



Projet d'étude promotion 2009

Projet d'étude N°27
Guillaume Langrand
Danilo Lessa
Noé Mitteault
Véronique Pham
Jiawen Song
Xiaoqian Yu

Commanditaires : ENTPE-DGCB, ECL-LTDS, CMA du Vaucluse

Tuteur(s) scientifique(s) : Eric Vincens

Conseiller en communication : Nicolas Hourcade

Conseiller en gestion de projet : Gilles Robert

Département d'accueil : MSGMGC

Novembre 2007

Rapport final

Ouvrages en pierre sèche :

Analyse du cycle de vie

Table des matières

Résumé.....	4
A-Ouvrages en pierre sèche : Analyse du cycle de vie.....	5
Introduction	6
I-Murs de soutènement des terres.....	8
I-1.Murs de soutènement en pierre sèche.....	8
I-1.1 Structure d'un mur de soutènement des terres en pierre sèche	9
I-1.2 Eléments techniques de la construction d'un mur en pierre sèche...10	
I-1.3 Outillage nécessaire à la construction.....	12
I-1.4 Le rôle indispensable du murailleur.....	13
I-2.Murs en béton en L.....	14
I-2.1 Définition	14
I-2.2 Parties principales d'un mur en L en béton	15
I-2.3 Construction d'un mur en L en béton	16
I-2.4 Outils pour la construction d'un mur en L en béton	16
I-3.Mur cloué en béton.....	17
I-3.1 Définition.....	17
I-3.2 Différents éléments d'un mur cloué.....	18
I-3.3 Étapes de construction.....	19
I-3.4 Machines et les outils utilisés.....	19
II-Analyse du cycle de Vie.....	21
II-1.Principe	21
II-1.1 Objectifs.....	21
II-1.2 Inventaire du cycle de vie.....	21
II-1.3 Analyse des impacts.....	22
II-1.4 Interprétation.....	23
II-2.L'étude de prix.....	23
II-3.L'écobilan.....	25
II-4.Définition des ouvrages élémentaires.....	27
II-4.1 Technologie Pierre Sèche.....	28
II-4.2 Technologie Béton.....	29
II-4.2 Besoins communs aux deux technologies – terrassement.....	29
III-Coût financier.....	31
III-1.Coût des matières premières	31
III-1.1 Calculs des déboursés secs pour la technologie pierre sèche.....	31
III-1.2 Calculs des déboursés secs pour la technologie béton.....	32
III-2.Cout de la phase construction	33
III-2.1 déboursés secs main d'œuvre.....	33
III-2.1.1 cas de la pierre sèche.....	33
III-2.1.2 cas du béton.....	34
III-2.2 déboursés secs matériel/consommable.....	35
III-2.2.1 cas de la pierre sèche.....	36
III-2.2.2 cas du béton.....	36
III-3.Coût de l'entretien /destruction.....	38
III-4.Comparaison des deux études	39

IV-Coût Environnemental.....	41
IV-1.Matériaux.....	41
IV-1.1.Données de l'écobilan.....	41
IV-1.1.1.Technologie Pierre Sèche.....	41
IV-1.1.2.Technologie Béton.....	42
IV-1.2.Application des données de l'écobilan aux caractéristiques des ouvrages élémentaires.....	43
IV-2.Construction.....	45
IV-2.1.Données de l'écobilan.....	45
IV-2.1.1.Pelle mécanique (bobcat, tractopelle).....	46
IV-2.1.2.Machine à projeter du béton.....	47
IV-2.1.3.Machine à clouer.....	48
IV.2.2.Application des données de l'écobilan aux caractéristiques des ouvrages élémentaires.....	48
IV-2.2.1.Pelle mécanique.....	48
IV-2.2.2 Machine à projeter du béton.....	48
IV-2.2.3.Machine à clouer.....	49
IV-2.3.Résultat total de la phase de construction.....	49
IV-3.Entretien et Destruction.....	51
IV-4.Comparaison finale pierre sèche/béton.....	52
Conclusion.....	55
Table des figures.....	56
Références bibliographiques.....	58
Annexes.....	59
B-Analyse du processus projet.....	68
1 L'organisation de l'équipe.....	69
2 Les relations avec les partenaires.....	70
3 Évolution des objectifs du projet.....	70
4 Gestion du budget.....	71
Diagramme de répartition des tâches.....	72
Diagramme logique.....	73
Check-list.....	74

Résumé

L'objectif de ce projet d'étude est d'établir une comparaison entre deux technologies de construction de murs de soutènement, à savoir la fabrication de murs en pierre sèche ou en béton. Cette comparaison s'effectuera au travers d'une analyse du cycle de vie comparée entre les deux technologies.

L'usage de la pierre sèche, construction ne nécessitant pas l'utilisation de liant mécanique (mortier ou ciment) est très ancien, mais ce type de murs a été délaissé pendant longtemps pour laisser place aux ouvrages massifs en béton. De fait, construire en béton offre de nombreux avantages, en particulier parce que les ingénieurs et les ouvriers maîtrisent très bien cette technologie. Or depuis quelques années, on peut observer un regain d'intérêt pour les ouvrages en pierre sèche : ceux-ci, outre le fait qu'ils s'ancrent bien dans le patrimoine culturel et touristique de certaines régions françaises, présentent également d'autres avantages, notamment au plan écologique. En effet, la construction en pierre sèche est un travail principalement manuel ne nécessitant que très peu d'outils mécaniques, par conséquent elle est très peu polluante.

L'analyse du cycle de vie de ces ouvrages consistera en un inventaire des flux entrants et sortants au cours des différentes phases de leur vie.

Dans ce rapport sont présentées les techniques de construction des murs de soutènements en pierre sèche, et celles des murs en béton ; cela afin de permettre une meilleure compréhension des résultats. Il est ensuite discuté de savoir dans quel cas la construction en pierre sèche peut être préférée à celle en béton, selon des critères économiques et environnementaux, sur la base d'un travail de recherche auprès de professionnels, de spécialistes, d'organismes spécialisés et d'entreprises.

**A-Ouvrages en pierre sèche :
analyse du cycle de vie.**

Introduction

Depuis quelques années, on peut observer un regain d'intérêt pour la construction en pierre sèche, technique longtemps délaissée au profit des constructions en béton. Cette technique ancestrale consiste à bâtir des ouvrages en pierre (murs de soutènement, paravalanches, masques de barrages, cabanes...) sans avoir recours à un liant mécanique (mortier de chaux ou de ciment...). Ces ouvrages présentent de nombreux atouts, tant sur le plan environnemental que culturel, mais étant quasiment absents de toute littérature scientifique, ils ne bénéficient d'aucun crédit auprès des entrepreneurs, des assureurs, des architectes... Et pourtant, ces ouvrages de soutènement en pierre sèche (OSPS) constituent un patrimoine conséquent se trouvant principalement dans le réseau routier départemental, les chemins ruraux, et les terrasses agricoles. Les statistiques qui concernent le seul réseau national (source METATT [Odent]) répertorient 410 000 m² pour 2100 OSPS inégalement répartis dans les trois quarts des départements français. C'est dans ce contexte que s'inscrivent plusieurs travaux de recherche, d'étude, d'informations visant à réhabiliter la pierre sèche. Le projet d'étude présenté dans ce rapport a été commandité par la Chambre des Métiers et de l'Artisanat du Vaucluse, des enseignants de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE) ainsi que par le laboratoire LTDS de l'Ecole Centrale de Lyon (ECL). Six étudiants de l'ECL ont participé à ce projet de 14 mois, encadrés par Eric Vincens, responsable de la filière génie civil.

L'objectif du projet est de réaliser une analyse du cycle de vie comparative de mur de soutènement en pierre sèche pour les deux technologies constructives que sont la pierre sèche et le béton armé. Le but étant de pouvoir déterminer dans quel cas la pierre sèche peut être préférée au béton armé.

Cette approche d'un problème se veut plus complète que les approches classiques essentiellement financières. Elle prend en compte notamment l'impact du processus de fabrication-entretien sur l'environnement dans son acception la plus large.

Le rapport commence donc par une description des murs de soutènement, avant de s'intéresser à la méthode de l'analyse du cycle de vie. Par la suite nous présenterons d'une part l'aspect financier de l'étude puis d'autre part l'aspect environnemental. Une synthèse refermant cette étude sera enfin proposée.



Figure 1 : Culture en terrasse dans la vallée du Douro au Portugal

I-Murs de soutènement des terres

Un mur de soutènement est un ouvrage qui vise à retenir une certaine quantité de terre. Ce type de mur a plusieurs utilisations, principalement 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 tendent à la 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 parois ancrées : formée d'éléments verticaux (pieux planches ou tubes) liés entre eux par différents procédés. La paroi ancrée s'oppose à la poussée du sol par des tirants d'ancrage le plus souvent en acier.
- La paroi préfabriquée : constituée d'éléments le plus souvent en béton armé, elle va s'opposer au renversement par une base, ou une semelle de grande surface.

Par la suite sont détaillées trois technologies de construction de murs de soutènement (une pour la pierre sèche, deux pour le béton) qui font l'objet de la comparaison de cette étude.

Chacune de ces technologies appartient à l'une des trois catégories citées précédemment.

La première est la technologie pierre sèche, qui appartient à la catégorie des murs poids.

I-1.Murs de soutènement en pierre sèche

Les techniques de construction des murs de soutènement en pierre sèche sont des techniques que l'on peut qualifier d'universelles : bien que quasiment absente de toute littérature, on les retrouve aux quatre coins de la planète (France, Japon, Portugal...) En effet ces murs répondent parfaitement à toutes les exigences techniques et environnementales. Ils peuvent être construits avec de très nombreux types de pierres : une des leurs caractéristiques principale est d'utiliser des matériaux « in situ », permettant ainsi leur construction sur tout types de terrain, même les plus reculés, à condition de pouvoir y trouver suffisamment de pierres.

I-1.1 Structure d'un mur de soutènement des terres en pierre sèche

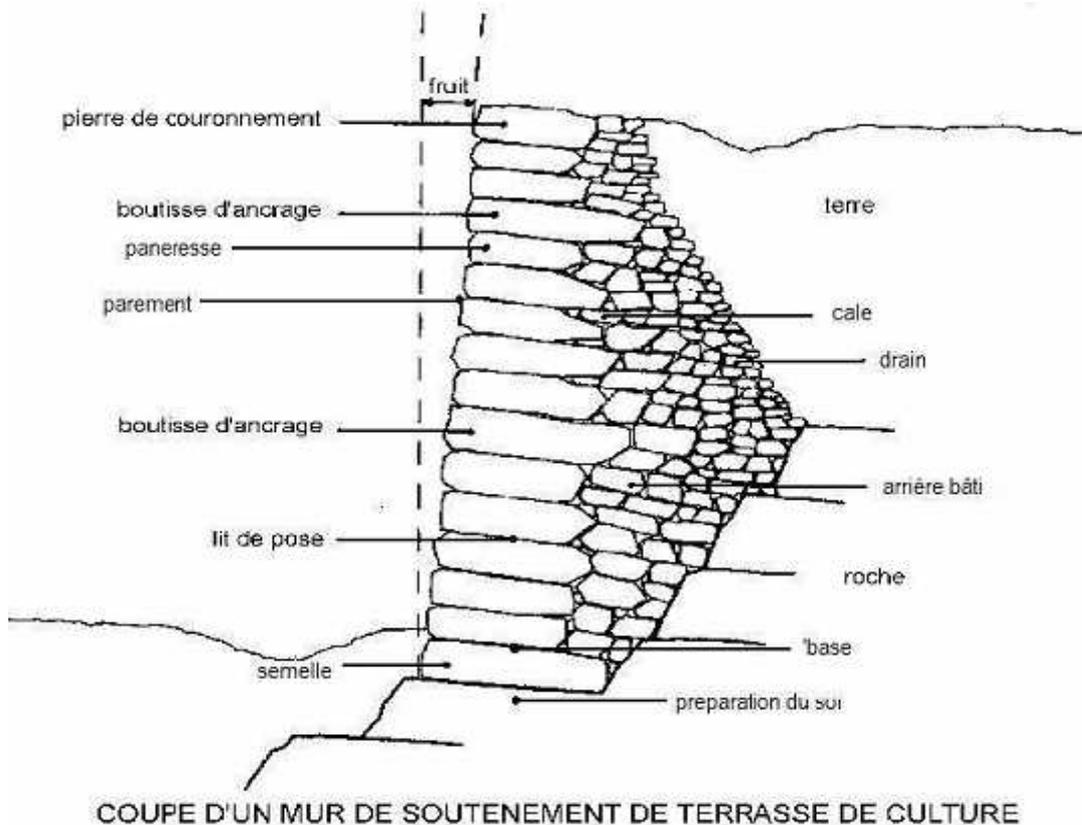


Figure I.1 : Coupe d'un mur de soutènement de terrasse de culture

Le mur en pierre sèche comporte cinq parties principales à savoir :

-**La base** : partie inférieure du mur, on y trouve les pierres les plus massives car elles devront supporter tout le poids du mur. Ces pierres sont des *semelles*.

-La surface extérieure du mur qui s'appelle **parement** : bien rangée et organisée. C'est la partie que chacun peut observer une fois le mur construit.

-La partie centrale du mur, appelé **arrière bâti** : composée principalement de deux types de pierres, les *boutisses d'ancrage* disposées dans la profondeur du mur et les *panneresses* disposées dans le sens de la longueur du mur. On peut également y trouver des petites *cales* situés vers l'arrière du mur, sous les pierres de taille importante.

-Le **drain** est la partie intermédiaire entre le mur et la terre soutenue. Cette partie du mur est essentielle. Constitué de pierre de plus petite taille que celle dans le corps du mur ainsi que de graviers, elle va assurer un rôle de filtre primordial ; Les graviers vont laisser réguler le passage de l'eau tandis qu'ils vont retenir la terre. Ainsi le filtrage se fait de

manière naturelle et l'eau n'est pas retenue en amont du mur, ce qui pourrait provoquer sa rupture du fait d'une sur-contrainte trop importante.

-Le **couronnement** est la partie supérieure du mur où les pierres sont relativement lourdes et servent à assurer la compression naturelle du mur. Il peut être bâti en *plat* ou en *chant*. L'une des raisons de construire en chant est d'éviter le passage des animaux.



Figure I.2 : Disposition d'un couronnement en chant

I-1.2 Eléments techniques de la construction d'un mur en pierre sèche

-Le fruit du parement

Etant avant tout des murs poids, l'une des principales caractéristiques des murs de soutènement en pierre sèche est le fruit, c'est à dire l'inclinaison du mur par rapport à la verticale. L'importance du fruit est liée non seulement à la hauteur du mur (plus le mur est haut, plus le fruit est important) mais aussi à la dimension et la qualité des pierres qui le composent : il peut varier entre 5% (cas des murs en gros blocs de granite du mont Lozère) et 30%, (cas de certains grès ou calcaires médiocres) .Cette inclinaison résulte d'une compression supplémentaire du mur, c'est à dire, une compression qui s'ajoute au propre poids du mur. Cette compression a un double effet positif. D'une part, la compression donne plus de rigidité au mur. D'autre part, cette compression est une composante de la poussée des terres : cela signifie que la contrainte de cisaillement est diminuée par rapport au cas où le fruit est nul. Or la contrainte de cisaillement tend à faire s'écrouler le mur (voir schéma).

-La préparation du sol

La préparation du sol a une relation directe avec le fruit. Le sol doit former un plan qui fait avec l'horizontale un angle égal à l'inclinaison du mur par rapport à la verticale, c'est à dire le fruit. Cette préparation permet donc d'assurer la présence du fruit dès la base. (Figure 1)

Suivant l'aspect géométrique du sol, la préparation du sol est différente. Par exemple, si le mur doit être construit sur un terrain incliné, le sol doit être creusé comme un escalier. Grâce à cette technique, tout glissement potentiel dû à la gravité sera évité.

De la même manière, la nature du sol influe sur la préparation du terrain. Dans le cas où celui-ci est meuble par exemple, il faut faire une couche stabilisante formé par des petites pierres entre le sol et la base du mur. Dans les autres cas, on peut bâtir le mur directement sur la terre.

-La base : les fondations du mur

La largeur de la base doit être d'environ 60% de la hauteur du mur. Cette règle géométrique est appliquée, de manière continue et régulière, à chaque étage du mur : en effet, chaque étage est une base pour le suivant. Ainsi, le mur a une largeur qui décroît avec la hauteur.

-Le croisement des pierres

Dans l'arrière bâti, l'artisan s'efforce de réaliser un maillage en 3 dimensions, un croisement des pierres afin d'assurer l'unité et la stabilité de la structure (voir image ci-après). Ce « tricotage » est assuré en disposant en angle droit les boutisses et les panneresses. Il 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. Lorsque le murailleur (artisan spécialiste de la pierre sèche) dispose les pierres, elles ne sont pas nécessairement dans la meilleure configuration possible (certaines bougent...). Mais une fois ces pierres soumises à la contrainte des terres en amont, elles trouvent naturellement une position stable. Cette faculté du mur de s'adapter à la contrainte, cette souplesse, va 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 : ce choix étant effectué par les murailleurs.

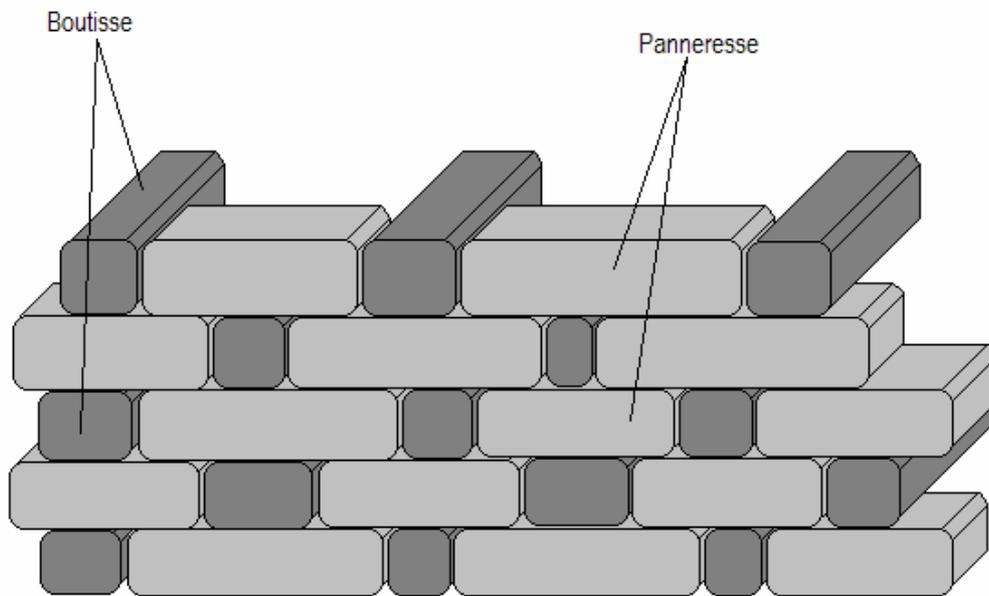


Figure I.3 : Croisement des pierres dans le mur, vue 3D

I-1.3 Outillage nécessaire à la construction

- Les **bois croisés** sont utilisés dans le processus de construction du mur pour assurer sa forme et son inclinaison. Ils sont constitués de deux poutres placées parallèlement à l'inclinaison voulue du mur, fixées en bas au sol et en haut à l'aide de quatre autres poutres placées horizontalement. Deux à deux, une extrémité de chaque poutre est fixée à la poutre inclinée et les autres extrémités sont appuyées dans la terre à l'amont. Avec cette structure montée, on utilise des cordaux de nylon qui sont fixés aux poutres parallèles à l'inclinaison et peuvent être déplacées de bas en haut selon l'étape de la construction (voir figure I.2).

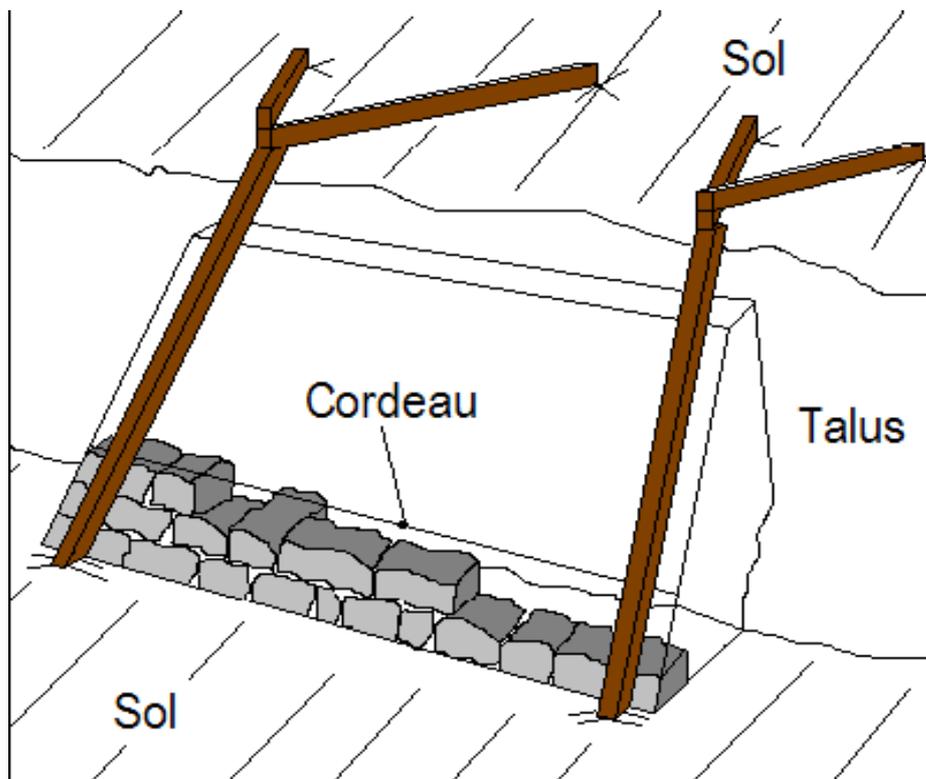


Figure I.4 : Disposition des bois croisés pour la construction des murs en pierre sèche

- **La Brouette mécanique** : utilisée pour le transport des pierres.
- **Le Tractopelle** : utilisé pour préparer le terrain au début du chantier
- **Les pioches, pelles, râteau...** : 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.

