

# **Le pont de Chaldecoste**

Un pont vers un développement économique  
et durable en Lozère

Rapport intermédiaire PEDRA  
*R. Brière, A-S Colas, G. Habert, Y. Tardivel*



*L'homme construit trop de murs et pas assez de ponts*  
Isaac Newton

## Avant Propos

---

En 2008, une buse métallique est détruite lors d'un épisode cévenol dans la commune de Saint-Andéol de Clerguemort. Le maire de la commune décide de remplacer cette buse par un pont en pierre. L'objectif d'une reconstruction avec ce type de matériaux (pierre) est, pour lui, de valoriser les ressources et le savoir-faire local et donner au projet un caractère durable.

Suivre ce chantier tout à fait original, puisque de nouveaux ponts en pierre n'ont pas été construits sur le territoire français depuis plus de 40 ans, a été pour nous l'occasion unique de collecter des données afin de quantifier les impacts environnementaux de la construction d'un ouvrage en pierre. La qualité des données récupérées vient de l'étroite collaboration que nous avons pu avoir avec les artisans bâtisseurs, les artisans carriers ainsi qu'avec le maire de Saint Andéol.

Plus largement, la construction de cet ouvrage a permis de se réapproprier cette technique constructive, autant pour les artisans qui n'avaient jusque là que reconstruit des ponts existants que pour le Maître d'Ouvrage (la Mairie) qui a dû proposer un cahier des charges, ainsi que pour les services de l'État chargés d'assister la maîtrise d'ouvrage et pour qui cette expérience permettra avant la fin du projet PEDRA de proposer un guide pour les futurs maîtres d'ouvrage intéressés.

---



# Sommaire

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introduction .....                                       | 7  |
| 1.1. Présentation de l'outil ACV .....                      | 7  |
| 1.2. Présentation des différentes solutions étudiées.....   | 7  |
| 2. Données techniques sur les ouvrages .....                | 9  |
| 2.1. Pont en pierre .....                                   | 9  |
| 2.2. Pont avec une voûte en béton avec murs en retour ..... | 11 |
| 2.3. Pont avec une buse en béton sans murs de retour .....  | 14 |
| 3. Analyse environnementale .....                           | 16 |
| 3.1. Données environnementales / Calcul des impacts .....   | 16 |
| 3.2. Détail des impacts du pont en pierre .....             | 17 |
| 3.3. Comparaison entre les trois ouvrages .....             | 20 |
| 3.4. Discussion.....                                        | 23 |
| 4. Analyse économique et sociale .....                      | 28 |
| 4.1 Analyse des coûts .....                                 | 28 |
| 4.2 Localistion des bénéfices .....                         | 29 |
| 5. Conclusion.....                                          | 31 |
| Annexes .....                                               | 33 |



# 1. Introduction

## 1.1. Présentation de l'outil ACV

L'analyse de Cycle de Vie est une méthode permettant d'évaluer quantitativement les impacts sur l'environnement d'un produit ou d'un service tout au long de son cycle de vie. C'est une méthode normalisée (ISO 14040-14044) qui permet d'étudier les impacts potentiels d'un produit depuis la production des matières premières le constituant jusqu'à sa fin de vie en passant par sa phase d'utilisation. Cette méthodologie peut être découpée en quatre phases :

*Définition des objectifs du champ de l'étude* : On pose les hypothèses, on délimite les frontières du système étudié et on choisit l'unité fonctionnelle qui est la performance quantifiée d'un produit que l'on choisit comme référence. Ici ce sera le franchissement d'une rivière pour une route de 4 m 80, en assurant une section hydraulique de 14 m<sup>2</sup> pendant une durée de 100 ans.

*Inventaire du cycle de vie (ICV)* : identification et quantification des différents flux de matière et d'énergie rentrant et sortant dans le système considéré.

*Calcul des impacts* : A cette étape, les différents flux recensés lors de l'ICV sont traduits en impacts environnementaux pour différentes catégories (effet de serre, acidification,...)

*Interprétation* : C'est l'étape de discussion des résultats et des hypothèses choisies lors des 3 premières étapes. A cette étape, on va souvent recalculer ou en tout cas évaluer les conséquences d'une modification dans les hypothèses précédentes.

## 1.2. Présentation des différentes solutions étudiées

L'intérêt de la méthode ACV est de proposer un cadre pour comparer différentes solutions. Ainsi, il nous a paru intéressant de comparer la solution effectivement réalisée sur la commune de Saint Andéol avec d'autres alternatives qui auraient pu répondre au même besoin. Au vu de la distance à franchir (portée de la brèche) et du fait que la solution en buse métallique n'avait pas été un succès, nous avons choisi de comparer la solution en pierre avec une solution en béton. La solution recommandée serait une voûte préfabriquée en béton. Deux options ont ensuite été envisagées, à savoir une solution avec des murs en retour permettant une voute peu large et une autre sans murs mais augmentant le volume des déblais et remblais et donc plus impactante en terme d'emprise au sol. Ces deux options, *in-fine*, ont des résultats très similaires.

Le choix d'un comparatif avec cette solution béton vient également du fait qu'un ouvrage très similaire a été construit dans une commune proche de Saint Andéol lors du même été que la construction du pont en pierre.



*Vue du Pont de Chaldecoste*



*Vue du Pont de St-Privat de Vallongue*

Notons cependant que pour le pont de Saint Privat, c'est une buse qui a été posé alors que l'ouvrage que nous allons évaluer ici est une voûte en béton préfabriqué. Cette différence se justifie selon nous par le fait que la buse béton n'est pas forcément conçue comme un ouvrage d'art, mais plutôt comme un conduit d'assainissement .

Enfin, dans le cadre de cette étude, nous n'avons pas pris en compte la construction de la route proprement dite, la couche de roulement puisqu'elle est commune et identique quelle que soit la solution considérée et que nous n'avons pas de données mesurées sur le terrain. Ajouter cette étape aurait donc finalement rajouté des incertitudes sur le résultat final sans permettre une meilleure distinction entre les deux solutions.

Pour les trois ouvrages étudiés, l'ensemble des données d'inventaires récoltées ont été regroupées en quatre modules :

*Production des matériaux* : l'ensemble des matériaux nécessaires à l'édification de l'ouvrage est ici regroupé tout comme les énergies nécessaires à leur production.

*Transport* : cet ensemble comprend les différents modules de transport : le transport des matériaux, du personnel ou bien des engins de chantier... Notons que le personnel n'est pas sensé être pris en compte selon la norme. Cependant, comme nous avons les données et que cette étude représente la première faite sur un ouvrage de ce type, il paraissait intéressant de les relever.

*Construction* : l'utilisation des engins de chantier et des différents outils sont pris en compte.

*Maintenance* : Cette étape sera discutée à la fin du rapport. Elle reprend l'ensemble des travaux qu'il va falloir effectuer sur l'ouvrage pour maintenir son utilisation pendant 100 ans.

