

Projet d'option – Génie Civil et Environnement

Promotion 2009



- MURS DE SOUTÈNEMENT -

Comparaison environnementale et financière de différentes technologies



Tuteur ECL : M. VINCENS Eric

Equipe : ALAVA Camille
AUGERAUD Lucie
APAVOU Sendyl
BOUSKELA Daniel
LENOIR Camille
PEYRARD Marianne

Date du rapport : mars 2009



Remerciements

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

Plus particulièrement, pour la partie pierres sèches, Lucie AUGERAUD et Camille ALAVA adressent leur remerciement à Marc DOMBRE, Bruno DURAND et Cathie O'Neill de l'Association des Bâisseurs en Pierres Sèches pour leur aide, leur disponibilité et leur gentillesse.

Pour la partie gabions, Camille LENOIR et Marianne PEYRARD remercient Mr. BERTIN, de la société MGB, qui leur a permis de visiter un chantier mettant en œuvre la technologie des gabions ainsi que Mr. SAUREL, de la société Aquaterra Solutions, pour les précieuses informations qui leur ont été apportées.



Sommaire

Résumé	4
Abstract	4
Introduction	5
1. Murs de soutènement des terres	6
1.1. Présentation générale	6
1.2. Murs de soutènement en pierres sèches	6
1.2.1. Structure d'un mur de soutènement en pierres sèches	7
1.2.2. Eléments techniques de la construction d'un mur en pierre sèche	10
1.2.3. Outillage nécessaire à la construction	12
1.2.4. Le rôle indispensable du muraillleur	13
1.3. Murs de soutènement en gabions	13
1.3.1. Réalisation d'un mur de soutènement en gabions	14
1.3.2. Outillages nécessaires à la construction	16
1.4. Murs de soutènement en béton	17
1.4.1. Murs bétons en L	17
1.4.2. Murs cloués en béton	19
1.5. Notion d'ouvrage élémentaire	22
2. Analyse financière	22
2.1. Principe	22
2.1.1. Principe de l'étude de prix	22
2.1.2. Application aux technologies étudiées	23
2.2. Technologie pierres sèches	24
2.2.1. Phase de construction	24
2.2.2. Phase d'entretien	29
2.2.3. Phase de restauration	29
2.2.4. Coût global	30
2.3. Technologie gabion	30
2.3.1. Phase de construction	30
2.3.2. Phases d'entretien et de restauration	33
2.3.3. Coût global	34
2.4. Technologie béton	34
2.4.1. Les déboursés secs matériaux	34
2.4.2. Les déboursés secs main d'œuvre	35
2.4.3. Les déboursés secs matériels/consommables	36
2.4.4. Coût de l'entretien et de la destruction	37
2.4.5. Coût global	37



3. Ecobilan	38
3.1. Principe	38
3.1.1. Coût global	38
3.1.2. Evaluations partielles	38
3.2. Technologie pierres sèches	39
3.2.1. Obtention et élimination du matériau utilisé	39
3.2.2. Transport	39
3.2.3. Fabrication du mur	40
3.2.4. Entretien du mur	41
3.2.5. Bilan	41
3.3. Technologie gabion	42
3.3.1. Obtention et élimination du matériau utilisé	42
3.3.2. Transport	43
3.3.3. Fabrication du mur	44
3.3.4. Entretien du mur	45
3.3.5. Bilan	45
3.4. Technologie béton	47
3.4.1. Obtention et élimination des matériaux utilisés	47
3.4.2. Transport	48
3.4.3. Construction du mur	49
3.4.4. Entretien du mur	50
3.4.5. Démolition du mur	50
4. Synthèse comparative	51
Conclusion	54
Annexes	55
Table des figures	56
Bibliographie	57



Résumé

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

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

Abstract

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

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



Introduction

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

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

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

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



1. Murs de soutènement des terres

1.1.Présentation générale

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

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

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

Les différentes techniques de soutènement sont les suivantes :

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

Nous détaillerons dans la suite trois technologies de construction de murs de soutènement qui sont celles sur lesquelles la comparaison va s'effectuer dans la suite de l'étude : les murs en pierre sèche, les murs en gabion et, enfin, les murs en béton. La première technologie que nous allons aborder est la technologie des murs en pierre sèche.

1.2.Murs de soutènement en pierres sèches

Les techniques de construction des murs de soutènement en pierres sèches sont universelles : bien que quasiment absentes de toute littérature, on les retrouve aux quatre coins de la planète (France, Japon, Portugal...). Ces murs présentent a priori l'avantage de répondre parfaitement à toutes les exigences techniques et environnementales. A l'épreuve du temps, ils peuvent être construits avec des pierres de tout type, ce qui permet dans la plupart des cas d'utiliser des matériaux « in situ ». Cet approvisionnement local en matières premières, allié à une technique facile à mettre en œuvre permet une construction respectueuse de l'environnement, sur tout type de terrains.



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

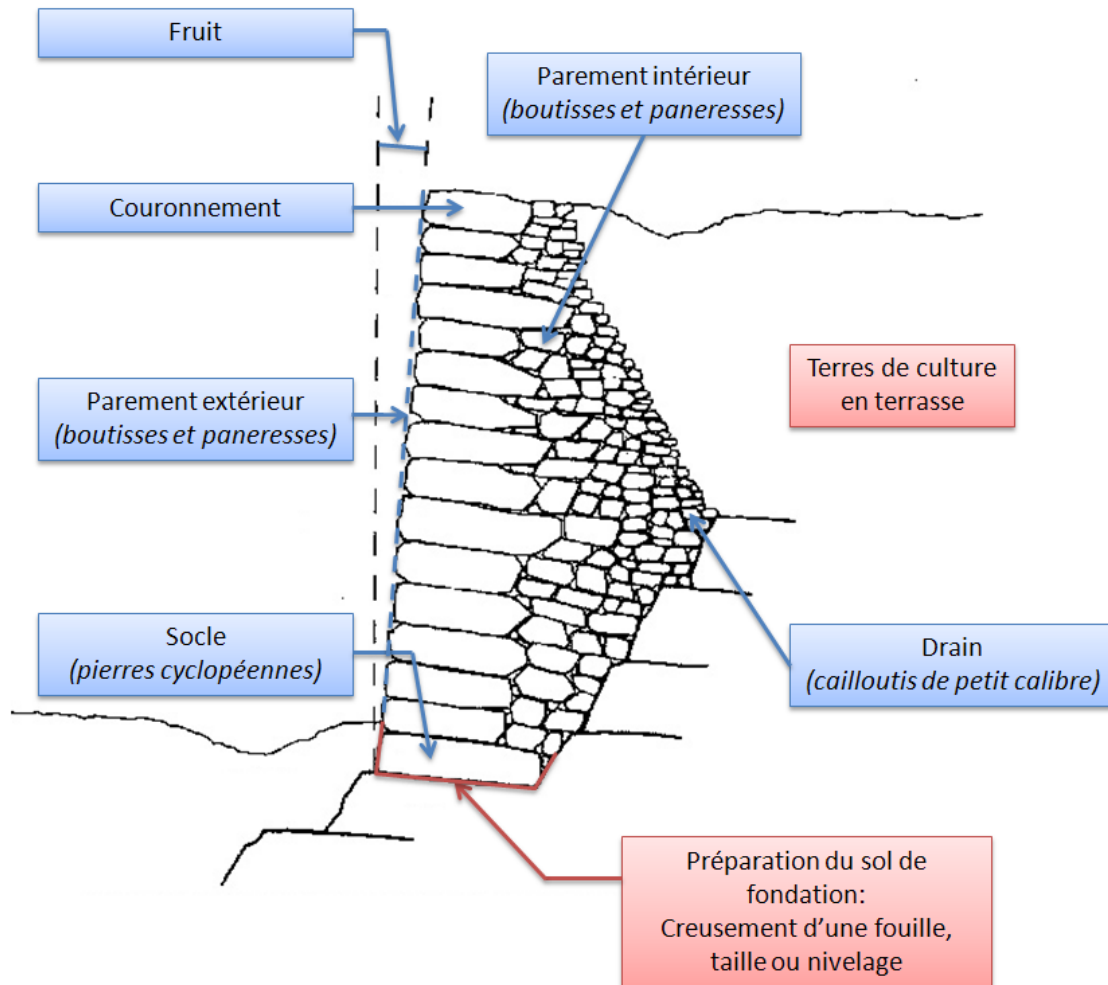


Figure 1: Structure d'un mur de soutènement en pierre sèche - Vue en coupe

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

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

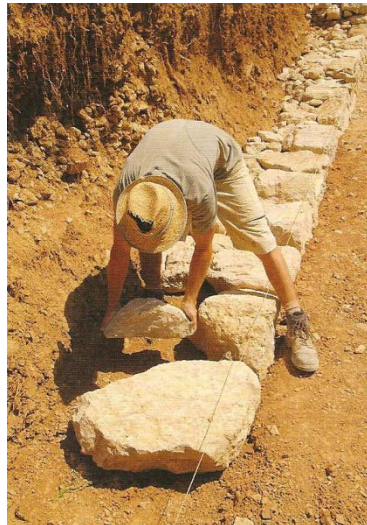


Figure 2: Pose des pierres de socle

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

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

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

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

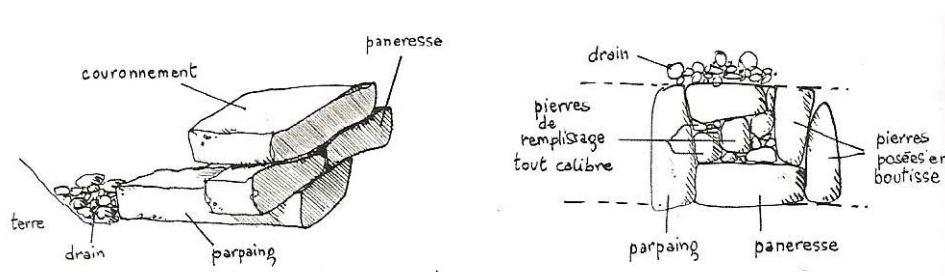


Figure 3: Désignation des pierres de bâti: perspective et coupe horizontale



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



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

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



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



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

1.2.2.1. Le fruit du parement

Les murs poids sont des ouvrages qui s'opposent à la poussée des terres, poussée qui augmente avec la profondeur. Le mur a besoin de s'épaissir à mesure que l'on se rapproche de sa base. Il possède donc en général un fruit : c'est à dire une inclinaison du mur par rapport à la verticale. Cependant, cela ne signifie pas que la valeur du fruit est forcément imposée par la qualité de la terre retenue ou par la hauteur du mur. En effet, lors de la conception du mur, il est possible d'imposer une valeur de fruit, qui peut être nulle. Connaissant la nature du sol retenu et des pierres constitutives du mur, l'angle formé par le remblai à soutenir et la hauteur du mur à réaliser, l'artisan est alors en mesure de calculer la profondeur de la base du mur grâce à des abaques. Ces abaques références ont été établis de façon collégiale par les artisans de la pierre sèche et normalisés dans l'ouvrage « Pierre sèche, guide de bonnes pratiques de construction de murs de soutènement » publié en 2008.

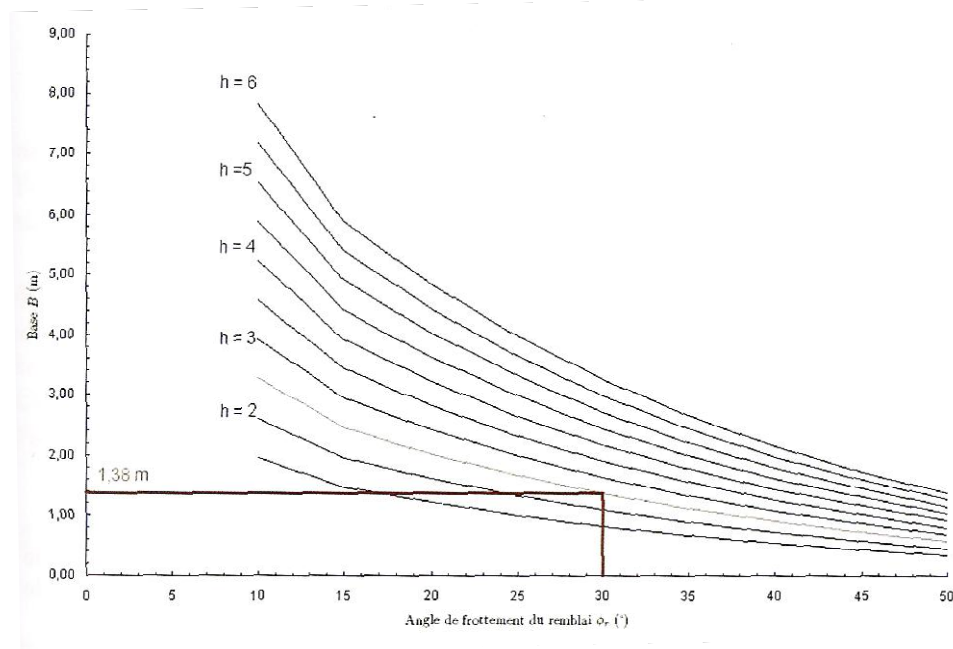


Figure 6: Détermination de la profondeur à donner à la base d'un mur en schiste de 2,5 m de hauteur avec un fruit de 10% soutenant un remblai de sable incliné à 10°

1.2.2.2. La préparation du sol

La fondation d'un mur assure une double mission :

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

La préparation de l'assise d'un mur de soutènement est donc fondamentale pour répondre aux contraintes auxquelles cet ouvrage va être confronté ; il est impératif que le support sur lequel l'ouvrage va reposer soit de bonne tenue. Selon l'environnement géologique, le mur peut reposer