I-1.4 Le rôle indispensable du murailleur

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 par exemple être capable de réaliser le croisement et le calage des pierres de manière correcte ; il doit également être capable de repérer visuellement quelle pierre conviendra à la place occupée 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 4T de pierre par jour, un manque d'expérience peut donc rapidement ralentir l'avancement du chantier, ainsi que la santé de l'artisan.

Ces exemples montrent le rôle fondamental de l'artisan pour la construction en pierre sèche.

La pierre sèche étant une technique énormément délaissée, on y fait très peu mention dans la littérature technique. Ce savoir-faire résulte donc essentiellement d'une transmission par la parole et par l'apprentissage.

I-2.Murs en béton en L

I-2.1.Définition :

Les murs de soutènement en béton armé, également appelés murs cantilever, sont très couramment employés. Ce sont des murs souples, 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 dispositif d'évacuation des eaux (barbacans 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).

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 environ).

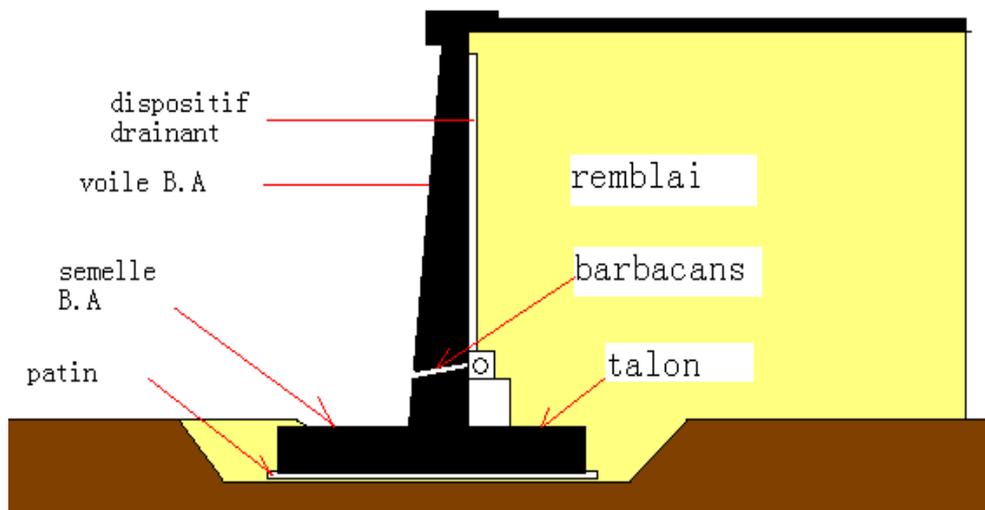


Figure I.5 : Coupe d'un mur en L

I-2.2. Parties principales d'un mur en L en béton :

-Fondations

On appelle fondation, la partie d'un ouvrage reposant sur un terrain d'assise auquel sont transmises toutes les charges permanentes et variables supportées par cet ouvrage. Généralement, 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. L'effort résultant que le sol exerce sur la semelle provoque un moment que contrebalance le moment que le sol exerce sur la partie verticale du mur. Ainsi la tendance à basculer est compensée par l'action de la semelle. (Voir schéma)

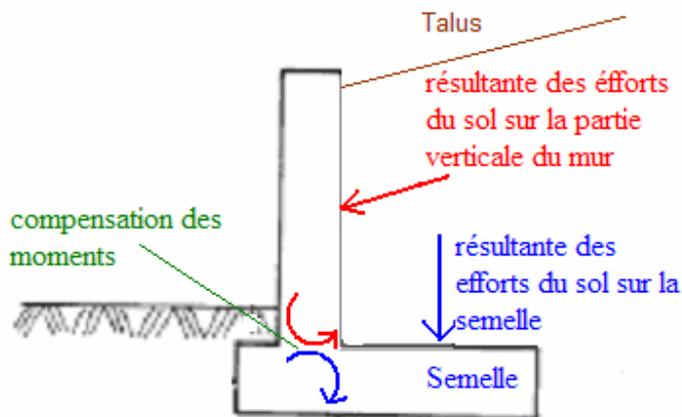


Figure I.6 : Modélisation des efforts dans un mur L.

-Armatures

C'est le système qui contribue à donner à un ouvrage sa rigidité, stabilité et résistance aux différentes forces qui solliciteront l'ouvrage. Le diamètre des armatures, barres métalliques crantée, est fonction des charges sollicitant 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)

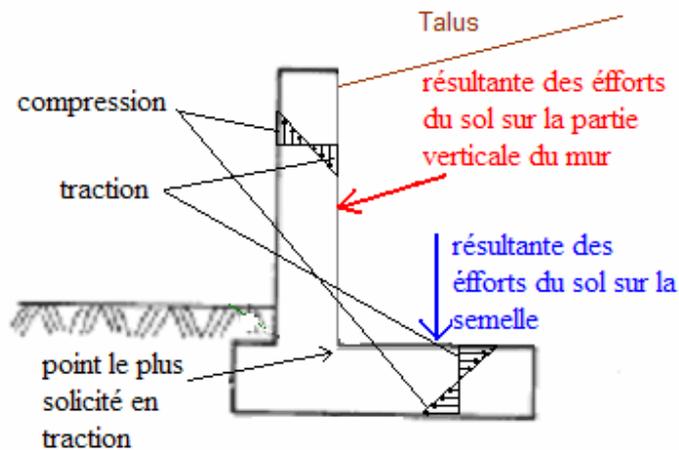


Figure I.7 : Sollicitations en traction/compression d'un mur en L

Comme on peut voir sur la figure précédente, les points où il faut renforcer la structure du mur avec des armatures sont la face amont du mur, la partie supérieure de la semelle et le point d'intersection entre la semelle et le corps du mur.

I-2.3. Construction d'un mur en L en béton :

La construction d'un mur en L non préfabriqué se constitue en quelques phases :

- D'abord la préparation du sol en faisant attention pour que dans la base le sol soit bien plan. Les dimensions préétablies doivent être respectées ;
- En suite le montage du coffrage, normalement en bois, qui va définir la forme finale du mur. Parallèlement à cette phase, la mise en place des armatures doit être exécutée d'une telle sorte qu'elles ne sortent pas de sa place au moment du coulage du béton ;
- Après, le coulage du béton doit remplir le volume du coffrage sans laisser des trous ni des bulles;
- A la fin, une phase à ne pas négliger c'est la démontage du coffrage et prise du béton. Pour cette dernière phase, la surface du béton doit être maintenue humide pour que les processus chimiques qui vont donner la bonne résistance au béton soient bien réalisés. Une faute dans cette phase peut provoquer l'apparition de microfissures qui avec du temps peuvent se propager et à la limite provoquer la rupture de la structure.

I-2.4. Outils pour la construction d'un mur en L en béton :

- Outils et machines d'excavation :

Pioche, pelle, pelle mécanique ou tractopelle, etc. ...

- Outils pour la mise en place du coffrage

Marteau, clous, bois.

- Outils pour la mise en place du béton

Brouette, bétonneuse, ...

I-3.Mur cloué en béton [Projet National Clouterre]

I-3.1 Définition

Les murs cloués sont des murs qui appartiennent à la catégorie des murs ancrés. 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 par rapport à l'horizontale, travaillant essentiellement à la traction. Ces barres peuvent également travailler partiellement à la flexion et au cisaillement. Elles sont appelées « clous », C'est par le biais du frottement qui s'exerce entre le sol et les clous que ces derniers peuvent se mettre en traction.

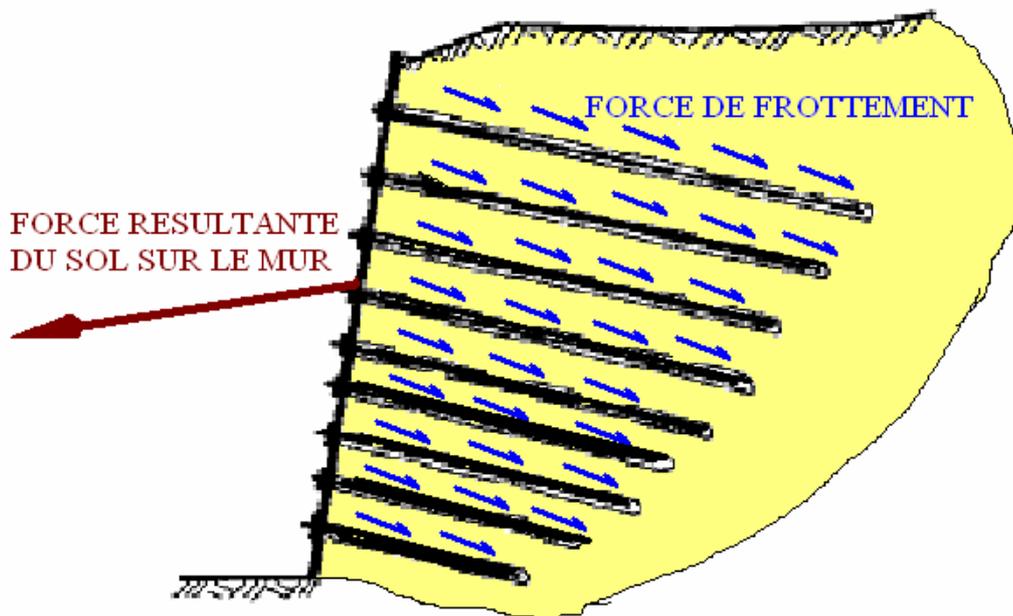


Figure I.8 : Modélisation des efforts sur un mur cloué

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, ou légèrement incliné.



Figure I.9 : Mur cloué le long d'un axe routier

I-3.2 Différents éléments d'un mur cloué

- **Les clous**, sont des éléments importants du mur cloué. On compte un clou ($\varnothing=6\text{cm}$, $L=6\text{m}$) pour $2,25\text{m}^2$ de mur. Il existe plusieurs méthodes de mise en place des clous : Soit par scellement au coulis de ciment ou au mortier dans un forage préalable, soit par battage ou vibrofonçage.

- **Le parement**, dans le cas du béton projeté a une épaisseur calculée qui est principalement fonction du maillage adopté pour la mise en place des barres. Elle est de l'ordre de la dizaine de centimètres,

- **Le treillis** est constitué d'armatures en acier, il sert à fixer le béton projeté. La quantité d'acier utilisée pour réaliser ce treillis est d'environ 10kg/m^3



Figure I.10 : Mise en place d'un treillis soudé

- **Les barbacanes** : comme pour le mur en L, ces conduits creusés ou en plastique permettent à l'eau de s'écouler au travers du mur

I-3.3 étapes de construction

La construction d'un mur en sol cloué se fait par phases successives en descendant progressivement :

- 1) un terrassement, généralement limité à 1 ou 2 m de hauteur et éventuellement limité en longueur selon les terrains.
- 2) la mise en place des clous dans le sol
- 3) la réalisation du parement qui peut être fait sur place (béton projeté sur treillis soudé ou béton de fibres) ou à l'aide d'éléments préfabriqués et qui peut être habillé de diverses manières.

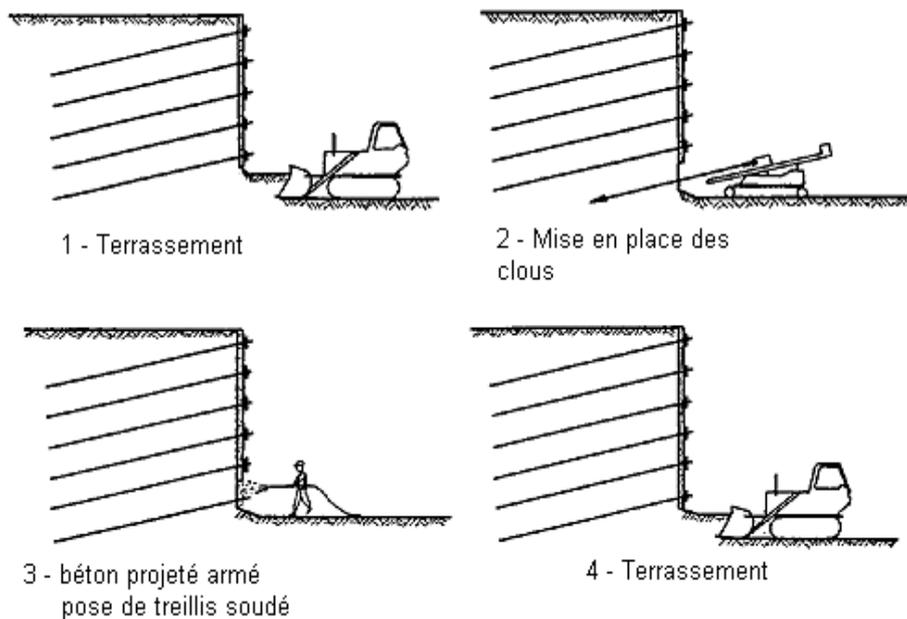


Figure I.11 : Phases de construction d'un mur cloué

I-3.4 Les machines et les outils utilisés

Lors de la phase de terrassement, on utilise comme pour les autres types de murs des **tractopelles, des pelles mécaniques ou des chargeuses** (voir photo ci-dessous)



Figure I.12 : Préparation d'une nouvelle étape de projection

Dans la phase de mise en place des clous, le forage est réalisé par rotation, par percussion ou par roto-percussion avec une **tarière** continue, un outil désagrégateur (tricône, outil à lame, taillant,...), un tube ouvert ou un tube et une tige portant un outil (tricône ou taillant). Ensuite, les barres sont introduites à l'aide d'un **canon à air comprimé ou d'un canon pyrotechnique**. Si la mise en place des clous se fait sans forage préalable, on utilise des **machines de battage ou de vibrofonçage**.

II-Analyse du cycle de Vie

Une Analyse du Cycle de Vie (ACV) est avant tout un outil permettant de mettre en exergue les impacts environnementaux lors d'une prise de décision financière. Elle consiste à évaluer tous les impacts environnementaux potentiels d'un système assurant une fonction au cours de son cycle de vie. Le cadre méthodologique de l'ACV a été normalisé par la série de normes ISO 14040 à 14043 [ADEME].

Tout en montrant comment celle-ci s'applique à cet objet d'étude (les murs de soutènement), on trouvera dans cette partie un rappel sur la méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV), et on verra comment l'application de l'analyse du cycle de vie à l'objet mur de soutènement des terres a permis de dégager deux axes d'études :

- Etude du coût financier
- Calcul du coefficient environnemental.

II-1.Principe

L'analyse du cycle de vie, résumée en Annexe 2 se divise en quatre grandes phases :

II-1.1 Objectifs

- L'évaluation comparative des étapes d'un cycle de vie afin d'identifier les transferts de pollution.
- L'évaluation comparative de plusieurs cycles de vie « concurrents » dans le but d'identifier les systèmes les plus respectueux de l'environnement. Afin de comparer ces différents systèmes, leur définition est établie sur la base de leur fonction. Cette base de comparaison, appelée « unité fonctionnelle », est définie avec précision à partir de l'objectif de l'étude, de son utilisation et de la fonction étudiée. Dès lors que l'objectif a été fixé, les systèmes à étudier doivent être parfaitement explicités.

Dans le cas de cette étude, il s'agit de comparer les cycles des technologies pierre sèche et béton. Cela suppose donc que l'on s'intéresse préalablement à l'étude des constructions des murs de soutènement pour les deux technologies, ce qui a déjà été présenté dans la partie précédente.

II-1.2 Inventaire du cycle de vie

Cette étape de l'analyse du cycle de vie consiste à inventorier l'ensemble des flux à l'intérieur et à l'extérieur du système considéré. Les flux identifiés sont de deux types :

- Les flux économiques qui sont les flux de matière, d'énergie, de services échangés entre les processus élémentaires et avec des systèmes extérieurs.
- Les flux élémentaires qui sont des flux échangés avec l'environnement (matières premières, déchets, émissions.).

Il s'agit donc ici d'identifier et de quantifier les flux de matière et d'énergie entrant et sortant des systèmes. On comptabilise ainsi les entrants (matières premières et énergie) et les sortants (produit, rejets dans l'air et l'eau et déchets solides) pour tout ou partie du cycle de vie étudié. La réalisation de ces bilans exige une recherche bibliographique importante.

Dans le cadre de l'étude des murs de soutènements des terres, le cycle de vie est séparé en trois phases (ceci pour les deux types de technologies) afin de faciliter la quantification des flux :

- Extraction des matières premières et transformation des pierres si nécessaire
- Réalisation et construction des ouvrages
- Entretien / Destruction.

II-1.3 Analyse des impacts

Cette phase consiste à traduire les flux de matière et d'énergie précédemment recensés en termes d'impacts potentiels sur l'environnement ; on peut regrouper ces impacts au sein de deux familles principales :

- Impacts locaux : conséquences toxiques et écotoxiques, et nuisances telles que le bruit et les odeurs.
- Impacts globaux : effet de serre, dégradation de la couche d'ozone, épuisement des ressources naturelles. La prise en compte de tous ces éléments permet la réalisation d'un bilan environnemental.

Dans le cadre de l'étude des murs de soutènements des terres, la prise en compte des impacts locaux s'avère être relativement complexe. L'étude se veut être générale alors que les impacts locaux que sont les nuisances sonores par exemple, relèvent plus du cas particulier en fonction de la localisation du chantier principalement. La prise en compte des impacts locaux nécessite d'effectuer des mesures de toxicité, de bruit engendrés... Ceci dépasse le cadre de ce travail et cet aspect ne sera pas pris en compte ici.

Par ailleurs, de nombreux critères difficilement chiffrables mais cependant très importants peuvent entrer en jeu lors d'un choix de technologie de construction.

Ces critères sont majoritairement des critères culturels. De nombreux ouvrages en pierre sèche viennent s'inscrire dans un patrimoine régional et valorisent les produits agricoles cultivés sur les terrains qu'ils soutiennent (Ex : Domaines viticoles en Alsace, dans les côtes du Rhône...). Dans ce cas là la pierre sèche présente un atout de « marketing territorial » qui est absolument impensable de ne pas prendre en compte au

moment du choix de la technologie de construction. Inclure ce critère dans cette étude semble difficile car il n'existe pas de moyen pour mesurer et chiffrer un tel avantage.

Il faut aussi signaler qu'un critère que l'on pourrait appeler « pollution visuelle » peut avoir son importance dans certains cas. Les ouvrages en pierre sèche s'inscrivent beaucoup plus aisément dans le paysage, surtout dans certaines régions, certains villages ou de nombreuses constructions en pierre sèche existent déjà. Par soucis d'objectivité et encore une fois dans le but de réaliser une étude qui soit générale, ce critère n'a ici pas été pris en compte.

D'un point de vue biologique, les ouvrages en pierre sèche permettent d'abriter des colonies de faune et de flore qui participent à la protection phytosanitaire des cultures, ce qui présente un avantage supplémentaire par rapport aux ouvrages en béton.

Il semble important d'avoir conscience de tous les critères cités avant, même si il n'est pas possible d'en rendre compte de manière chiffrée.

II-1.4 Interprétation

Il s'agit de réaliser une synthèse des bilans environnementaux et de déterminer quel bilan est le plus compétitif.

En suivant point à point cette méthodologie, on fournira ici deux résultats principaux pour les deux technologies étudiées :

- Un coût financier, afin de considérer tout l'aspect financier. Pour faire cela, c'est la méthode de l'étude de prix qui a été utilisée
- Un coefficient environnemental, permettant de considérer l'aspect environnemental. Pour y répondre, c'est la méthode de l'écobilan qui a été retenue.

Ces deux méthodes sont présentées ci-dessous.

II-2.L'étude de prix [Barrois]

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 et s'effectue toujours en amont de la vie d'une affaire (cf. l'organigramme du suivie d'affaires en annexe : Annexe 2).

Une fois le cahier des charges établi, il faut calculer le chiffrage du chantier. Ce chiffrage s'effectue en deux grandes étapes. La première d'entre elle consiste à déterminer les **déboursés secs (D.S.)**. Ces derniers correspondent à la valeur des composants strictement nécessaires et directement affectables à un **ouvrage élémentaire** (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.). Pour l'étude des murs, c'est un mètre linéaire de mur pour différentes hauteurs qui a été choisi comme OE, ce choix est détaillé par la suite. Le chiffrage comprend :

- Le coût des **matériaux** : il dépend de la quantité de matériaux et de leurs valeurs unitaires (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. On considère les différentes grandeurs suivantes pour définir le déboursé horaire main d'œuvre :

- Le salaire de base
- Les heures supplémentaires
- Les primes et gratifications assujettis aux charges sociales
- Les avantages
- Les indemnités
- Les primes et indemnités non assujettis aux charges sociales
- Les repos compensateurs
- Le temps improductif...

Pour le travail réalisé, les coûts de la main d'œuvre qui ont été retenus sont les chiffres utilisés par les ingénieurs du bâtiment pour réaliser les études de prix. Ces chiffres ont été fournis par des professionnels, ils n'ont pas été recalculés, cela nécessitant un travail fastidieux et l'accès à toutes les données économiques est souvent compliqué, les entreprises ne souhaitant pas les communiquer.