Le système étudié ainsi que ses frontières sont récapitulés sur la figure suivante:



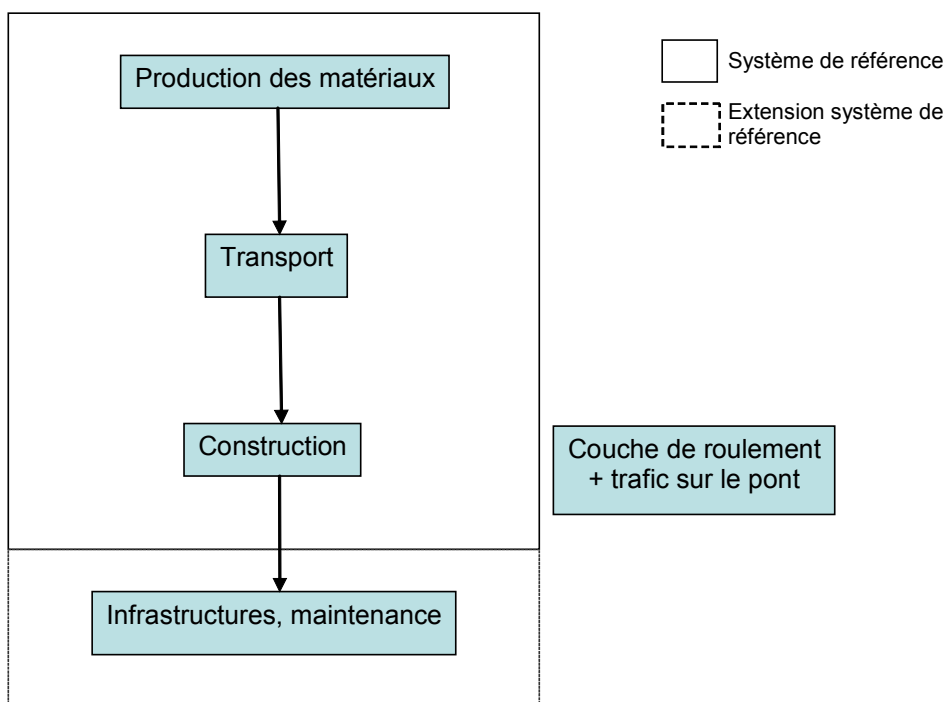


Figure 1 : Frontières du système étudié

L'objectif de cette figure est de rappeler que notre évaluation s'arrête au pont livré « nu ». C'est-à-dire que la couche de roulement sur laquelle les véhicules vont circuler n'est pas prise en compte. De même l'impact du trafic sur le pont n'est pas considéré. La prise en compte du trafic rendrait les 3 solutions étudiées très comparable car il est généralement largement prédominant (et identique pour les 3 solutions).

Enfin, la maintenance ultérieure du pont n'est pas évaluée mais sera discutée à la fin du rapport. De même ce que l'on nomme « infrastructure » dans une analyse environnementale n'est pas évalué.

Ce que l'on appelle « infrastructure » en ACV représente les impacts liés à la production et la maintenance des outils de production ou de transport. Par exemple l'impact de déplacer une tonne de matériau sur 1 km peut être évalué comme le fait de brûler de l'essence dans un moteur mais également, si l'on prend en compte les infrastructures, comme le fait d'avoir construit un camion et une route et d'assurer leur maintenance, et de devoir donc intégrer une partie de ces impact au regard de l'utilisation que l'on en fait (1km par rapport aux 300 000 km que dure un camion).

## 2. Données techniques sur les ouvrages

### 2.1. Pont en pierre

Les tableaux 1, 2 et 3 récapitulent toutes les données collectées.

Tableau 1: données sur les matériaux pour le pont en pierre

| Fonction                      | Nature               | Valeurs              |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| Pierres et mortier            | Pierres              | 389 t                |
|                               | Chaux                | 16,13 t              |
|                               | Sable                | 112 t                |
|                               | Ciment               | 1,4 t                |
| Remplissage                   | GNT (0/20)           | 136,2 t              |
|                               | Chaux (5%)           | 4,2 t                |
|                               | Géomembrane (Bitume) | 301 kg               |
|                               | Drain (PVC)          | 30,8 kg              |
| Ouvrages provisoires (cintre) | Bois (charpente)     | 1,162 m <sup>3</sup> |
|                               | Bois (coffrage)      | 0,515 m <sup>3</sup> |
|                               | Boulons (Acier)      | 10 kg                |
|                               | Rondelles (Acier)    | 2 kg                 |

Tableau 2: Données sur le transport pour le pont en pierre

| Fonction             | Nature                  | Valeurs     |
|----------------------|-------------------------|-------------|
| Transport matériaux  | Pierre                  | 37 703 t.km |
|                      | Mortier                 | 48 763 t.km |
|                      | Remplissage             | 13 582 t.km |
|                      | Ouvrages provisoires    | 190 t.km    |
| Personnel            | Voiture                 | 4 800 km    |
|                      | Utilitaire              | 9 600 km    |
| Transport des engins | Préparation du chantier | 1 467 t.km  |
|                      | Engins pour le chantier | 273 t.km    |

Tableau 3: Données sur la construction du pont en pierre

| Fonction        | Nature           | Valeurs | Hypothèses                                                                                      |
|-----------------|------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Terrassement    | Fioul            | 650 L   | Conso engins 40L/h ; 4h/j ; env 4j                                                              |
|                 | PVC              | 106 kg  | 20 mlin PVC 60 cm 4mm masse volumique 1,4. Réutilisé une fois sur un autre chantier             |
| Voûte en pierre | Fioul            | 350 L   | Mesure Artisans                                                                                 |
|                 | Essence          | 200 L   | Mesure Artisans                                                                                 |
|                 | Huile            | 5 L     | Mesure Artisans                                                                                 |
|                 | Disques diamants | 2,21 kg | 7 disques 30cm diam + 3mm épais + 7850 density / 1,5cm extérieur recouvert de poudre de diamant |
| Remblais        | Fioul            | 320 L   | Conso engins 40L/h ; 4h/j ; env 2j                                                              |

Le détail pour le calcul des distances de transports est indiqué en annexe.

## 2.2. Pont avec une voûte en béton avec murs en retour

Dans cette première solution béton, la voûte en béton préfabriqué est prolongée par des murs permettant de limiter l'emprise longitudinale de l'ouvrage. Les figures suivantes schématisent cette solution :

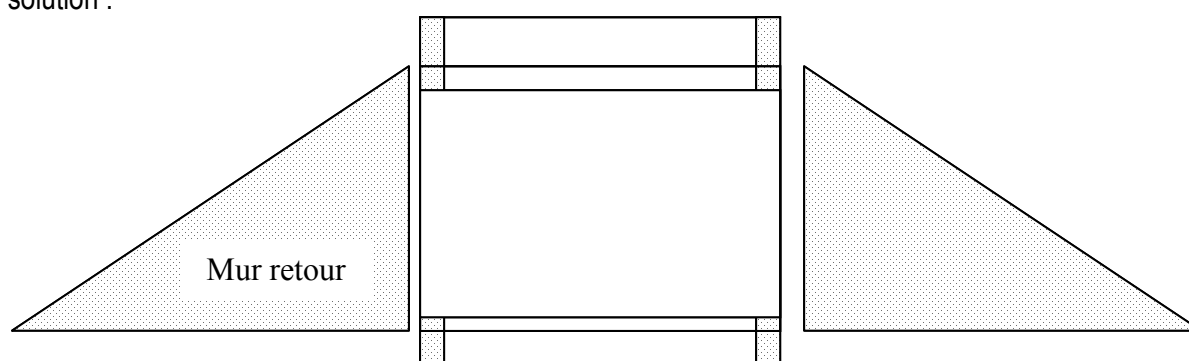


Figure 2 : schéma de la voûte avec murs en retour (coupe transversale)