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

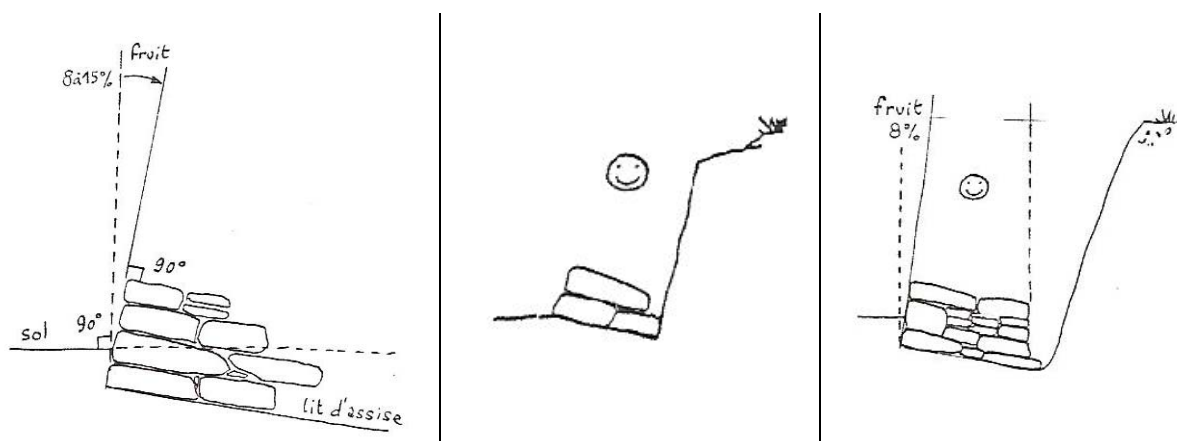


Figure 7: Inclinaison des lits perpendiculaire au fruit (à gauche); Fondation sur support rocheux (au centre); Fondation sur sol dur ou meuble (à droite)

1.2.2.3. Le croisement des pierres

Dans l'arrière bâti, l'artisan s'efforce de réaliser un maillage en trois dimensions, un croisement des pierres afin d'assurer l'unité et la stabilité de la structure (voir figure 1.3). Ce « tricotage » est assuré en disposant en angle droit les boutisses et les panneresses. L'artisan place également des petites pierres qui serviront de cales, sur lesquelles viennent s'appuyer dans le sens de la poussée des terres les pierres de taille importante. En outre, l'artisan veille à ce que, d'un lit de pierres à l'autre, les joints ne s'alignent pas verticalement. En croisant et décalant les joints, le murailleur forme la troisième dimension du maillage qui permet par exemple d'éviter l'apparition de « coups de sabre », c'est-à-dire de ruptures du mur du fait de la juxtaposition de plusieurs éléments de bâtisse non solidaires les uns des autres soumis aux poussées et pressions.

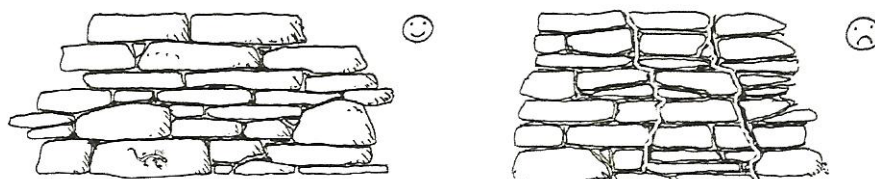


Figure 8: Règle de croisement des joints: privilégier les jointures décalées (à gauche) pour éviter les coups de sabre (à droite)



Lorsque le murailleur (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 à 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 : c'est au murailleur, fort de son expérience, que revient ce choix parfois délicat.

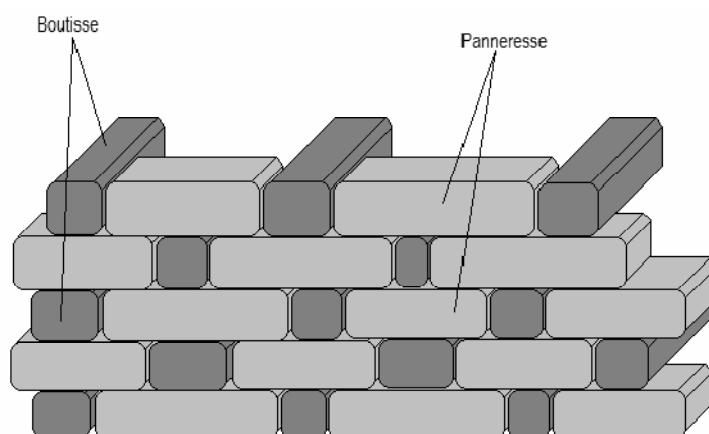


Figure 9: Croisement des pierres dans un maillage 3D, vue en perspective

1.2.3. Outillage nécessaire à la construction

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

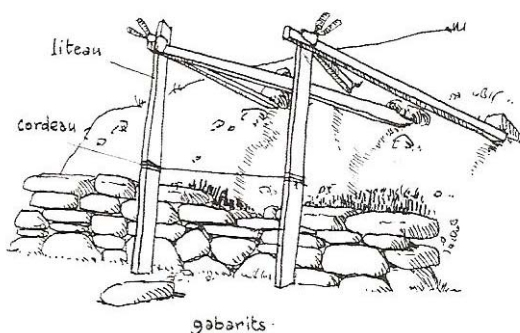


Figure 10: Gabarits et cordeaux



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.



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

1.2.4. 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 une place donnée dans le mur. Cette capacité (qui vient avec l'expérience) lui permet de gagner du temps et de se préserver physiquement, en évitant de déplacer inutilement des pierres souvent lourdes. Un artisan porte environ 4 tonnes de pierres par jour : un manque d'expérience peut donc rapidement ralentir l'avancement du chantier, et nuire à la santé de l'artisan.

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

1.3.Murs de soutènement en gabions

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



1.3.1. Réalisation d'un mur de soutènement en gabions



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

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

Il existe deux types de grillage de gabions :

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

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



Figure 13: Gabions à double torsion



Figure 14: Gabions électrosoudés



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

Le remplissage des gabions peut être réalisé selon deux techniques :

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

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

Pour plus d'esthétisme, les gabions peuvent être arrangés à la main, afin de donner une mise en place plus uniforme du mur.

L'assemblage des panneaux est réalisé à l'aide d'une agrafeuse pneumatique, qui permet d'attacher les gabions entre eux grâce à des agrafes en acier.

Pour plus de stabilité, des tirants de renfort, tiges d'acier aux extrémités recourbées, sont placés diagonalement entre les différentes faces de la cage. Quatre tirants sont placés à $\frac{1}{3}$ de la hauteur et quatre autres sur le $\frac{1}{3}$ suivant.

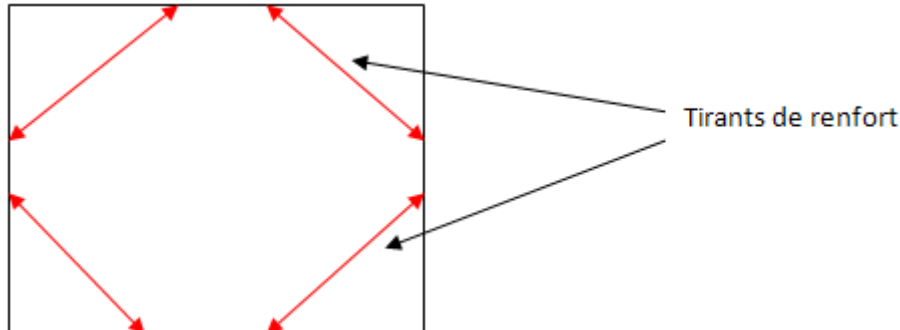


Figure 15: Vue de dessus d'un gabion



Figure 16: Agrafes entre les différents panneaux



Figure 17: Tirants de renfort



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

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

1.3.2. Outillages nécessaires à la construction

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

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



Figure 18: Tractopelle remplissant les gabions



Figure 19: Barres d'alignement



Figure 20: Agrafeuse pneumatique

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

1.4. Murs de soutènement en béton

1.4.1. Murs bétons en L

1.4.1.1. Les fondations

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

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

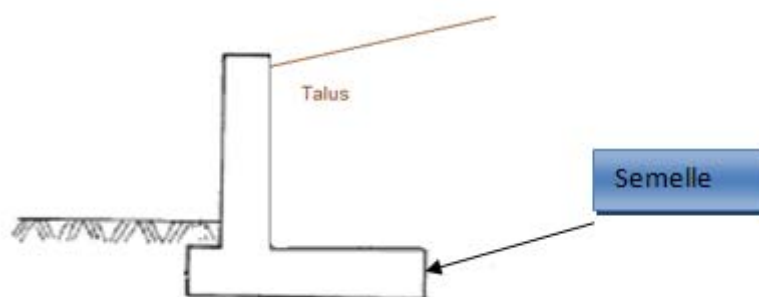


Figure 21: Coupe d'un mur en L

1.4.1.2. La structure en béton armé

Les murs de soutènement en béton armé, également appelés murs cantilever, sont très couramment employés. Ils sont constitués d'un voile en béton armé encastré sur une semelle de fondation, en béton armé également et généralement horizontale. Celle-ci comprend le patin, situé à l'avant du voile, et le talon, situé à l'arrière. La semelle peut être pourvue d'une bêche pour



améliorer la stabilité de l'ouvrage au glissement. C'est le cas notamment lorsque la bonne résistance du sol de fondation et/ou des problèmes d'emprise permettent ou imposent une semelle de largeur plus faible.

Les murs de soutènement en béton armé sont normalement pourvus d'un dispositif de drainage à l'arrière du voile auquel est associé un 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). L'eau constitue un véritable danger pour la stabilité de l'ouvrage. L'évacuer est donc une priorité.

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

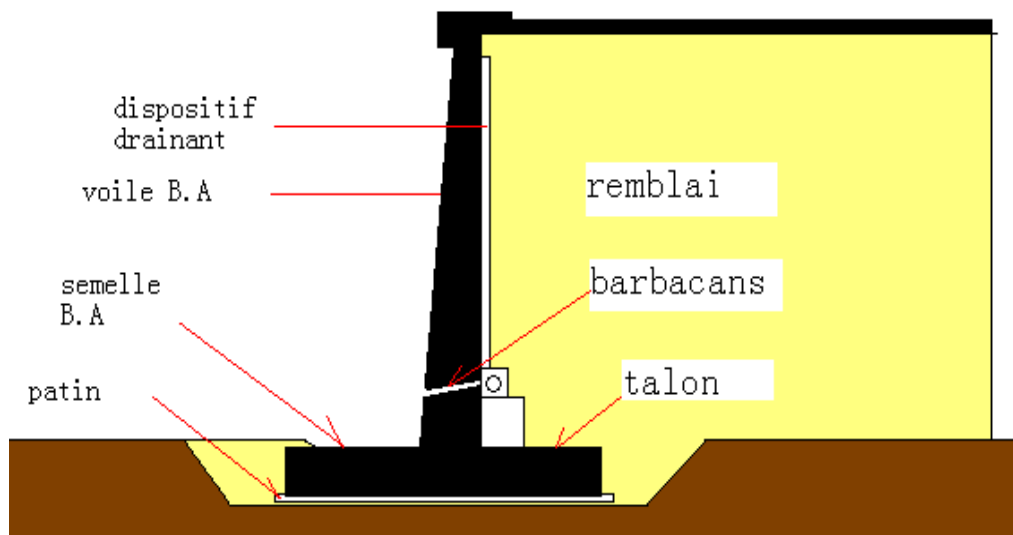


Figure 22: Eléments d'un mur en L

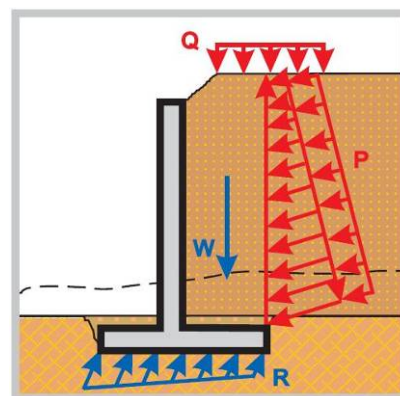


Figure 23: Fonctionnement d'un mur en en béton encastré sur semelle; P: poussée des terres du massif soutenu; W: poids des terres à l'aplomb de la semelle ;
R : réaction du massif d'assise



1.4.1.3. Le rôle des armatures en acier

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

1.4.2. Murs cloués en béton

1.4.2.1. Définition

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

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

De nos jours c'est une technique extrêmement répandue car le comportement des ouvrages est satisfaisant et le coût de la mise en œuvre est inférieur à celui des murs en L pour la même hauteur de mur.



Figure 24: Exemple de mur cloué

1.4.2.2. Les différentes phases de la fabrication

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

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 subhorizontaux ou inclinés au sein du sol.