- 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 leurs entretiens seront fonction de l'amortissement qu'il faudra déterminer.

La seconde étape consiste à déterminer différents frais :

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

L'étude réalisée se veut la plus générale possible, les frais de chantier qui sont calculés pour l'ouvrage particulier n'entrent donc pas dans l'inventaire à réaliser. En négligeant ces frais, l'erreur commise ne s'avère pas être très pénalisante car ces frais ne caractérisent pas un type de technologie en particulier contrairement aux frais considérés auparavant.

- Les **frais généraux (F.G.)** : Ce 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...

Pour les murs de soutènement des terres en béton, il existe une phase préalable de dimensionnement, effectuée par un bureau d'étude (Pour les murs en pierre sèche, c'est par son savoir-faire que l'artisan lui même dimensionne son mur). Il est difficile

d'attribuer un coût général à cette phase de la vie du mur. La complexité du travail à réaliser et donc le temps à consacrer à l'étude est extrêmement variable.

Les autres frais généraux à considérer dépendent plus du type d'entreprise réalisant l'ouvrage que de la technologie retenue ce qui n'entre pas dans le cadre de l'étude.

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.

$$\mathbf{P.R. = D.S. + F.C. (+ F.G. + F.S.)}$$

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.

$$\mathbf{P.V. = P.R. + Bénéfices}$$

En résumé de la méthode, on pourra se référer au schéma de l'annexe 3.

Avant de réaliser l'étude de prix des murs de soutènement des terres, il a fallu déterminer un **ouvrage élémentaire** comme décrit dans la méthode. Les ouvrages qui ont été choisis sont présentés par la suite.

II-3.L'écobilan [Ecobilan]

Un des objectifs de ce projet est la traduction d'une manière simple et fiable, des effets sur l'environnement des technologies constructives abordées. On va pour cela utiliser ici la méthode de l'écobilan.

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. Cette recommandation porte sur l'évaluation globale fondée sur la méthode de la saturation écologique, exprimée en **indices de charge polluante (écopoints)**. Cette méthode suisse a été publiée en 1990 et actualisée en 2006 avec la collaboration des milieux de la recherche, de l'industrie et des offices fédéraux. De ces mêmes flux de matière et d'énergie peuvent être tirées en plus des évaluations partielles. La liste concerne l'énergie grise et l'effet de serre.

Evaluation globale :

– **Les écopoints (UBP)** quantifient les charges environnementales résultantes 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.

Evaluation partielle:

– **Energie grise** : L'énergie grise indique l'énergie cumulée de la consommation énergétique fossile, nucléaire et hydraulique. 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). 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. Plusieurs outils de l'association Eco-Bau (construction écologique) (éco-devis, feuilles CFC) s'appuient aujourd'hui, pour une évaluation générale, sur cette évaluation partielle, en plus des caractéristiques écologiques.

– **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. Il n'est pas comparable avec l'émission de CO₂ liée à l'emplacement et dont les objectifs doivent être convenus avec la Confédération en relation avec la loi sur le CO₂.

Un tableau contenant ces évaluations pour chaque branche des ressources matériaux, énergie et transport est l'outil final de cette méthode (voir tableau en annexe). Il faut utiliser ce tableau ainsi que les données d'utilisation des ressources relatives à un certain ouvrage pour chiffrer les charges environnementales résultantes de celui-ci.

Pour réaliser une analyse du cycle de vie des ouvrages en pierre sèche et en béton armé, plusieurs étapes ont été identifiées :

- Etape 0 : Définition des ouvrages élémentaires (O.E.), les mêmes que ceux utilisés pour l'étude de prix, en vue de l'objectif de comparer les technologies béton et pierre sèche en faisant une relation entre aspect financier et environnemental.

- Etape 1 : A travers l'étude technologique qui a été réalisée, estimation des volumes des matériaux nécessaires pour la construction de chaque O.E., de la quantité et qualité du matériel utilisée pour sa construction (machines, outils) et finalement de ces mêmes paramètres pour la phase d'entretien et démolition.

- Etape 2 : En ajoutant une étude supplémentaire sur les distances de transport entre les lieux de fabrication des matériaux et les ouvrages, utilisation du tableau pour calculer les écopoints relatifs aux matériaux livrés en chantier pour chaque O.E.

- Etape 3 : En faisant des approximations des données du tableau (voir annexe) pour les adapter aux machines utilisées dans la phase de construction, calcul des écopoints relatifs à la phase de construction pour chaque O.E. Ici, quelques hypothèses ont été formulées : la seule source de pollution de la phase de construction est les combustions des machines ; il est possible d'approximer la consommation des machines en utilisant les données relatives aux transports. Ensuite, le temps de travail des machines n'est pas le même que celui qui sera considéré pour le calcul du prix car la machine ne va polluer que quand elle réalise la combustion, c'est à dire qu'il faut utiliser le temps utile de travail.

- Etape 4 : Pollution de la phase d'entretien et démolition. Du à la difficulté de maîtriser les besoins et les réalités de cette phase du cycle de vie, le tableau-outil de l'Ecobilan n'a pas été utilisée ici. Justification de l'aspect négligeable de cette phase de la vie de l'ouvrage en comparaison avec les autres.

Toutes les hypothèses détaillées et les résultats obtenus à chaque étape (sauf pour l'étape 0) ainsi que le résultat final concernant le Coût Environnemental seront montrés dans la partie Coefficient Environnemental.

II-4. Définition des ouvrages élémentaires

Les O.E. choisis sont en résumé, 1m linéaire de mur pour différentes hauteurs. Le mètre linéaire est un O.E. très utilisée pour les murs en général ainsi que le mètre carré. Cependant, si l'O.E. était le mètre carré, il serait difficile de prendre en compte l'effet de la hauteur du mur dans son coût, effet qui a une influence capitale.

Les hauteurs choisis sont 1m, 3m, et 5m. Ces valeurs ont été choisies à partir des opinions et des études des intervenants de la pierre sèche de ce projet. Selon eux, les murs en pierre sèche commencent à devenir non compétitifs par rapport aux murs en béton à partir de 3 ou 4m de hauteur. Ce fait résulte de la caractéristique des murs en Pierre Sèche (P.S.) d'être des murs poids et donc d'avoir un grand volume de matériaux nécessaire pour sa construction quand les hauteurs sont importantes. Choisir des hauteurs de 3 et 5m permettra donc de justifier ou non les jugements établis.

Avec cette définition des O.E., il a été jugé que la comparaison entre les murs en P.S. et les murs en béton montrerait bien les limites de chaque technologie.

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

Figure II.1 : Définition des ouvrages élémentaires

Il est ensuite nécessaire de caractériser ces ouvrages élémentaires, c'est à dire, d'expliciter la qualité et quantité des matériaux nécessaires à la construction de chaque O.E. pour chaque technologie.

II.4.1 Technologie Pierre Sèche

Hypothèses (formulées à partir de la description technique des murs) :

- Fruit calculé suivant la hauteur du mur
- Le vide est estimé à 25%
- La base du mur est de 60% de sa hauteur
- La densité minimale des pierres est d'environ 2000 kg/m³

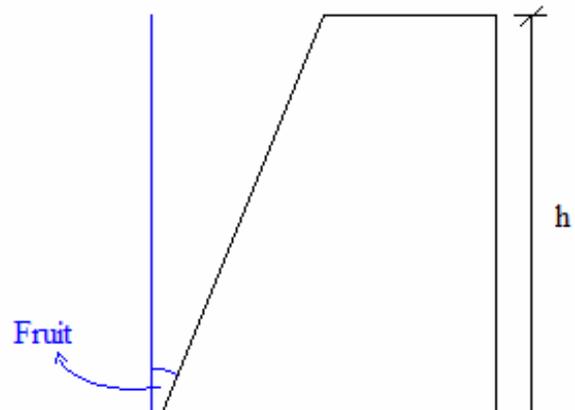


Figure II.2 : Section transversale d'un mur en P.S.

Calcul du volume de chaque OE :

- Volume du mur (m³) = aire du trapèze x 1
 $= [(0,6 \times h + (0,6 - \tan(\text{fruit})) \times h) \times h] / 2$
 $= [(1,2 - \tan(\text{fruit})) \times h^2] / 2$
- Volume de pierres (m³) = Volume du mur – Volume vide
 $= \text{Volume du mur} \times 0,75$
- Masse de pierres (t) = Volume de pierres x densités des pierres
 $= \text{Volume de pierres} \times 2$

O.E.	h	Fruit	Volume du mur	Volume de pierres	Masse de pierres
O.E.1	h=1m	10%	0,55 m ³	0,41 m ³	0,825t
O.E.2	h=2m	15%	4,7 m ³	3,5 m ³	7,087t
O.E.3	h=5m	20%	12,5 m ³	9,38 m ³	18,75t

Figure II.3 : Caractéristiques des O.E. de la Pierre Sèche

II.4.2 Technologie Béton

Hypothèses :

Mur en L :

- Volume de béton = $0,8 \times h$
- acier : 100kg/m^3

Mur Cloué :

- épaisseur de 20 cm de béton projeté
- clou : $\varnothing = 6\text{cm}$, $L = 6\text{m}$
- 1 clou par $2,25\text{m}^2$ de mur
- 10kg de treillis soudé par m

O.E.	Technologie	Volume de béton	Masse de béton	Masse d'acier
O.E.1	h=1m L	$0,8 \text{ m}^3$	1,904 t	0,08 t
O.E.2	h=3m L	$2,4 \text{ m}^3$	5,712 t	0,24 t
O.E.3	h=5m Cloué	1 m^3	2,38 t	0,316 t

Figure II.4 : Caractéristiques des O.E. du Béton

II.4.3 Besoins communs aux deux technologies – terrassement

Pour les murs de soutènement, soit en P.S. soit en béton, la phase de terrassement est toujours présente. Le terrassement se caractérise de manière simple par le volume de terre déplacé.

Pour ces volumes pour chaque O.E. il faut faire une considération : l'inclinaison du terrain est d'environ 30° .

Cette hypothèse étant commune aux deux technologies, une erreur importante n'aurait pas de conséquence sur la comparaison finale.

Voici l'explicitation du calcul :

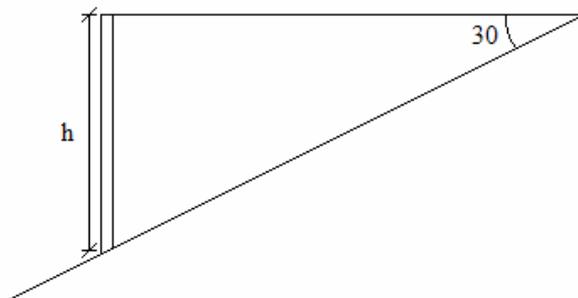


Figure II.5 : Section transversale d'un mur de soutènement et du terrain par lui soutenu

$$\text{Volume/metre lineaire} = [(h/\tan 30 \times h)/2]$$

Il est utile de savoir la masse de terre équivalente à ces volumes. Pour cela il faut multiplier par la densité moyenne de la terre qui est usuellement prise égale à 2t/m^3 . De cette façon, on obtient le tableau ci-dessous :

O.E.		Volume de terre déplacé	Masse de terre déplacée
O.E.1	h=1m	0,87m ³	1,73t
O.E.2	h=3m	7,79m ³	15,59t
O.E.3	h=5m	21,65m ³	43,30t

Figure II.6 : Terrassement, volumes de terre déplacés

III-Coût financier

L'Analyse du Cycle de Vie débute par l'aspect qui pèse le plus lors d'une prise de décision, à savoir l'aspect financier. Comme il a été précisé dans le principe de l'ACV, la vie du mur est découpée en trois étapes, chacune étant étudiée en détail.

III-1 Coût des matières premières :

III-1.1 Calculs des déboursés secs pour la technologie pierre sèche.

Le calcul des déboursés secs matériaux nécessite une bonne connaissance des techniques de construction des murs étudiés afin de déterminer le type et la quantité de matériaux à utiliser.

Pour les murs de soutènement en pierre sèche, le seul matériau nécessaire est la pierre. Aucun liant mécanique de type mortier ou ciment n'est utilisé. Cependant, il est important de signaler que la nature des pierres peut être variable. En effet, le choix des pierres est surtout relatif à la nature des pierres que les murailleurs sont capables de trouver dans la région de construction. L'un des seuls critères qu'il est important de vérifier est la densité des pierres : une pierre est utilisable en construction lorsque sa densité est supérieure ou égale à 2300 kg/m^3 . Il s'agit donc de pierres de type moyennement durs à très durs. Plus communément, les murailleurs utilisent des pierres calcaires (en particulier en Provence), en granite (notamment dans la région du massif central), du schiste (surtout en Lozère)...

L'un des intérêts majeurs de la construction en pierre sèche est l'utilisation de matériau « in situ », c'est à dire prélevé sur place. Cette caractéristique, en plus de contribuer fortement à sa qualité environnementale, diminue considérablement la pollution due au transport. D'autre part pour certains chantiers, une partie des pierres peut provenir d'un ancien ouvrage ou peuvent être ramassées aux alentours du chantier, par exemple dans les champs, cette technique est nommée épierrage. Cependant la qualité des pierres récupérées n'est pas comparable à celles obtenue dans des carrières et les pierres de récupérations ne représentent qu'une partie des pierres utilisées (rarement plus de 30%). Ce « recyclage » de matériau n'a pas été considéré pour l'étude de prix car il n'est pas toujours possible mais il est important de savoir que cette pratique existe ; son impact est plus important dans l'étude environnementale.

Pour déterminer la distance nécessaire au transport des pierres depuis les carrières, afin de connaître le prix du matériau livré sur le chantier, une étude effectuée par Jean-Claude Morel (ENTPE) a servi de référence [Morel] :

Il a montré que les pierres utilisées devaient provenir d'une carrière située au maximum à 40km du chantier. Au delà, le choix de la technologie pierre sèche était écarté.

Ainsi, après avoir répertorié les matériaux qui étaient susceptibles d'être utilisés pour la construction, une phase de recherche des prix, incluant la livraison au chantier, le conditionnement a permis d'accéder aux résultats suivants, répertoriés dans le tableau ci-dessous :

	Densité	Prix au m ³	Caractéristiques
Schiste	1,6 à 2,9	80 €	Mi dur
Andésite	2,4 à 2,8	100 €	Dur
Granite	2,5 à 2,75	120 €	Très dur
Calcaire	2,7 à 2,8	130 €	Très dur
Granulats	Quelconque	20 €/t	Pour le drainage

Figure III.1 : Caractéristiques de différents types de pierres

III.1.2 Calculs des déboursés secs pour la technologie pierre sèche.

De la même manière, seulement après avoir étudié les techniques de construction des murs de soutènement en béton (mur en L et mur en sol cloué), il a été possible de lister l'ensemble des matériaux nécessaires. Contrairement à la technologie pierre sèche qui présentent des différences selon la région de construction, la technologie béton a un aspect « universel » qui facilite le calcul.

Ainsi à partir des prix couramment utilisés dans le génie civil et de la description technique des ouvrages en béton ont pu être complétés les tableaux suivants :

- Pour les murs en L :

	Coût	Caractéristiques
Béton livré chantier	100 € / m ³	
Treillis soudé	2 € / kg	Acier
Coffrage	45 € / m ²	En bois

Figure III.2 : Prix des fournitures pour les murs en L

- Pour les murs en sols cloués (mur d'une hauteur h > 3 m) :

	Coût	Caractéristiques
Béton projeté	200 € / m ³	
Treillis soudé	2 € / kg	Acier
Clou	70 € l'unité	Acier

Figure III.3 : Prix des fournitures pour les murs cloués

Pour le calcul du coût du béton, ont été considérés les constituants que sont ciment, gravier, sable et d'eau dans les quantités suivantes (proportions usuelles fournies par la littérature spécialisée) :

$$\mathbf{1/3 \text{ Ciment} + 1/3 (\text{gravier} + \text{sable}) + 1/3 \text{ eau} = \text{béton}}$$

Ainsi, connaissant les coûts de chacun des constituants, le coût du béton a été estimé à environ 80 euros. En ajoutant les coûts liés au transport et à la location d'une bétonnière, son estimation a été revue à la hausse, en moyenne à cent euros livré chantier. Ce chiffre ayant par la suite été validé par le tuteur scientifique, ainsi que par les professionnels interrogés à ce sujet.

Par ailleurs, on observe une différence du simple au double entre les coûts du béton « classique » et du béton projeté. Tout d'abord, il faut rappeler ce qu'est le béton projeté : il s'agit d'un béton qui est transporté à travers un boyau et projeté pneumatiquement à très grande vitesse sur une surface. Et, à la différence du béton conventionnel, qui est d'abord placé dans un coffrage et ensuite vibré, le béton projeté est placé et compacté en même temps par la force avec laquelle il est projeté. Ce procédé produit un béton plus dense, plus homogène et plus imperméable que les autres types de béton. Ainsi, ceci contribue à diminuer considérablement son taux d'absorption, le rendant moins vulnérable aux attaques de l'acide d'ensilage. Ce sont donc sur des critères de malaxation lors de l'élaboration du béton que la différence de coût a été prononcée : l'un faisant appel à des techniques de production beaucoup plus sophistiquées que l'autre.

Finalement, les déboursés secs pour les différents ouvrages élémentaires sont :

Hauteur du mur h	Technologie pierre sèche	Technologie béton
1 m	72 €	240 €
3 m	610 €	720 €
5 m	1 625 €	872 €

Figure III.4 : Déboursés secs pour les différents ouvrages élémentaires

Remarque : les déboursés secs matériaux des murs de soutènement en pierre sèche ont été calculés sur la base du prix des roches calcaires. Ce choix provient du fait qu'une des régions dans laquelle le marché de la pierre sèche représente un fort enjeu est la Provence, région dans laquelle c'est la roche calcaire qui est utilisée pour ce type de murs.

III-2. Coût de la phase construction :

III-2.1 déboursés secs main d'œuvre

Tel qu'il a été précisé précédemment dans la méthode de l'étude de prix, déterminer les déboursés secs main d'œuvre présente plusieurs problèmes à considérer. En effet, il ne suffit pas de déterminer le salaire d'un ouvrier sur le chantier, en incluant toutes les primes et gratifications qu'il pourrait obtenir : Le calcul du déboursé sec main d'œuvre suppose que l'on détermine le coût moyen qu'un ouvrier devrait obtenir pour la construction d'un ouvrage élémentaire défini. Pour faire cela, il faut s'intéresser plus précisément aux deux types de technologie de construction et estimer le temps qu'un ouvrier mettrait pour bâtir un ouvrage élémentaire. Il a fallu les valider et les confronter à la réalité en discutant avec des professionnels des deux technologies : M. Paul Arnault (Artisan « pierre sèche ») pour la technologie pierre sèche, et M. Matthieu Avril (bureau d'études ARCADIS) pour la technologie du béton.

III-2.1.1 cas de la pierre sèche.

En ce qui concerne la technologie pierre sèche, il faut savoir que la construction d'un mur se fait en binôme : un spécialiste de la pierre sèche appelé bâtisseur ou muraillers, et un ouvrier « classique ». Le premier s'occupe de la pose des pierres, tandis

que le second l'aide à choisir les pierres qui s'imbriqueront le mieux dans l'ouvrage et bien sur à les transporter si celles-ci sont très lourdes : il s'agit donc d'un véritable travail d'équipe. Or, pour déterminer le déboursé sec main d'œuvre, il faut estimer le temps, puis par extension le coût, qu'un seul des deux membres mettraient pour réaliser un ouvrage élémentaire complet.

Dans les faits, il s'avère qu'en moyenne une équipe, murailleurs et ouvrier, est capable de déplacer et de poser quatre tonnes de pierres en une journée de travail de huit heures. Cependant, il n'est pas possible d'appliquer ce résultat aux trois ouvrages élémentaires de manière parfaitement linéaire. En effet, plus un mur est haut, plus il sera difficilement accessible, et il sera plus difficile à construire, et donc plus long à bâtir. Par ailleurs, pour estimer la durée qu'un seul homme mettrait pour construire l'ouvrage, il n'est pas réaliste de multiplier uniquement la durée par deux : en pratique le temps de pose doit être plus long que la durée mise pour le choix d'une pierre. Aussi, en supposant que ces deux données se compensent l'une l'autre dans la durée passée sur le chantier, les résultats suivant ont été établis :

Hauteur du mur h	Masse de pierres nécessaires	Durée moyenne sur le chantier	Déboursé sec
1 m	0,8 t	3 h 30	91 €
3 m	7,1 t	30 h	780 €
5 m	18,8 t	80 h	2080 €

Figure III.5 : Détail des déboursés secs main d'œuvre pour la pierre sèche

Les déboursés secs ont été calculés en partant du principe que l'ouvrier spécialisé a lui-même une grande autonomie de la gestion du chantier et qu'il est payé 26€ à l'heure, toutes charges comprises.

III.2.1.2 cas du béton

De la même manière, il faut s'intéresser aux deux techniques de construction de mur de soutènement en béton : mur en L et mur en sol cloué afin d'estimer au mieux la durée moyenne qu'un ouvrier devrait passer sur un chantier pour bâtir l'un des ouvrages élémentaires considéré. De fait, ces estimations ont été plus difficilement réalisables que pour la technologie pierre sèche, car la technologie béton repose sur une équipe beaucoup plus conséquente en nombre de personnes sur le chantier. De plus, la construction en béton est beaucoup moins artisanale que celle en pierre sèche : tous les ouvriers sur le terrain ne sont donc pas aptes à manipuler les différentes machines et engins nécessaire à la construction d'un mur de soutènement. Le nombre de personnes mobilisées peut être estimé à d'environ 6 dans les 2 cas (1 responsable chantier, 1 chef de chantier, équipe de 3, 1 terrassier) mais cela reste très indicatif ; si on veut augmenter les cadences on rajoute des ouvriers et des machines. Il faut également des personnes pour se charger des tâches logistiques (transport de matériel). Ainsi, bien que les estimations aient pu être validées par le tuteur et par les correspondants en entreprise, elles ne reflètent pas rigoureusement la réalité.