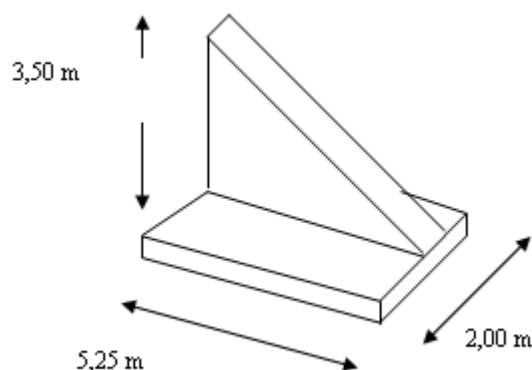


Figure 3 : Schéma du mur en retour avec semelle

Cet ouvrage est principalement constitué de béton (béton de la voûte et béton de propreté) et d'acier et présente les caractéristiques suivantes :

- Section hydraulique de 14 m<sup>2</sup>
- Diamètre intérieur de 6 m
- Diamètre extérieur de 6,50 m
- Une hauteur totale de 4 m
- Une largeur de voûte en section complète de 4,80 m
- Un ratio de 80 kilos d'acier par m<sup>3</sup> de béton. A noter qu'il n'y en a pas dans le béton de propreté.

Pour les bétons, les formules suivantes ont été choisies:

Béton de propreté (kg/m<sup>3</sup>)

Ciment: 260 kg  
Graviers: 980 kg  
Sable: 890 kg  
Eau: 260

Béton pour la voûte préfabriquée (kg/m<sup>3</sup>)

Ciment: 400 kg  
Gravier: 950 kg  
Sable: 800 kg  
Eau: 197 kg  
Super plastifiants: 5 kg

A l'instar du pont en pierre, les différentes données ont été associées dans les modules de production, transport et construction présentés ci-dessous.

Tableau 4: données sur les matériaux pour le pont en voûte béton avec murs en retour

| Usage                                       | Matériaux            | Quantité                                        |
|---------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------|
| Béton de propreté (8,37 m <sup>3</sup> )    | Ciment               | 2,18 t                                          |
|                                             | Granulats            | 8,2 t                                           |
|                                             | Sable                | 7,45 t                                          |
| Béton préfabriqué (38,91 m <sup>3</sup> ) * | Ciment               | 15,56 t                                         |
|                                             | Granulats            | 39,96 t                                         |
|                                             | Sable                | 31,13 t                                         |
|                                             | Adjuvant             | 0,19 t                                          |
|                                             | Acier de ferrailage  | Min: 2 490 kg<br>Moy: 3 112 kg<br>Max: 3 735 kg |
|                                             | GNT **               | 653,4 t                                         |
| Remplissage                                 | Chaux (5%)           | 21 t                                            |
|                                             | Géomembrane (bitume) | 320 kg                                          |
|                                             | Drain (PVC)          | 30,8 kg                                         |

\* Le béton est étuvé en usine. La seule référence trouvée vient de Weil (In: Provis (Eds) Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications. Woodhead publishing, CRC Press Cambridge, 2009) et donne une valeur de 150 kWh/m<sup>3</sup>. Cela me semble un peu élevé mais comme cela représente entre 5 et 10% des impacts, on n'a pas cherché à raffiner cette valeur.

\*\* GNT comprend la Grave non Traitée 0/20 (637 t) qui est mélangée à 5% de chaux + des matériaux drainant (20/40) (1,8 t) + des matériaux pour remblais contigus assimilés à GNT 0/20 (14,4 t)

Tableau 5: Données sur le transport pour le pont en voûte béton avec murs de retour

| Usage                                                  | Détail                             | Quantité    |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------|
| Transport matériaux                                    | Béton de propreté                  | 3 462 t.km  |
|                                                        | Eléments préfabriqués              | 11 262 t.km |
|                                                        | Remplissage *                      | 55 875 t.km |
| Transport personnel chantier                           | Utilitaire                         | 4 000 km    |
|                                                        | Voiture                            | 8 000 km    |
| Transport interne pour l'usine d'éléments préfabriqués | Matériaux constituant le béton     | 9 841 t.km  |
|                                                        | Personnel                          | 871,9 km    |
| Transport engins de chantier                           | Pelle pour préparation de chantier | 1 467 t.km  |
|                                                        | Grue pour les éléments préfa       | 1 467 t.km  |
|                                                        | Engins pour le chantier            | 8 000 t.km  |

\* Nous avons considéré que la chaux pour la GNT ne viendrait pas de Saint Astier mais d'une usine plus proche . Nous avons pris 150 km de distance comme distance moyenne. Si on prenait la chaux de Saint Astier, cela rajouterait 10 000 t.km.

Tableau 6: Données sur la construction du pont en voûte béton avec murs de retour

| Fonction                | Nature | Valeurs | Hypothèses                                                                          |
|-------------------------|--------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Terrassement            | Fioul  | 800 L   | Conso engins 40L/h ; 4h/j ; env 4j                                                  |
|                         | PVC    | 106 kg  | 20 mlin PVC 60 cm 4mm masse volumique 1,4. Réutilisé une fois sur un autre chantier |
| Béton de propreté       | Fioul  | 135 L   | Bétonnière 1L/h 5h/j, 7j<br>+ Bobcat 5L/h, 4h/j, 5j                                 |
| Pose des éléments préfa | Fioul  | 160 L   | Grue 40L/h, 4h de travail                                                           |
| Remblais                | Fioul  | 800 L   | Conso engins 40L/h ; 4h/j ; env 4j                                                  |

## 2.3. Pont avec une voûte en béton sans murs de retour

Cette seconde alternative, comporte également une voûte béton préfabriquée mais diffère de la précédente par l'absence de murs en retour entrainant un linéaire de section complète plus important avec une voûte en biseau prolongeant la voûte centrale. Elle se caractérise par :

- Une section hydraulique, des diamètres intérieurs et extérieurs et une épaisseur de voûte identiques au précédent.
- Une longueur de voûte en section complète de 8,80 m
- Une longueur de voûte en section biseau de 13,80 m
- Une hauteur totale de 4 m.