3. La réalisation d'un 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.

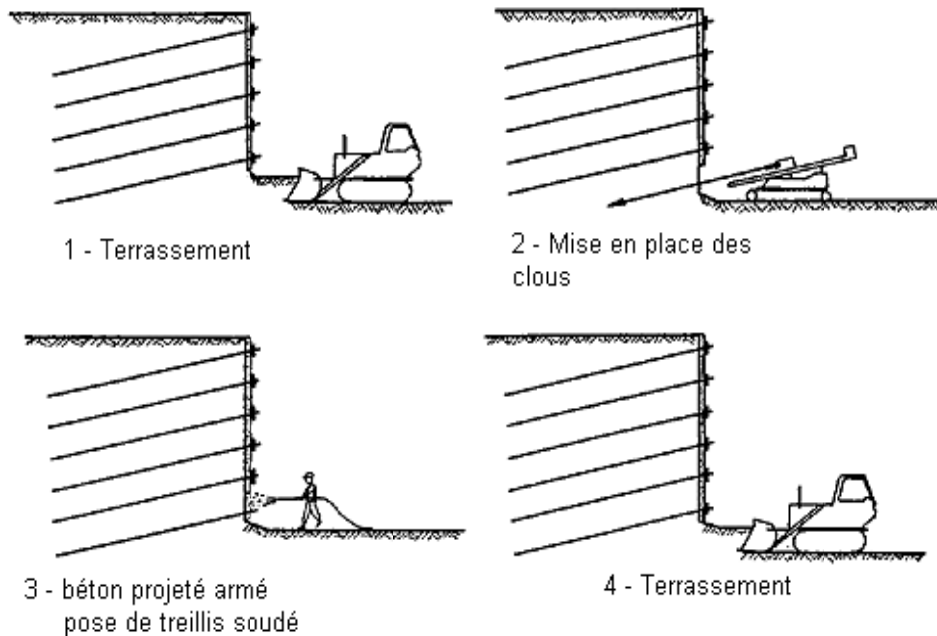


Figure 25: Phases de construction d'un mur cloué

1.4.2.3. *Éléments d'un mur cloué*

Les clous : les dimensions et la densité des barres dans un sol sont fonction des charges à supporter et de la qualité du sol. Pour un sol cohérent, on pourra utiliser un clouage peu dense, ce qui ne sera pas le cas pour un sol pulvérulent. Ici nous considérerons le sol cohérent. Nous prendrons donc 1 clou ($\varnothing=6\text{cm}$, $L=6\text{m}$) pour $2,25 \text{ m}^2$ de mur. La technique de renforcement des sols en place, grâce à laquelle l'ouvrage en sol cloué est réalisé en déblai, se fait par passes descendants successives. Il existe plusieurs méthodes : soit par scellement au coulis de ciment ou au mortier dans un forage préalable, soit par battage ou vibrofonçage.

Les armatures sont en acier.

Le parement, dans le cas du béton projeté armé, a une épaisseur calculée qui est principalement fonction du maillage adopté pour la mise en place des barres. Dans notre situation, nous avons une épaisseur de 20 cm de béton projeté.

Le treillis, qui est dans la couche de béton projeté, a un standard de 10 kg de treillis soudé par m^2 dans notre cas.



Figure 26: Mise en place des treillis soudés

Les barbicanes : Elles servent à évacuer toute infiltration d'eau



Figure 27: Mise en place du parement en béton par projection

1.4.2.4. Les machines et les outils utilisés

Lors de la phase de terrassement, on utilise **des excavateurs** pour le déplacement du sol et pour renforcer le terrain.

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 de désagrégation (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 et d'un canon pyrotechnique.



Figure 28: Forage du sol avant introduction des clous



Une **machine à projeter** permet de réaliser la projection du béton.

1.5. Notion d'ouvrage élémentaire

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

Un ouvrage élémentaire (O.E.) est une partie spécifique d'un ouvrage. Chaque O.E. est une portion de l'ouvrage qui exige de la main d'œuvre, des matériaux et du matériel qui lui sont propres et qui produit également un impact sur l'environnement. Pour l'étude des murs, c'est un mètre linéaire de mur pour différentes hauteurs qui a été choisi comme O.E.

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

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

Tableau 1: Définition des ouvrages élémentaires

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

2. Analyse financière

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

2.1. Principe

2.1.1. Principe de l'étude de prix

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

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



2.1.1.1. Déboursés secs (D.S)

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

- Le coût des **matériaux** : il dépend de la quantité de matériaux et de 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.
- 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 sera fonction de l'amortissement qu'il faudra déterminer.

2.1.1.2. Frais de chantier (F.C.)

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

2.1.1.3. Frais généraux (F.G.)

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

2.1.1.4. Frais spéciaux (F.S.)

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

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

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

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

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

2.1.2. Application aux technologies étudiées

Cette étude de prix détaille tous les coûts et frais qui rentrent en jeu lors de la construction d'un ouvrage. Cependant, de nombreux paramètres entrant dans la constitution de ces coûts ne sont pas accessibles pour des personnes qui n'appartiennent aux entreprises de construction. Nous avons donc, en fonction des technologies, adapté cette étude de prix aux données fournies.

Par ailleurs, 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.

2.2. Technologie pierres sèches

2.2.1. Phase de construction

Nous avons pu recueillir auprès de deux artisans (Marc Dombre et Bruno Durand) des devis concernant des chantiers de construction ou de restauration de murs en pierres sèches. Parmi les prix des devis, une distinction a été réalisée entre le prix des matériaux et le prix horaire de la main d'œuvre. Ce prix horaire correspond en fait à la globalité des frais autres que les déboursés secs pour les matériaux. Il permet d'une part à l'artisan de rémunérer ses ouvriers s'il en a mais également d'assurer le bon fonctionnement de son entreprise.

2.2.1.1. Coût des matériaux

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. Lorsque la masse volumique des pierres est supérieure ou égale à 2300 kg/m³, le matériau candidat peut être utilisé pour la construction. Il s'agit donc de pierres de type moyennement dures à très dures. 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 peut être ramassées aux alentours du chantier, par exemple dans les champs : cette technique est nommée épierage. Cependant, la qualité des pierres récupérées peut ne pas être comparable à celles obtenue dans des carrières et les pierres de récupérations ne représentent qu'une partie des pierres utilisées (rarement plus de 30%). Cette réutilisation de matériau sera considérée dans la suite du rapport lorsque nous aborderons les phases d'entretien et de restauration du mur en pierre sèche.

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. Il a ainsi été montré que les pierres utilisées devaient provenir d'une carrière située au maximum à 40 km du chantier. Au delà, le choix de la technologie pierre sèche était écarté. Cette hypothèse nous a été confirmée par plusieurs artisans (Marc DOMBRE et Bruno DURAND) qui ont pu constater une distance moyenne carrière/chantier de 40 à 50 km.

Après avoir répertorié les matériaux qui étaient susceptibles d'être utilisés pour la construction, une phase de recherche des prix (matière première en sortie de carrière) auprès des artisans eux mêmes a permis d'accéder aux résultats suivants, répertoriés dans les deux tableaux ci-dessous :



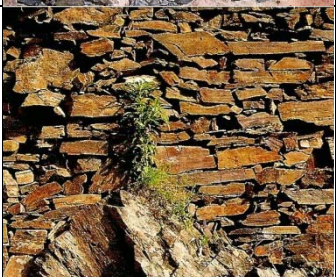
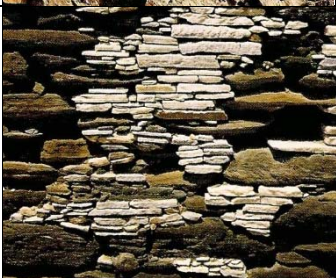
	Origine	Forme	Présence géographique	Densité	Aspect
Calcaire	Sédimentaire	Dépôt stratifié, forme parallélépipédique	Sur tout le territoire	2,6 à 2,7	
Grès		Dépôt stratifié, forme arrondie		1,8 à 3,2	
Granite	Magmatique	Pierres sans strates, plus ou moins arrondies avec l'érosion	Bretagne, Massif Central, Vosges, Alpes et Pyrénées	2,4 à 2,8	
Basalte				2,7 à 3,2	
Schiste	Métamorphique	Pierres allongées se débitant facilement en feuillets	Anciennes zones montagneuses	1,6 à 2,9	
Gneiss		Formes diverses		2,7 à 2,8	

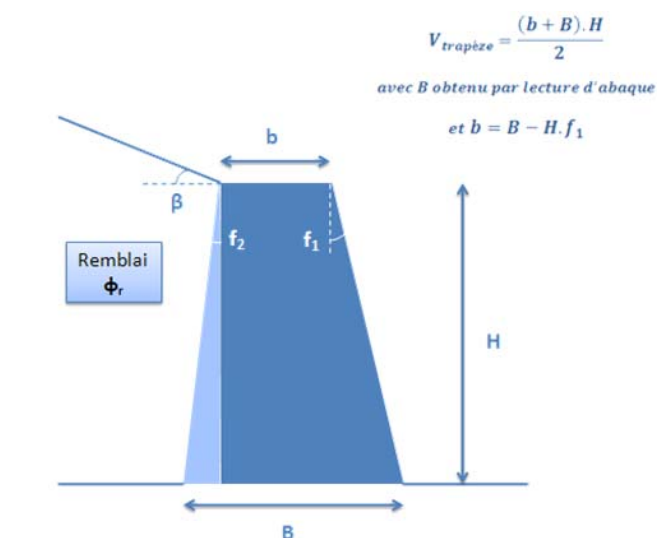
Tableau 2: Caractéristiques générales des pierres sèches les plus couramment utilisées.



	Prix unitaire (€/m ³)
Schiste	55
Calcaire	36
Granite	60

Tableau 3: Prix unitaires (€/m³) des pierres sèches les plus couramment utilisées.

Une fois connus les prix unitaires des matières premières, il nous faut, pour déterminer la valeur des déboursés secs pour chaque O.E., déterminer le volume de pierre nécessaire à la construction de chacun de ces ouvrages. Pour cela, nous avons considéré les recommandations de dimensionnement fournies par les abaques de l'ouvrage « Pierre sèche, guide de bonnes pratiques de construction de murs de soutènement ». Nous avons également considéré que le mur construit est réalisé à base de pierres calcaires, présente un fruit de 20% et soutient un remblai de sable formant un angle de 20° avec l'horizontale. La lecture des abaques nous donne, à partir de la connaissance de ces données la valeur de la profondeur de la base B nécessaire au calcul du volume de pierres. On remarquera que l'on considérera que le pourcentage de vide dans le mur est d'environ 25%. Le principe des calculs effectués est résumé dans la figure suivante.



$\phi_{r(sable)}$	30°	
$\beta_{remblai}$	20°	
f_1	20%	Fruit aval f_1: tangente de l'angle formé par le parement extérieur du mur et la verticale, en pourcentage.
f_2	0%	Fruit aval f_2: tangente de l'angle formé par le parement intérieur du mur et la verticale, en pourcentage.
% de vides	25%	
$\rho_{calcaire}$	2650	kg/m ³

Hauteur H (m)	Base B (m)	Base b (m)	$V_{trapèze}$ (m ³)	V_{pierre} (m ³)	m_{pierre} (kg)
1	0,55	0,35	0,45	0,34	894,38
3	1,68	1,08	4,14	3,11	8228,25
5	2,72	1,72	11,10	8,33	22061,25

Figure 29: Principe du calcul des volumes de pierres.



Il faut noter ici que le prix des cailloutis constituant le drain à l'arrière du mur n'a pas été pris en compte. Les artisans s'arrangent, la plupart du temps pour récupérer ces pierres de petit calibre sur le site du chantier, n'engendrant ainsi aucun coût supplémentaire. En effet, le prix d'achat de ce type de pierres, qui nécessite un concassage après extraction en carrière est plus élevé que celui des pierres dites « en vrac » utilisée pour le bâti du mur : c'est pourquoi les artisans favorise dans ce cas la récupération.

Grâce aux valeurs de volume, il est donc facile d'obtenir le prix des pierres à la sortie de la carrière. Il reste encore à considérer pour obtenir la valeur des déboursés secs, le coût du transport carrière/chantier. Il s'agit donc, par exemple de déterminer un prix « rendu chantier » au m^3 , tenant compte à la fois du coût des pierres et du coût du transport. Pour une distance de parcours de 40 km, le forfait de transport pour 15 m^3 de pierres calcaires est de 500 €. Le prix unitaire rendu chantier peut donc se déterminer grâce à la formule suivante :

$$Prix_{rendu\ chantier} = \frac{15\ m^3 \times Prix_{pierres} + Forfait\ transport}{15\ m^3} = 69\ €/m^3$$

Ainsi la valeur des déboursés secs pour chaque O.E est de :

	Volume de pierres (m^3)	Déboursés secs (€)
O.E.1	0,34	23,5
O.E.2	3,11	214,6
O.E.3	8,33	574,8

Tableau 4: Technologie pierres sèches - Déboursés secs matériaux pour les différents ouvrages élémentaires.

2.2.1.2. Coût « horaire »

La valeur de ce coût horaire dépend de manière significative de l'entreprise, de ses frais de fonctionnement et du bénéfice qu'elle prévoit de gagner à la fin du chantier. L'artisan se fixe un salaire horaire dont la valeur doit permettre de couvrir ses revenus ainsi que l'ensemble des frais annexes propres à son entreprise (amortissement de machines, frais généraux). A partir des différents devis qui nous ont été fournis, nous avons pu déterminer des valeurs moyennes de ces coûts horaires, respectivement pour la phase de terrassement et la phase de montage du mur.

Phase de terrassement

Sur un chantier de mur en pierre sèche, le terrassement fait partie intégrante de la construction et c'est, dans la plupart des cas, l'artisan qui le réalise lui-même. Il faut noter que pour les artisans de la pierre sèche, la phase de terrassement comprend les étapes de déblaiement et de dressage du talus mais également les étapes de préparation du socle du mur, c'est-à-dire le creusement des fouilles dans lesquelles la base du mur viendra reposer.

Le coût et la durée du terrassement varient en fonction des conditions que présentent chaque site. Dans la plupart des cas, le terrassement est effectué à l'aide d'une mini-pelle. Dans certains cas où le terrassement peut se faire dans des conditions idéales, un tractopelle peut être utilisé. A l'inverse, dans des conditions plus difficiles (difficultés d'accès et/ou rencontre du rocher qui oblige à piquer le rocher pour dresser le talus), le terrassement est réalisé manuellement.



