154	0,0877	149	149	0,0856	9,00	8,80	0,198	SRE	Distribution de chaleur, radiateurs, besoins en puissance 30 W/m2
Wärmeverteilung, Radiatoren, spez. Leistungsbedarf 50 W/m2	EBF	m2	18 600	18 400	182	214	214	0,122	207	207	0,119	12,5	12,2	0,275	SRE	Distribution de chaleur, radiateurs, besoins en puissance 50 W/m2
Wärmeverteilung, Fussbodenheizung	EBF	m2	8 390	6 250	2 140	132	132	0,354	128	127	0,346	8,57	5,23	3,34	SRE	Distribution de chaleur, plancher chauffant
Wärmeverteilung, Luftheizung	EBF	m2	2 700	2 660	42,8	30,8	30,8	0,0188	30,0	29,9	0,0186	1,72	1,65	0,0664	SRE	Distribution de chaleur, chauffage à air chaud
Lüftungsanlagen			Ventilation													
Lüftungsanlage Wohnen, Blechkanäle, inkl. Küchenabluft	EBF	m2	39 700	39 500	228	227	226	0,542	213	212	0,511	13,3	13,0	0,305	SRE	Ventilation habitation, canaux en tôle, évacuation d'air (cuisine)
Lüftungsanlage Wohnen, PE-Kanäle, inkl. Küchenabluft	EBF	m2	20 000	19 500	492	139	139	0,556	131	130	0,525	8,19	7,46	0,727	SRE	Ventilation habitation, canaux en HDPE, évacuation d'air (cuisine)
Abluftanlage Küche und Bad	EBF	m2	11 400	11 300	82,9	60,7	60,7	0,0513	57,5	57,5	0,0507	3,59	3,46	0,125	SRE	Evacuation d'air cuisine et salle de bain
Erdregister zu Lüftungsanlage Wohnen	EBF	m2	4 530	3 040	1 490	61,0	56,3	4,66	59,1	54,7	4,49	4,56	2,95	1,61	SRE	Registre de terre pour ventilation habitation
Lüftungsanlage Büro Blechkanäle, spez. Luftmenge 2 m3/hm2 EBF	EBF	m2	42 400	42 300	11,7	212	212	0,0422	199	199	0,0418	12,2	12,2	0,0131	SRE	Ventilation bureau, canaux en tôle, besoins en air 2 m3/hm2 SRE
Lüftungsanlage Büro Blechkanäle, spez. Luftmenge 4 m3/hm2 EBF	EBF	m2	53 800	53 800	14,9	269	269	0,0536	253	253	0,0531	15,5	15,5	0,0166	SRE	Ventilation bureau, canaux en tôle, besoins en air 4 m3/hm2 SRE
Lüftungsanlage Büro Blechkanäle, spez. Luftmenge 6 m3/hm2 EBF	EBF	m2	61 800	61 800	17,1	309	309	0,0616	291	291	0,0610	17,8	17,8	0,0190	SRE	Ventilation bureau, canaux en tôle, besoins en air 6 m3/hm2 SRE
Erdregister kurz zu Lüftungsanlage Büro (0,27 m/m2 EBF)	EBF	m2	7 850	5 260	2 590	106	97,7	8,08	103	94,7	7,79	7,90	5,11	2,79	SRE	Registre de terre court pour ventilation bureau (0,27 m/m2 SRE)
Erdregister lang zu Lüftungsanlage Büro (0,67 m/m2 EBF)	EBF	m2	19 600	13 200	6 470	264	244	20,2	256	237	19,5	19,7	12,8	6,98	SRE	Registre de terre long pour ventilation bureau (0,67 m/m2 SRE)
Sanitäranlagen			Installations sanitaires													
Sanitäranlagen Wohnen	EBF	m2	25 100	23 500	1 600	242	242	0,674	230	230	0,643	15,2	12,8	2,48	SRE	Installations sanitaires habitation
Sanitäranlagen Büro	EBF	m2	19 300	17 800	1 470	164	162	1,56	159	157	1,47	10,1	7,90	2,21	SRE	Installations sanitaires bureau