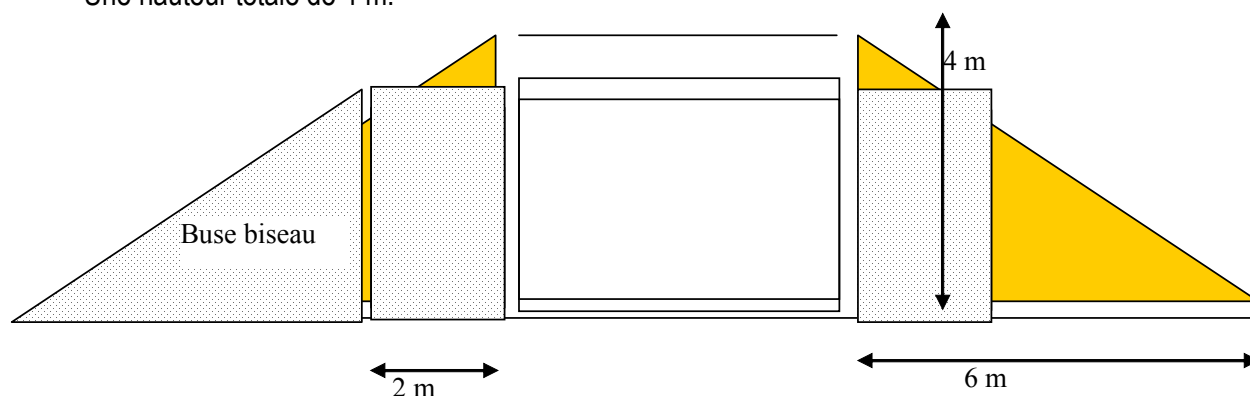


Figure 4 : Schéma de l'ouvrage béton sans murs en retour

Pour cette solution, les formules de béton sont similaires à l'ouvrage précédent, mais les volumes sont différents.

Tableau 7: données sur les matériaux pour le pont en voûte béton sans murs de retour

| Usage             | Matériaux            | Quantité   |
|-------------------|----------------------|------------|
| Béton de propreté | Ciment               | 3,18 t     |
|                   | Granulats            | 11,98 t    |
|                   | Sable                | 10,88 t    |
| Béton préfabriqué | Ciment               | 13,52 t    |
|                   | Granulats            | 32,12 t    |
|                   | Sable                | 27,05 t    |
|                   | Adjuvant             | 0,17 t     |
|                   | Acier                | 2 704,8 kg |
| Remplissage       | GNT**                | 874,2 t    |
|                   | Chaux (5%)           | 21 t       |
|                   | Géomembrane (bitume) | 489 kg     |
|                   | Drain (PVC)          | 30,8 kg    |

\* le béton est également étuvé.

\*\* GNT comprend la Grave non Traitée 0/20 (858 t) qui est mélangée à 5% de chaux + des matériaux drainant (20/40) (1,8 t) + des matériaux pour remblais contigus assimilés à GNT 0/20 (14,4 t)

Tableau 8: Données sur le transport pour le pont en voûte béton sans murs de retour

| Usage                                                  | Détail                               | Quantité    |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------|
| Transport matériaux                                    | Béton de propreté                    | 5 056 t.km  |
|                                                        | Eléments préfabriqués                | 9 786 t.km  |
|                                                        | Remplissage                          | 72 862 t.km |
| Transport personnel chantier                           | Utilitaire                           | 4 000 km    |
|                                                        | Voiture                              | 8 000 km    |
| Transport interne pour l'usine d'éléments préfabriqués | Matériaux constituant le béton       | 8 551 t.km  |
|                                                        | Personnel                            | 757,6 km    |
| Transport engins de chantier                           | Pelle pour préparation de chantier   | 1 467 t.km  |
|                                                        | Grue pour la pose des éléments préfa | 1 467 t.km  |
|                                                        | Engins pour le chantier              | 8 000 t.km  |

Tableau 9: Données sur la construction du pont en voûte béton sans murs de retour

| Fonction                | Nature | Valeurs | Hypothèses                                                                          |
|-------------------------|--------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Terrassement            | Fioul  | 800 L   | Conso engins 40L/h ; 4h/j ; env 4j                                                  |
|                         | PVC    | 106 kg  | 20 mlin PVC 60 cm 4mm masse volumique 1,4. Réutilisé une fois sur un autre chantier |
| Béton de propreté       | Fioul  | 135 L   | Bétonnière 1L/h 5h/j, 7j<br>+ Bobcat 5L/h, 4h/j, 5j                                 |
| Pose des éléments préfa | Fioul  | 160 L   | Grue 40L/h, 4h de travail                                                           |
| Remblais                | Fioul  | 800 L   | Conso engins 40L/h ; 4h/j ; env 4j                                                  |

### 3. Analyse environnementale

Pour calculer les impacts environnementaux, il faut affecter des données environnementales à chacune des données techniques récoltées. Par exemple, connaître l'impact d'un kg de ciment, d'acier, de pierre à maçonner puis multiplier ces impacts par la quantité de matériau effectivement utilisée pour l'ouvrage considéré. Ces données environnementales proviennent pour la plupart de la base de données Ecoinvent (v2.0). Ces données sont associées aux données techniques à l'aide du logiciel Simapro.

#### 3.1. Données environnementales / Calcul des impacts

Toutes les données environnementales utilisées sont rassemblées en annexe. L'essentiel vient directement d'Ecoinvent et sont donc des données assez générale pour l'Europe. Elles pourraient être adaptées au contexte français, voir régional, cependant cela demande beaucoup de travail et parfois cela diminue la qualité de la donnée par manque d'information locale pertinente.

Il nous semble donc que l'on peut être relativement confiant dans le choix des données choisies. Nous avons cependant pointé le fait que certaines données on besoin d'être affinées (Cf Annexe).

Il s'agit en particulier :

- de l'inventaire de la chaux, qui semble assez élevé et peut probablement être 10 à 20% inférieur avec des données plus actualisées sur les processus utilisé.
- de celui de la géo-membrane d'étanchéité pour laquelle nous n'avons pas de données exactes et à laquelle nous avons associé la seule valeur trouvée dans Ecoinvent.
- et de la mise en décharge de l'étanchéité en fin de vie, même si ce point aura moins de conséquences.

Pour transformer les données d'inventaire de cycle de vie (associant les données techniques récoltées aux données environnementales choisies, on utilise une méthode de calcul. Plusieurs méthodes existent. Celle que nous avons choisie est la plus acceptée internationalement CML01. Elle a été développée par l'université de Leiden (Pays Bas) dans les années 90 (CML92) puis mise à jour au début des années 2000 (CML01). Les catégories d'impact évaluées sont les suivantes :