Les données que nous avons pu recueillir indiquent que le coût facturé par les artisans dans les deux cas est proche de 35 € / h. Cependant, le temps passé sur le chantier est bien plus important pour les sites présentant des conditions difficiles. Dans le cadre de notre étude, nous nous plaçons dans le cas d'un chantier réalisé à la mini-pelle dans des conditions faciles d'accès.

	Surface de parement	Durée moyenne de la phase de terrassement	Coût du terrassement
O.E.1	1 m ²	15 mn	9 €
O.E.2	3 m ²	50 mn	30 €
O.E.3	5 m ²	1h30	53,5 €

Tableau 5: Coûts du terrassement pour les différents ouvrages élémentaires.

On donne à titre indicatif les mêmes données pour un chantier réalisé dans des conditions difficiles.

	Surface de parement	Durée moyenne de la phase de terrassement	Coût du terrassement
O.E.1	1 m ²	2h30	88,5 €
O.E.2	3 m ²	7h00	248 €
O.E.3	5 m ²	11h30	407 €

Tableau 6: Coûts du terrassement pour les différents ouvrages élémentaires, pour des conditions de réalisation difficiles.

Phase de montage du mur

Une analyse des devis fournis par les artisans nous a permis d'établir la valeur moyenne du coût horaire pour la phase de montage du mur à environ 30€/heure.

La construction d'un mur en pierres sèches se fait en binôme : un spécialiste de la pierre sèche appelé bâtisseur ou murailleur, 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 sûr à les transporter si celles-ci sont très lourdes : il s'agit donc d'un véritable travail d'équipe. Or, pour déterminer la durée du chantier, il a fallu 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, murailleur 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, de bon sens, plus un mur est haut, plus il est difficilement accessible. A partir de 1m30 environ la mise en place d'un échafaudage est nécessaire. Cette opération augmente donc la durée du chantier. 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 :



	Masse de pierres nécessaires	Durée moyenne sur le chantier	Coût de montage du mur
O.E.1	0,8 t	3h30	105 €
O.E.2	8,2 t	35 h	1050 €
O.E.3	22,1 t	95 h	2850 €

Tableau 7: Coûts de montage des murs pour les différents ouvrages élémentaires.

2.2.2. Phase d'entretien

Il existe différents facteurs de dégradation des murs en pierres sèches : les charges et surcharges, les facteurs naturels tels que les intempéries, la faune et la flore ou le vieillissement, qui se traduit notamment par le colmatage par les fines des vides du mur. L'homme peut également être considéré comme un facteur de dégradation s'il ne suit pas les règles de l'art de la construction de l'ouvrage, ou bien s'il n'assure pas un bon entretien du mur.

Ces facteurs de dégradation sont à l'origine de pathologies, dont les plus connues sont :

- La désagrégation des pierres gélives ou trop friables,
- La détérioration par séparation du parement extérieur du reste du mur,
- Le basculement des pierres de parement vers l'intérieur du mur. Le parement se déforme alors sous forme de ventre, provoquant l'affaissement d'une partie de l'ouvrage.

Le respect de quelques précautions d'usage peut permettre de prévenir contre la ruine prématurée d'un ouvrage en pierre sèche :

- maîtriser la circulation des eaux de ruissellement et éviter la concentration de ravinement ;
- procéder à l'enlèvement et à la suppression de toute végétation arbustive sauvage poussant dans le mur et à moins de deux mètres des parois ;
- procéder à la restauration immédiate des parties de mur effondrées ou des pierres dégradées par le mauvais état du matériau ;
- si le mur présente des pathologies importantes, ne pas attendre que ce dernier s'effondre. Dès l'apparition d'un ventre, prévenir par le démontage et la réfection qui doit s'opérer dans les plus courts délais.

Si le mur a été construit suivant les règles de l'art de construction, ces précautions d'entretien sont très peu coûteuses, que ce soit en temps de travail ou en matériau. L'entretien est donc une phase dont le coût pourra être négligé par rapport au coût de fabrication de l'ouvrage.

2.2.3. Phase de restauration

L'avantage du mur en pierre sèche est qu'il peut être réparé au niveau des zones où il s'est affaibli. Une destruction totale du mur n'est pas obligatoire. La restauration d'un ouvrage reprend les mêmes étapes que la construction. Elle nécessite également une phase préliminaire qui consiste à définir la zone à restaurer et la façon de la restaurer. Il faut également démonter et trier les pierres de la zone à restaurer. Certaines ne pourront pas être réutilisées car elles seront trop abimées et auront perdu une partie de leur résistance. Les pierres qui se seront complètement désagrégées avec le temps pourront être réutilisées pour le drain.



Toutefois, si l'entretien du mur est effectué régulièrement et s'il a été bien construit, le mur n'a pas de raison de s'effondrer. Cette phase de restauration ne sera donc pas prise en compte dans le coût total du mur en pierres sèches.

2.2.4. Coût global

Ménageant certaines hypothèses et approximations, le coût global de chaque ouvrage élémentaire est calculé par somme des coûts liés à chaque étape de son cycle de vie :

	Coût global
O.E.1	140 €
O.E.2	1295 €
O.E.3	3480 €

Tableau 8: Coût global de chaque ouvrage élémentaire pour la technologie pierres sèches.

2.3. Technologie gabion

2.3.1. Phase de construction

Nous avons contacté Jérémie Saurel, Responsable Technique de l'entreprise Aquaterra Solutions, basée dans la Drôme et qui propose la réalisation de murs de soutènement en gabions. Nous avons ainsi pu recueillir des informations concernant les différents types de gabions proposés par cette société, ainsi que leurs prix. Nous sommes ensuite allés visiter un de leurs chantiers en cours, pour l'entreprise Sanofi Pasteur, à Marcy-l'Etoile. La maîtrise d'œuvre était assurée par la société MGB, basée à Mornant, au sud de Lyon.

2.3.1.1. Le terrassement

Pour la construction d'un mur de soutènement en gabions, un terrassement doit d'abord être réalisé. Celui-ci comprend la fouille du sol et son évacuation. Il est chiffré au mètre-cube, environ 7 €/m³. On considèrera ici un sol meuble. Une fois le mur monté, un remblai est nécessaire, dont le coût est de 15€/m³.

Le volume évacué et le volume du sol ne sont pas les mêmes, il faut tenir compte d'un coefficient de foisonnement du sol qui est fonction de sa nature et de son état d'humidité. Nous le prendrons égal à 1,3.



Calcul des volumes excavés et remblayés :

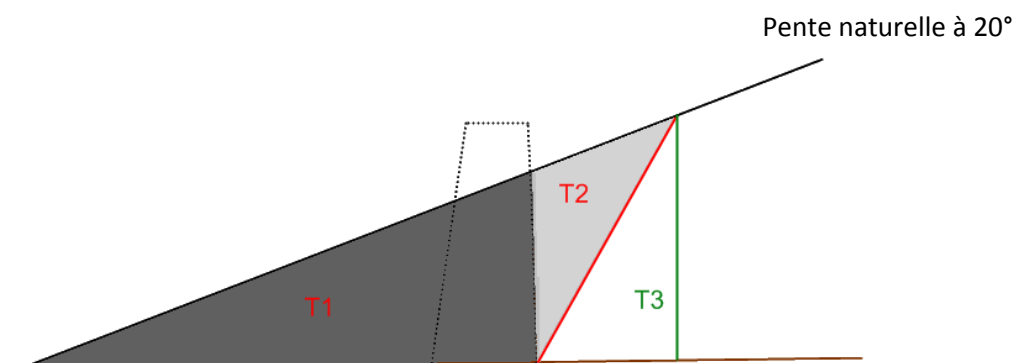


Figure 30 : Schéma du volume excavé – Murs PS et gabions

Les zones grisées correspondent à la surface à excaver. Le mur est représenté en pointillés. Le guide des bonnes pratiques indique le rapport hauteur/largeur du triangle T3 est de 3/2. Pour calculer la zone à excaver, nous allons donc retrancher la surface S_3 du triangle T3 à la surface des trois triangles, que l'on va appeler S_{tot} .

Soit h la hauteur du mur :

$$S_{tot} = 0,5 * h * \frac{h}{\tan(20^\circ)},$$

$$S_3 = 0,5 * h * \frac{2h}{3},$$

D'où

$$S_{excavée} = h^2 * \left(\frac{0,5}{\tan(20^\circ)} - \frac{1}{3} \right)$$

Pour obtenir le volume excavé, on multipliera tout simplement la surface excavée par 1, puisque notre ouvrage élémentaire fait un mètre de largeur, puis par 1,3, le coefficient de foisonnement.

Le volume à remblayer correspond à un triangle dont la hauteur est celle de notre ouvrage élémentaire et la base, celle du triangle T3, multiplié par le coefficient de foisonnement.

Le tableau suivant nous donne les coûts des terrassements et remblaiements pour les différents ouvrages élémentaires :

	Volume à excaver (m ³)	Coût du terrassement (€)	Volume à remblayer (m ³)	Coût du remblaiement (€)
O.E.1	1,35	9,5	0,43	6,5
O.E.2	12,17	85,2	3,9	58,5
O.E.3	33,81	230,0	10,83	162,5

Tableau 9: Terrassement nécessaire pour chaque ouvrage élémentaire - Technologie gabions

2.3.1.2. Coût des matériaux



Pour les murs de soutènement en gabions, les matériaux nécessaires sont les gabions en acier, les pierres, des agrafes permettant d'attacher les panneaux rigides entre eux, des tirants de renfort et du géotextile lors du terrassement. Aucun liant mécanique de type mortier ou ciment n'est utilisé.

L'un des intérêts majeurs de la technique des gabions, comme pour la construction en pierre sèche, est l'utilisation de matériaux pierreux pris localement, ce qui réduit considérablement le prix des transports et permet une meilleure intégration dans le paysage. De plus, ces structures sont relativement faciles à mettre en œuvre, souples, monolithiques et drainantes.

Parmi le choix de panneaux métalliques existants, nous avons opté pour des gabions électrosoudés, de taille 1 x 1 m, de maille 100 x 50 mm et de fils de diamètre 4,5mm. Ceux-ci correspondent à un modèle standard couramment utilisé. Concernant les pierres, il est important de signaler que le choix des pierres est conditionné par différents critères : la nature des pierres dans la région de construction et l'esthétisme final du mur. Par exemple, des murs de soutènement en gabions ont été construits, dans la région Lyonnaise, avec des pierres dorées, qui sont du calcaire de couleur ocre. Ici, afin de comparer au mieux les différentes technologies, nous avons choisi, comme pour les pierres sèches, un matériau calcaire, de taille minimale 60 x 100mm pour qu'ils ne passent pas au travers des mailles. Les hypothèses de transport sont donc identiques et le prix unitaire de ces pierres est donc de 69 €/m³. Cependant les pierres pour les gabions n'ont pas besoin d'être d'aussi bonne qualité que pour les pierres sèches ; leur prix est donc sensiblement inférieur.

Une fois les coûts des matières premières connus, il nous faut déterminer le volume de pierres nécessaire à la construction de chacun des ouvrages élémentaires. Ici encore, le principe de calcul des volumes de pierres reste identique à celui de la technique des murs en pierres sèches. Nous reprenons alors un mur présentant un fruit de 20% et soutenant un remblai de sable qui forme un angle de 20° avec l'horizontale ; le pourcentage de vides est pris égal à 25%. Le volume de mur, ainsi que la masse de pierres nécessaires, sont résumés dans le tableau ci-dessous :

	Hauteur H (m)	V _{trapèze} (m ³)	V _{pierres} (m ³)	m _{pierres} (kg)
O.E.1	1	0,45	0,34	894,38
O.E.2	3	4,14	3,11	8 228,25
O.E.3	5	11,10	8,33	22 061,25

Tableau 10: Technologie gabion - Volumes de gabions nécessaires

Il est maintenant facile d'obtenir le prix des gabions métalliques. Nous présentons le coût de revient pour deux cas : soit les gabions sont placés visuellement dans un souci d'esthétisme, soit ils sont disposés en vrac, cette deuxième solution entraînant une moins-value de 40%. Les prix sont donnés en mètre-cube et correspondent à l'amenée à pied d'œuvre, l'assemblage des gabions, le remplissage, l'arrangement manuel des pierres et la fermeture des gabions. Le prix du géotextile est donc à ajouter, soit 3€/m². La surface de géotextile nécessaire correspond à la hauteur de l'ouvrage élémentaire, multipliée par la largeur de l'ouvrage, soit 1m.



Ainsi le coût des matériaux, ainsi que la pose pour chaque O.E est de :

	$V_{\text{trapèze}}$ (m ³)	Prix et pose en vrac (€)	Prix et pose esthétique (€)	Prix des pierres (€)	Prix du géotextile (€)	Coût de la pose en vrac (€)	Coût de la pose réarrangée (€)
O.E.1	0,45	54,7	91,2	23,5	3,0	75	109
O.E.2	4,14	377,6	629,3	214,6	9,0	549	773
O.E.3	11,10	1 012,3	1 687,2	574,8	15,0	1 462	2 065

Tableau 11: Coût de l'installation pour les différents ouvrages élémentaires

2.3.1.3. Coût horaire

La valeur de ce coût horaire dépend de l'entreprise, de ses frais de fonctionnement et de la qualification de l'ouvrier. Nous avons choisi comme valeur du coût horaire, celle d'un ouvrier du bâtiment, charges comprises ; soit 24€ (valeur SHOP Insee 2008).

Le nombre d'ouvriers pour la construction d'un mur en gabions dépend de la taille du mur et du délai du chantier, mais en général, l'équipe est composée d'un conducteur d'engin qui est souvent le chef de chantier et qui dépose à l'aide de la pelle les pierres dans les gabions, et un ou plusieurs ouvriers « classiques » qui arrangent les pierres. Le rendement d'un homme, en considérant qu'une journée de travail est de 8 heures, est d'environ 15 m³/jour pour une disposition en vrac des pierres, et plutôt de 10 m³/jour, pour une disposition réarrangée.