Elektroanlagen			Installations électriques													
Elektroanlagen, tiefer Installationsgrad	EBF	m2	52 900	50 600	2 360	159	155	4,05	151	147	3,81	9,42	6,01	3,41	SRE	Installations électriques, degré d'installations faible
Elektroanlagen, mittlerer Installationsgrad	EBF	m2	88 200	84 300	3 930	265	258	6,75	252	245	6,35	15,7	10,0	5,68	SRE	Installations électriques, degré d'installations moyen
Elektroanlagen, hoher Installationsgrad	EBF	m2	161 000	155 000	6 870	529	517	11,8	501	490	11,1	31,3	21,4	9,94	SRE	Installations électriques, degré d'installations élevé
Solarstromanlage	Max. Leistung	kWp	2 680 000	2 680 000	inkl.	32 900	32 900	inkl.	28 300	28 300	inkl.	1790	1790	inkl.	Puissance max.	Installations photovoltaïque
Solarstromanlage Schrägdach	Max. Leistung	kWp	2 700 000	2 700 000	inkl.	32 700	32 700	inkl.	28 200	28 200	inkl.	1790	1790	inkl.	Puissance max.	Installations photovoltaïque toiture inclinée
Solarstromanlage Flachdach	Max. Leistung	kWp	2 510 000	2 510 000	inkl.	33 700	33 700	inkl.	28 900	28 900	inkl.	1820	1820	inkl.	Puissance max.	Installations photovoltaïque toiture plate
Solarstromanlage Fassade	Max. Leistung	kWp	2 740 000	2 740 000	inkl.	33 400	33 400	inkl.	28 600	28 600	inkl.	1780	1780	inkl.	Puissance max.	Installations photovoltaïque façade

Ökobilanzdaten im Baubereich Stand Januar 2011			KBOB / eco-bau / IPB 2009/1				Données des écobilans dans la construction Etat de janvier 2011	
ENERGIE [Literatur ESU-services, Version 2.2]	Bezug		UBP UBP -	Primärenergie Energie primaire		Treibhausgas- emissionen Emissions de gaz à effet de serre kg	Référence	ENERGIE [Bibliographie ESU-services, version 2.2]
	Grösse	Einheit Unité		gesamt globale MJ	nicht erneuerbar non renouvelable MJ		Dimension	
Brennstoffe ¹								Combustibles ¹
Heizöl EL	Endenergie	MJ	44,4	1,24	1,23	0,0827	Énergie finale	Mazout EL
Erdgas	Endenergie	MJ	31,5	1,12	1,11	0,0658	Énergie finale	Gaz naturel
Propan/Butan	Endenergie	MJ	39,3	1,18	1,18	0,0778	Énergie finale	Propane/butane
Kohle Koks	Endenergie	MJ	110	1,69	1,68	0,120	Énergie finale	Coke de houille
Kohle Brikett	Endenergie	MJ	122	1,21	1,20	0,108	Énergie finale	Brique de houille
Stückholz	Endenergie	MJ	27,6	1,06	0,0523	0,00354	Énergie finale	Bûches de bois
Holz schnitzel	Endenergie	MJ	27,1	1,14	0,0636	0,00308	Énergie finale	Particules de bois
Pellets	Endenergie	MJ	27,8	1,22	0,210	0,0102	Énergie finale	Granules (pellets)
Biogas	Endenergie	MJ	33,2	0,403	0,369	0,0455	Énergie finale	Biogaz
Fernwärme								Chauffage urbain
Heizzentrale Oel	Endenergie	MJ	66,0	1,69	1,68	0,112	Énergie finale	Centrale de chauffage, pétrole
Heizzentrale Gas	Endenergie	MJ	42,9	1,56	1,55	0,0869	Énergie finale	Centrale de chauffage, gaz