- Abiotic depletion (Epuisement des ressources non renouvelables). L'épuisement des ressources naturelles évalue la diminution des réserves minérales et fossiles, d'origine non renouvelable. Elle est exprimée en kg Sb (Antimoine) équivalent.
- Acidification (Acidification). L'acidification atmosphérique est le phénomène causé par l'émission de gaz dans l'air tels le SO<sub>2</sub> ou les NO<sub>x</sub> dont les propriétés chimiques sont à l'origine d'une acidification en présence d'humidité. Ces substances retombent ensuite lors de pluies acides sur les sols ou dans les cours d'eau et dégradent l'environnement, en abaissant le pH des milieux. Elle est exprimée en kg SO<sub>2</sub> eq.
- Eutrophication (Eutrophisation). Elle est exprimée en kg PO<sub>4</sub><sup>2-</sup> eq.
- Global Warming Potential (Potentiel de réchauffement climatique). Cette catégorie d'impact évalue l'effet de serre, cause du réchauffement climatique, en comptabilisant l'ensemble des gaz contribuant au phénomène, tel le CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub> ou encore le N<sub>2</sub>O. Ces gaz n'ayant pas tous le même pouvoir réchauffant, des facteurs de conversions sont utilisés. Elle est exprimée en kg CO<sub>2</sub> eq.
- Ozone Layer depletion (Destruction de la couche d'ozone). La couche d'ozone stratosphérique nous protège des rayons UV nocifs pour les êtres vivants. La destruction de cette couche est due



principalement aux composés chloro-fluorés organiques présents dans les systèmes de climatisations ou encore dans les aérosols. Ces émissions, hautes dans l'atmosphère, entraîne des réactions destructives des molécules d'ozone (O<sub>3</sub>) ce qui permet la pénétration accrue des UVB et UVC. Chaque émission identifiée dans l'inventaire est multipliée par un coefficient de conversion. La somme de ces valeurs indique l'impact environnemental sur cet indicateur. Elle est exprimée en kg CFC-11 (Chloro-fluoro-carbone 11) eq.

- Human toxicity (Toxicité humaine). Elle est exprimée en kg 1,4 DB eq. (1,4- Dichlorobenzène)
- Fresh water aquatic ecotox. (Ecotoxicité de l'eau douce). Elle est exprimée en kg 1,4 DB eq.
- Marine aquatic ecotox. (Ecotoxicité de l'eau de mer). Elle est exprimée en kg 1,4 DB eq.
- Terrestrial ecotox. (Ecotoxicité terrestre). Elle est exprimée en kg 1,4 DB eq.
- Photochemical oxidation. (Oxydation photochimique). Ce phénomène s'applique à la couche d'ozone troposphérique. Les rayons solaires réagissent normalement avec l'oxygène de l'air et forme des molécules d'ozone mais en présence d'oxydes d'azote et d'hydrocarbures ce phénomène est fortement amplifié. Or l'ozone est un oxydant puissant et est dangereux pour l'homme et la biosphère. Elle est exprimée en kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq.

### 3.2. Détail des impacts du pont en pierre

Les impacts engendrés lors du cycle de vie du pont en pierre sont regroupés sur la figure 5.

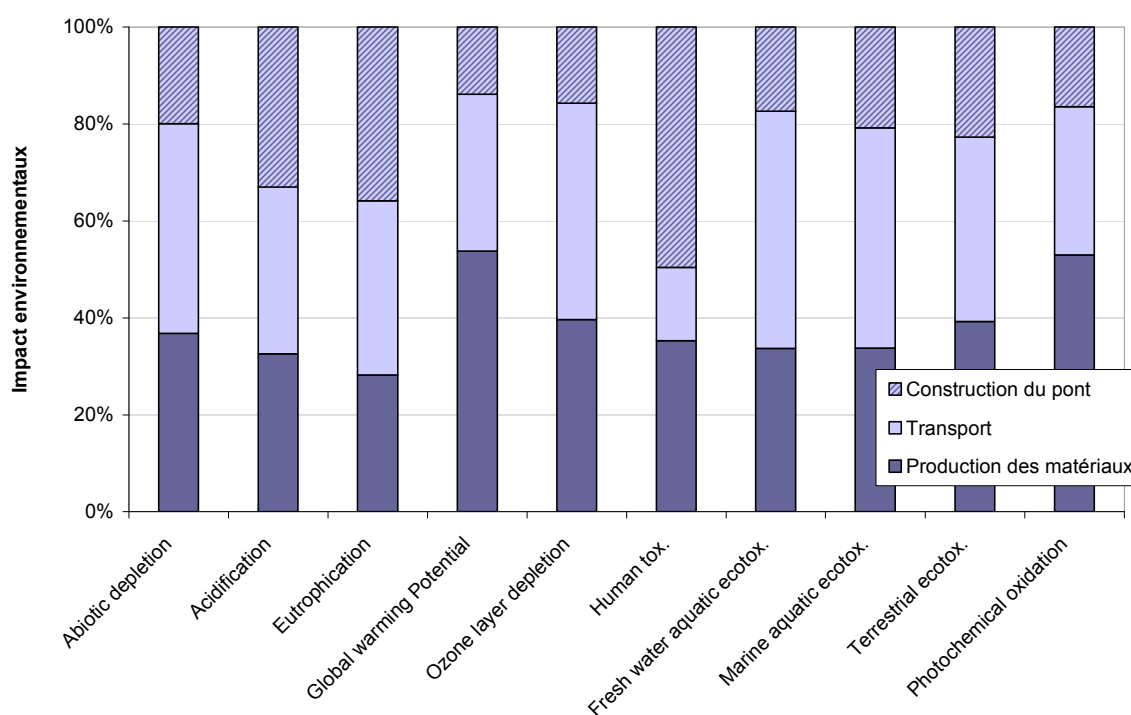


Figure 5 : Contribution relative des 3 phases de la construction du pont en pierre.

Même si les phases de production et de transport sont les étapes les plus impactantes, la phase de construction du pont représente encore autour de 20% des impacts. Le détail de chaque phase est présenté dans les figures suivantes afin de pouvoir identifier les matériaux et process qui contribuent le plus aux impacts.