	Volume du mur (m ³)	Durée de réalisation sur le chantier pour un homme - disposition en vrac	Durée de réalisation sur le chantier pour un homme – disposition réarrangée	Déboursés secs main d'œuvre - disposition en vrac (€)	Déboursés secs main d'œuvre – disposition réarrangée (€)
O.E.1	0,45	15 min	22 min	6	8,8
O.E.2	4,14	2h 10min	3h 20min	52	80
O.E.3	11,10	5h 50min	8h 50min	140	212

Tableau 12: Déboursés secs main d'œuvre pour les différents ouvrages élémentaires : technologie gabions.

2.3.2. Phases d'entretien et de restauration

Ce type de mur ne nécessite pas d'entretien particulier. C'est un ouvrage monolithique drainant, qui est intéressant dans les milieux humides. Les fils d'acier peuvent être protégés en les galvanisant ou en utilisant des films de protection particulier, comme le GalFan pour la société Aquaterra, ce qui permet d'augmenter la durée de vie du gabion de 6 à 8 fois.

Il faut environ 50 ans au moins avant l'apparition d'un point de rouille. Cependant, ce n'est pas pour cela que le mur va rompre. Si le gabion est complètement rouillé, le remplacement d'un panneau est facile à mettre en œuvre. Il peut être aussi ajouté, selon l'humidité du milieu, du PVC par-dessus le fil métallique pour éviter la rouille. Ce traitement est cependant beaucoup plus cher.



L'entretien et la restauration sont donc des phases dont le coût pourra être négligé par rapport au coût de fabrication de l'ouvrage.

2.3.3. Coût global

En considérant certaines hypothèses et approximations, le coût global de chaque ouvrage élémentaire est calculé par la somme des coûts liés à chaque étape de son cycle de vie :

	Coût global disposition en vrac (€)	Coût global disposition réarrangée (€)
O.E.1	100	130
O.E.2	715	970
O.E.3	1 880	2 670

Tableau 13: Coût global de chaque ouvrage élémentaire pour la technologie gabions

2.4. Technologie béton

2.4.1. Les déboursés secs matériaux

Le calcul du coût des déboursés secs lors de la mise en place d'un mur de soutènement prend en compte le coût du béton, celui des aciers ainsi que les particularités propre à chaque technologie en fonction de la hauteur du mur (en L pour h=1m et h=3m et cloué pour h=5m).

Cas du Mur en L (O.E.1 et O.E.2):

Les éléments à prendre en compte pour faire le béton armé sont :

- Volume de béton = $0,8 \times h$
Prix (Béton livré) : 100 € / m³
- Treillis soudés : 100kg/m³
Prix : 2 € / kg
- Coffrage (bois): 45 € / m²

	Volume béton nécessaire (m ³)	Masse d'acier nécessaire (kg)	Surface à coffrer (m ²)	Cout total (€)
O.E. 1	0,8	80	1	285
O.E. 2	2,4	240	3	855

Tableau 14: Technologie béton - Volumes de béton nécessaires (O.E.1 et O.E.2)

Cas du Mur Cloué (O.E.3):

Les éléments à prendre en compte sont :



- Béton projeté (épaisseur de 20 cm) soit un volume de $5 \times 0,2 = 1 \text{ m}^3$
Prix : 200 € / m^3
- Clou ($\varnothing = 6\text{cm}$, $L = 6\text{m}$)
1 clou par $2,25\text{m}^2$ de mur (on considère un clouage peu dense pour un sol cohérent)
Prix : 70 € l'unité
- Treillis soudés : $10\text{kg} / \text{m}^2$
Prix : 2 € / kg

	Volume béton nécessaire (m^3)	Masse d'acier nécessaire (kg)	Nombre de clous	Cout total (€)
O.E. 3	1	50	2	440

Tableau 15: Technologie béton - Volume de béton nécessaire (O.E.3)

2.4.2. Les déboursés secs main d'œuvre

La méthode de calcul du déboursé sec main d'œuvre consiste à déterminer le coût moyen d'un ouvrier pour la construction d'un ouvrage élémentaire défini. Pour faire cela, il a fallu estimer le temps qu'un ouvrier mettrait pour bâtir un ouvrage élémentaire pour les deux types de technologie de construction en béton. Ces temps sont des estimations de conducteurs de travaux de soutènement.

De fait, la technologie béton repose sur une équipe conséquente en nombre de personnes sur le chantier ce qui constitue une incertitude quant à l'estimation du nombre de personnes affectées à la mise en place de l'ouvrage. Nous estimerons à 4 le nombre de personnes travaillant uniquement à la mise en place de l'ouvrage.

Chaque phase de la mise en place de l'ouvrage est quantifiée en nombre d'heure. Ce chiffrage peut être influencé par le rendement des ouvriers ce qui le rend approximatif.

	Temps estimé de mise en place d'une semelle (h)	Temps estimé de mise en place des treillis et du coffrage si nécessaire (h)	Temps estimé de mise en place du béton par coulage ou projection (h)	Temps estimé de mise en place des clous (h)	Total (h)	Cout total
O.E. 1	4	3	1	0	8	768 €
O.E. 2	10	9	3	0	22	2112 €
O.E. 3	0	15	5	12	32	3072 €

Tableau 16: Calcul du coût salarial pour chaque ouvrage élémentaire

Les déboursés secs main d'œuvre ont été calculés en prenant 24€ (valeur SHOB Insee 2008) comme valeur du coût horaire d'un ouvrier du bâtiment, charges comprises.



2.4.3. Les déboursés secs matériels/consommables

Le calcul des déboursés secs matériels et de consommables chiffre l'ensemble des coûts et des besoins d'utilisation en outillage et engins mécanique. Pour ce faire nous avons procédé à un listing de tous les outils nécessaires à la construction d'un ouvrage élémentaire et de défini leur coût. Afin de simplifier l'étude on considèrera qu'un certain nombre d'outil nécessaire appartiennent à l'entreprise et sont amortis.

- Terrassement :

Le terrassement comprend la fouille du sol et son évacuation. Il est chiffré au mètre cube évacué (environ 15 euros/m³). On considèrera ici un sol meuble. S'il y avait eu à considérer la présence de roches à briser, il aurait fallu prendre en compte la location d'un brise-roche (environ 300 euros de l'heure). Ici aussi on prend en compte un coefficient de foisonnement de 1,3.

	Volume à excaver (m ³)	Coût (euros)
O.E. 1	1,3	20
O.E. 2	12,2	183
O.E. 3	33,8	507

Tableau 17: Technologie béton - Calcul du coût du terrassement

- Machines propres à la technologie béton et consommables

Les machines utilisées sont louées, en général, compte tenu de la rareté d'utilisation par une entreprise non spécialisée dans les murs de soutènement. Par ailleurs, leur coût à l'achat est difficile à estimer car il dépend des caractéristiques propres au sol du chantier. Le prix d'une machine de forage dépend des options souhaitées (vitesse de rotation, type d'embout) qui sont elles-mêmes fonction du sol. Le type de machine à projeter de béton est lui fonction de la granulométrie. Compte-tenu de la variabilité de ces données en fonction du chantier, la location semble plus appropriée.

Pour le mur en L de 3m, la mise en place du béton se fait grâce à une pompe à béton qui est la même machine qui sert à projeter le béton.

Le mur en L de 1m ne nécessite aucune machine pour être mis en place.

En ce qui concerne la consommation en carburant, il s'agit d'une conversion de la puissance des machines en litre de carburant consommé à l'heure (9kWh = 1 l/h). La puissance de ces machines est de 18 kWh.



Outil machine	Cout à la location journalière	Consommation Diesel (l/h)
Machine à pomper et à projeter le béton	50	2
Machine de forage pour mise en place des clous	200	2

	Coût (€ / l)
Carburant	1

Tableau 18: Technologie béton - Caractéristiques des machines

Le calcul du coût total prend donc en compte le coût de la location des machines en fonction du nombre de jours de location, et le coût de la consommation en carburant en fonction du nombre d'heures d'utilisation de chaque machine (cf. tableau 2).

	Durée de location de la machine à projeter (j)	Durée de location de la foreuse (j)	Consommation en carburant (l)	Cout total (euros)
O.E. 1	1	0	2	54
O.E. 2	1	0	6	62
O.E. 3	1	2	17	484

Tableau 19: Technologie béton - Calcul du coût des machines pour chaque ouvrage élémentaire

2.4.4. Coût de l'entretien et de la destruction

Pour un mur en béton bien réalisé, l'entretien concerne essentiellement le système de drainage. En effet on vérifie que les barbacanes ne sont pas obstruées. En ce qui concerne sa structure, elle doit fonctionner sans entretien pendant 50 ans. Cet entretien n'est pas chiffrable.

En ce qui concerne la destruction du mur de soutènement en vue d'une reconstruction, il s'agit d'une démolition partielle. En effet, même si le béton et les armatures sont détruits, les terres sont retenues par un système provisoire durant la durée des travaux. Ce système doit être dimensionné en prenant en compte les charges variables et permanentes c'est-à-dire le comportement du sol, son poids, les charges qui reposent sur le sol (voie routière etc.), les zones d'instabilité etc. L'absence de ces données rend donc une estimation du coût d'une démolition partielle impossible car il est extrêmement aléatoire d'un chantier à l'autre. Aussi, nous ne prendrons pas en compte l'entretien et la destruction dans le chiffrage global du mur de soutènement.

2.4.5. Coût global

Pour les murs de soutènement des terres en béton, il existe une phase préalable de dimensionnement, effectuée par un bureau d'étude. Ce n'est pas le cas pour les murs en pierre sèche



pour lesquels le dimensionnement est davantage une question d'expérience (cf. Partie pierres sèches).

	Cout total (euros)
O.E. 1	1130
O.E. 2	3210
O.E. 3	4500

Tableau 20: Technologie béton - Calcul du coût global du mur pour chaque ouvrage élémentaire

3. Ecobilan

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

3.1.Principe

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

3.1.1. Coût global

L'évaluation globale des impacts environnementaux d'un système est exprimée par l'intermédiaire **d'écopoints**. 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.

3.1.2. Evaluations partielles

Les évaluations partielles peuvent s'exprimer en quantité d'énergie ou bien en quantité d'émissions de gaz à effet de serre.

- **Energie grise:** L'énergie grise indique l'énergie cumulée de la consommation énergétique fossile, nucléaire et hydraulique. La charge environnementale due à l'énergie grise est comprise dans l'évaluation globale UBP. L'énergie grise est une valeur connue dans la construction, elle est indiquée séparément.



- **Effet de serre:** L'effet de serre évalue les effets de différents gaz à effet de serre par rapport à la substance principale qu'est le CO₂. La charge environnementale due à l'effet de serre est contenue dans l'évaluation globale UBP. L'évaluation partielle de l'effet de serre est un indice établi politiquement, raison pour laquelle il est mentionné séparément.

Un tableau, publié par l'association des maîtres d'ouvrage suisses KBOB et donné en annexe, contient ces évaluations pour différents matériaux, énergies et modes de transports.

Le système étudié est, pour chaque technologie, l'ouvrage élémentaire, tout au long de son cycle de vie. Tous les flux d'énergie et de matières, entrants et sortants du système sont pris en compte, pour chaque étape de la vie de l'ouvrage. Les données concernant les matériaux prennent en compte à la fois la fabrication du matériau et sa destruction. Les différentes étapes du cycle de vie de notre mur seront donc les suivantes :

- Fabrication du matériau
- Transport du matériau jusqu'au chantier
- Construction du mur
- Entretien du mur

3.2. Technologie pierres sèches

3.2.1. Obtention et élimination du matériau utilisé

Il n'existe pas de données concernant directement les pierres sèches dans le tableau de l'écobilan. Le matériau présent dans le tableau et se rapprochant le plus des pierres sèches est le gravier concassé. Un kilogramme de gravier correspond à l'impact environnemental suivant :

UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO _{2eq} (kg)
61,9	0,292	0,0132

Tableau 21 : Données Ecobilan – Gravier concassé

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

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

	Masse de pierres (kg)	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO _{2eq} (kg)
O.E.1	894,375	55362	261,158	11,805
O.E.2	8228,25	509329	2402,65	108,613
O.E.3	22061,25	1365591	6441,88	291,209

Tableau 22 : Impact environnemental du matériau selon l'O.E. pour PS

3.2.2. Transport

A partir des différentes informations que nous avons pu récupérer auprès des professionnels de la pierre sèche, une distance carrière-chantier de 40 km semble tout à fait raisonnable. Les



données choisies correspondent à un camion de 28 tonnes. C'est le moyen de transport plus largement utilisée pour ce type de matériau et ce type d'ouvrage. En supposant que le camion parcourt une distance chantier-carrière non chargé et une distance carrière-chantier chargé, cela revient à calculer l'impact environnemental du transport des pierres sur un aller plus la moitié d'un retour, donc sur 60 km.

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

UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
215	3,22	0,193

Tableau 23 : Données Ecobilan - Transport 28 tonnes

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

	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
O.E.1	11537	172,79	10,357
O.E.2	106144	1589,70	95,283
O.E.3	284590	4262,23	255,469

Tableau 24 : Impact environnemental du transport selon l'O.E. pour PS

3.2.3. Fabrication du mur

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

Les données 2009 de l'écobilan présentent dans la partie « transport de marchandises » des valeurs concernant les excavations mécaniques. Elles s'expriment en fonction du volume excavé (en m³).

UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
665	8,03	0,529

Tableau 25 : Données Ecobilan - Excavation

Les volumes excavés sont les mêmes pour les technologies gabions et pierres sèches. En se basant sur les calculs de volume établis au paragraphe 2.3.1.3, on peut donc établir l'impact environnemental de l'excavation. Le tableau suivant récapitule la valeur de cette impact pour les différents ouvrages élémentaires :

	Volume excavé (en m ³)	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
O.E.1	1,35	899	10,86	0,715
O.E.2	12,17	8095	97,75	6,439



O.E.3	33,81	22486	271,52	17,887
-------	-------	-------	--------	--------

Tableau 26 : Impact environnemental de l'excavation selon l'O.E. pour PS

3.2.4. Entretien du mur

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

3.2.5. Bilan

3.2.5.1. Comparaison des différentes du cycle de vie

La comparaison des apports des différentes phases du cycle de vie du mur en pierres sèches montre que c'est le flux de matière qui a le plus grand impact global environnemental. Il représente 87 % de l'impact environnemental total. Vient ensuite le transport, avec 17 %. L'excavation représente seulement 1% de l'impact total.

	Matériau	Transport	Excavation
O.E.1	55362 (82 %)	11537 (17 %)	899 (1 %)
O.E.2	509329 (82 %)	106144 (17 %)	8095 (1 %)
O.E.3	1365591 (82 %)	284590 (17 %)	22486 (1 %)

Tableau 27 : UBP des étapes du cycle de vie pour les murs PS

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

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

	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO _{2eq} (kg)
O.E.1	67799	444,81	22,878
O.E.2	623568	4090,09	210,335
O.E.3	1672667	10975,64	564,565

Tableau 28 : Impacts environnementaux en fonction des O.E. pour les murs PS

Le tracé de la courbe reliant le nombre d'écopoints à la hauteur de l'ouvrage élémentaire met en évidence une relation non linéaire entre ces deux paramètres. Il s'agit plutôt d'une relation exponentielle.

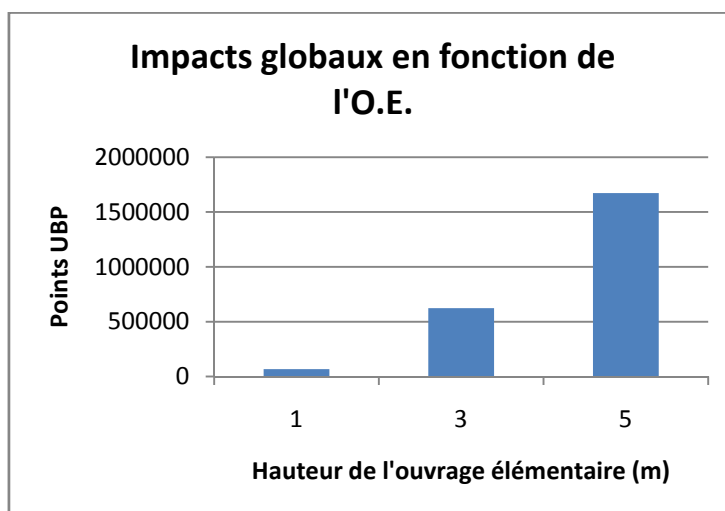


Figure 31 : Impacts globaux en fonction de l'O.E. (murs PS)

3.3.Technologie gabion

3.3.1. Obtention et élimination du matériau utilisé

De même que pour la technologie pierre sèche, nous choisissons de représenter les pierres remplissant les cages métalliques par du gravier concassé. Cette approximation est même moins gênante dans le cas des gabions, car la granulométrie des pierres est plus petite que celle des pierres sèches.

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

	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
Gravier concassé	61,9	0,292	0,0132
Acier d'armatures	2450	13,6	0,71

Tableau 29: Données Ecobilan – Gravier concassé et acier d'armatures

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



	Volume de gabion nécessaire (m ³)
O.E.1	0,34
O.E.2	3,10
O.E.3	8,32

Tableau 30: Volumes de gabions nécessaires pour chaque O.E.

Nous présentons maintenant l'influence de ces deux matériaux.

	Masse de pierres (kg)	Masse de l'acier (kg)	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
O.E.1	894,4	4,4	66111	320,8	14,9
O.E.2	8228,2	40,4	608223	2951,6	137,3
O.E.3	22061,2	108,2	1630743	7913,7	368,1

Tableau 31: Impact environnemental du matériau selon l'O.E. pour les gabions

Il est intéressant de noter que l'impact de l'acier est très important : alors qu'il ne représente seulement que 0,5% du poids total d'un gabion (cage et pierres), sa part représente 16% des points UBP. Cela est dû au fait que la production d'acier est très gourmande en énergie.

3.3.2. Transport

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

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

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

Tableau 32: Données Ecobilan - Transport 28 tonnes

Le tableau suivant récapitule les impacts du transport des pierres et des cages jusqu'au chantier pour les différents ouvrages élémentaires. Nous considérons aussi que l'acier doit être transporté sur 40 km.



	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO _{2eq} (kg)
O.E.1	33708	504,8	30,3
O.E.2	126404	1893,1	113,5
O.E.3	252808	3786,2	227

Tableau 33: Impact environnemental du transport selon l'O.E. pour les gabions

3.3.3. Fabrication du mur

Pour la construction d'un mur en gabion, il faut considérer l'étape de terrassement et le remplissage des cages. Mais pour effectuer le calcul de nos impacts sur l'environnement, le remplissage des cages va être considéré comme un terrassement supplémentaire. Il faut en effet les mêmes engins, mais on apporte la matière au lieu de l'enlever. Une fois les cages installées, il faut remblayer l'espace situé derrière avec de la terre : là aussi, on considère un terrassement, avec le volume correspondant.

De même que pour le mur en pierres sèches, on reprend les données 2009.

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

Tableau 34: Données Ecobilan - Excavation

Calcul de volume excavé :

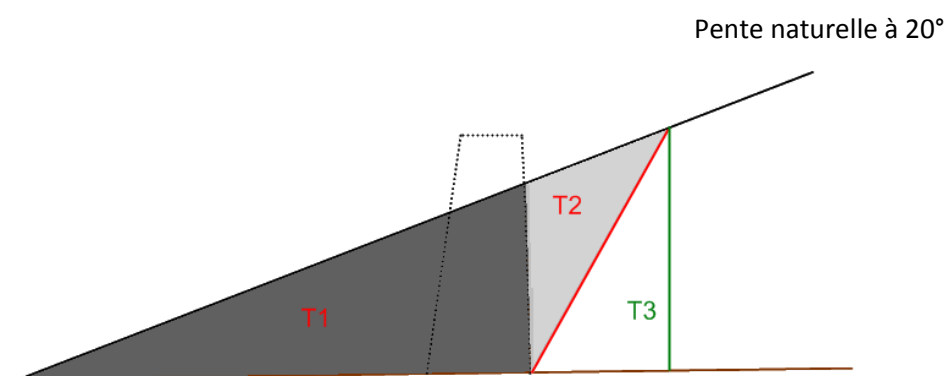


Figure 32 - Schéma du volume excavé - Murs gabion

Il s'agit donc du même volume que pour la technologie pierre sèche. Le volume à excaver, sachant que la largeur de l'O.E. est 1 m, est donc :



$$S_{excavée} = h^2 * \left(\frac{0,5}{\tan(20^\circ)} - \frac{1}{3} \right)$$

Calcul du volume à remblayer : en bleu.

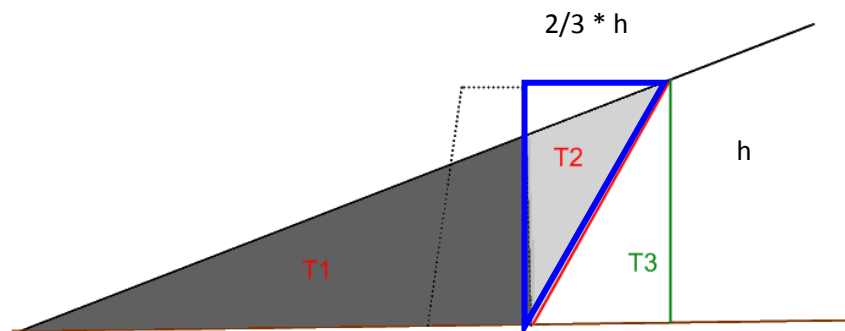


Figure 33: volume à remblayer

Le volume bleu à remblayer a donc une surface en coupe de :

$$S_{remblai} = h^2 * 0,5 * \frac{2}{3}$$

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

	Volume excavé (en m ³)	Volume pierres gabion (en m ³)	Volume à remblayer (en m ³)	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
O.E.1	1,35	0,34	0,4	1414	17,1	1,1
O.E.2	12,2	3,11	3,9	12757	154,0	10,1
O.E.3	33,8	8,33	10,8	35229	425,4	28,0

Tableau 35 - Impact environnemental de l'excavation selon l'O.E. pour les gabions

3.3.4. Entretien du mur

Les murs en gabions ne nécessitent aucun entretien.

3.3.5. Bilan

3.3.5.1. Comparaison des différentes étapes du cycle de vie

Lorsque l'on s'intéresse au bilan global de la construction de murs de soutènement en gabion en termes d'écopoints UBP, on remarque que c'est le flux de matériaux qui a le plus grand impact, comme c'était le cas pour les murs en pierre sèche.



	Construction	Transport	Matériaux
O.E.1	1414	11594	66111
O.E.2	12756	106665	608223
O.E.3	35229	285986	1630743

Tableau 36 - UBP des étapes du cycle de vie pour les murs en gabions

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

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

	UBP	Energie grise (MJ _{eq})	Emissions de CO _{2eq} (kg)
O.E.1	79119	511,5	26,4
O.E.2	727645	4703,1	243,2
O.E.3	1951958	12622,3	652,8

Tableau 37 - Impacts environnementaux en fonction des O.E. pour les murs en gabions

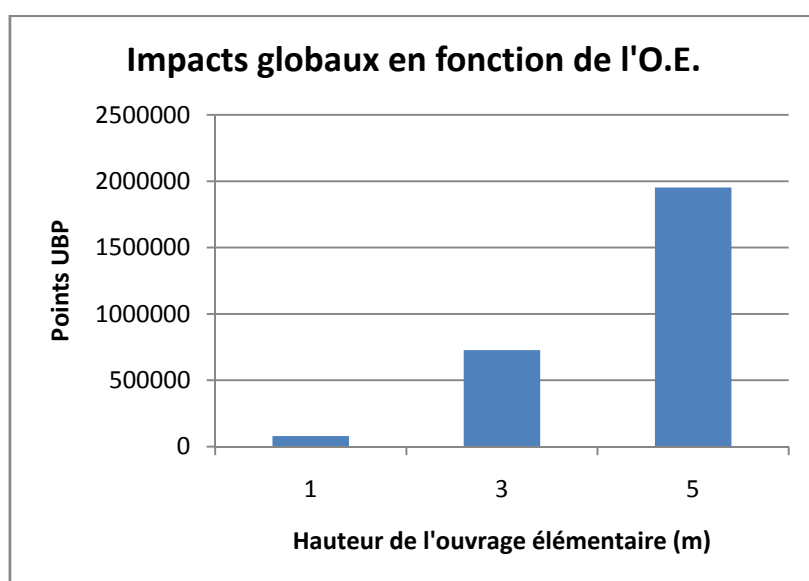


Figure 34: Impacts globaux en fonction de l'O.E. (murs gabions)



3.4. Technologie béton

3.4.1. Obtention et élimination des matériaux utilisés

3.4.1.1. Production du béton

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

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

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

UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
97.6	0.682	0.0778

Tableau 38: Données Ecobilan – Béton C25/30

Les volumes de béton pour les trois types d'ouvrages sont les suivants :

	Volume de béton nécessaire (m ³)
O.E.1	0,8
O.E.2	2,4
O.E.3	1

Tableau 39: Volumes de béton nécessaires pour chaque ouvrage élémentaire

Les masses de béton correspondantes sont calculées à partir d'une densité moyenne de 2400 kg/m³, et permettent de chiffrer les impacts environnementaux de l'utilisation du béton :

	Masse de béton (kg)	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
O.E.1	1920	187392	1309.44	149.376
O.E.2	5760	562176	3928.32	448.128
O.E.3	2400	234240	1636.8	186.72

Tableau 40: Impacts environnementaux de la production du béton pour chaque O.E.



3.4.1.2. Production de l'acier

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

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

UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO _{2eq} (kg)
2450	13.6	0.710

Tableau 41: Données Ecobilan – Acier

	Masse d'acier nécessaire (kg)	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO _{2eq} (kg)
O.E.1	80	196000	1088	56.8
O.E.2	240	588000	3264	170.4
O.E.3	316	774200	4297.6	224.4

Tableau 42: Impacts environnementaux de la production d'acier par O.E.

3.4.1.3. Bilan production et destruction

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

	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO _{2eq} (kg)
O.E.1	383392	2397.4	206.2
O.E.2	1150176	7192.3	618.5
O.E.3	1008440	5934.4	411.1

Tableau 43: Bilan de l'impact environnemental de la production et de la destruction des matériaux pour la technologie béton

3.4.2. Transport

3.4.2.1. Transport du béton

On considère comme plus économique l'achat du béton directement fini (mélange fait en usine, et non sur le chantier). La distance de transport a été fixée à 30 km entre le lieu de la



production et le chantier. Le camion effectue également 30 km vide, on estime donc que le camion transporte son chargement sur 45 km.

Les camions bétonnières 28 tonnes étant suffisants, ils ont été pris pour le calcul du bilan environnemental. Ce qui permet d'obtenir les impacts suivants pour le transport du béton

	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO _{2eq} (kg)
O.E.1	18576	278,21	16,675
O.E.2	55728	834,62	50,026
O.E.3	23220	347,76	20,844

Tableau 44: Calcul des impacts environnementaux du transport de béton pour chaque O.E.