Heizzentrale Holz	Endenergie	MJ	29,7	1,66	0,102	0,0132	Énergie finale	Centrale de chauffage, bois
Heizkraftwerk Holz	Endenergie	MJ	25,5	1,41	0,0944	0,0113	Énergie finale	Centrale à cogénération, bois
Heizzentrale EWP Luft/Wasser (JAZ 2.8)	Endenergie	MJ	62,2	2,15	1,19	0,0282	Énergie finale	Centrale de chauffage PACE, air/eau (COPA 2.8)
Heizzentrale EWP Abwasser (JAZ 3.4)	Endenergie	MJ	46,2	1,91	0,885	0,0206	Énergie finale	Centrale de chauffage PACE, eaux usées (COPA 3.4)
Heizzentrale EWP Grundwasser (JAZ 3.4)	Endenergie	MJ	40,7	1,04	0,897	0,0153	Énergie finale	Centrale de chauffage PACE, eaux souterraines (COPA 3.4)
Heizzentrale EWP Erdsonde (JAZ 3.9)	Endenergie	MJ	51,9	2,01	1,00	0,0225	Énergie finale	Centrale de chauffage PACE, sonde géothermique (COPA 3.9)
Heizzentrale Geothermie	Endenergie	MJ	29,9	1,52	0,162	0,00597	Énergie finale	Centrale de chauffage, géothermie
Heizkraftwerk Geothermie	Endenergie	MJ	20,9	0,589	0,126	0,00432	Énergie finale	Centrale à cogénération, géothermie
Kehrichtverbrennung	Endenergie	MJ	2,35	0,0582	0,0506	0,000957	Énergie finale	Incinération des ordures ménagères
Blockheizkraftwerk Diesel	Endenergie	MJ	24,5	0,630	0,621	0,0402	Énergie finale	Centrale à cogénération, diesel
Blockheizkraftwerk Gas	Endenergie	MJ	20,0	0,649	0,641	0,0377	Énergie finale	Centrale à cogénération, gaz
Blockheizkraftwerk Biogas	Endenergie	MJ	19,0	0,252	0,228	0,0252	Énergie finale	Centrale à cogénération, biogaz
Blockheizkraftwerk Biogas, Landwirtschaft	Endenergie	MJ	7,22	0,0785	0,0675	0,00593	Énergie finale	Centrale à cogénération, biogaz agricole
Fernwärme Durchschnitt Netze CH	Endenergie	MJ	24,8	0,854	0,796	0,0445	Énergie finale	Chauffage à distance, moyenne réseaux CH
Fernwärme mit Nutzung Kehrichtwärme, Durchschnitt Netze CH	Endenergie	MJ	24,2	0,814	0,804	0,0454	Énergie finale	Chauffage à distance de l'incinération des ordures, moyenne réseaux CH
Nutzwärme								Chaleur utile
Heizkessel Heizöl EL	Nutzwärme ²	MJ	47,5	1,31	1,30	0,0886	Chaleur utile ²	Chaudière, mazout EL
Heizkessel Erdgas	Nutzwärme ²	MJ	34,8	1,22	1,22	0,0719	Chaleur utile ²	Chaudière, gaz naturel
Heizkessel Propan / Butan	Nutzwärme ²	MJ	43,1	1,29	1,28	0,0845	Chaleur utile ²	Chaudière, propane/butane
Heizkessel Kohle Koks	Nutzwärme ²	MJ	164	2,05	2,03	0,178	Chaleur utile ²	Chaudière, coke de houille
Heizkessel Kohle Brikett	Nutzwärme ²	MJ	181	1,53	1,52	0,160	Chaleur utile ²	Chaudière, brique de houille
Heizkessel Stückholz	Nutzwärme ²	MJ	44,8	1,69	0,0928	0,00617	Chaleur utile ²	Chaudière, bûches de bois
Heizkessel Holz schnitzel	Nutzwärme ²	MJ	38,1	1,56	0,0984	0,00565	Chaleur utile ²	Chaudière, particules de bois