Les résultats ont été calculée en fonction d'une estimation du temps que prend chaque étape de la construction d'un OE

- Murs en L :

Etape	Mur de 1m	Mur de 3m
Mise en place de la semelle	3h	10h
Pose armature et coffrage	3h	8h
Coule du béton	2h	5h

Figure III.6 : temps de réalisation des différentes étapes de la fabrication d'un mur en L pour 1 OE.

- Murs cloués (cycle répété 5 fois) :

Etape	Mur de 5m
Creusement du sol	3h
Pose treillis+clou	7h
Projection du béton	1h

Figure III.7 : temps de réalisation des différentes étapes de fabrication d'un mur cloué pour 1 OE.

Finalement ces résultats se synthétisent dans le tableau suivant :

Hauteur du mur h	Technologie	Durée moyenne sur le chantier	Déboursé sec
1 m	L	8 h	336 €
3 m	L	23 h	924 €
5 m	Cloué	55 h	1408 €

Figure III.8 : Détail des déboursés secs main d'œuvre pour les murs en béton

Les déboursés secs main d'œuvre ont été calculés en considérant le fait que le coût horaire d'un ouvrier du bâtiment, charges comprises, est de 28€ à l'heure.

III.2.2 déboursés secs matériel/consommable

Comme indiqué dans la méthode de l'étude de prix, le calcul des déboursés secs matériels et de consommables doit permettre de chiffrer l'ensemble des coûts et des besoins d'utilisation en outillage, engins mécaniques... Plus concrètement, dans cette partie de l'étude, il faut lister et répertorier tous les outils nécessaires à la construction d'un ouvrage élémentaire, et de définir leur coût. De plus, pour les engins et machines mécaniques, il faut déterminer leur amortissement. Il a donc été nécessaire de connaître l'activité globale de la construction des murs de soutènement dans les deux types de technologie étudiés.

Tout d'abord sont répertoriés ci-dessous l'ensemble des outils et machines nécessaires à la préparation du terrain : il s'agit donc de la partie de terrassement.

Outils / machines	Coût à l'achat	Amortissement
Pioche	37 €	1 an

Pelle	26 €	1 an
Râteau	15 €	1 an
Brouette manuelle	55 €	2 ans
Tractopelle	20 000 €	4 ans

Figure III.9 : Coût et amortissement de différents outils communs aux deux technologies

Dans le calcul, il est supposé que les outils sont présents en un seul exemplaire sur le chantier, ce n'est certainement pas le cas mais encore une fois cela dépend de l'importance du chantier. D'autre part cette phase étant commune aux deux technologies, quelque soit l'hypothèse qui soit choisie cela ne n'aura pas de répercussions sur la comparaison finale. Pour le tractopelle, il existe différentes tailles d'engins, le prix affiché correspond à un engin de taille moyenne. Le but n'étant pas de connaître la valeur exacte de ce type de machine mais un ordre d'idée du prix à investir.

Par la suite ont été considéré l'ensemble des outils et machines propres à chaque technologie.

III.2.2.1 cas de la pierre sèche

Outils / machines	Amortissement	Coût à l'achat	Utilité
Têtu	2 ans	16 €	Dégraissage et taille des pierres
Massette	2 ans	23 €	Dégraissage et taille des pierres
Croc	2 ans	17 €	
Bramine	2 ans	22 €	Pose pour les grosses pierres
Brouette mécanique	4 ans	4500 €	Transport des pierres
Echafaudage	4 ans	68€/ml	Pose en hauteur

Figure III.10 : Coût et amortissement de différents outils pour les murs en béton

III.2.2. 2 cas de la pierre béton

En ce qui concerne la technologie béton, l'outillage est beaucoup plus restreint, voire quasiment inexistant, mais les machines sont beaucoup plus imposantes :

Outils / machines	Amortissement	Coût à l'achat	Utilité
Centrale de projection du béton	4 ans	30 000 €	Projeter le béton
Machine pour la mise en place des clous	4 ans	15 000 €	Enfoncer les clous dans le sol

Figure III.11 : Coût et amortissement des machines utiles dans la construction des murs cloués

Les coûts des machines reportés dans ce tableau sont assez grossiers, cependant toutes les entreprises n'utilisent pas les mêmes engins. Les petites entreprises ont tendance à louer les machines pour la durée du chantier, les plus grosses entreprises

utilisent leurs machines sur plusieurs chantiers en même temps pour les rentabiliser au maximum.

A cela, il faut ajouter certaines dépenses qui peuvent être nécessaires à la bonne marche du chantier, notamment pour acheminer les matériaux :

	Amortissement	Coût
Echafaudage	4 ans	68 € / ml
Carburant		1 € / L
Camion (15t grue)	5 ans	45 000 €

Figure III.12 : Dépenses supplémentaires pour les chantiers des murs en béton.

Les amortissements sont la constatation d'un amoindrissement de la valeur d'un élément d'actif résultant de l'usage, du temps ou de l'évolution des techniques, ou de toutes autres causes. Ceci permet ainsi à l'entreprise de dégager les sommes nécessaires pour le renouvellement des éléments d'actif amorti. Dans le cadre du projet, et c'est ce qui est fait en pratique dans les entreprises, c'est un amortissement linéaire qui est considéré pour chaque outil et machine. Cela signifie que le taux d'amortissement annuel est égal au coût d'acquisition divisé par le nombre d'années de la durée d'amortissement. Enfin, l'amortissement est calculé par la formule suivante :

$$\text{Coût d'acquisition} \times \text{taux} = \text{annuité d'amortissement}$$

L'entreprise calcule l'annuité à partir du coût des différents chantiers qu'elle aura dans l'année. Les chiffres considérés lors du projet sont basés sur l'activité annuelle de chacune des technologies pour la construction de murs de soutènement.

Les quelques hypothèses supplémentaire émises pour l'étude :

- 1) Les déplacements pour les livraisons ne s'effectuent pas à plus d'un rayon de quarante kilomètres du chantier.
- 2) L'activité annuelle de la construction en pierre sèche est de : 600 m³ / an (chiffres correspondants aux ouvrages référencés.) En supposant que cela correspond en moyenne à vingt chantiers de murs de soutènement pour un professionnel de la pierre sèche (la construction en pierre sèche n'est pas l'activité principale d'un murailleurs : ils sont également maçon (traditionnel ou non) en raison d'une demande trop faible.
- 3) L'hypothèse concernant l'activité béton est du double de celle de la pierre sèche, elle est donc de : quarante chantiers annuels par équipe.

Finalement, les déboursés secs matériaux et consommables qui ont été définis sont regroupés dans le tableau ci-dessous pour chacun des ouvrages élémentaires :

Hauteur du mur h	Technologie pierre sèche	Technologie béton
1 m	160 €	225 €

3 m	220 €	295 €
5 m	220 €	895 €

Figure III.13 : Tableau récapitulatifs des déboursés secs matériaux et consommables pour les différents OE.

III-3.Coût de l'entretien /destruction

Afin de considérer l'ensemble de la vie d'un ouvrage, il faut attribuer un coût à la phase dite de destruction ou d'entretien. Avant cela il est donc nécessaire de savoir en quoi consiste l'entretien pour ce type de mur. L'étude économique de cette phase s'avère être très complexe pour plusieurs raisons :

- D'une part c'est lié au problème du « cas par cas ». La vie du mur dépend surtout des contraintes auxquelles il est soumis et ceci est propre à chaque mur, au terrain qu'il soutient.
- Un mur bien dimensionné et bien construit ne devrait pas avoir à être réparé pendant une certaine période, qui varie selon les technologies. On considère en général qu'un ouvrage en béton n'a pas à subir de réparations importantes avant environ 50 ans. Pour les ouvrages en pierre sèche, cette période est plutôt d'une centaine d'année. Il a été expliqué dans les parties précédentes que les murs en pierre sèche sont des ouvrages souples, qui s'adaptent aux contraintes qu'ils subissent et qui peuvent donc rester debout plus longtemps que les murs en béton qui n'ont pas cette faculté.
- Un autre critère qui va beaucoup jouer sur la vie de l'ouvrage est l'eau :
 Les ouvrages en pierre sèche ont une capacité drainante grâce aux espaces qui existent entre les pierres et qui permet à l'eau de s'écouler. Ce rôle de filtre naturel ne nécessite pas l'intervention humaine et est primordial pour la stabilité du mur : sans cette aptitude à laisser passer l'eau, il peut se créer des poches de rétention. La contrainte que subit le mur est alors fortement augmentée et le mur peut s'écrouler. Dans le cas des murs en béton, qui sans dispositif particuliers sont étanches, on installe un système de conduites (creusées ou en plastique) que l'on nomme « barbacanes » qui permet donc à l'eau de s'écouler. Ce système nécessite donc un entretien particulier (vérifier que les conduits ne sont pas obstrués).
 On recommande en théorie une surveillance et un entretien du système d'écoulement d'eau annuels pour les murs en béton. Malheureusement cela ne se fait que très rarement dans la pratique sauf dans le cas de murs « à risques », comme des ouvrages en bord de chaussée ou en amont d'habitations.
 Pour le cas des murs en pierre sèche, on recommande également une surveillance annuelle pour vérifier que les espaces entre les pierres ne sont pas complètement bouchés par des accumulations de terres ou de déchets végétaux.
- Enfin mis à part la vérification du système de drainage, il existe peu « d'entretien » ou de réparations possibles pour les murs de soutènement des terres. Lorsqu'un mur est partiellement écroulé ou présente une défaillance qui menace sa stabilité, on préfère

détruire et reconstruire.

Dans ces conditions, chiffrer un coût d'entretien général surtout pour un mètre linéaire de mur relève d'une grande difficulté. Il faut savoir que l'espérance de vie d'un ouvrage en pierre sèche est plus importante que son homologue en béton pour les raisons citées précédemment, ce qui est à prendre en considération lors d'une prise de décision. Le danger que représentent les murs de soutènement lorsque leur système de drainage est défaillant n'est pas non plus négligeable et doit surtout être évalué en fonction de la localisation du mur.

III-4. Comparaison des deux études :

Afin de pouvoir comparer les différentes technologies considérées, il faut calculer le prix de revient de chaque ouvrage élémentaire. En appliquant la formule :

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

On obtient finalement les résultats suivants :

Hauteur du mur h	Technologie pierre sèche	Technologie béton
1 m	323 €	689€
3 m	1 610 €	1 659 €
5 m	3 925 €	2567€

Figure III.14 : Prix de revient des OE.

Pour pouvoir mieux se rendre compte des fluctuations entre les deux technologies, voici un diagramme représentant le coût financier d'un mur de soutènement pour les deux technologies, et en fonction du coût qui vient d'être établi :

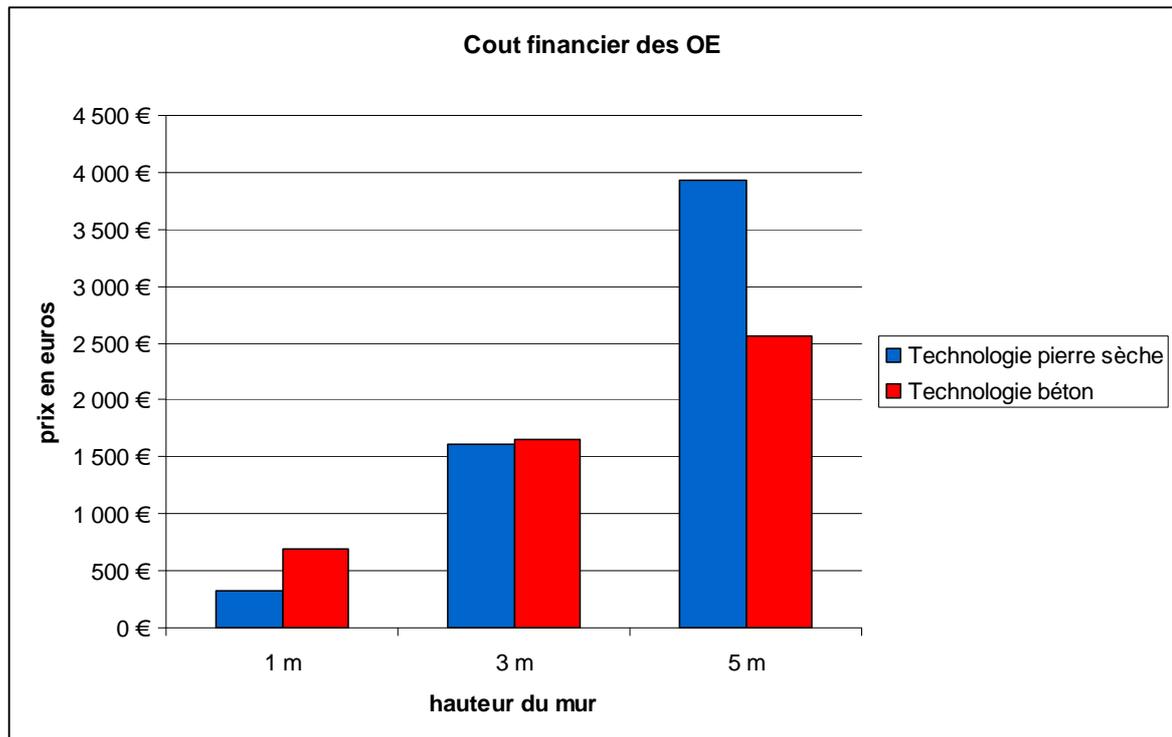


Figure III.15 : Coût de revient des OE

A travers cette étude, et surtout grâce à ce graphique récapitulatif, il est possible d'avoir un aperçu sur les cas où la technologie pierre sèche peut être la plus avantageuse d'un point de vue financier. Il ne faut pas oublier que de nombreuses hypothèses généralisatrices sont venues simplifier le problème, les résultats obtenus sont donc à nuancer.

Cependant on peut s'apercevoir que pour des murs d'importance moyenne ($h \leq 3m$), le coût de l'ouvrage élémentaire en pierre sèche est du même ordre de grandeur que celui en béton. Ceci permet de montrer que les critères environnementaux peuvent être déterminants lors de la prise de décision.

Enfin, pour les murs de cinq mètres, la pierre sèche n'est plus du tout rentable comparée au béton : ceci confirme les différents points de vue qui ont été obtenus de la part des professionnels à ce sujet... Dans la pratique, de tels murs ne sont quasiment jamais construits.

IV-Coût Environnemental

Dans cette partie tous les détails de l'application de l'outil écobilan ainsi que les résultats obtenus pour chaque phase du cycle de vie des deux technologies confrontées seront présentés. Rappelons que le cycle de vie pour cette étude a été divisé en trois phases : matériaux ; construction ; et entretien et démolition. Toutes les hypothèses, approximations et considérations pour pouvoir arriver à ces résultats seront également décrits. Le résultat final fera la comparaison entre la technologie pierre sèche et béton pour ce qui concerne le coût Environnemental.

IV-1.Matériaux

Pour la phase matériaux le coût environnemental est le coût des matériaux livrés en chantier. Cette phase se divise donc en deux parties : La première est le coût environnemental de la production des matériaux et la deuxième est relative au transport de ces matériaux jusqu'au chantier.

Le tableau fourni par l'outil Ecobilan (annexe 1) fournit les écopoints pour la production de divers matériaux, comme, par exemple, du gravier, du béton, de l'acier, etc. Le tableau fournit aussi des données des écopoints pour différents types de transport comme par exemple, bateau, train, camion, etc. Il s'agit donc de déterminer les quantités de matériaux nécessaires à la construction des différents murs et le mode de transport utilisé pour amener ces matériaux au chantier.

IV-1.1.Données de l'écobilan

IV-1.1.1.Technologie Pierre Sèche

Le seul matériau utilisé pour la construction des murs en P.S. est la pierre.

Considérations :

- On assimile les données des pierres à celle du gravier dont on dispose dans le tableau de l'écobilan. Il serait mieux d'avoir une donnée exacte pour la pierre de grosse taille utilisée dans la construction des murs en P.S., mais les données des écobilans sont limitées.
- La distance carrière-chantier est estimée à 40 km selon une étude réalisée par Jean Claude Morel sur la distribution des carrières dans le territoire français [Morel].
- On utilise un camion de 28 T pour le transport. C'est le moyen de transport plus largement utilisée pour ce type de matériau et ce type d'ouvrage.

PIERRE SECHE	Production	Transport	Total
UBP / t de pierre	60500	11560	72060
MJ éq / t de pierre	243	150	393
Kg CO ₂ éq / t de pierre	11	8	10

Figure IV.1 : Données de l'écobilan pour la production et transport des pierres

IV-1.1.2. Technologie Béton

La technologie béton utilise deux matériaux. Le béton, et l'acier pour la constitution des armatures ou des clous.

Considérations :

- On considère un béton à 30-37MPa. C'est un béton largement utilisée dans tous les ouvrages.
- L'acier des armatures et le même que celui utilisé pour l'ancrage. Les différences de densité et de composition ont été considérées comme négligeables.
- La bétonnière considérée a une capacité de 10m³. C'est une bétonnière largement utilisée dans tous les ouvrages.
- La densité du béton 30-37Mpa est de 2,38t/m³, la masse transportée par la bétonnière étant de 23,8t. À partir de cette considération, donc, on peut approximer la bétonnière à un camion 23t. Un tel camion n'est pas décrit dans les données de l'écobilan, mais il est possible de faire une interpolation avec les camions de 16t et 28t et 40t dont les données sont disponibles.
- On utilise un camion de 28t pour le transport de l'acier (utilisation courante)
- La distance entre l'usine sidérurgique / l'usine de béton et le chantier est estimée à 40 km. Ici, cette distance a été approximée à la distance carrière-chantier. C'est une distance empiriquement confirmée.

BETON	Production	Transport	Total
UBP / t	119 000	13 200	132 200
MJ éq / t	811	170	981
Kg CO ₂ éq / t	121	10	131

Figure IV.2 : Données de l'écobilan pour la production et transport du béton

ACIER	Production	Transport	Total
UBP / t	6 030 000	11 560	6 041 560
MJ éq / t	24 100	150	24 250
Kg CO ₂ éq / t	1 250	8	1 258

Figure IV.3 : Données de l'écobilan pour la production et transport de l'acier

IV-1.2.Application des données de l'écobilan aux caractéristiques des ouvrages élémentaires

Il faut appliquer les données de l'écobilan aux définitions des ouvrages élémentaires pour obtenir les résultats en écopoints, énergie grise et Kg de CO₂ équivalent. On multiplie la dernière colonne du tableau de la figure II.3 par la dernière colonne du tableau IV.1 et on multiplie l'avant dernière colonne et la dernière colonne du tableau de la figure II.4 respectivement par la dernière colonne des tableaux des figures IV.2 et IV.3.

En résumé :

$$[\text{UBPmatériaux}] = \sum [\text{masse de matériau } i] \times [\text{UBPtotalmatériau } i]$$

$$[\text{MJ-EQmatériaux}] = \sum [\text{masse de matériau } i] \times [\text{MJ-Eqtotalmatériau } i]$$

$$[\text{KgCO}_2\text{-EQmatériaux}] = \sum [\text{masse de matériau } i] \times [\text{KgCO}_2\text{-Eqtotalmatériau } i]$$

Remarque : pour la technologie P.S. le seul matériau est la pierre. Pour la technologie béton, le matériau 1 est le béton et le matériau 2 est l'acier.