3.4.2.2. Transport de l'acier

On suppose que l'acier n'est pas transporté avec le béton car il provient d'une autre source d'approvisionnement. L'acier étant un matériau beaucoup plus facile à trouver, la distance entre le point d'approvisionnement et le chantier a été établie à 15 km.

	Masse d'acier nécessaire (kg)	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO _{2eq} (kg)
O.E.1	80	387	5,81	0,347
O.E.2	240	1161	17,39	1,042
O.E.3	316	1529	22,89	1,372

Tableau 45: Calcul des impacts environnementaux du transport d'acier pour chaque O.E.

Les impacts du transport sont très majoritairement imputables au transport du béton, matériau prépondérant en masse.

3.4.3. Construction du mur

3.4.3.1. Mur béton en L

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



Figure 35: Etapes de la construction d'un mur de béton en L

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

3.4.4. Entretien du mur

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

3.4.5. Démolition du mur

Ne disposant pas de critères pertinents, aucune évaluation chiffrée de ces impacts n'a été prise en compte.

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

Après les calculs de toutes les étapes du cycle de vie, un bilan total est nécessaire :

	UBP	Energie Grise (MJ _{eq})	Emissions de CO ₂ _{eq} (kg)
O.E.1	590646	3121	250
O.E.2	1777335	9491	757
O.E.3	1289914	7618	516

Tableau 46: Bilan final - UBP, énergie grise et émissions de CO₂ pour chaque O.E.

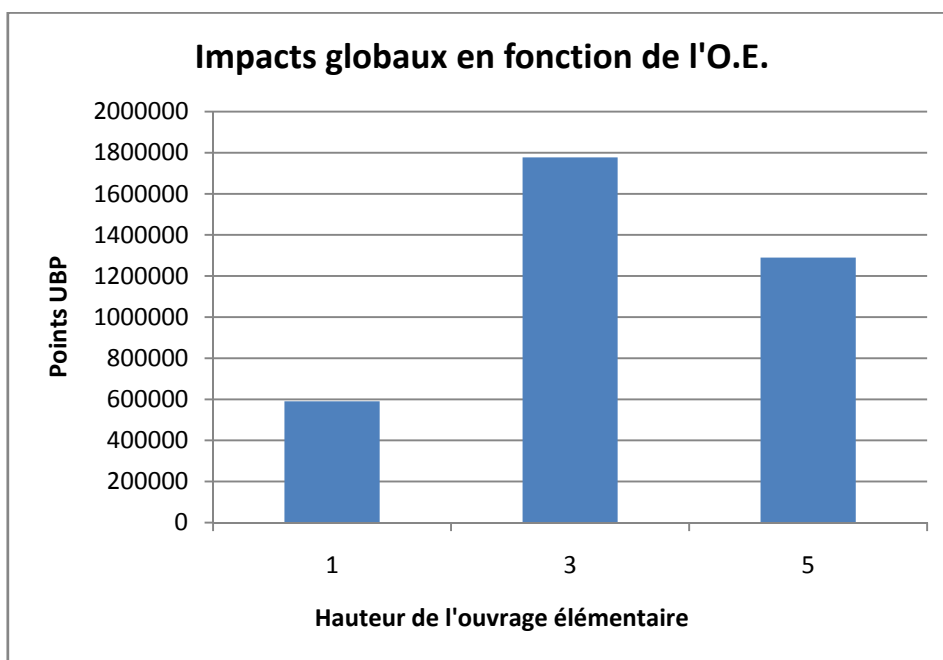


Figure 36: Impacts globaux en fonction de l'O.E. (murs en béton)

On observe ici que le mur en béton cloué de 5 mètres a un impact environnemental moindre que le mur en L de 3 mètres. Cela s'explique par la plus grande consommation de béton dans le cas du mur en L.

4. Synthèse comparative

Cette dernière partie synthétise les différents calculs effectués précédemment. Voici tout d'abord la comparaison des différentes technologies d'un point de vue financier :

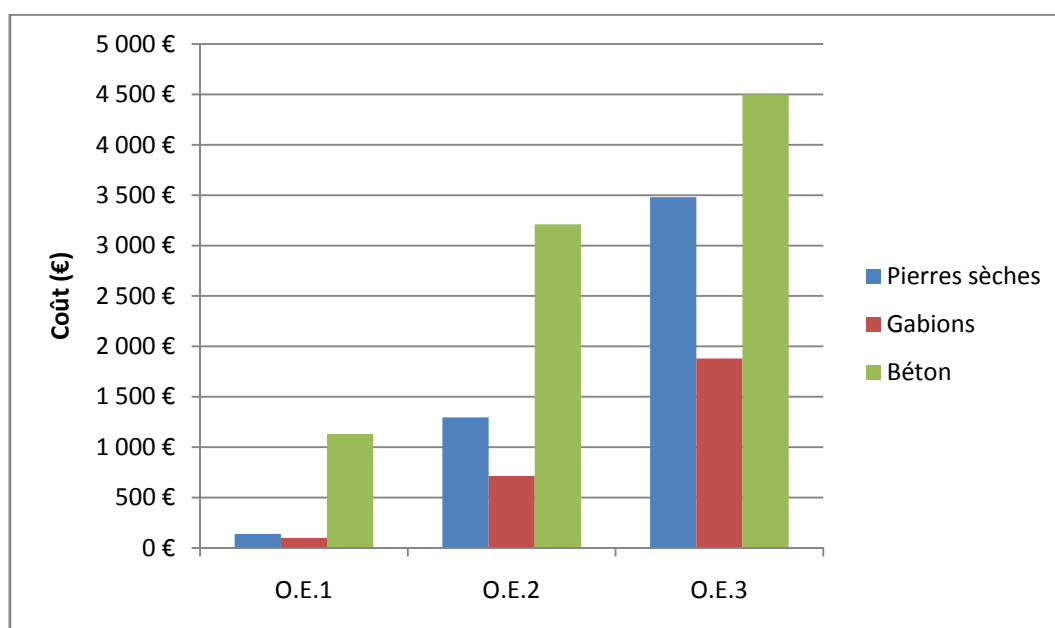


Figure 37 : Synthèse comparative - Aspect financier

Ce graphe met en évidence l'avantage financier que représentent les murs de petites hauteurs en gabion et en pierres sèches par rapport au mur en béton. Toutefois, on observe avec l'augmentation de la hauteur du mur que la technologie pierre sèche perd de sa compétitivité par rapport au béton.

D'après l'évolution des courbes la technologie béton sera plus économique à partir d'une certaine hauteur. Le groupe précédent avait défini cette hauteur à environ 4 mètres. Nos calculs donnent une hauteur un peu plus grande (environ 6 mètres). Cette différence est due à certaines hypothèses que nous avons faites, et notamment celle de la location du matériel pour la construction du mur en béton. En effet, à partir d'un certain nombre d'heure d'utilisation du matériel, il est plus économique de l'acheter et de l'amortir, plutôt que de le louer.

Enfin, la technologie qui reste la plus économique dans les trois cas est la technologie des gabions.

En ce qui concerne le bilan environnemental des trois technologies, voici le graphe récapitulatif des résultats :

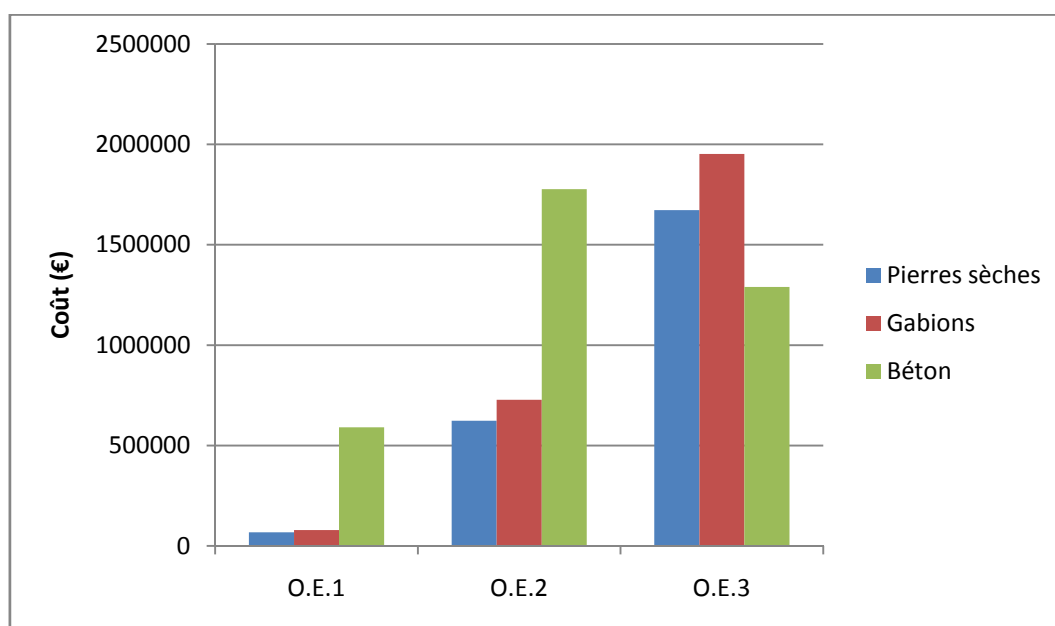


Figure 38 : Synthèse comparative - Aspect environnemental

En ce qui concerne le mur de 1 mètre, les technologies pierres sèches et gabions ont très nettement l'avantage sur la technologie béton (rapport de 1 à 10). A 3 mètres de hauteur, les murs en béton ne sont plus que deux fois plus polluants que les murs en pierres sèches et en gabions. Le rapport passe de 10 à 2, et cela s'explique par l'augmentation non linéaire du volume des pierres à utiliser. Enfin, de manière assez surprenante, un mur en béton cloué de 5 mètres semble moins polluant qu'un mur en pierres sèches ou en gabions. Cela s'explique par les deux raisons suivantes : la quantité de pierres augmente beaucoup quand on passe d'un mur de 3 à 5 mètres, alors qu'au contraire, on utilise moins de béton pour un mur cloué de 5 mètres que pour un mur en L de 3 mètres. Or la consommation de matériaux représente la part la plus importante de l'impact environnemental.



Conclusion

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

D'un point de vue financier tout d'abord, il apparaît que les technologies de la pierre sèche et du gabion sont bien plus compétitives lorsqu'il s'agit de construire des murs de soutènement de taille modérée (un à trois mètres). Cependant, l'écart constaté avec la technologie béton tend à diminuer lorsque la hauteur du mur augmente. En effet, plus la hauteur du mur augmente, plus la quantité de pierres et le temps nécessaire à leur pose deviennent importants. Ainsi, pour des murs de hauteur élevée, il sera plus avantageux d'un point de vue financier d'opter pour la construction d'un mur en béton cloué.

L'analyse environnementale fait ressortir une donnée intéressante. Pour l'ensemble des technologies, la phase de production ou d'extraction des matériaux est l'étape dont l'impact est le plus important en proportion. L'intérêt à porter aux technologies utilisant des pierres est confirmé par un impact environnemental négligeable pour des murs de faibles hauteurs.

Utilisant un approvisionnement local en matériaux et ne nécessitant pas ou peu l'utilisation de machines pour leur mise en œuvre, les technologies de la pierre sèche et du gabion sont donc appelées à un fort essor dans le domaine de la construction de murs de soutènement : elles sont en effet les plus compétitives et les plus respectueuses de l'environnement lorsqu'on construit à de faibles hauteurs. Enfin, la technologie novatrice des gabions s'impose, à l'issue de cette étude, comme la plus avantageuse des trois techniques étudiées : présentant un impact environnemental équivalent à celui de la pierre sèche, elle est, quelque soit la hauteur considérée, bien plus compétitive d'un point de vue financier.