Heizkessel Pellets	Nutzwärme ²	MJ	36,6	1,57	0,277	0,0140	Chaleur utile ²	Chaudière, granules (pellets)
Heizkessel Biogas	Nutzwärme ²	MJ	37,5	0,452	0,414	0,0508	Chaleur utile ²	Chaudière, biogaz
Nutzwärme am Standort erzeugt, inkl. erneuerbare Energien ³								Chaleur utile produite sur place, y compris énergies renouvelables ³
Elektrowärmepumpe Luft / Wasser (JAZ 2.8)	Nutzwärme ²	MJ	49,9	1,74	0,950	0,0227	Chaleur utile ²	Pompe à chaleur électrique air-eau (COPA 2.8)
Elektrowärmepumpe Erdsonden (JAZ 3.9)	Nutzwärme ²	MJ	36,6	1,55	0,695	0,0164	Chaleur utile ²	Pompe à chaleur électrique sondes géothermiques (COPA 3.9)
Elektrowärmepumpe Grundwasser (JAZ 3.4)	Nutzwärme ²	MJ	41,3	1,62	0,795	0,0179	Chaleur utile ²	Pompe à chaleur électrique eaux souterraines (COPA 3.4)
Flachkollektor für Warmwasser EFH	Nutzwärme ²	MJ	28,7	1,62	0,295	0,0120	Chaleur utile ²	Collecteurs solaires plan, eau chaude maison individuelle
Flachkollektor für Raumheizung und Warmwasser EFH	Nutzwärme ²	MJ	25,1	1,85	0,241	0,0112	Chaleur utile ²	Collecteurs solaires plan, chaleur et eau chaude maison individuelle
Flachkollektor für Warmwasser MFH	Nutzwärme ²	MJ	11,4	1,24	0,0950	0,00473	Chaleur utile ²	Collecteurs solaires plan, eau chaude immeuble locatif
Röhrenkollektor für Raumheizung und Warmwasser EFH	Nutzwärme ²	MJ	21,0	1,74	0,203	0,00930	Chaleur utile ²	Collecteurs solaires à tubes, chaleur et eau chaude maison individuelle
¹ Oberer Heizwert								¹ Pouvoir calorifique supérieur
² inkl. Verteilverluste (Wärme am Ausgang Wärmezeuger)								² y compris pertes de distribution (Chaleur à la sortie du producteur de chaleur)
³ Regionale Sicht 2000-Watt-Gesellschaft								³ Point de vue régionale de la société à 2000 watt

Ökobilanzdaten im Baubereich Stand Januar 2011							Données des écobilans dans la construction Etat de janvier 2011	
ENERGIE [Literatur ESU-services, Version 2.2]	Bezug		UBP UBP -	Primärenergie Energie primaire		Treibhausgas- emissionen Emissions de gaz à effet de serre kg	Référence	ENERGIE [Bibliographie ESU-services, version 2.2]
	Grösse	Einheit Unité		gesamt globale MJ	nicht erneuerbar non renouvelable MJ		Dimension	
Elektrizität vom Netz								Electricité du réseau
Atomkraftwerk	Endenergie	MJ	153	4,07	4,07	0,00451	Énergie finale	Centrale nucléaire
Erdgaskombikraftwerk GuD	Endenergie	MJ	73,8	2,34	2,33	0,135	Énergie finale	Centrale combinée gaz naturel G+V
Kohlekraftwerk	Endenergie	MJ	175	4,02	3,99	0,344	Énergie finale	Centrale au charbon
Kraftwerk Oel	Endenergie	MJ	258	3,85	3,83	0,277	Énergie finale	Centrale, pétrole
Kehrichtverbrennung	Endenergie	MJ	13,8	0,0230	0,0195	0,00211	Énergie finale	Incinération des ordures ménagères