A partir de ces formules, on obtient :

O.E.	O.E.1 h=1m	O.E.2 h=3 m	O.E.3 h=5 m
Pierres sèche	59 449	510 725	1 351 125
Béton	735 033	2 205 100	2 223 768

Figure IV.4 : Ecopoints (UBP) pour la phase matériaux

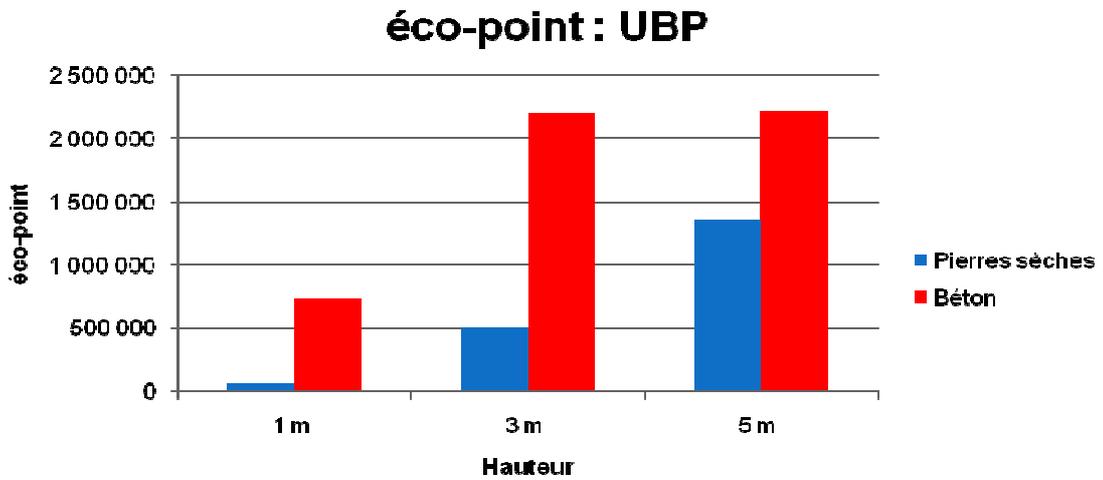


Figure IV.5 : Comparaison en écopoints entre les deux technologies pour la phase matériaux

Énergie grise (MJ éq) :O.E.	O.E.1 h=1m	O.E.2 h=3 m	O.E.3 h=5 m
Pierres sèche	325	2 788	7 376
Béton	3 807	11 423	9 997

Figure IV.6 : Energie grise (MJ-*eq*) pour la phase matériaux

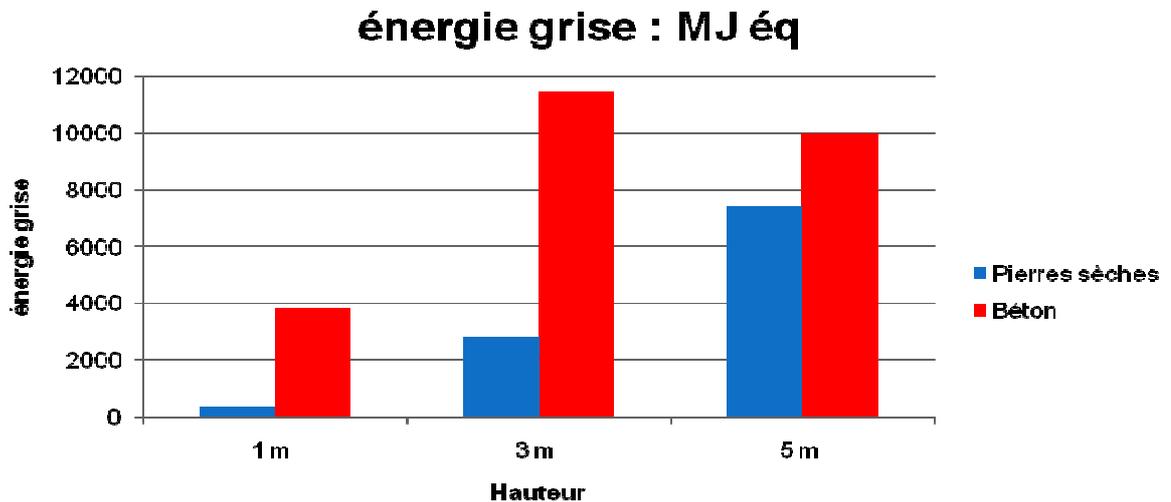


Figure IV.7 : Comparaison en énergie grise entre les deux technologies pour la phase matériaux

O.E.	O.E.1 h=1 m	O.E.2 h=3 m	O.E.3 h=5 m
Pierres sèche	17	146	388
Béton	350	1 052	710

Figure IV.8 : Effet de serre (kg CO₂ éq) pour la phase matériaux :

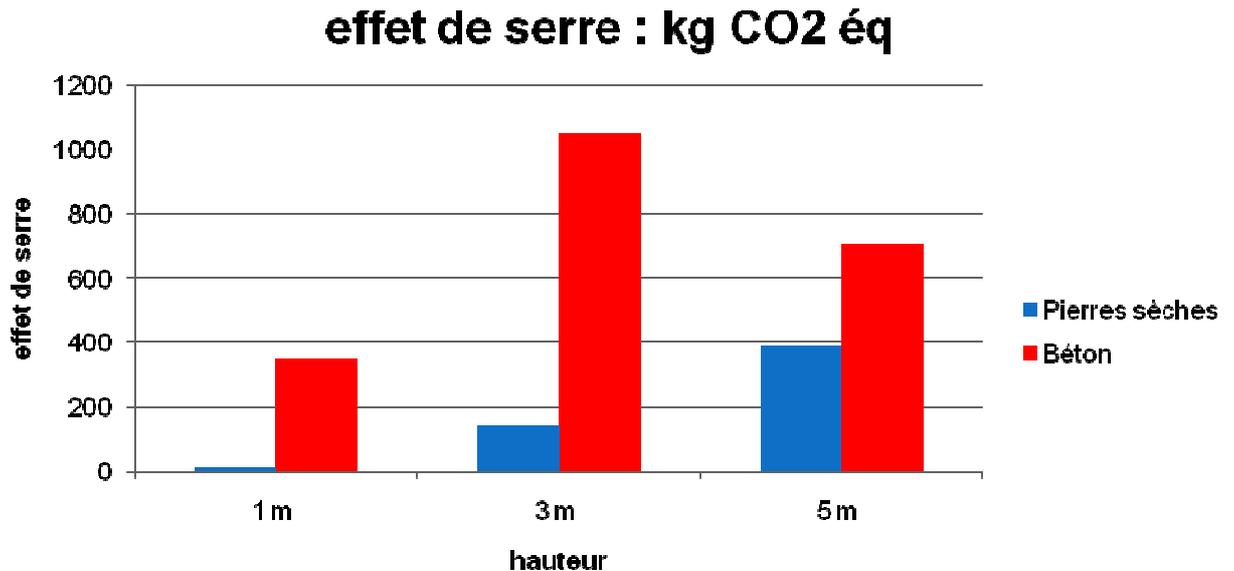


Figure IV.9 : Comparaison en effet de serre entre les deux technologies pour la phase matériaux

IV-2.Construction

Pour la phase construction, le coût environnemental vient des pollutions des machines utilisées dans la construction de l'ouvrage.

IV-2.1.Données de l'écobilan

Le tableau fourni par l'outil écobilan ne présente pas les données des écopoints relatives aux machines souvent utilisées en chantier, comme les pelles mécaniques, les machines à projeter du béton, ... Par conséquent, il faut essayer d'approximer les pollutions émises par ces machines par les pollutions émises par quelque chose d'autre dont les données sont présentes dans le tableau de l'écobilan.

A travers l'étude des technologies, on considère trois machines : la pelle mécanique (bobcat), soit pour la technologie P.S., soit pour la technologie béton ; la machine à projeter du béton (centrale de projection de béton) pour la technologie béton mur cloué ; et la machine à clouer pour la technologie béton mur cloué.

La meilleure approximation utilise les moyens de transport, notamment les camions, pour approcher les données des pollutions aux machines utilisées. Cependant il est possible de noter une différence majeure : les machines normalement restent immobiles ou peu mobiles (pelle mécanique) par rapport aux camions. De ce fait, il faut essayer de faire une transformation de la distance parcourue par le camion en temps de parcours. Ce temps de parcours serait comparé avec le temps d'utilisation utile des machines et de cette manière les résultats peuvent être assez bien approximés.

Il sera explicité ci-dessous l'étude réalisée pour chaque machine.

IV-2.1.1.Pelle mécanique (bobcat, tractopelle)

La pelle mécanique travaille en cycles composés de :

- 1- mouvement jusqu'au lieu de retrait de la terre.
- 2- retrait de la terre.
- 3- mouvement jusqu'au local de dépôt de la terre.
- 4- dépôt de la terre.

Il faut connaître le temps moyen de ce cycle et aussi savoir quelle est la masse de terre transportée à chaque cycle.

À travers l'observation de quelques vidéos montrant des processus de creusement, on a pu établir un temps de cycle d'environ 40s. Le godet d'une pelle mécanique peut contenir environ 2t de terre. Une approximation envisageable serait donc de considérer un camion < 3,5 t.

Enfin, pour pouvoir transformer la distance parcourue par un camion en temps de trajet, la vitesse moyenne a été fixée à 40km/h.

En résumé :

- 1 cycle >> 40s >> 2t de terre transportées, 1h d'utilisation >> 180t de terre transportées;
- donnée dans le tableau de l'écobilan prise comme approximation pour la pelle mécanique >> camion < 3,5T ;
- vitesse moyenne d'un camion 16T dans son parcours de transport >> 40km/h.

En faisant une analyse dimensionnelle pour arriver à l'unité UBP (ou énergie grise ou effet de serre) on obtient pour la pelle mécanique :

$$\text{UBP} = [\text{temps d'utilisation (h)}]^2 \times [180 \text{ (t/h)}] \times [40 \text{ (km/h)}] \times [1310 \text{ (UBP/t x km)}]$$

$$\text{MJ-EQ} = [\text{temps d'utilisation (h)}]^2 \times [180 \text{ (t/h)}] \times [40 \text{ (km/h)}] \times [19,5 \text{ (MJ-EQ/t x km)}]$$

$$\text{KgCO}_2\text{-EQ} = [\text{temps d'utilisation (h)}]^2 \times [180 \text{ (t/h)}] \times [40 \text{ (km/h)}] \times [1,16 \text{ (KgCO}_2\text{/t x km)}]$$

IV.2.1.2.Machine à projeter du béton

On cherche à établir une relation entre les pollutions engendrées par cette machine et son temps d'utilisation.

Il existe dans le marché plusieurs modèles de machine à projeter du béton. Pour les grands ouvrages, normalement les machines employées ont un débit plus important, d'environ 30m³/h. Or, le mur cloué, qui est l'ouvrage pour lequel la machine à projeter du béton sera employé, est naturellement un grand ouvrage, avec des dimensions importantes. Un débit de 30m³/h est donc une bonne hypothèse.

Comme les données du tableau de l'écobilan sont en UBP/t (ou MJ-Eq/t ou KgCO₂-Eq/t) il faut transformer le volume en masse. Pour cela, la masse volumique du béton a été considéré comme 2,38t/m³ comme il a déjà été fait auparavant.

En faisant une comparaison entre les puissances du moteur d'une telle machine et les puissances des moteurs des camions, il a été estimé que la meilleure approximation serait le camion <3,5T.

Finalement, pour pouvoir transformer la distance parcourue par un camion en temps de trajet, la vitesse moyenne a été fixée en 40km/h.

En résumé :

- débit = 30m³/h
- masse volumique du béton = 2,38t/m³
- donnée dans le tableau de l'écobilan prise comme approximation pour la pelle mécanique >> camion < 3,5T ;
- vitesse moyenne d'un camion < 3,5T dans son parcours de transport >> 40km/h.

En faisant une analyse dimensionnelle pour arriver à l'unité UBP (ou énergie grise ou effet de serre) on obtient pour la machine à projeter du béton :

$$\text{UBP} = [\text{temps d'utilisation (h)}]^2 \times [30 \times 2,38 \text{ (t/h)}] \times [40 \text{ (km/h)}] \times [1310 \text{ (UBP/t x km)}]$$

$$\text{MJ-EQ} = [\text{temps d'utilisation (h)}]^2 \times [30 \times 2,38 \text{ (t/h)}] \times [40 \text{ (km/h)}] \times [19,5 \text{ (MJ-EQ/t x km)}]$$

$$\text{KgCO}_2\text{-EQ} = [\text{temps d'utilisation (h)}]^2 \times [30 \times 2,38 \text{ (t/h)}] \times [40 \text{ (km/h)}] \times [1,16 \text{ (KgCO}_2\text{/t x km)}].$$

IV.2.1.3 Machine à clouer

Il n'existe aucune référence à ce type de machine dans le tableau écobilan. Pour chiffrer les pollutions engendrées par cette machine, on considère donc qu'elle est, en pollution par mètre linéaire de mur, équivalente à la machine à projeter du béton.

IV.2.2.Application des données de l'écobilan aux caractéristiques des ouvrages élémentaires

Après avoir trouvées les formules aux paragraphes IV.2.1.1 et IV.2.1.2 il faut finalement, calculer les temps d'utilisation de chaque machine pour chaque O.E. Ainsi, les formules pourront être utilisées et les résultats pourront être obtenus. Voyons l'explicitation des calculs des temps d'utilisation et l'application des formules pour le calcul des UBP, MJ-EQ et KgCO₂-EQ.

IV-2.2.1.Pelle mécanique

Le tableau de la figure II.6 fournit des données des volumes et des masses de terre déplacés dans la phase de terrassement pour chaque O.E. A travers ce tableau et en sachant les caractéristiques des cycles décrites dans le paragraphe IV.2.1.1 on obtient les temps d'utilisation nécessaires à réaliser le terrassement pour chaque O.E.

La capacité de déplacement de terre de la pelle mécanique est de 180t/h. En divisant la masse de terre déplacée explicité dans le tableau de la figure II.6 par cette valeur, on obtient les temps d'utilisation. En utilisant les formules appropriées, on trouve les résultats pour la pelle mécanique.

Voyons le tableau contenant les résultats ci-dessous :

	O.E.1 h=1 m	O.E.2 h=3 m	O.E.3 h=5 m
Temps d'utilisation	0,0096h	0,0887h	0,2406h
UBP	873	70740	545833
MJ-EQ	13	1053	8125
KgCO ₂ -EQ	1	63	483

Figure IV.10 : Temps d'utilisation et bilan environnemental par mètre linéaire de mur pour la pelle mécanique.

IV-2.2.2 Machine à projeter du béton

Le tableau de la figure II.4 fournit des données des volumes et des masses de béton nécessaires à la construction d'un mètre linéaire pour chaque O.E. de la technologie béton. La machine à projeter du béton n'est utilisé que pour l'O.E.3. Or, il faut calculer le temps d'utilisation de cette machine pour, après, appliquer les formules trouvées en IV.2.1.2.

On a vu que le débit de la machine à projeter du béton considérée dans notre étude vaut $30\text{m}^3/\text{h}$. Le tableau de la figure II.4 montre que pour 1m linéaire de mur cloué, il faut 1m^3 de béton. En faisant une règle de trois on trouve que le temps d'utilisation de la machine à projeter du béton par mètre linéaire de l'O.E. vaut 0,033h (2min).

Avec le temps d'utilisation calculé et en utilisant les formules appropriées, on trouve les résultats pour la machine à projeter du béton. Voyons le tableau contenant les résultats ci-dessous :

	O.E.1 h=1 m	O.E.2 h=3 m	O.E.3 h=5 m
Temps d'utilisation	-----	-----	0,033h
UBP	0	0	4157
MJ-EQ	0	0	62
KgCO ₂ -EQ	0	0	4

Figure IV.11 : Temps d'utilisation et bilan environnemental par mètre linéaire de mur pour la machine à projeter du béton

IV-2.2.3.Machine à clouer

Comme il a été dit dans le paragraphe IV.2.1.3, la pollution générée par la machine à clouer par mètre linéaire de mur est considéré comme égale à celle générée par la machine à projeter du béton. On a donc les résultats suivants :

	O.E.1 h=1 m	O.E.2 h=3 m	O.E.3 h=5 m
UBP	0	0	4157
MJ-EQ	0	0	62
KgCO ₂ -EQ	0	0	4

Figure IV.12 : Temps d'utilisation et bilan environnemental par mètre linéaire de mur pour la machine à clouer

IV-2.3.Résultat total de la phase de construction

En faisant la somme des tableaux des figures IV.10, IV.11 et IV.12, on obtient :

OE	O.E.1 h=1 m	O.E.2 h=3 m	O.E.3 h=5 m
Pierre Sèche	873	70740	545833
Béton	873	70740	554147

Figure IV.13 : Ecopoints (UBP) pour la phase construction

Eco-points : UBP

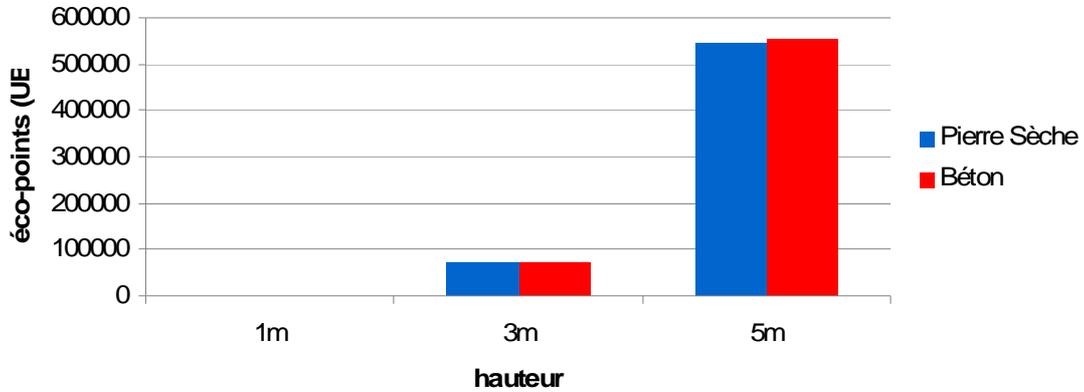


Figure IV.14 : Comparaison en écopoints entre les deux technologies pour la phase construction

OE	O.E.1 h=1 m	O.E.2 h=3 m	O.E.3 h=5 m
Pierre sèche	13	1053	8125
Béton	13	1053	8249

Figure IV.15 : Energie grise (MJ-*eq*) pour la phase construction

Energie Grise : MJ-*eq*

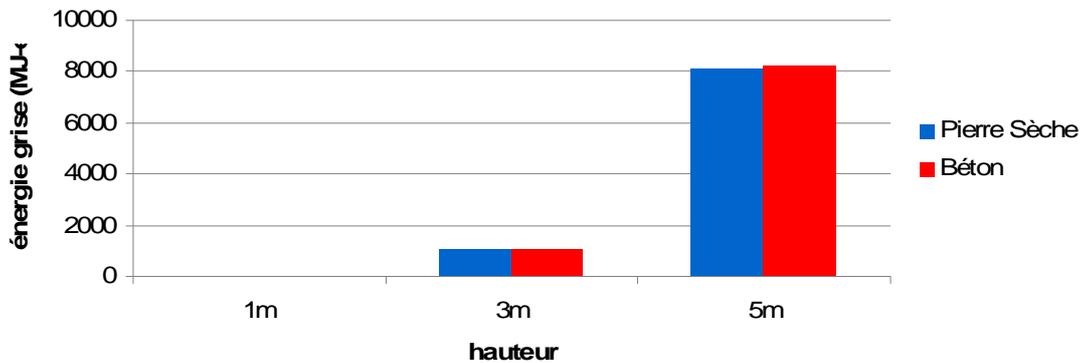


Figure IV.16 : Comparaison en énergie grise (MJ-*eq*) entre les deux technologies pour la phase construction

OE	O.E.1 h=1 m	O.E.2 h=3 m	O.E.3 h=5 m
Pierre sèche	1	63	483
Béton	1	63	491

Figure IV.17 : Effet de serre (KgCO₂-*eq*) pour la phase construction

Effet de serre : KgCO₂-éq

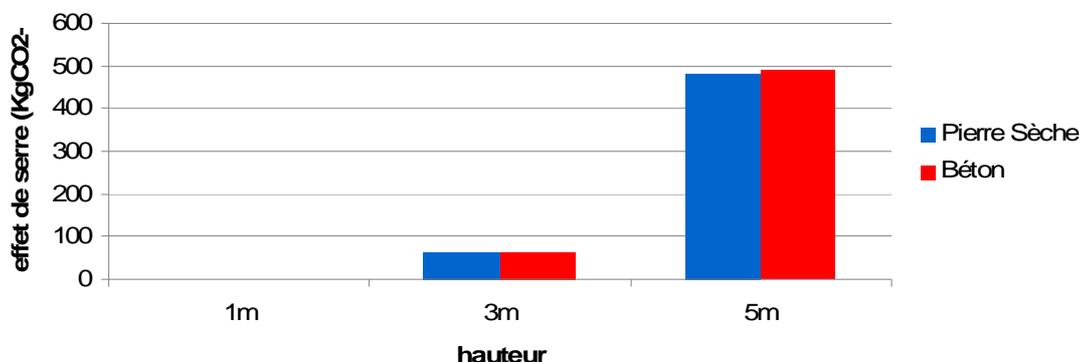


Figure IV.18 : Comparaison en effet de serre entre les deux technologies pour la phase construction

On remarque que la phase construction n'apporte pas beaucoup d'influence sur le résultat final dans ce qui concerne la comparaison entre P.S. et béton car les valeurs pour ces deux différentes technologies sont proches. La seule différence qui n'est pas très nette est pour les murs de 5m d'hauteur. Les machines à projeter du béton et à clouer ne sont pas très polluantes. Cependant, les valeurs finales seront plus fiables et tiendront en compte tout le cycle de vie.

IV-3. Entretien et Destruction

Dans de bonnes conditions de construction, l'entretien des murs en P.S. consiste simplement, comme décrit précédemment, à nettoyer le mur chaque année et à remettre en place quelques pierres. Il n'est pas nécessaire d'employer des machines ni des nouveaux matériaux. La pollution engendrée par l'entretien des murs en P.S. est très faible.

De la même façon, l'entretien 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 aussi très faible.