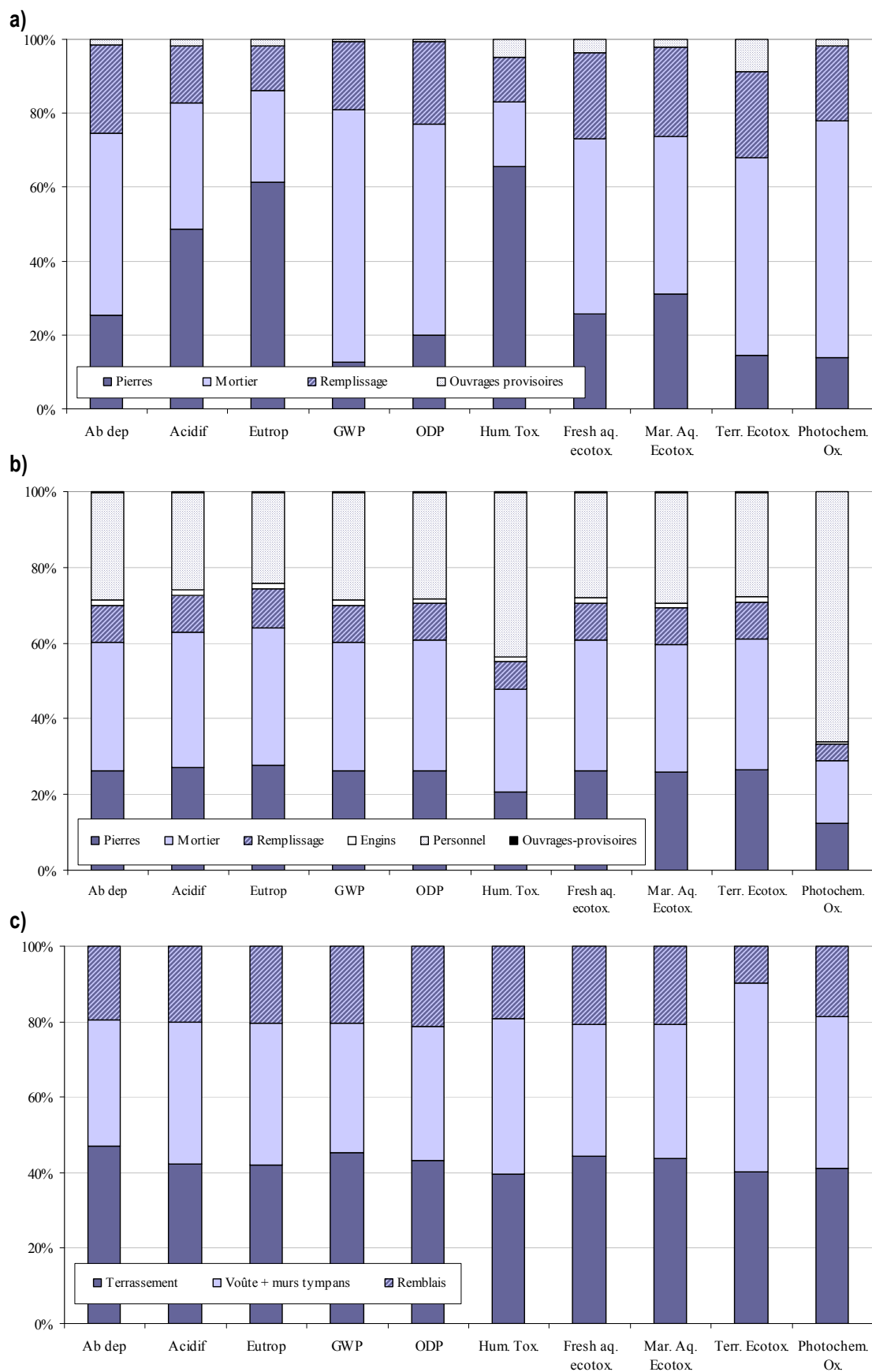
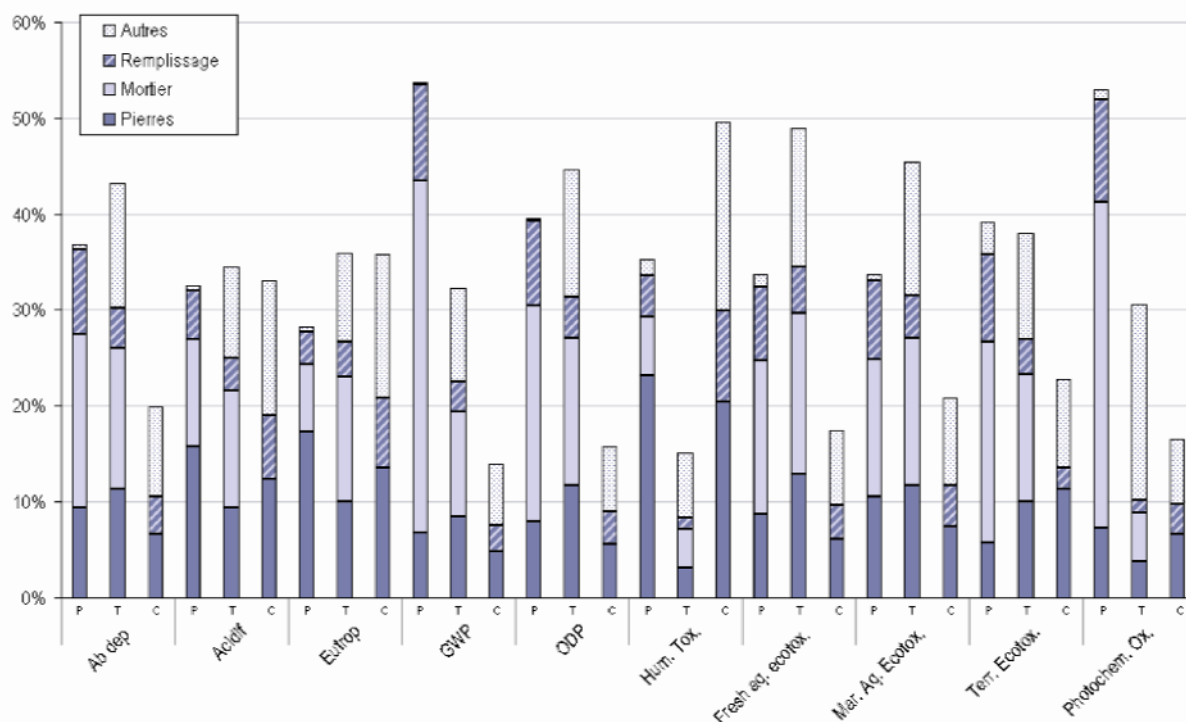


Figure 6 : Contribution relative des différents processus impliqués dans les 3 phases de la construction du pont en pierre. a) production des matériaux ; b) Transport ; c) Construction

Sur la figure 6, on peut voir que la chaux (mortier) représente la contribution majeure pour la plupart des impacts, sauf pour l'acidification, l'eutrophisation et la toxicité humaine où la production des pierres est déterminante. La contribution importante des pierres pour la toxicité humaine, vient de l'utilisation du diesel dans les machines de carrière. Ce dernier, en brûlant émet des HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques). Pour l'acidification et l'eutrophication, ce sont les émissions de NOx lors de la combustion du diesel qui sont responsables des impacts.

Les phases de terrassement et de remblais sont importantes lors de la construction. Cependant, comme l'étape de construction n'est pas prédominante ces impacts sont finalement assez faibles. La figure 7 permet d'avoir une vision complète, quoique difficilement lisible, de la contribution du mortier, de la pierre et du remplissage élatée sur les 3 phases de la construction. L'impact total est égal à 100% et l'on peut donc voir que la contribution de la production de la pierre représente 10 % des impacts en moyenne.



Cette représentation est difficile à lire et la figure suivante, est plus aisée. On a rassemblé les 3 phases (production, transport, mise en œuvre) pour chaque matériau. L'étape de la construction de la voûte et des murs tympans a été assimilée à la mise en œuvre de la pierre. On a donc négligé la consommation de la bétonnière. On se rend compte que dans la construction d'un pont en pierre, l'impact des pierres n'est pas négligeable ; vient ensuite la chaux (en particulier pour l'effet de serre) puis le remblais (qui comprend la GNT et l'étanchéité). Enfin, les derniers impacts appelé « autres » comprennent le transport de tout ce qui n'est pas pierre, chaux ou remplissage ; c'est-à-dire le personnel ainsi que la consommation de fuel lors de la préparation du chantier (terrassement).