Heizkraftwerk Holz	Endenergie	MJ	78,9	3,80	0,152	0,0316	Énergie finale	Centrale à cogénération, bois
Blockheizkraftwerk Diesel	Endenergie	MJ	143	3,36	3,35	0,231	Énergie finale	Centrale à cogénération, diesel
Blockheizkraftwerk Gas	Endenergie	MJ	111	3,29	3,28	0,205	Énergie finale	Centrale à cogénération, gaz
Blockheizkraftwerk Biogas	Endenergie	MJ	105	1,08	0,983	0,135	Énergie finale	Centrale à cogénération, biogaz
Blockheizkraftwerk Biogas, Landwirtschaft	Endenergie	MJ	60,6	0,199	0,163	0,0503	Énergie finale	Centrale à cogénération, biogaz agricole
Photovoltaik	Endenergie	MJ	50,7	1,66	0,393	0,0257	Énergie finale	Photovoltaïque
Photovoltaik Schrägdach	Endenergie	MJ	45,4	1,59	0,337	0,0223	Énergie finale	Photovoltaïque toiture inclinée
Photovoltaik Flachdach	Endenergie	MJ	42,2	1,59	0,331	0,0218	Énergie finale	Photovoltaïque toiture plate
Photovoltaik Fassade	Endenergie	MJ	61,2	1,79	0,506	0,0322	Énergie finale	Photovoltaïque façade
Windkraft	Endenergie	MJ	24,4	1,32	0,101	0,00755	Énergie finale	Energie éolienne
Wasserkraft	Endenergie	MJ	17,2	1,22	0,0348	0,00351	Énergie finale	Energie hydraulique
Pumpspeicherung	Endenergie	MJ	177	4,41	3,81	0,0611	Énergie finale	Accumulation par pompage
Heizkraftwerk Geothermie	Endenergie	MJ	47,2	3,36	0,191	0,00858	Énergie finale	Centrale à cogénération, géothermie
CH-Produktionsmix	Endenergie	MJ	75,7	2,41	1,76	0,00830	Énergie finale	Mix de production CH
CH-Verbrauchermix	Endenergie	MJ	125	3,05	2,63	0,0413	Énergie finale	Mix consommateur CH
UCTE-Mix	Endenergie	MJ	177	3,54	3,32	0,165	Énergie finale	Mix UCTE
Elektrizität am Standort erzeugt, inkl. erneuerbare Energien³								Electricité produite sur place, y compris énergies renouvelables³
Photovoltaik	Endenergie	MJ	32,9	1,46	0,334	0,0211	Énergie finale	Photovoltaïque
Photovoltaik Schrägdach	Endenergie	MJ	28,2	1,40	0,283	0,0180	Énergie finale	Photovoltaïque toiture inclinée
Photovoltaik Flachdach	Endenergie	MJ	25,4	1,40	0,279	0,0176	Énergie finale	Photovoltaïque toiture plate
Photovoltaik Fassade	Endenergie	MJ	42,2	1,57	0,433	0,0268	Énergie finale	Photovoltaïque façade
Windkraft	Endenergie	MJ	9,43	1,16	0,0730	0,00485	Énergie finale	Energie éolienne
Biogas	Endenergie	MJ	81,0	0,937	0,857	0,118	Énergie finale	Biogaz
Biogas, Landwirtschaft	Endenergie	MJ	41,7	0,157	0,128	0,0430	Énergie finale	Biogaz agricole
³ Regionale Sicht 2000-Watt-Gesellschaft								³ Point de vue régional de la société à 2000 watt

Ökobilanzdaten im Baubereich						KBOB / eco-bau / IPB 2009/1								Données des écobilans dans la construction							
Stand Jaunar 2011														Etat de janvier 2011							