Le coût environnemental de destruction des murs en P.S. est plus faible que celui des murs en béton, car la durée de vie des murs en P.S. est plus grande que la durée de vie de son concurrent le béton. Cependant, de la même manière que pour l'étude de prix (cf. paragraphe III-3), ne pouvant disposer de critères pertinents, aucune évaluation chiffrée de ces impacts n'a donc été prise en compte. Cette hypothèse simplificatrice n'engendre toutefois pas beaucoup d'erreurs dans la mesure où l'entretien des ouvrages reste minime en termes de pollution par rapport à la phase de construction du mur. En termes d'entretien, les murs en pierre sèche présentent tout de même de nombreux atouts devant leurs concurrents en béton, atouts décrits lors de l'étude de prix (III-3)

IV-4. Comparaison finale pierre sèche/béton

En prenant en compte les coûts environnementaux de la phase matériaux, de la phase construction et en négligeant les coûts environnementaux de la phase entretien et destruction on obtient les résultats suivants :

OE	O.E.1 h=1 m	O.E.2 h=3 m	O.E.3 h=5 m
Pierre sèche	60 322	581 465	1 896 958
Béton	735 906	2 275 840	2 777 915

Figure IV.19 : Ecopoints (UBP) total

Eco-points : UBP

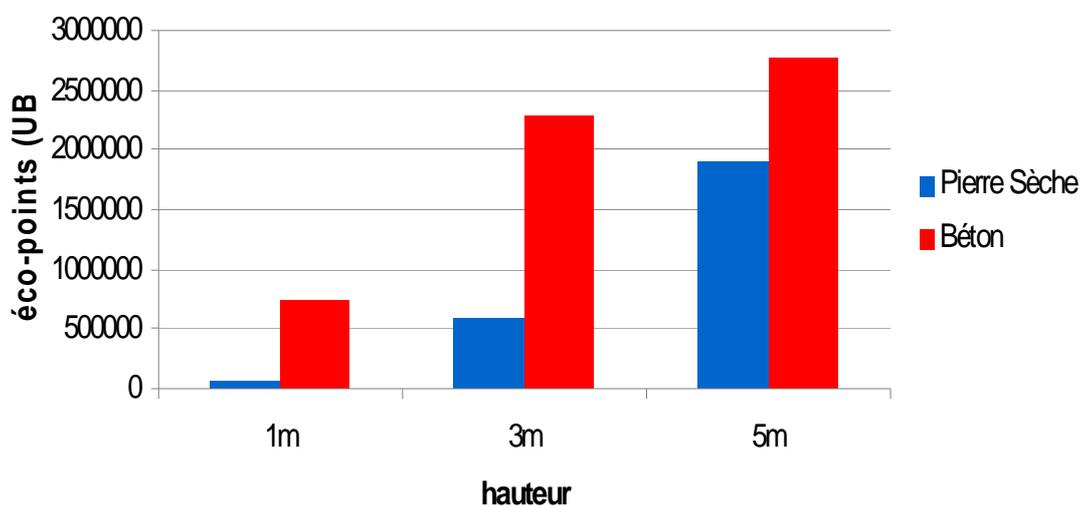


Figure IV.20 : Comparaison en écopoints entre les deux technologies

O.E.	O.E.1 h=1m	O.E.2 h=3m	O.E.3 h=5m
Pierre Sèche	338	3 841	15 501
Béton	3 820	12 476	18 246

Figure IV.21 : Energie Grise (MJ-ég) total

Energie Grise : MJ-éq

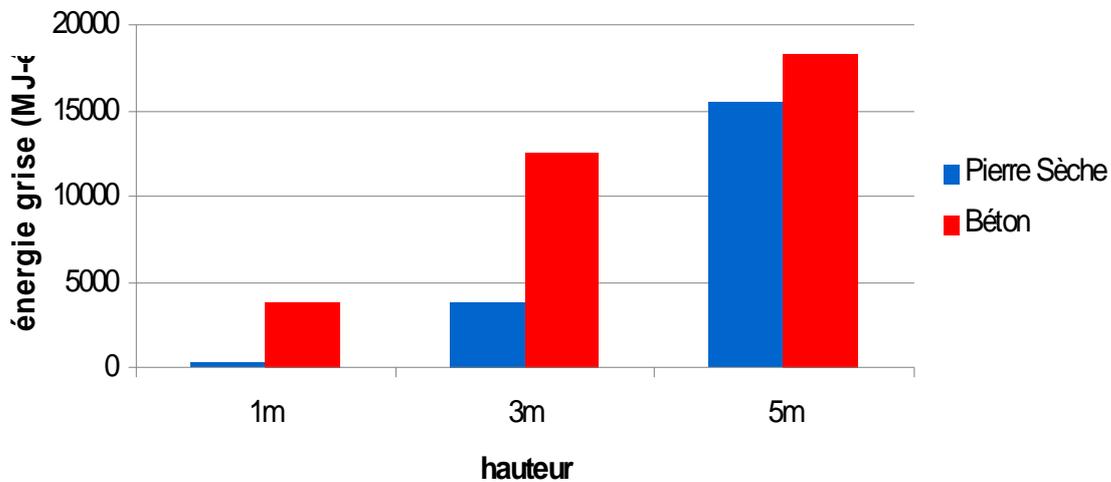


Figure IV.22 : Comparaison en énergie grise entre les deux technologies

O.E.	O.E.1 h=1m	O.E.2 h=3m	O.E.3 h=5m
Pierre Sèche	18	209	871
Béton	351	1 115	1 201

Figure IV.23 : Effet de Serre (KgCO₂-éq) total

Effet de Serre : KgCO₂-éq

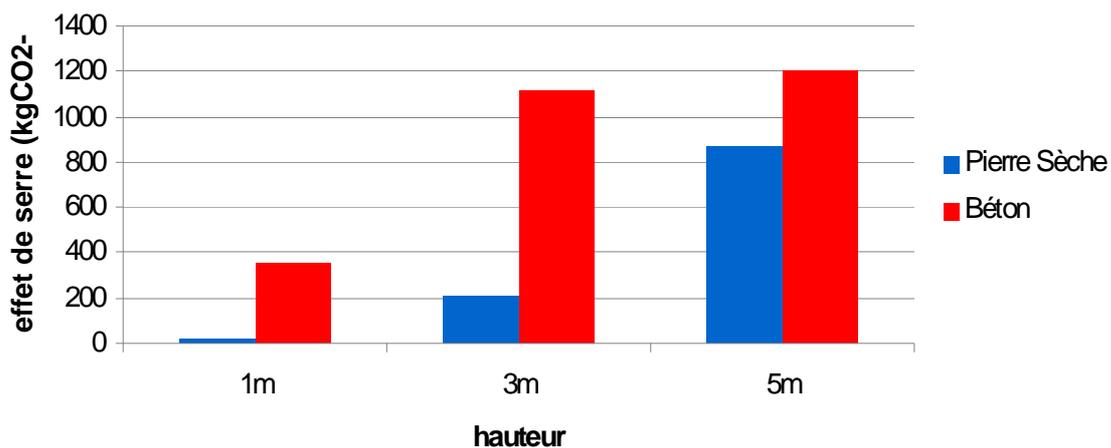


Figure IV.24 : Comparaison en effet de serre entre les deux technologies

Ainsi, à travers cette étude, et surtout grâce à ces graphiques récapitulatifs, principalement le graphe de la figure IV.20 qui représente un bilan général des pollutions engendrées et énergies consommées, il est possible de noter que, pour les hauteurs de mur considérées, les murs en pierre sèche sont toujours moins nocifs à l'environnement que les

murs en béton. Cependant, il est possible de déduire qu'à partir d'une hauteur un peu plus grande que 5 m les murs en P.S. seront plus polluants que les murs cloués en béton. L'explication vient du fait que les murs en P.S. sont des murs poids, et la quantité de pierre nécessaire pour réaliser le mur croît exponentiellement avec l'hauteur du mur pendant que pour les murs en béton, soit en L soit cloués qui sont des murs souples la progression est une droite (la pente pour les murs en L est plus grande que la pente pour les murs cloués).

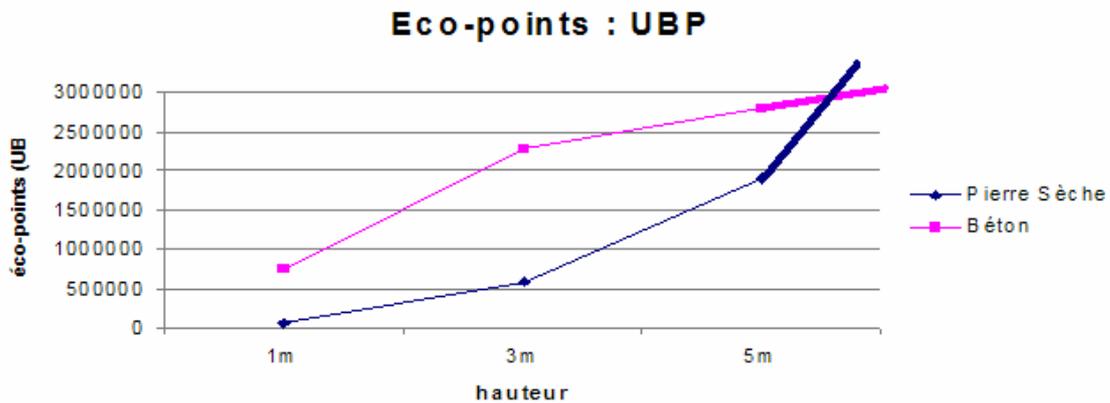


Figure IV.25 : Croisement des courbes d'écopoints des ouvrages en P.S. et en béton

En faisant un lien avec la partie coût environnemental, on peut dire que pour le mur jusqu'à 3m de hauteur, même si les murs en P.S sont plus chers, l'aspect environnemental peut jouer un rôle très important lors d'un choix entre les technologies confrontées dans cet étude. Par contre, pour les murs de plus de 5m de hauteur, l'utilisation de la technologie Pierre Sèche n'est plus du tout envisageable.

Conclusion

L'objectif majeur de ce projet était de déterminer dans quel cas le choix de la technologie pierre sèche pour des murs de soutènement pouvait être plus intéressant que celui de la technologie béton.

Les différents éléments présentés dans ce rapport permettent d'aboutir à plusieurs conclusions.

L'aspect financier étant prédominant dans toute prise de décision, il a tout d'abord été effectué une comparaison du prix de revient des ouvrages élémentaires.

L'étude de prix met en évidence que mis à part pour des hauteurs importantes (5m et au delà) les murs de soutènement en pierre sèche ont un coût de revient relativement proche de ceux des murs en béton en L. Malgré les nombreuses hypothèses simplificatrices formulées, l'étude financière abouti à un coût d'environ 1500 € /ml pour des murs « moyens »(hauteur d'environ 3m), ce qui correspond au prix que l'on peut trouver sur le marché (pour les murs en béton).

Dés lors que le choix du béton n'est pas significativement plus intéressant économiquement, l'aspect environnemental peut entrer en ligne de compte.

Pour les murs « moyens » pour lesquels l'aspect financier n'est pas déterminant, l'étude environnementale basée sur un calcul d'écopoints a montré que les murs en pierre sèche étaient beaucoup plus respectueux de l'environnement (rapport 1 à 4) que leurs concurrents en béton. Ce calcul a été établi en fonction des consommations d'énergies, des rejets dans l'atmosphère et de l'élimination des déchets.

Pour les murs de petite taille (inférieure à 1m) ou de grande taille (supérieure à 5m); les conclusions obtenues par l'étude sont plus nuancées.

Les murs en pierre sèche de petite taille sont économiquement et écologiquement plus compétitifs que ceux en béton, mais les ouvrages de cette taille ne représentent qu'une faible part du marché de la pierre sèche.

En ce qui concerne les ouvrages en pierre sèche de grande taille, leur prix de revient est quasiment deux fois plus élevé que pour des murs en béton. De plus leur qualité environnementale diminue considérablement à cause de la grande quantité de pierres que leur construction nécessite.

Au vu de cette étude, l'usage de la pierre sèche est pertinent pour des murs qui n'excèdent pas 3 ou 4 mètres. Souhaitons que des études techniques, la création de normes, des publications...puissent venir crédibiliser ce mode de construction afin de lui ouvrir un marché plus large que celui qu'il connaît aujourd'hui.

Table de figures:

<i>Figure 1 : Culture en terrasse dans la vallée du Douro au Portugal.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I.1 : Coupe d'un mur de soutènement de terrasse de culture.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I.2 : Disposition d'un couronnement en chant.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure I.3 : Croisement des pierres dans le mur, vue 3D.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure I.4 : Disposition des bois croisés pour la construction des murs en pierre sèche.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure I.5 : Coupe d'un mur en L.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure I.6 : Modélisation des efforts dans un mur L.</i>	<i>15</i>
<i>Figure I.7 : Sollicitations en traction/compression d'un mur en L.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure I.8 : Modélisation des efforts sur un mur cloué.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure I.9 : Mur cloué le long d'un axe routier.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure I.10 : Mise en place d'un treillis soudé.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure I.11 : Phases de construction d'un mur cloué.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure I.12 : Préparation d'une nouvelle étape de projection.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure II.1 : Définition des ouvrages élémentaires.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure II.2 : Section transversale d'un mur en P.S.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure II.3 : Caractéristiques des O.E. de la Pierre Sèche.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure II.4 : Caractéristiques des O.E. du Béton.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure II.5 : Section transversale d'un mur de soutènement et du terrain par lui soutenu....</i>	<i>29</i>
<i>Figure II.6 : Terrassement, volumes de terre déplacés.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure III.1 : Caractéristiques de différents types de pierres.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure III.2 : Prix des fournitures pour les murs en L.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure III.3 : Prix des fournitures pour les murs cloués.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure III.4 : Déboursés secs pour les différents ouvrages élémentaires.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure III.5 : Détail des déboursés secs main d'œuvre pour la pierre sèche.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure III.6 : temps de réalisation des différentes étapes de la fabrication d'un mur en L pour 1 OE.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure III.7 : temps de réalisation des différentes étapes de fabrication d'un mur cloué pour 1 OE.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure III.8 : Détail des déboursés secs main d'œuvre pour les murs en béton.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure III.9 : Coût et amortissement de différents outils communs aux deux technologies....</i>	<i>36</i>
<i>Figure III.10 : Coût et amortissement de différents outils pour les murs en béton.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure III.11 : Coût et amortissement des machines utiles dans la construction des murs cloués.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure III.12 : Dépenses supplémentaires pour les chantiers des murs en béton.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure III.13 : Tableau récapitulatifs des déboursés secs matériaux et consommables pour les différents OE.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure III.14 : Prix de revient des OE.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure III.15 : Coût de revient des OE.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure IV.1 : Données de l'écobilan pour la production et transport des pierres.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure IV.2 : Données de l'écobilan pour la production et transport du béton.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure IV.3 : Données de l'écobilan pour la production et transport de l'acier.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure IV.4 : Ecopoints (UBP) pour la phase matériaux.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure IV.5 : Comparaison en écopoints entre les deux technologies pour la phase matériaux.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure IV.6 : Energie grise (MJ-eq) pour la phase matériaux.....</i>	<i>44</i>

<i>Figure IV.7 : Comparaison en énergie grise entre les deux technologies pour la phase matériaux.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure IV.8 : Effet de serre (kg CO₂ éq) pour la phase matériaux.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure IV.9 : Comparaison en effet de serre entre les deux technologies pour la phase matériaux.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure IV.10 : Temps d'utilisation et bilan environnemental par mètre linéaire de mur pour la pelle mécanique.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure IV.11 : Temps d'utilisation et bilan environnemental par mètre linéaire de mur pour la machine à projeter du béton</i>	<i>49</i>
<i>Figure IV.12 : Temps d'utilisation et bilan environnemental par mètre linéaire de mur pour la machine à clouer</i>	<i>49</i>
<i>Figure IV.13 : Ecopoints (UBP) pour la phase construction.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure IV.14 : Comparaison en écopoints entre les deux technologies pour la phase construction.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure IV.15 : Energie grise (MJ-éq) pour la phase construction.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure IV.16 : Comparaison en énergie grise (MJ-éq) entre les deux technologies pour la phase construction.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure IV.17 : Effet de serre (KgCO₂-éq) pour la phase construction.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure IV.18 : Comparaison en effet de serre entre les deux technologies pour la phase construction.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure IV.19 : Ecopoints (UBP) total</i>	<i>52</i>
<i>Figure IV.20 : Comparaison en écopoints entre les deux technologies.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure IV.21 : Energie Grise (MJ-éq) total</i>	<i>52</i>
<i>Figure IV.22 : Comparaison en énergie grise entre les deux technologies.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure IV.23 : Effet de Serre (KgCO₂-éq) total</i>	<i>53</i>
<i>Figure IV.24 : Comparaison en effet de serre entre les deux technologies.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure IV.25 : Croisement des courbes d'écopoints des ouvrages en P.S. et en béton.....</i>	<i>54</i>

Références Bibliographiques

- ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), *Management environnemental – Approche produit*, ADEME, www.ademe.fr
- Barrois, M-M. (2005), TFE : *Les études de prix – Rapport bibliographique*
- Cornu, C. (2006), *La pierre sèche*, Chambre de Métiers et de l'Artisanat de Vaucluse, www.cmavignon.fr
- Cussatlegras, C. (1996), *Le mur de soutènement routier en pierres sèches : dossier de synthèse*, Le ministère de l'environnement – Bureau du paysage.
- Données sur les machines de construction www.cifa-france.com
- Données sur les machines de construction : www.torfs-nv.be
- Ecobilan : www.bbl.admin.ch
- Godart, B, Divet, L. (2000), *Recensement des ouvrages de soutènement en bordure du réseau routier national*, Ouvrages d'art n°34
- L'architecture de pierre sèche : Définitions (2001), www.pierreseche.com
- L.G., *Un blog pierre sèche*, un blog pierre sèche – a dry-stone blog, pierreseche.over-blog.com
- MOREL, J-C VILLEMUS B, MENARD J, MESBAH Ali, 1999, Etude des murs en pierres sèches du Luberon & murs de soutènement routiers en pierres sèches : Cahier des clauses techniques particulières (CCTP).ENTPE de Lyon, CETE Méditerranée Laboratoire régional des Ponts & Chaussées d'Aix en Provence
- Odent N., Mai 2000, *Recensement des ouvrages de soutènement en bordure du réseau national*, Ouvrages d'art n°34.
- Perchat J. (2005), *Les murs de soutènement*, Adets : Association technique pour le développement de l'emploi du treillis soudé, www.adets.org
- Projet National Clouterre (1994), Recommandations CLOUTERRE 1991, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

- Powrie, W, Harkness, R.M, Zhang, X. (2003), *Deformation and failure modes of drystone retaining walls*, Géotechnique n°52.
- Publication d'un rapport sur l'industrie cimentière (2004), Ministère de l'industrie, Folio administratif
- Rousseaux, P. (2005), *Analyse du cycle de vie (ACV)*, Les Techniques de l'Ingénieur, référence G5500
- Villemus, B. (2004), Thèse : *Etude des murs de soutènement en maçonnerie de pierres sèches*
- Crédits vidéo <http://fr.youtube.com/watch?v=FbOsREgl3HY>
<http://fr.youtube.com/watch?v=jCnQaB4G2BI>

Annexe 1 : Tableau : Données des Ecobilans dans la construction

Ökobilanzdaten im Baubereich		KBOB / eco-bau / IPB 2007/1				Données des écobilans dans la construction
Stand Dezember 2006						Etat de décembre 2006
Baustoff / Prozess	Bezug réf.	Dichte densité [kg/m3]	UBP UBP [Pt]	Graue Energie Energie Grise [MJ-Eq]	Treibhauseffekt Effet de serre [kg CO2-Eq]	Matériaux / processus
BAUSTOFFE						MATERIAUX DE CONSTRUCTION
Beton, Mauersteine und andere Massivbaustoffe						Béton, pierres de taille et autres matériaux massifs
Beton C 8/10 (Magerbeton)	kg	2190	90.3	0.548	0.065	Béton C 8/10 (béton maigre)
Beton C 25/30 speziell für Fundamente / Bodenplatten	kg	2385	98.9	0.721	0.0779	Béton C 25/30 spécialement pour fondations / dalles
Beton C 30/37	kg	2380	119	0.811	0.121	Béton C 30/37
Beton C 50/60 (hoch belastbar)	kg	2440	132	0.932	0.144	Béton C 50/60 (pour charge élevée)
Backstein	kg	1000	189	2.82	0.246	Brique en terre cuite
Tonziegel	kg	1600	266	4.11	0.363	Tuile en terre cuite
Sanitärkeramik	kg	2200	2980	42.9	2.3	Céramique sanitaire
Betonstein	kg	2380	145	0.983	0.13	Parpaing
Betonziegel	kg	2300	233	1.97	0.215	Tuiles en béton
Kalksandstein	kg	1500	146	1.53	0.139	Grès
Leichtbetonstein: Bläherlit	kg	400	788	16.1	1.01	Pierre en béton léger: perlite expansé
Leichtbetonstein: Blähton	kg	1200	376	5.27	0.439	Pierre en béton léger: argile expansée
Leichtbetonstein: Naturbims	kg	900	202	1.68	0.227	Pierre en béton léger: pierre ponce naturelle
Leichtbetonstein: Polystyrol	kg	400	771	12.5	1.08	Pierre en béton léger: polystyrène
Leichtlehmstein	kg	600	200	2.88	0.169	Brique en argile léger
Porenbeton	kg	600	303	3.6	0.418	Béton cellulaire
Faserzement-Dachschindel	kg	1800	683	9.54	0.733	Bardeau de fibrociment
Faserzementplatte gross	kg	1800	806	11.2	0.825	Dalle de fibrociment, grande
Faserzement-Wellplatten	kg	1800	649	8.1	0.688	Plaque ondulée en fibrociment
Gipsfaserplatte	kg	1250	448	5.34	0.366	Plaque de plâtre armé de fibres
Gipskartonplatte	kg	800	426	6.36	0.377	Plaque de plâtre cartoné
Sand	kg	2000	64.6	0.303	0.0141	Sable
Rundkies	kg	2000	60.5	0.243	0.0118	Gravier rond
Kies gebrochen	kg	2000	64.4	0.319	0.0136	Gravier concassé
Mörtel und Putze						Mortier et crépis
Gips	kg	1800	169	1.73	0.0869	Plâtre
Grundputz	kg	1800	183	1.67	0.218	Sous-couche
Kalkputz	kg	1500	388	3.57	0.606	Enduit à la chaux
Klebmörtel, Kunststoffbasis	kg	1600	1520	25	1.08	Mortier adhésif à base synthétique
Kunststoffdeckputz	kg	1700	237	5.34	0.182	Enduit en matière synthétique
Lehmfertigputz	kg	1800	61.2	0.641	0.0248	Enduit de gaise
Mineralischer Deckputz	kg	1500	162	1.73	0.0858	Enduit minéral
Wärmedämmputz	kg	350	533	8.3	0.739	Enduit d'isolation thermique
Zementmörtel	kg	1700	179	1.6	0.201	Mortier de ciment
Zementunterlagsboden	kg	1700	173	1.28	0.182	Chape de ciment
Anhydritfließmörtel	kg	1700	130	1.41	0.0561	Mortier à base d'anhydrite