Annexes

Ökobilanzdaten im Baubereich			KBOB / eco-bau / IPB 2009/1				Données des écobilans dans la construction		
Stand Dezember 2008							Etat de décembre 2008		
BAUSTOFFE [Literatur EMPA]	Bezug		UBP	Primärenergie Energie primaires		Treibhausgasemissionen Emissions de gaz à effet de serre	Referenz	MATERIAUX [bibliographie EMPA]	
	Grösse	Einheit	UBP	Gesamt global	Graue Energie (nicht Energie grise (non	kg	Dimension		
				MJ	MJ				
Beton									
Beton C 8/10 (Magerbeton)	Masse	kg	88.9	0.551	0.521	0.0650	Masse	Béton C 8/10 (béton maigre)	
Beton C 25/30 speziell für Fundamente / Bodenplatten	Masse	kg	97.6	0.727	0.682	0.0778	Masse	Béton C 25/30 spécialement pour fondations / dalles	
Beton C 30/37	Masse	kg	118	0.817	0.774	0.120	Masse	Béton C 30/37	
Beton C 50/60 (hoch belastbar)	Masse	kg	131	0.939	0.890	0.144	Masse	Béton C 50/60 (pour charge élevée)	
Mauersteine									
Backstein	Masse	kg	179	3.03	2.76	0.247	Masse	Brique en terre cuite	
Zementstein	Masse	kg	137	1.02	0.941	0.151	Masse	Pât de ciment	
Kalksandstein	Masse	kg	136	1.58	1.45	0.139	Masse	Grais	
Leichtzementstein, blattton	Masse	kg	202	3.29	3.12	0.438	Masse	Pierre en béton léger: argile expansée	
Leichtzementstein, Naturbims	Masse	kg	183	1.64	1.53	0.223	Masse	Pierre en béton léger: pierre ponce naturelle	
Leichtbimsstein	Masse	kg	225	5.69	2.83	0.171	Masse	Brique en argile léger	
Porenbetonstein	Masse	kg	280	3.64	3.43	0.420	Masse	Béton cellulaire	
Andere Massivbaustoffe									
Betonziegel	Masse	kg	209	2.03	1.91	0.218	Masse	Tuiles en béton	
Tonziegel	Masse	kg	255	4.11	4.02	0.367	Masse	Tuile en terre cuite	
Faserzement-Dachziegel	Masse	kg	737	11.0	5.41	0.768	Masse	Bardoue de fibrociment	
Faserzementplatte (grün)	Masse	kg	662	12.7	11.0	0.860	Masse	Dalle de fibrociment, grante	
Faserzement-Wellplatte	Masse	kg	704	9.83	7.97	0.720	Masse	Plaque ondule en fibrociment	
Gipsfaserplatte	Masse	kg	382	5.15	5.01	0.318	Masse	Plaque de plâtre armé de fibres	
Gipskartonplatte	Masse	kg	292	6.34	6.02	0.366	Masse	Plaque de plâtre cartonné	
Vollgipsplatte	Masse	kg	326	5.15	5.01	0.305	Masse	Carréaux de plâtre massif	
Sanitärkeramik	Masse	kg	3300	43.6	42.5	2.38	Masse	Céramique sanitaire	
Sand	Masse	kg	62.1	0.204	0.205	0.0136	Masse	Sable	
Rundkies	Masse	kg	38.5	0.236	0.225	0.0113	Masse	Gruvier rond	
Kies gekörnt	Masse	kg	61.9	0.313	0.262	0.0132	Masse	Gruvier concassé	
Mörtel und Putze									
Anhydritunterlagsboden	Masse	kg	125	1.52	1.33	0.0552	Masse	Chape d'anhydrite	
Zementunterlagsboden	Masse	kg	163	1.35	1.17	0.160	Masse	Chape de ciment	
Kunststoffmörtel	Masse	kg	1160	24.9	24.1	1.13	Masse	Mortier achéal à base synthétique	
Zementmörtel	Masse	kg	177	1.72	1.50	0.200	Masse	Mortier de ciment	
Zementputz	Masse	kg	181	1.78	1.55	0.218	Masse	Enduit de ciment	
Gips-Weissputz	Masse	kg	159	1.84	1.62	0.0844	Masse	Enduit minéral	
Kunststoffputz	Masse	kg	236	5.45	5.30	0.197	Masse	Enduit en matière synthétique	
Lehmputz	Masse	kg	38.8	0.63	0.575	0.0235	Masse	Enduit de plâtre	
Wärmedämmputz EPS	Masse	kg	542	6.71	6.33	0.769	Masse	Enduit d'isolation thermique EPS	
Fenster und Metall-Glas-Fassaden									
2-IV Verglasung	Fläche	m ²	33900	484	462	24.5	Surface	Vitrage 2-IV	
2-IV Verglasung, VSG	Fläche	m ²	58800	734	700	38.3	Surface	Vitrage 2-IV, vsg	
3-IV Verglasung	Fläche	m ²	65800	589	538	49.3	Surface	Vitrage 3-IV	
Fensterrahmen Aluminium	Rahmenfläche ¹	m ²	502000	8300	7240	473	Surf. des cadres ¹	Cadre de fenêtre en aluminium	
Fensterrahmen Holz	Rahmenfläche ¹	m ²	261000	4770	2360	145	Surf. des cadres ¹	Cadre de fenêtre en bois	
Fensterrahmen Holz-Aluminium	Rahmenfläche ¹	m ²	379000	6490	3690	267	Surf. des cadres ¹	Cadre de fenêtre bois-aluminium	
Fensterrahmen Kunststoff (PVC)	Rahmenfläche ¹	m ²	511000	6900	6520	352	Surf. des cadres ¹	Cadre en matière synthétique (PVC)	
Flachglas beschichtet	Masse	kg	565	15.4	14.9	0.675	Masse	Vitre plat enduit	
Flachglas unbeschichtet	Masse	kg	700	13.1	12.6	0.561	Masse	Vitre plat non enduit	
Fenster-Riegel-Fassade, Alu/Glas	Fläche	m ²	221000	2860	2630	152	Surface	Façades montants et traverses, aluminium/verre	
Soweit Teil der Fensterfläche gemäss SIA 416/1									
1) pour autant qu'elle fasse partie de la surface des fenêtres selon SIA 416/1									

Données Ecobilans pour les matériaux

Ökobilanzdaten im Baubereich			KBOB / eco-bau / IPB 2009/1				Données des écobilans dans la construction		
Stand Dezember 2008							Etat de décembre 2008		
TRANSPORTS [Literatur ESU-services]	Bezug	Einheit	UBP	Primärenergie Energie primaire		Treibhausgas-emissionen Emissions de gaz à effet de serre	Référence	TRANSPORTS [bibliographie ESU-services]	
	Größe		UBP	Gesamt globale	nicht erneuerbar non renouvelable		Dimension		
			-	MJ	MJ	kg			
Treibstoffe									
Diesel in Baumaschine	Endenergie	MJ	109	1.24	1.24	0.0929	Energie finale	Carburants	
Diesel in LKW	Endenergie	MJ	87.3	1.22	1.21	0.0935	Energie finale	Gasöl pour engin de chantier	
Benzin in PKW	Endenergie	MJ	79.3	1.29	1.28	0.0884	Energie finale	Gasöl pour camions	
Diesel in PKW	Endenergie	MJ	54.3	1.22	1.21	0.0837	Energie finale	Essence pour voitures	
Biogas in PKW	Endenergie	MJ	32.2	0.452	0.441	0.0324	Energie finale	Gasöl pour voitures	
Erdgas in PKW	Endenergie	MJ	40.5	1.17	1.17	0.0651	Energie finale	Biogaz pour voitures	
Kerosin in Flugzeug	Endenergie	MJ	57.1	1.19	1.19	0.0804	Energie finale	gaz naturel pour voitures	
Güter-Transporte									
Aushub maschinell	Aushubvolumen	m3	665	8.07	8.03	0.529	Vol excavation	Kérosène pour avions	
Binnenfrachter	Transportleistung	tkm	54.0	0.656	0.548	0.0463	Rend du transp.	Transports de marchandises	
Güterzug	Transportleistung	tkm	38.4	0.567	0.299	0.0143	Rend du transp.	Excavations mécaniques	
Helikopter	Einflugszeit	h	55200	1440	1440	96.9	Heures de vol	Cargo de marchandise, navigation intérieure	
Hochseefrachter	Transportleistung	tkm	18.1	0.170	0.167	0.0107	Rend du transp.	Train de marchandises	
Hochseefrachter	Transportleistung	tkm	9.18	0.0903	0.089	0.00562	Rend du transp.	Hélicoptère	
Lieferwagen bis 3,5 t	Transportleistung	tkm	1760	26.9	26.2	1.54	Rend du transp.	Navire de haute mer	
LKW 20 bis 28 t	Transportleistung	tkm	215	3.26	3.22	0.193	Rend du transp.	Pétrolier de haute mer	
LKW 3,5 bis 20 t	Transportleistung	tkm	315	4.64	4.50	0.277	Rend du transp.	Véhicule de transport, jusqu'à 3,5 t	
LKW über 28 t	Transportleistung	tkm	150	2.36	2.33	0.136	Rend du transp.	Camion 20-28 t	
Luftfracht	Transportleistung	tkm	144	17.9	17.6	1.14	Rend du transp.	Camion 3,5-20 t	
Luftfracht, Europa	Transportleistung	tkm	1550	33.4	32.5	1.95	Rend du transp.	Camion >28 t	
Luftfracht, interkontinental	Transportleistung	tkm	782	16.4	16.3	1.08	Rend du transp.	Transport aérien	
Personen-Transporte									
Fernreisezug	Transportleistung	pkm	21.1	0.543	0.236	0.00818	Rend du transp.	Transport aérien, Europe	
ICE	Transportleistung	pkm	60.9	1.03	0.991	0.0601	Rend du transp.	Transport aérien, intercontinental	
Linienbus	Transportleistung	pkm	115	1.67	1.65	0.104	Rend du transp.	Transports de personnes	
Passagierflugzeug	Transportleistung	pkm	126	2.78	2.70	0.154	Rend du transp.	Train de grand parcours	
Passagierflugzeug, Europa	Transportleistung	pkm	155	3.34	3.25	0.282	Rend du transp.	ICE	
Passagierflugzeug, intercontinental	Transportleistung	pkm	78.4	1.64	1.63	0.108	Rend du transp.	Bus de ligne	
Personenwagen	Transportleistung	pkm	198	3.33	3.25	0.194	Rend du transp.	Avion passagers	
Personenwagen, Benzin	Transportleistung	pkm	207	3.39	3.31	0.197	Rend du transp.	Avion passagers, Europe	
Personenwagen, Diesel	Transportleistung	pkm	150	3.04	2.96	0.177	Rend du transp.	Avion passagers, intercontinental	
Regionalzug	Transportleistung	pkm	41.7	1.17	0.516	0.0151	Rend du transp.	Voiture	
Reisebus	Transportleistung	pkm	37.3	0.861	0.846	0.0519	Rend du transp.	Voiture, essence	
Tram	Transportleistung	pkm	58.6	1.15	0.997	0.0250	Rend du transp.	Voiture, diesel	
Trolleybus	Transportleistung	pkm	59.3	1.40	1.21	0.0233	Rend du transp.	Train régional	
Personen-Transporte									
Fernreisezug	Fahrleistung	km	8290	213	92.7	3.21	km parcourus	Autocar	
ICE	Fahrleistung	km	15700	319	360	14.6	km parcourus	Tram	
Linienbus	Fahrleistung	km	1610	23.4	23.1	1.45	km parcourus	Trolleybus	
Passagierflugzeug	Fahrleistung	km	32100	113	690	39.5	km parcourus		
Passagierflugzeug, Europa	Fahrleistung	km	10100	217	212	28.2	km parcourus		
Passagierflugzeug, Interkontinental	Fahrleistung	km	25100	525	521	34.6	km parcourus		
Personenwagen	Fahrleistung	km	316	5.33	5.20	0.310	km parcourus		
Personenwagen, Benzin	Fahrleistung	km	332	5.42	5.29	0.315	km parcourus		
Personenwagen, Diesel	Fahrleistung	km	239	4.87	4.74	0.283	km parcourus		
Regionalzug	Fahrleistung	km	1520	53.9	23.8	0.898	km parcourus		
Reisebus	Fahrleistung	km	1200	18.1	11.8	1.09	km parcourus		
Tram	Fahrleistung	km	3100	60.9	52.8	1.32	km parcourus		
Trolleybus	Fahrleistung	km	1540	36.4	31.5	0.806	km parcourus		

Données Ecobilans pour le transport et l'excavation



Table des figures

Figure 1: Structure d'un mur de soutènement en pierre sèche - Vue en coupe	7
Figure 2: Pose des pierres de socle	8
Figure 3: Désignation des pierres de bâti: perspective et coupe horizontale	8
Figure 4: Ecoulement des eaux pluviales à travers un mur en pierres sèches	9
Figure 5: Couronnement des murs en pierre sèche: en grosses pierres plates à gauche, en clavade à droite	9
Figure 6: Détermination de la profondeur à donner à la base d'un mur en schiste de 2,5 m de hauteur avec un fruit de 10% soutenant un remblai de sable incliné à 10°	10
Figure 7: Inclinaison des lits perpendiculaire au fruit (à gauche); Fondation sur support rocheux (au centre); Fondation sur sol dur ou meuble (à droite)	11
Figure 8: Règle de croisement des joints: privilégier les jointures décalées (à gauche) pour éviter les coups de sabre (à droite)	11
Figure 9: Croisement des pierres dans un maillage 3D, vue en perspective	12
Figure 10: Gabarits et cordeaux	12
Figure 11: Différents types de chasses, d'aiguilles et de têtus	13
Figure 12: Chantier en cours de réalisation utilisant la technique gabion	14
Figure 13: Gabions à double torsion	14
Figure 14: Gabions électrosoudés	14
Figure 15: Vue de dessus d'un gabion	15
Figure 16: Agrafes entre les différents panneaux	15
Figure 17: Tirants de renfort	15
Figure 18: Tractopelle remplissant les gabions	16
Figure 19: Barres d'alignement	17
Figure 20: Agrafeuse pneumatique	17
Figure 21: Coupe d'un mur en L	17
Figure 22: Eléments d'un mur en L	18
Figure 23: Fonctionnement d'un mur en en béton encastré sur semelle; P: poussée des terres du massif soutenu; W: poids des terres à l'aplomb de la semelle ; R : réaction du massif d'assise	18
Figure 24: Exemple de mur cloué	19
Figure 25: Phases de construction d'un mur cloué	20
Figure 26: Mise en place des treillis soudés	21
Figure 27: Mise en place du parement en béton par projection	21
Figure 28: Forage du sol avant introduction des clous	21
Figure 29: Principe du calcul des volumes de pierres.	26
Figure 30 : Schéma du volume excavé – Murs PS et gabions	31
Figure 31 : Impacts globaux en fonction de l'O.E. (murs PS)	42
Figure 32 - Schéma du volume excavé - Murs gabion	44
Figure 33: volume à remblayer	45
Figure 34: Impacts globaux en fonction de l'O.E. (murs gabions)	46
Figure 35: Etapes de la construction d'un mur de béton en L	50
Figure 36: Impacts globaux en fonction de l'O.E. (murs en béton)	51
Figure 37 : Synthèse comparative - Aspect financier	52
Figure 38 : Synthèse comparative - Aspect environnemental	53



Bibliographie

Technologie pierres sèches

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

Technologie gabion

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

Technologie béton

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