TRANSPORTE [Literatur ESU-services, Version 2.2]	Bezug		UBP				Primärenergie Energie primaire								Treibhausgas-emissionen Emissions de gaz à effet de serre				Référence	TRANSPORTS [Bibliographie ESU-services, version 2.2]	
	Grösse	Einheit Unité	UBP				gesamt globale				nicht erneuerbar non renouvelable								Dimension		
			Total total	Betrieb Exploitation	Fahrzeug Véhicule	Infrastruktur	Total total	Betrieb Exploitation	Fahrzeug Véhicule	Infrastruktur	Total total	Betrieb Exploitation	Fahrzeug Véhicule	Infrastruktur	Total total	Betrieb Exploitation	Fahrzeug Véhicule	Infrastruktur			
			-	-	-	-	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	kg	kg	kg	kg			
Treibstoffe																			Carburants		
Diesel in Baumaschine	Endenergie	MJ	103	103			1,24	1,24			1,22	1,22			0,0833	0,0833			Energie finale Gasoil pour engin de chantier		
Diesel in LKW	Endenergie	MJ	87,3	87,3			1,22	1,22			1,20	1,20			0,0841	0,0841			Energie finale Gasoil pour camions		
Benzin in PKW	Endenergie	MJ	79,4	79,4			1,29	1,29			1,26	1,26			0,0886	0,0886			Energie finale Essence pour voitures		
Diesel in PKW	Endenergie	MJ	54,3	54,3			1,22	1,22			1,20	1,20			0,0839	0,0839			Energie finale Gasoil pour voitures		
Biogas in PKW	Endenergie	MJ	38,5	38,5			0,382	0,382			0,139	0,139			0,0405	0,0405			Energie finale Biogaz pour voitures		
Erdgas in PKW	Endenergie	MJ	40,5	40,5			1,18	1,18			1,13	1,13			0,0655	0,0655			Energie finale gaz naturel pour voitures		
Kerosin in Flugzeug	Endenergie	MJ	57,1	57,1			1,19	1,19			1,17	1,17			0,0805	0,0805			Energie finale Kérosène pour avions		
Güter-Transporte																			Transports de marchandises		
Aushub maschinell	Aushubvolumen	m3	664	609	55,0		8,07	7,35	0,718		8,03	7,33	0,694		0,534	0,492	0,0417		Vol excavation Excavations mécaniques		
Binnenfrachter	Transportleistung	tkm	53,8	41,3	1,90	10,6	0,656	0,514	0,0178	0,125	0,648	0,513	0,0172	0,118	0,0464	0,0355	0,00100	0,00993	Rend.du transp. Cargo de marchandise, navigation intérieure		
Güterzug	Transportleistung	tkm	37,4	20,8	6,64	10,0	0,808	0,607	0,0864	0,115	0,552	0,365	0,0816	0,105	0,0142	0,00372	0,00543	0,00505	Rend.du transp. Train de marchandises		
Helikopter	Einsatzzeit	h	55200	54600	577		1440	1430	7,97		1440	1430	6,76		97,0	96,5	0,507		Heures de vol Hélicoptère		
Hochseefrachter	Transportleistung	tkm	18,1	16,2	0,328	1,56	0,170	0,134	0,00282	0,0329	0,167	0,134	0,00275	0,0309	0,0108	0,00904	0,000178	0,00153	Rend.du transp. Navire de haute mer		
Hochseetanker	Transportleistung	tkm	9,17	8,06	0,221	0,886	0,0903	0,0696	0,00191	0,0187	0,0889	0,0695	0,00186	0,0176	0,00563	0,00464	0,000122	0,000873	Rend.du transp. Pétrolier de haute mer		