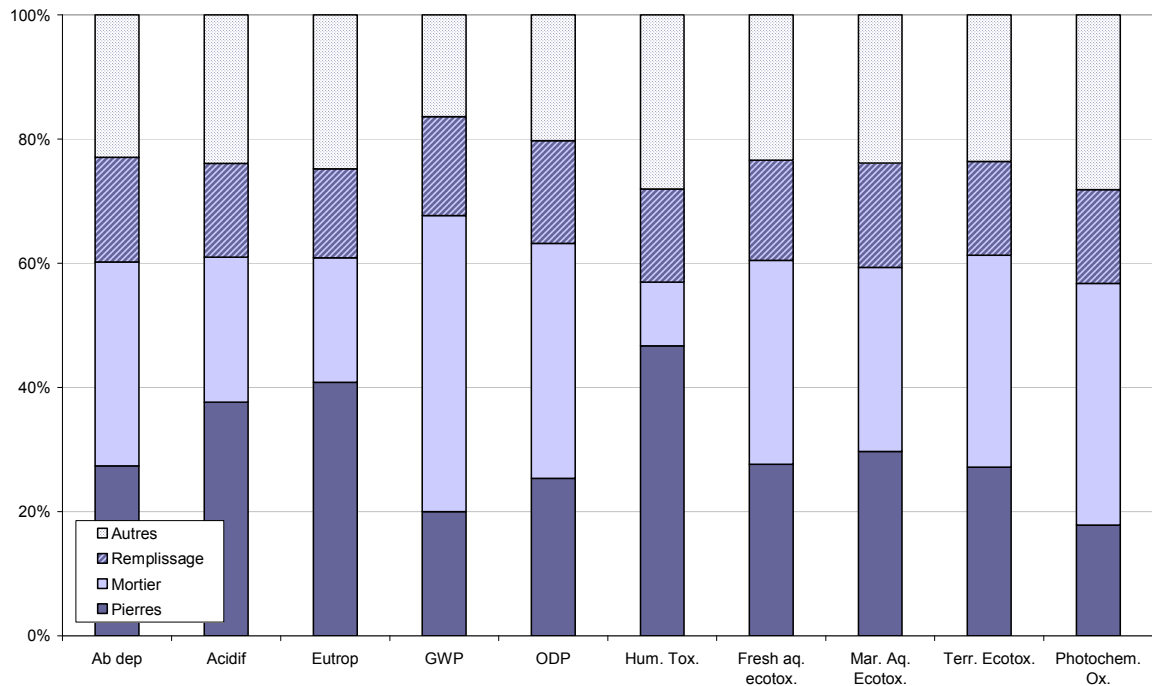


Figure 8 : Contribution relative de la pierre, de la chaux et du remplissage pour la construction du pont en pierre. Les impacts liés à la production, au transport et à la mise en œuvre sont rassemblés.

### 3.3. Comparaison entre les trois ouvrages

La comparaison entre les trois ouvrages confirme le fait que le pont en pierre a des impacts environnementaux plus faibles que les deux solutions en béton (Figure 9). La diminution est de l'ordre de 20% pour la plupart des impacts. Elle est de 40% pour le réchauffement climatique et de plus de 100% pour l'écotoxicité terrestre. Le fait que l'augmentation des impacts ne soit que de 20% vient du fait que la phase de transport est similaire pour les trois ouvrages. De même la phase de construction proprement dite n'est pas très différente (même si les processus utilisés le sont). Ainsi la différence qui existe au niveau de la production des matériaux, différence de l'ordre de 50% est atténuée si l'on considère les 3 phases de la construction, et la différence finale n'est que de 20%.

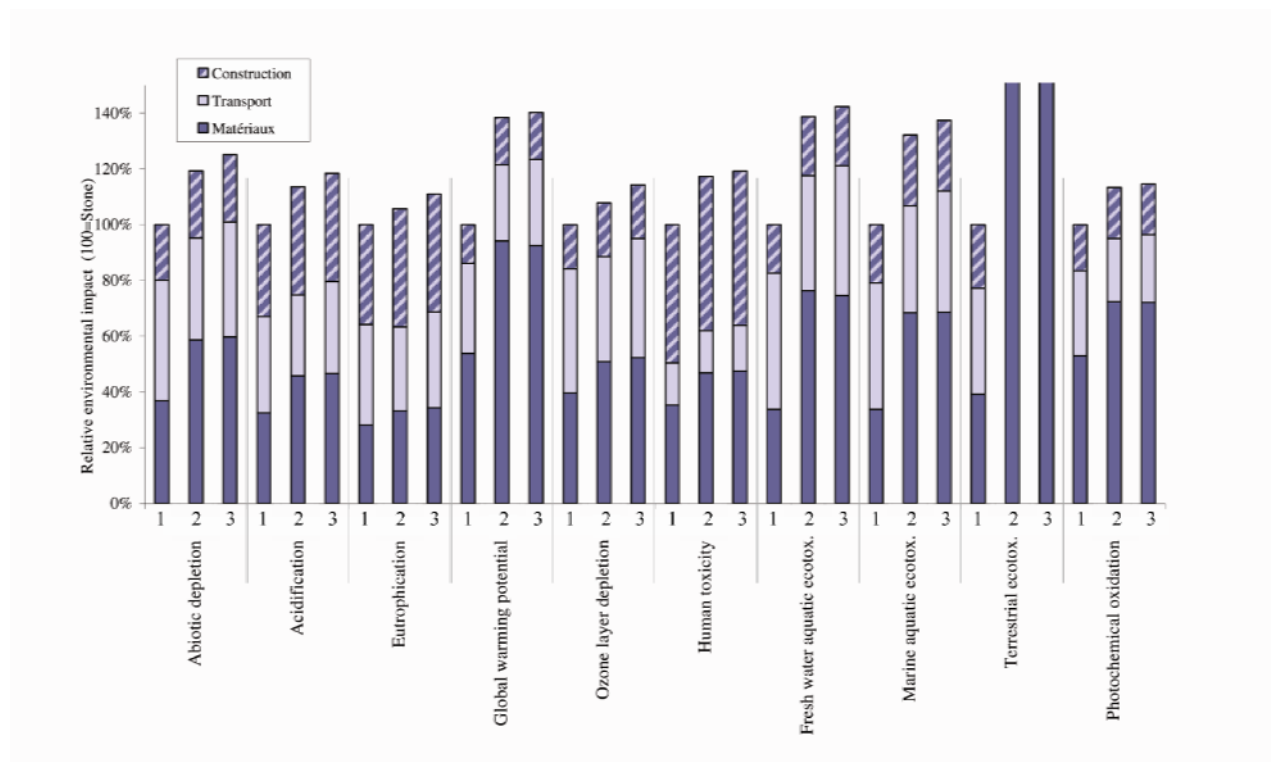


Figure 9 : Comparaison des trois ouvrages en détaillant au sein de chaque ouvrage les 3 phases étudiées. 1) Voûte en pierre + murs tympans, 2) Voûte en béton avec murs en retour, 3) Voûte béton sans murs. La comparaison se fait en considérant que l'impact du pont en pierre est de 100%.

De même que pour la solution en pierre, il est intéressant d'étudier en détail la contribution des différents matériaux et étapes de la voûte en béton. Pour des raisons de simplicité, nous n'étudierons que la voûte en béton avec les murs de retour. La solution sans mur ayant des impacts très similaires.