Baustoff / Prozess	Bezug réf.	Dichte densité [kg/m ³]	UBP UBPP [Pt]	Graue Energie Energie Grise [MJ-Eq]	Treibhauseffekt Effet de serre [kg CO ₂ -Eq]	Matériaux / processus
Flachglas und Fenster						
Glas (Flach-) unbeschichtet	kg	2500	2360	12.9	0.982	Verre plat et fenêtre
Glas (Flach-) beschichtet	kg	2500	2580	15.1	1.14	Verre (plat), enduit
Acrylglas	kg	1180	8860	138	10.5	Verre acryle
Polycarbonat Scheibe	kg	1200	7300	116	8.77	Plaque de Polycarbonate
Polyester glasfaserverstärkt	kg	1800	7820	83.3	5.33	Polyester renforcé par des fibres de verre
2-IV Verglasung U<1.1 W/m ² K	m ²		78400	650	42.9	Vitrage 2-IV U<1.1 W/m ² K
2-IV Verglasung U<1.1 W/m ² K, VSG	m ²		86900	832	50.5	Vitrage 2-IV U<1.1 W/m ² K, VSG
3-IV Verglasung U<0.5 W/m ² K	m ²		123000	1120	69.5	Vitrage 3-IV U<0.5 W/m ² K
Holzfensterahmen U 1.5 W/m ² K (Rahmenfläche)	m ²		244000	2670	120	Cadre de fenêtre en bois U 1.5 W/m ² K (surface du cadre)
Holz-Metallfensterahmen U 1.6 W/m ² K (Rahmenfläche)	m ²		363000	4620	225	Cadre de fenêtre bois-métal U 1.6 W/m ² K (surface du cadre)
Alufensterahmen (Rahmenfläche)	m ²		494000	8150	453	Cadre de fenêtre en aluminium (surface du cadre)
Kunststofffensterahmen (PVC) (Rahmenfläche)	m ²		300000	4730	183	Cadre en matière synthétique (PVC) (surface du cadre)
Pfosten-Riegel-Fassaden (inkl. Fenster)						
Pfosten-Riegel-Fassade, Alu/Glas	m ²		422000	2880	164	Façades montants et traverses (fenêtres comprises)
Türen						
Aussentüren, Holz, Aluminiumbeplankt	m ²		257000	2520	138	Portes extérieures bois, doublées alu
Aussentüren, Holz, Glaseinsatz	m ²		187000	1650	91.1	Portes extérieures bois, avec vitrage
Innentüre, Holz	m ²		192000	1440	76.1	Portes intérieures bois
Innentüre, Holz, Glaseinsatz	m ²		180000	1510	84.7	Portes intérieures bois, avec vitrage
Metallbaustoffe (Recyklatanteil 2000)						
Armierungsstahl	kg	7850	6030	24.1	1.25	Acier d'armature
Stahl, niedriglegiert	kg	7850	6760	29.3	1.54	Acier, faiblement allié
Stahlblech, blank	kg	7850	6980	30.6	1.57	Tôle d'acier nue
Stahlblech, verzinkt	kg	7850	9020	35.5	1.81	Tôle d'acier, zinguée
Stahlprofil, blank	kg	7850	6410	26.2	1.41	Profil en acier, nu
Stahlprofil, verzinkt	kg	7850	8580	32	1.72	Profil en acier, zingué
Chromnickelstahl 18/8	kg	7850	12000	87.6	4.93	Acier nickel-chrome 18/8
Chromnickelstahlblech 18/8	kg	7850	13000	98.5	5.47	Tôle d'acier nickel-chrome 18/8
Chromstahlblech 18/8, verzinkt	kg	7850	13300	102	5.68	Tôle d'acier chromé, étamée 18/8
Aluminiumblech, blank	kg	2700	9510	152	8.81	Tôle d'aluminium, nue
Aluminiumprofil, blank	kg	2700	9940	160	9.21	Profil d'aluminium, nue
Kupferblech, blank	kg	8900	54400	56.6	2.81	Tôle de cuivre, nue
Titanzinkblech	kg	7200	37000	84.5	4.03	Tôle zinc-titane
Messing	kg	8400	46200	39.7	2.05	Laiton

Ökobilanzdaten im Baubereich
KBOB / eco-bau / IPB 2007/1
Données des écobilans dans la construction

Stand Dezember 2006

Etat de décembre 2006

Baustoff / Prozess	Bezug ref.	Dichte densité [kg/m ³]	UBP UBP [Pt]	Graue Energie Energie Grise [MJ-Eq]	Treibhauseffekt Effet de serre [kg CO ₂ -Eq]	Matériaux / processus
Holz und Holzwerkstoffe						
<i>Bois et produits en bois</i>						
Massivholz Fichte / Tanne / Lärche, luftgetrocknet, rauh	kg	540	1010	2.21	0.123	Bois massif épicéa / sapin / mélèze, séché à l'air, brut
Massivholz Fichte / Tanne / Lärche, luftgetrocknet, gehobelt	kg	540	1090	3.26	0.173	Bois massif épicéa / sapin / mélèze, séché à l'air, raboté
Massivholz Fichte / Tanne / Lärche, kammergetrocknet, gehobelt	kg	495	1290	4.39	0.225	Bois massif épicéa / sapin / mélèze, séché en cellule, raboté
Massivholz Buche, Eiche, luftgetrocknet, rauh	kg	790	1020	1.67	0.0912	Bois massif hêtre / chêne, traité à l'air, brut
Massivholz Buche, Eiche, luft- / kammergetrocknet, rauh	kg	715	1140	2.05	0.109	Bois massif hêtre / chêne, séché à l'air et en cellule, brut
Massivholz Buche, Eiche, kammergetrocknet, rauh	kg	715	1190	2.5	0.129	Bois massif hêtre, chêne, séché en cellule, brut
Massivholz Buche, Eiche, luft- / kammergetrocknet, gehobelt	kg	715	1220	2.88	0.149	Bois massif hêtre, chêne, séché à l'air / en cellule, raboté
Brettschichtholz	kg	495	1700	8.81	0.631	Bois lamellé-collé
Brettschichtholz, wasserfest	kg	495	1730	9.55	0.668	Bois lamellé-collé, résistant à l'eau
3-Schicht Massivholzplatte	kg	540	1810	10.9	0.708	Panneau de bois massif 3 couches
Sperrholz/Multiplex	kg	790	4220	14.4	0.835	Bois lamellé / multiplex
Sperrholz/Multiplex, wasserfest	kg	790	4400	17.7	1.02	Bois lamellé / multiplex, résistant à l'eau
Spanplatte V20, Innenanwendung	kg	690	1410	9.47	0.613	Panneau de particules V20, pour l'intérieur
Spanplatte V20, Innenanwendung, beschichtet	kg	690	1490	10.8	0.664	Panneau de particules V20, pour l'intérieur, enduit
Spanplatte V100, Aussenanwendung	kg	690	1990	13.8	0.695	Panneau de particules V100, pour l'extérieur
OSB Platte	kg	473	2310	18.1	0.822	Panneau d'aggloméré type OSB
Hartfaserplatte	kg	900	2450	13.4	0.857	Panneau de particules dur
Weichfaserplatte	kg	300	2460	13.5	0.862	Panneau de particules tendre
Mitteldichte Faserplatte (MDF)	kg	790	1650	15	0.853	Panneau de fibres à densité moyenne (MDF)
Holzwohle-Leichtbauplatten, zementgebunden	kg	450	900	4.16	0.468	Panneau de bois léger à paille de bois liée par du ciment
Fugendichtungsmassen						
<i>Masses de jointolement</i>						
Bitumen	kg	1020	2290	54	2.92	Bitume
Bitumenklebemasse kalt	kg	1020	10200	57.7	3.07	Masse bitumeuse, froide
Bitumenklebemasse heiss	kg	1020	2290	39.3	2.76	Masse bitumeuse, chaude
Kautschukdichtungsmasse	kg		6150	63.1	1.42	Masse de jointolement en caoutchouc
Silicon-Fugenmasse	kg	1700	2870	61.6	2.62	Masse de jointolement en silicone
Dichtungsbahnen und Schutzfolien						
<i>Lés d'étanchéité et feuilles de protection</i>						
Polymerbitumenbahn EP4 flam	kg	1160	2790	45.6	3.13	Lé de bitume-polymère EP4 flam
Bitumenbahn V60	kg	1160	2690	44.7	2.98	Lé de bitume V60
Bitumenbahn VA4	kg	1160	3080	54.3	3.48	Lé de bitume VA4
Bitumenbahn Alu80	kg	1160	3400	55	3.69	Lé de bitume Alu80
Bitumendichtungsbahn GV2	kg	1160	3020	50.9	3.4	Lé d'étanchéité en bitume GV2
Aluminiumdichtungsbahn	kg	2700	10200	163	9.38	Lé d'étanchéité aluminium
EPDM-Dichtungsbahn	kg	860	2970	91.8	2.58	Lé d'étanchéité EPDM
Dampfbremse PE	kg	940	4550	91.6	5.46	Barrière de vapeur PE
Polyethylenfolie (LDPE)	kg	940	5440	91.5	5.19	Feuille de polyéthylène (LDPE)
Polyethylenvlies	kg	930	5490	97.5	5.8	Voile de polyéthylène
Kraftpapier	kg	650	3470	33	1.7	Papier Kraft

Ökobilanzdaten im Baubereich

KBOB / eco-bau / IPB 2007/1

Données des écobilans dans la construction

Stand Dezember 2006

Etat de décembre 2006

Baustoff / Prozess	Bezug réf.	Dichte densité [kg/m ³]	UBP UBP [Pt]	Graue Energie Energie Grise [MJ-Eq]	Treibhauseffekt Effet de serre [kg CO ₂ -Eq]	Matériaux / processus
Wärmedämmstoffe						Produits thermiques isolants
Steinwolle	kg	100	2120	22.2	1.43	Laine de pierre
Glaswolle	kg	30	2190	48.4	1.47	Laine de verre
Schaumglas	kg	110	1250	27.1	1.19	Verre cellulaire
Blähperlit	kg	100	773	17	0.998	Perlite expansée
Korkplatte	kg	120	2580	26.3	1.34	Panneau de liège
Polystyrol expandiert (EPS)	kg	18	5360	100	6.64	Polystyrène expansé (EPS)
Polystyrol extrudiert (XPS)	kg	18	4570	84.2	5.98	Polystyrène extrudé (XPS)
Polyuretanschaum, fest (PUR)	kg	30	7220	102	6.54	Mousse rigide de polyuréthane (PUR)
Zellulosefasern (eingebblasen)	kg	60	1310	7.81	0.384	Fibres de cellulose (soufflées)
Bodenbeläge						Revêtements de sol
Natursteinplatten geschnitten	kg	2750	2920	8.39	0.268	Dalle de pierre naturelle coupée
Natursteinplatten geschliffen	kg	2750	3770	12	0.364	Dalle de pierre naturelle rectifiée
Natursteinplatten poliert	kg	2750	4920	15	0.443	Dalle de pierre naturelle polie
Kunststeinplatten	kg	1750	202	1.51	0.234	Dalle de pierre artificielle
Keramikplatten	kg	1900	2610	14.8	0.772	Dalle de céramique
Asphaltdeckschicht	kg	2100	843	4.42	0.106	Couche de couverture en asphalte
Asphalttragschicht	kg	2100	831	3.36	0.0944	Couche porteuse en asphalte
Gussasphalt	kg	2300	1810	7.54	2.56	Asphalte coulé
Rohre						Tuyaux
Polyvinylchlorid (PVC) Rohr	kg	1380	4860	78.6	4.73	Chlorure de polyvinyle (PVC), tuyau
Polypropylen (PP) Rohr	kg	910	4660	83.8	5.35	Polypropylène (PP), tuyau
Polyethylen (HDPE) Rohr	kg	930	4990	87.6	5.24	Polyéthylène (HDPE), tuyau
Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) Rohr	kg	1050	5390	103	6.75	Acrylonitril-butadiène-styrène (ABS), tuyau
Anstrichstoffe						Enduits
Alkydharzgrundierung	kg		6150	55.4	5.05	Résine alkyde, couche de fond
Alkydharz lösemittelverdünnt	kg		9970	97	5.9	Résine alkyde, diluée par solvant
Decklack, Silikonpolyester	kg		4780	61.6	4.99	Couche de finition, polyester siliconé
Decklack, Alkydharzlack, wasserverdünnt, weiss	kg		6150	55.4	5.05	Couche de finition, laque de résine alkyde, diluable à l'eau, blanche
Decklack, Acrylat, wasserverdünnt, weiss	kg		4580	46.5	4.13	Couche de finition, acrylate, diluable à l'eau, blanche
Acryl-Dispersion, wasserverdünnt	kg		5010	52.9	4.38	Dispersion acrylique, diluable à l'eau

Ökobilanzdaten im Baubereich

KBOB / eco-bau / IPB 2007/1

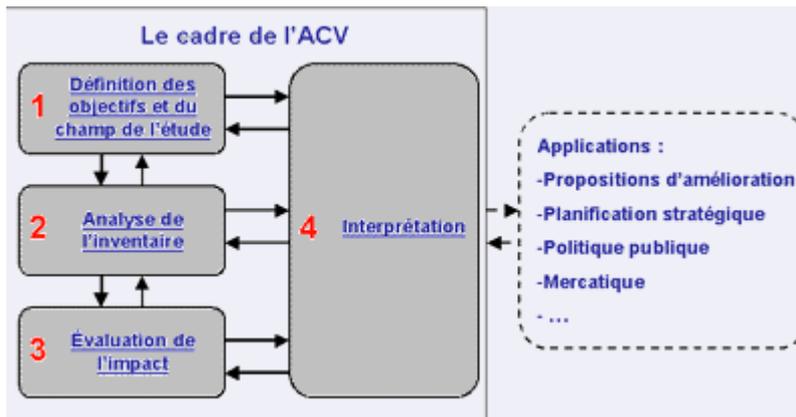
Données des écobilans dans la construction

Stand Dezember 2006

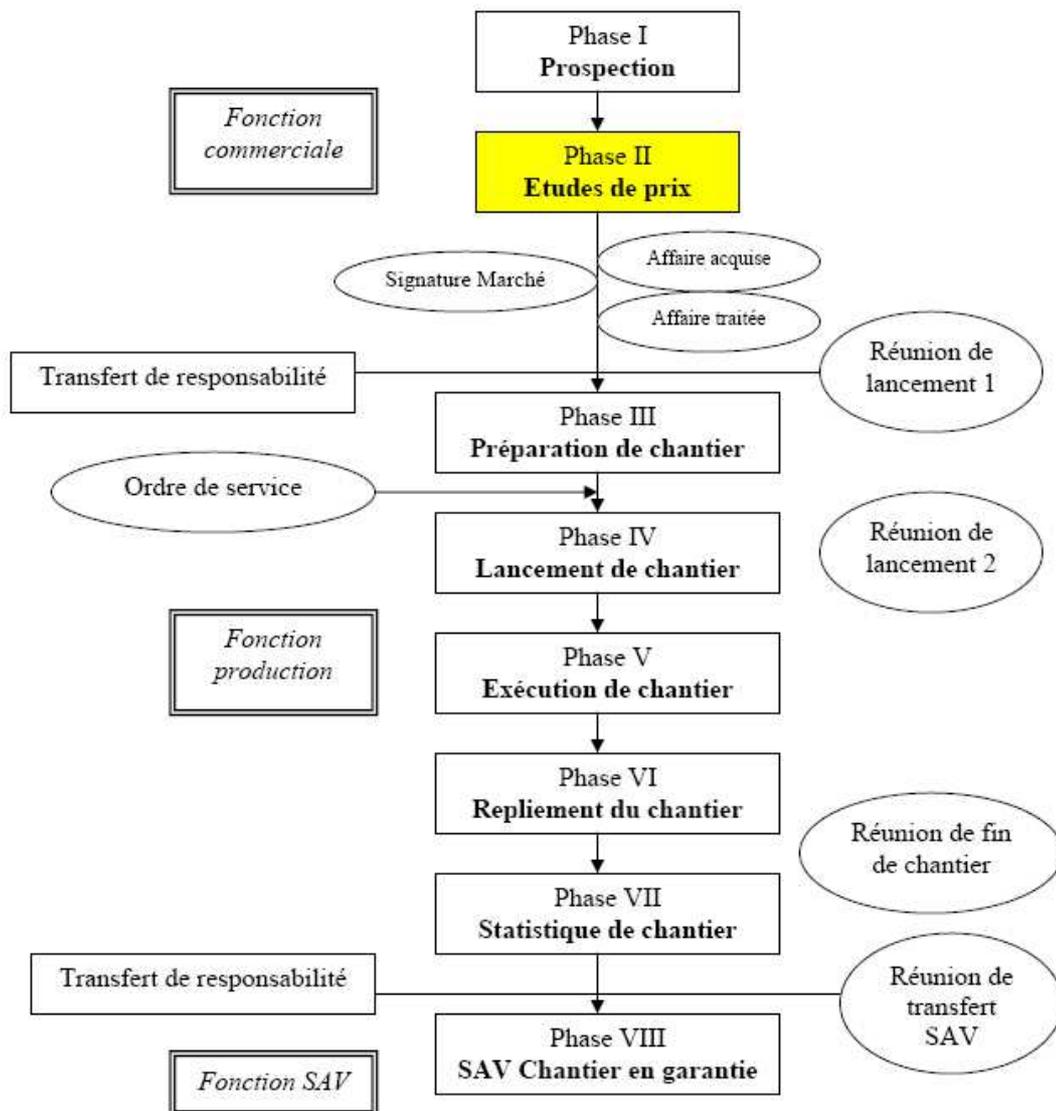
Etat de décembre 2006

Baustoff / Prozess	Bezug réf.	Dichte densité [kg/m ³]	UBP UBP [Pt]	Graue Energie Energie Grise [MJ-Eq]	Treibhauseffekt Effet de serre [kg CO ₂ -Eq]	Matériaux / processus
ENERGIE						ENERGIE
Nutzwärme						Chaleur utile
Ölheizung EL 10 kW	MJ		54.5	1.42	0.0944	Chauffage au mazout EL 10 kW
Ölheizung EL 10 kW Brennwert	MJ		51.5	1.34	0.089	Chauffage au mazout EL 10 kW à condensation
Ölheizung EL 100kW Brennwert	MJ		49	1.31	0.0884	Chauffage au mazout EL 100 kW à condensation
Ölheizung EL Industrie	MJ		54.4	1.36	0.0924	Chauffage au mazout EL industrie
Gasheizung kondensierend, <100 kW	MJ		39	1.28	0.074	Chauffage au gaz à condensation <100 kW
Holzheizung Stückholz 30 kW	MJ		48.1	0.11	0.00661	Chauffage à bois, bûches 30 kW
Holzheizung Pellet 50kW	MJ		42	0.357	0.0163	Chauffage à bois, pellets 50kW
Wärmepumpe, Aussenluft 10kW (JAZ 2.8)	MJ		45.4	1.04	0.0215	Pompe à chaleur air-eau 10kW (JAZ 2.8)
Wärmepumpe, Erdsonden 10kW (JAZ 3.9)	MJ		37.3	0.823	0.0182	Pompe à chaleur saumure-eau (sonde géoth.) 10kW (JAZ 3.9)
Flachkollektoranlage für Warmwasserspeicher	MJ		8.44	0.061	0.00277	Capteur plan pour accumulateur d'eau chaude
Strom						Courant électrique
Elektrizität aus Wasserenergie	kWh		10.8	4.56	0.00368	Electricité provenant d'énergie hydraulique
Elektrizität aus Windenergie	kWh		50.4	0.295	0.0169	Electricité provenant d'énergie éolienne
Photovoltaik 3kWp	kWh		144	1.5	0.0818	Générateur photovoltaïque 3kWp
Strom, Schweiz	kWh		409	10.4	0.143	Courant électrique, Suisse
Strom, UCTE (Europa)	kWh		651	12.5	0.537	Courant électrique, UCTE (Europa)
TRANSPORTE						TRANSPORTS
Güter-Transporte						Transports de marchandise
Güterzug	tkm		39.3	0.606	0.0138	Train de marchandises
Lieferwagen bis 3,5 t	tkm		1310	19.5	1.16	Véhicule de transport, jusqu'à 3,5 t
LKW 16 t	tkm		411	5.27	0.318	Camion 16 t
LKW 28 t	tkm		289	3.76	0.223	Camion 28 t
LKW 40 t	tkm		211	2.84	0.165	Camion 40 t
Binnenfrachter	tkm		58.8	0.657	0.0457	Cargo de marchandise, navigation intérieure
Hochseefrachter	tkm		18.6	0.17	0.0106	Navire de haute mer
Frachtflugzeug	tkm		792	16.4	1.08	Avion de fret
Personen-Transporte						Transports de personnes
Personenzug	pkm		27.4	0.641	0.00812	Train des personnes
Personenwagen	pkm		223	3.39	0.203	Voiture
Passagierflugzeug	pkm		128	2.79	0.155	Avion passager