Lieferwagen bis 3.5 t	Transportleistung	tkm	1710	1220	306	188	26,2	18,3	4,10	3,85	25,6	18,2	3,86	3,54	1,54	1,26	0,195	0,0890	Rend.du transp. Véhicule de transport, jusqu'à 3.5 t		
LKW 20 bis 28 t	Transportleistung	tkm	215	161	19,5	34,6	3,27	2,34	0,298	0,629	3,23	2,33	0,287	0,608	0,195	0,161	0,0137	0,0195	Rend.du transp. Camion 20-28 t		
LKW 3.5 bis 20 t	Transportleistung	tkm	315	246	27,0	42,0	4,65	3,43	0,428	0,784	4,59	3,42	0,411	0,749	0,280	0,237	0,0196	0,0229	Rend.du transp. Camion 3.5-28 t		
LKW über 28 t	Transportleistung	tkm	150	104	16,4	29,1	2,36	1,58	0,256	0,522	2,34	1,58	0,247	0,508	0,137	0,109	0,0114	0,0167	Rend.du transp. Camion >28 t		
Luftfracht	Transportleistung	tkm	786	773	2,59	10,1	16,4	16,1	0,0448	0,241	16,3	16,1	0,0414	0,221	1,10	1,09	0,00262	0,00783	Rend.du transp. Transport aérien		
Luftfracht, Europa	Transportleistung	tkm	1550	1180	2,39	367	33,4	24,6	0,0414	8,76	32,5	24,5	0,0387	7,94	1,95	1,66	0,00239	0,283	Rend.du transp. Transport aérien , Europe		
Luftfracht, Interkontinental	Transportleistung	tkm	762	750	2,02	10,4	15,9	15,6	0,0352	0,248	15,8	15,6	0,0326	0,227	1,07	1,06	0,00206	0,00805	Rend.du transp. Transport aérien, intercontinental		
Personen-Transporte																			Transports de personnes		
Fernreisezug	Transportleistung	pkm	27,7	15,8	1,12	10,7	0,633	0,495	0,0150	0,123	0,411	0,285	0,0134	0,113	0,00711	0,000980	0,000716	0,00541	Rend.du transp. Train de grand parcours		
ICE	Transportleistung	pkm	53,5	39,1	2,33	12,2	1,09	0,966	0,0259	0,0965	1,04	0,921	0,0243	0,0933	0,0637	0,0552	0,00141	0,00710	Rend.du transp. ICE		
Linienbus	Transportleistung	pkm	115	98,4	6,73	9,66	1,67	1,38	0,114	0,179	1,65	1,38	0,102	0,172	0,104	0,0949	0,00421	0,00531	Rend.du transp. Bus de ligne		
Passagierflugzeug	Transportleistung	pkm	90,2	87,8	0,487	1,89	1,88	1,83	0,00844	0,0452	1,88	1,83	0,00780	0,041	0,126	0,124	0,000492	0,00147	Rend.du transp. Avion passagers		
Passagierflugzeug, Europa	Transportleistung	pkm	155	118	0,572	36,7	3,34	2,46	0,00994	0,876	3,25	2,45	0,00928	0,794	0,195	0,166	0,000574	0,0283	Rend.du transp. Avion passagers, Europe		
Passagierflugzeug, intercontinental	Transportleistung	pkm	77,4	75,0	0,200	2,18	1,62	1,56	0,00349	0,0521	1,61	1,56	0,00322	0,0476	0,108	0,106	0,000204	0,00169	Rend.du transp. Avion passagers, intercontinental		
Personenwagen	Transportleistung	pkm	197	142	32,8	22,0	3,34	2,41	0,458	0,480	3,26	2,40	0,436	0,430	0,197	0,166	0,0227	0,00928	Rend.du transp. Voiture		
Personenwagen, Benzin	Transportleistung	pkm	207	152	32,8	22,0	3,40	2,46	0,458	0,480	3,32	2,46	0,436	0,430	0,201	0,169	0,0227	0,00928	Rend.du transp. Voiture, essence		
Personenwagen, Diesel	Transportleistung	pkm	149	94,4	32,8	22,0	3,05	2,12	0,458	0,480	2,98	2,11	0,436	0,430	0,178	0,146	0,0227	0,00928	Rend.du transp. Voiture, gasoil		
Regionalzug	Transportleistung	pkm	51,7	33,5	3,22	15,0	1,28	1,08	0,0275	0,172	0,805	0,624	0,0230	0,158	0,0109	0,00215	0,00121	0,00757	Rend.du transp. Train régional		
Reisebus	Transportleistung	pkm	57,4	46,2	4,51	6,63	0,863	0,664	0,0757	0,123	0,849	0,663	0,0681	0,118	0,0522	0,0457	0,00284	0,00365	Rend.du transp. Autocar		
Tram	Transportleistung	pkm	60,1	35,5	4,33	20,2	1,19	0,888	0,0612	0,238	1,04	0,767	0,0559	0,221	0,0265	0,0118	0,00218	0,0125	Rend.du transp. Tram		
Trolleybus	Transportleistung	pkm	61,4	45,5	4,74	11,1	1,44	1,16	0,0800	0,205	1,27	1,00	0,0719	0,197	0,0251	0,0160	0,00297	0,00612	Rend.du transp. Trolleybus		
Personen-Transporte																			Transports de personnes		
Fernreisezug	Fahrleistung	km	10900	6200	439	4210	248	194	5,89	48,3	161	112	5,26	44,2	2,79	0,384	0,280	2,12	km parcourus Train de grand parcours		
ICE	Fahrleistung	km	16500	12100	719	3760	336	298	8,01	29,8	321	284	7,51	28,8	19,7	17,05	0,436	2,19	km parcourus ICE		
Linienbus	Fahrleistung	km	1610	1380	94,3	135	23,4	19,3	1,59	2,51	23,1	19,3	1,43	2,40	1,46	1,33	0,0589	0,0744	km parcourus Bus de ligne		
Passagierflugzeug	Fahrleistung	km	25200	24500	136	527	526	511	2,36	12,6	524	510	2,18	11,5	35,1	34,6	0,137	0,409	km parcourus Avion passagers		
Passagierflugzeug, Europa	Fahrleistung	km	10100	7670	37,2	2380	217	160	0,646	57,0	212	159	0,603	51,6	12,7	10,8	0,0373	1,84	km parcourus Avion passagers, Europe		
Passagierflugzeug, Interkontinental	Fahrleistung	km	24800	24000	63,9	697	518	500	1,12	16,7	515	499	1,03	15,2	34,5	33,8	0,0654	0,541	km parcourus Avion passagers, intercontinental		
Personenwagen	Fahrleistung	km	315	228	52,5	35,2	5,35	3,85	0,733	0,767	5,22	3,84	0,698	0,688	0,316	0,265	0,0363	0,0148	km parcourus Voiture		
Personenwagen, Benzin	Fahrleistung	km	331	243	52,5	35,2	5,44	3,94	0,733	0,767	5,31	3,93	0,698	0,688	0,322	0,271	0,0363	0,0148	km parcourus Voiture, essence		
Personenwagen, Diesel	Fahrleistung	km	239	151	52,5	35,2	4,88	3,38	0,733	0,767	4,76	3,38	0,698	0,688	0,285	0,233	0,0363	0,0148	km parcourus Voiture, gasoil		
Regionalzug	Fahrleistung	km	2380	1540	148	692	59,2	50,0	1,27	7,94	37,1	28,8	1,06	7,27	0,504	0,0990	0,0556	0,349	km parcourus Train régional		
Reisebus	Fahrleistung	km	1200	971	94,8	139	18,1	13,9	1,59	2,58	17,8	13,9	1,43	2,47	1,10	0,960	0,0596	0,0767	km parcourus Autocar		
Tram	Fahrleistung	km	3180	1880	229	1070	62,8	47,0	3,24	12,6	55,2	40,6	2,96	11,7	1,40	0,623	0,115	0,664	km parcourus Tram		
Trolleybus	Fahrleistung	km	1600	1180	123	288	37,5	30,1	2,08	5,34	33,0	26,0	1,87	5,12	0,653	0,417	0,0771	0,159	km parcourus Trolleybus		