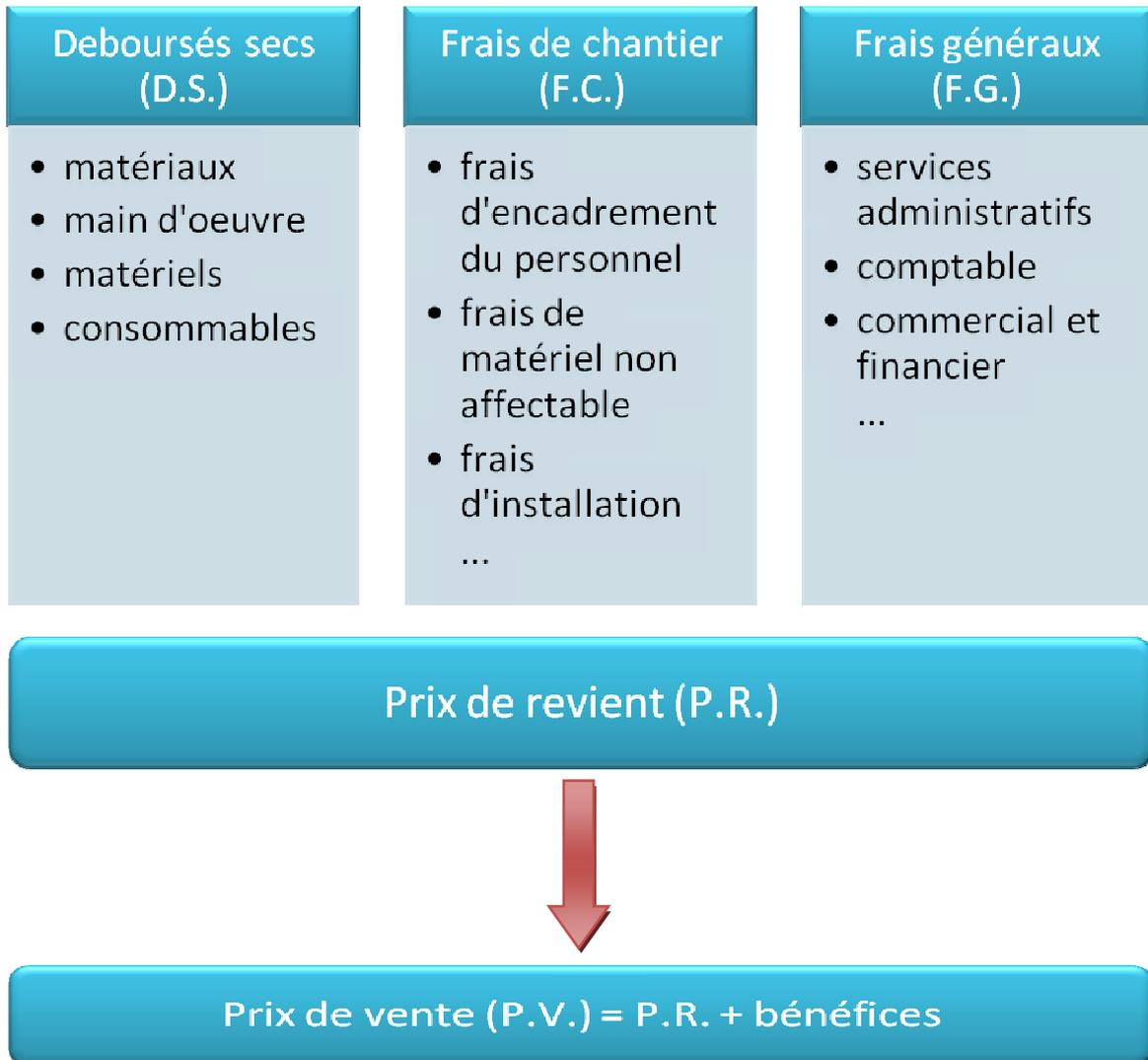
Annexe 2 : Principe de l'ACV [2]



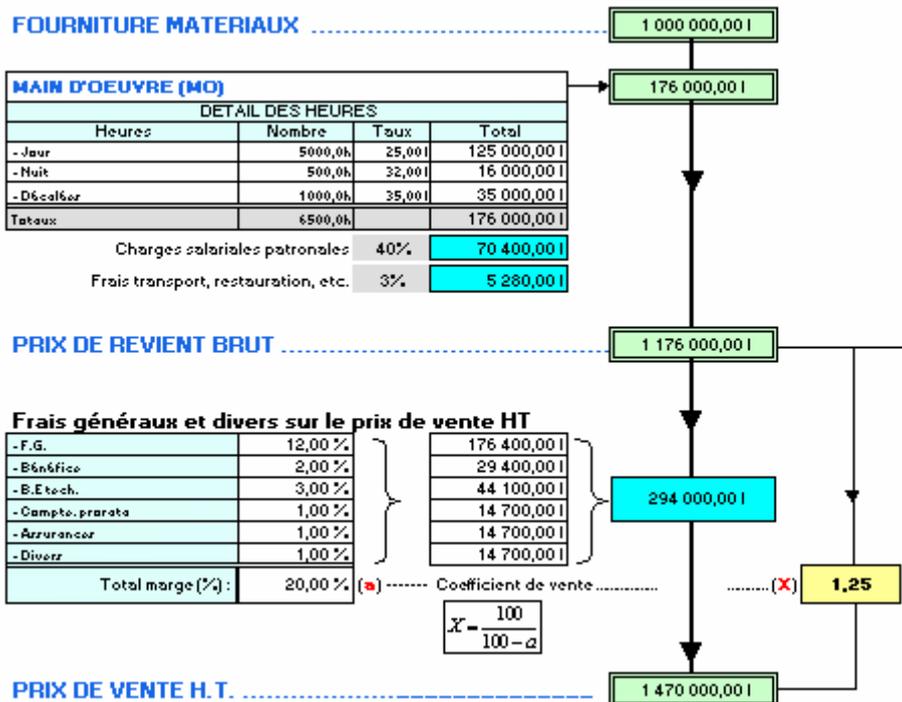
Annexe 3 : La place de l'étude de prix dans la vie d'une affaire



Annexe 4 : Schéma de principe de l'étude de prix



Annexe 5 : Exemple de calcul d'un prix de vente [3]



B-Analyse du processus projet
Projet d'étude n°27

Plusieurs méthodes de communication et de gestion de projet nous ont été présentées lors de TD Expression et Organisation (TD EO) et de TD Gestion de Projet (TD GP).

En TD GP, nous avons appris à bien définir notre projet avant de nous lancer dans le projet en lui-même.

Cette longue phase de préparation comprend avant tout une définition des rôles au sein de l'équipe ce qui nous permet de bien nous partager le travail "annexe" au projet (contact avec des professionnels, calcul du budget, organisation des réunions, gestion du site internet...).

Les rôles ont donc initialement été définis ainsi:

~ chef de projet : Danilo

~ responsable de la communication : Noé

~ trésorière : Xiaoqian

~ responsable informatique : Jiawen

~ secrétaire générale : Véronique

Nous nous sommes rendu compte que cette organisation n'était finalement pas vraiment utile, mis à part le chef de projet, car certaines tâches comme la gestion du budget ne sont que très minimales dans notre projet et il ne sert à rien de déléguer une personne pour s'en charger.

Ensuite, une phase incontournable du projet consiste à définir clairement les tâches à réaliser, ainsi que les découper en sous-tâches... leur ordre de réalisation et les responsables de chaque tâche.

Nous avons pour cela établi un diagramme de répartition des tâches, que vous trouverez à la fin du dossier.

Pour la planification logique et temporelle, deux outils, les diagrammes Pert et Gantt nous ont été présentés. Nous les avons réalisés, mais face à la difficulté de les rendre clairs et compréhensibles pour les personnes extérieures au projet, nous avons préféré faire figurer dans ce rapport un diagramme réunissant la planification logique et temporelle, les marges d'erreurs ainsi que l'intitulé précis des tâches, ce qui rend le diagramme plus lisible.

Encore une fois, ces différents outils et diagrammes ne se sont pas avérés être très efficaces pour notre projet. Il est pratique de pouvoir constater de l'avancement du projet au fur et à mesure que des sous-tâches sont réalisées, cependant notre projet a consisté principalement à rechercher de la documentation... Il a donc été quasiment impossible de prévoir en combien de temps nous allions trouver l'information que nous cherchions. Par ailleurs, la plupart des ouvrages ou publications concernant notre sujet d'études n'abordaient pas uniquement une ou deux sous-tâches mais un grand nombre d'informations qui s'inscrivaient dans de nombreuses sous-tâches. Respecter l'ordre logique fixé en début de projet s'est donc avéré être très difficile.

Les grandes étapes du projet ont été faites dans l'ordre mais l'ordre décrit par les diagrammes Pert et Gantt est bien trop précis pour pouvoir être bien respectés. En ce qui concerne notre projet, nous avons l'impression d'avoir passé énormément de temps à faire ces diagrammes pour une utilité finalement extrêmement limitée...

La définition précise des objectifs nous a par contre beaucoup aidés pour bien situer nos axes de recherche. C'est sans doute l'aspect de la gestion de projet qui a été le plus utile pour nous et le plus formateur. Le sujet était pour nous assez vague et conformément aux méthodes de GP nous n'avons pas hésité à passer beaucoup de temps à bien le définir en étudiant le contexte de la pierre sèche, en cherchant à savoir ce qu'était une Analyse du Cycle de Vie (ACV), en cherchant si de telles études avaient déjà été réalisées ce qui nous a par exemple permis de nous fixer comme objectif l'établissement d'un coefficient environnemental.

1-L'organisation de l'équipe, les méthodes de travail

Le travail en équipe constitue pour nous une expérience nouvelle. Les TD EO nous ont permis d'apprendre à nous organiser. Nous avons notamment appris à bien organiser des réunions de travail, en

ciblant les objectifs de chaque réunion, en fixant un temps pour chaque objectif, en choisissant un lieu adéquat, en essayant d'impliquer tous les acteurs, notamment lors de la phase de "brainstorming".

Malgré tous les conseils prodigués, l'efficacité de nos réunions était loin d'être parfaite et c'est sans aucun doute l'un des points sur lequel nous aurions dû nous focaliser pour gagner en efficacité. En effet, la barrière de la langue lors de nos réunions ainsi que les différentes personnalités ont été un frein au bon déroulement des réunions. Il est rare que tout le monde ait participé activement aux prises de décisions. On nous a certes appris à faire participer tout le monde lors d'une réunion, mais dans un groupe où nous avons tous le même statut, il n'est pas évident que quelqu'un endosse une autorité pour rappeler aux autres qu'ils doivent participer au travail de groupe.

Pour les recherches bibliographiques, nous avons procédé de différentes manières, que ce soit sur internet, dans des bibliothèques, par prêt de documents de la part de nos tuteurs ou de contacts extérieurs, ou enfin grâce aux références conseillées encore une fois par nos contacts extérieurs.

A chaque réunion, ou lorsque nous avançons dans une des tâches, Véronique, en tant que secrétaire générale, s'est chargée de dresser un compte-rendu et de le mettre sur le serveur en ligne afin d'avoir une trace de tout ce que l'on faisait.

La plupart du travail de notre PE était constitué de recherches bibliographiques, de contacts avec des professionnels de la pierre sèche ou du béton, de présentations et de rédaction de rapports. Étant donné la constitution de notre groupe (2 étudiants chinois, 2 étudiants français et un étudiant brésilien) il a parfois été difficile d'organiser le travail à cause de la barrière de la langue qui a été un frein énorme pour la plupart des tâches que nous avions à effectuer.

Nous avons dû faire face au cours de notre projet à un problème qui a beaucoup perturbé notre organisation. En juillet 2007, Véronique a quitté le projet et a été remplacée en octobre 2007 par Guillaume. L'activité importante de Véronique au sein du groupe lors de la première année de travail a beaucoup manqué lors de la période de rédaction de ce rapport. L'apport d'un élève de langue française aurait fortement aidé dans cette ultime période du projet. L'arrivée de Guillaume, également de langue française a certes permis de combler le départ de Véronique, mais il était impossible de lui demander de remplir la fonction de Véronique en ayant manqué 11 mois de travail au sein du groupe.

2-Les relations avec les partenaires

Nous avons été amenés lors de notre projet à rencontrer plusieurs acteurs du monde professionnel comme M. Jean-Claude Morel, professeur à l'ENTPE ou Claire Cornu qui travaille à la Chambre des métiers et de l'artisanat du Vaucluse (CMAV), ou encore être en relation via internet avec d'autres personnes. Ces contacts ont abouti de différentes manières. Certains comme M Morel, Mme Cornu, M Avril ont été très attentifs à notre égard, nous accueillant chaleureusement sur leur lieu de travail et étaient clairement ravis de pouvoir nous faire partager leurs connaissances et leur expérience sur le sujet.

Ils ont répondu immédiatement à nos sollicitations par mails. D'autres contacts comme par exemple des professionnels des barrages chez EDF ne nous ont donné aucun signe de vie malgré nos nombreuses sollicitations et relances.

Les relations avec les professionnels du milieu peuvent donc être très enrichissantes mais peuvent également être compliquées dans la mesure où nous ne sommes que des étudiants et certaines personnes n'ont pas forcément de temps à nous consacrer.

3-Evolutions des objectifs du projet

Comme cela a été dit précédemment, une longue période a été consacrée à la définition des objectifs afin de ne pas avoir à les modifier en permanence. Cependant, notre projet portait initialement sur deux types d'ouvrages à étudier : les murs de soutènement et les masques de barrage. Les masques de barrages sont des constructions complexes, sur lesquels il est difficile de trouver des ouvrages dans la littérature scientifique. Après avoir cherché tant bien que mal le maximum d'informations que nous

pouvions sur ces masques, nous avons besoin de l'aide d'un professionnel pour nous aider sur la question. Nous étions censés pouvoir en trouver auprès de personnes travaillant chez EDF (initialement commanditaire de la partie portant sur les masques). Nous avons essayé de les contacter à maintes reprises sans succès. L'intervention de notre tuteur n'ayant pas permis d'obtenir de réponse de leur part, nous avons considéré que la perte de temps que nous infligeaient ces recherches ne nous permettrait pas de mener à bien l'étude sur les murs. Nous avons donc avec l'accord de notre tuteur, décidé de reporter cet objectif à la fin de notre projet, au cas où nous terminerions en avance la partie sur les murs. Au fur et à mesure de l'avancement du projet, nous nous sommes rendu compte que nous ne pourrions jamais commencer l'étude des masques de barrages, cet objectif a donc été abandonné en septembre 2007.

D'autre part, l'intitulé du projet stipulait que les ouvrages étudiés seraient uniquement les ouvrages en pierres sèche. Nous avons dès le début considéré avec le tuteur du projet qu'il pouvait être intéressant d'établir une comparaison de cette technologie constructive avec la technologie concurrente, le béton.

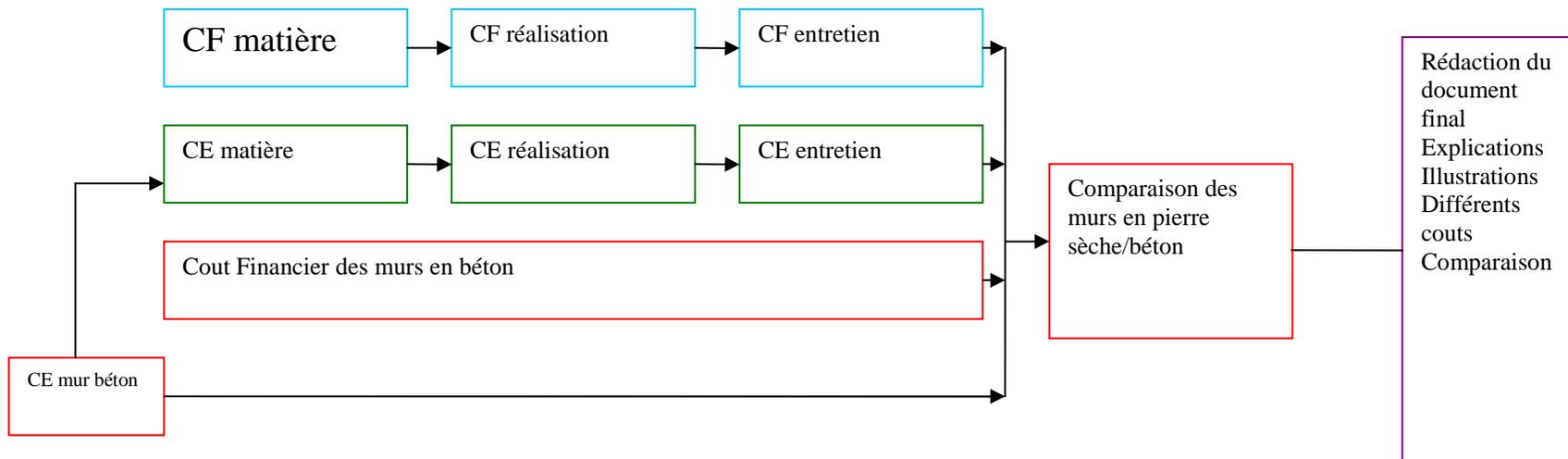
Nous pensions pouvoir trouver des données sur le béton très facilement étant donné que cette technologie est très développée et bien maîtrisée.

Au bout de quelques semaines de recherches, nous avons dû nous rendre à l'évidence qu'une étude approfondie des ouvrages en béton devait être réalisée, ce qui a gonflé de manière assez importante nos objectifs. C'est sûrement une des raisons pour laquelle nous n'avons pas pu finir cette partie plus tôt et ainsi commencer la partie sur les masques de barrages.

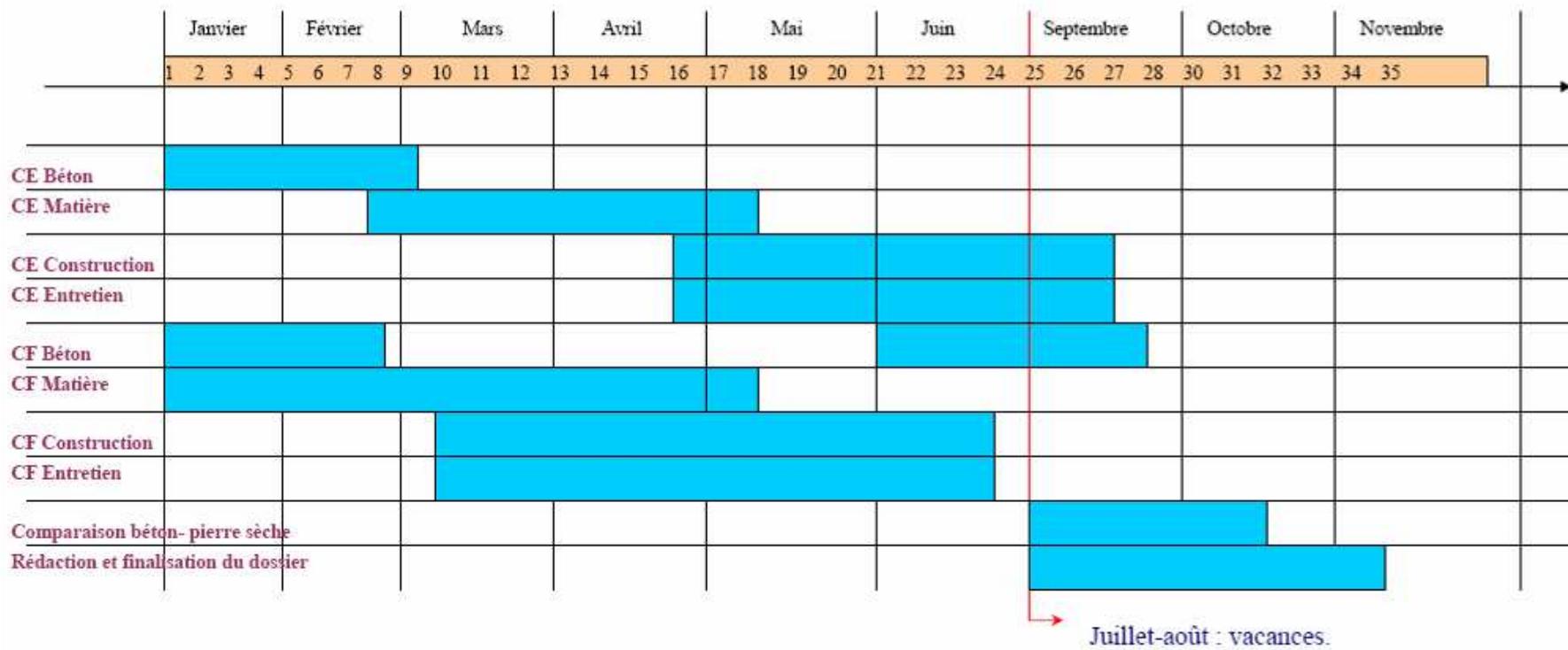
4-Gestion du budget

Nous n'avons eu qu'une seule dépense au cours de notre projet. Cette dépense, correspond à un déplacement à Avignon, pour rencontrer Claire Cornu et Paul Arnault (spécialistes de la pierre sèche) d'un montant de 80€. Nous n'avons eu aucun mal à gérer notre budget étant donné qu'il n'y a eu qu'une seule dépense et qu'elle était largement inférieure au budget total alloué à notre groupe.

ORGANIGRAMME DES TACHES ET RESPONSABILITES



Danilo; Noé; Jiawen; Véronique; Xiaoqian



Juillet-août : vacances.

Remarque :

CE = coefficient environnemental

CF = coût financier

Check-list de rapport de Projet d'Etudes

A remplir par les rédacteurs (élèves)

et à insérer en dernière page du rapport

A développer

Renseigner la case par le nom du responsable, ou la date ou une simple croix lorsque la vérification a été faite.

Vérification présence	Vérification qualité
-----------------------	----------------------

Contenu

Table des matières		
Introduction		
Conclusion générale		
Bibliographie		
Résumé		
Table des figures		

Forme

Vérification orthographe		
Pagination		
Homogénéité de la mise en page		