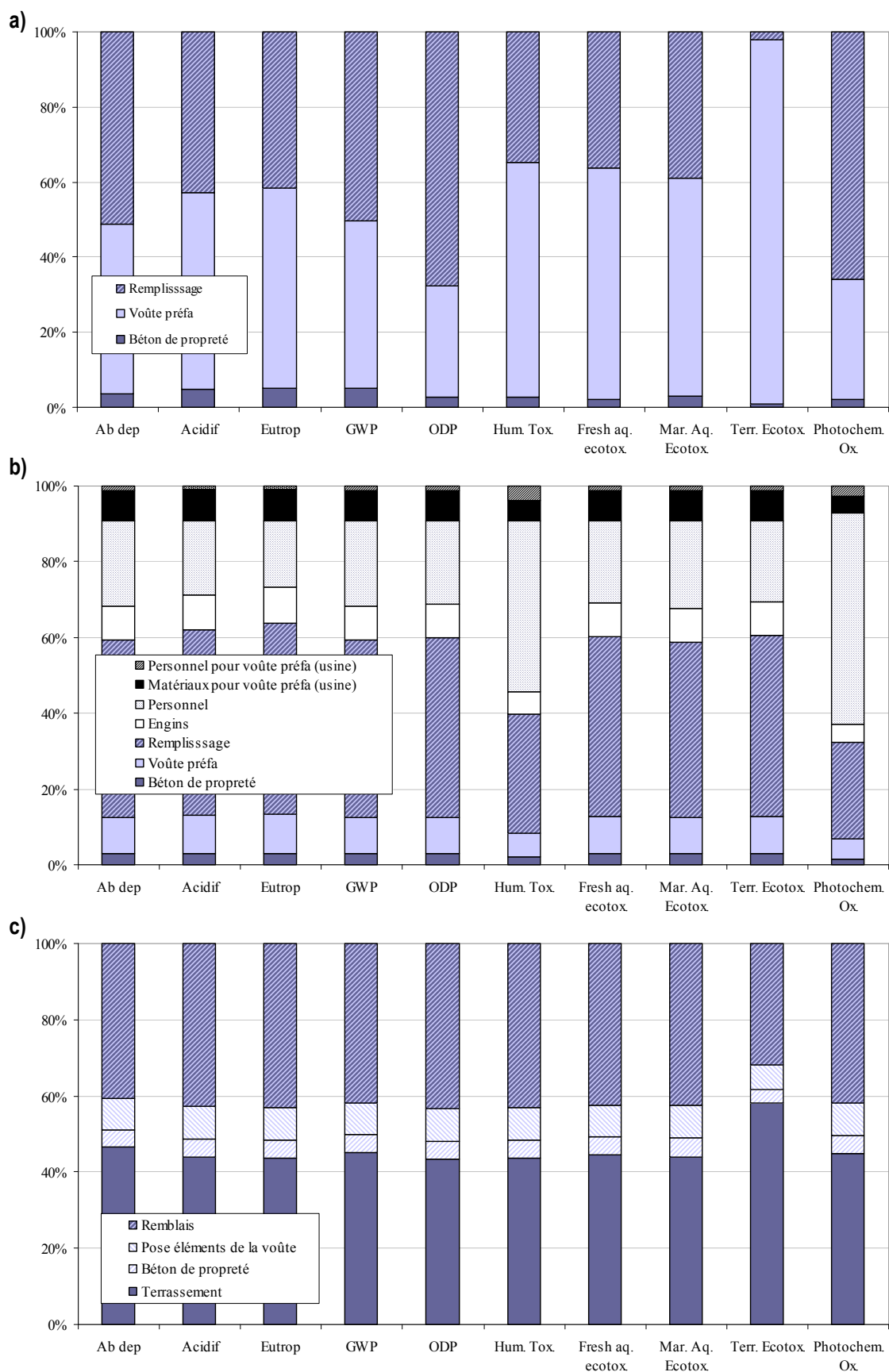


Figure 10 : Contribution relative des différents processus impliqués dans les 3 phases de la construction du pont avec une voûte en béton préfabriquée et des murs en retour. a) production des matériaux ; b) Transport ; c) Construction

Comme la phase de production des matériaux est prédominante (Figure 9), on remarque que la production du béton de la voûte ainsi que du remblai sont les phases principales. La production du remblai vient en fait de la chaux introduite pour stabiliser la GNT. De même pour le transport, on remarque que c'est le transport des remblais qui induit le plus d'impacts. Ceci est dû à la quantité bien plus importante de matériel transporté comparé à la solution en pierre (600t vs 150t). Il est intéressant de noter qu'à la différence du pont en pierre, la phase de construction proprement dite de la voûte est très rapide et n'induit que très peu d'impact (Figure 10c). Ceci explique que malgré les quantités bien plus importantes de déblais et remblais déplacés, les impacts de la construction sont similaires. La mise en œuvre de la voûte préfabriquée se faisant très facilement avec peu d'hommes et de machines sur site. Le transport du personnel est également réduit, même en prenant en compte les déplacements des ouvriers qui sont venus à l'usine pour produire les éléments de la voûte.

On retrouve ici un élément classique de comparaison entre une technique mécanisée et une technique plus traditionnelle. La technique mécanisée a optimisé les déplacements et les temps de travaux réduisant ainsi les coûts de mise en œuvre. Et, dans ce cas particulier, ce n'est pas le béton, en lui-même qui cause un bilan défavorable pour cette solution en voûte préfa, mais plutôt la quantité de remblais qu'il faut déplacer. En effet, si l'on compare la figure 10 avec la figure 6, on remarque que le béton (production + transport + mise en œuvre) représente une contribution inférieure à la voûte en pierre jointoyée à la chaux. Le transport du personnel est également inférieur. Par contre les travaux de préparation du chantier ainsi que les quantités de déblais – remblais imputables à l'ouvrage et aux soutènements rendent cette solution technique moins pertinente.

**Perspectives de travail :** Au vu de la sensibilité du résultat à la quantité de remblais nécessaire et à la consommation de fuel associée lors de cette mise en œuvre, il semble important de vérifier ces calculs.

### 3.4. Discussion

A la suite de cette étude préliminaire, certains points méritent discussion

#### 3.4.1. Amortissements des infrastructures

Rappelons d'abord que dans le cadre de l'Analyse de Cycle de Vie, le terme infrastructure représente les impacts indirects associés à la production et à la maintenance des moyens de production. Dans les simulations précédentes, les infrastructures ont été exclues. Ce choix est justifié car prendre en compte les infrastructures rajoute beaucoup d'incertitudes aux résultats.

Si on prend en compte les infrastructures, on prendra en compte l'amortissement des engins de chantier ainsi que l'amortissement des infrastructures telles les routes sur lesquelles les camions transportant les matériaux roulent. On prendra également les impacts liés à la construction (et la maintenance) d'une centrale électrique nécessaire à produire l'électricité utilisée pour étuver le béton préfabriqué.

Par exemple, lorsqu'on analyse le processus qui a permis de modéliser les camions utilisés lors de la phase de transport on obtient les résultats suivants (figure 11) : Les infrastructures représentent souvent plus de 30% des impacts ; essentiellement du fait de la construction de la route. Pour l'écotoxicité terrestre la construction de la route et du camion rendent les impacts de l'utilisation du camion négligeables.

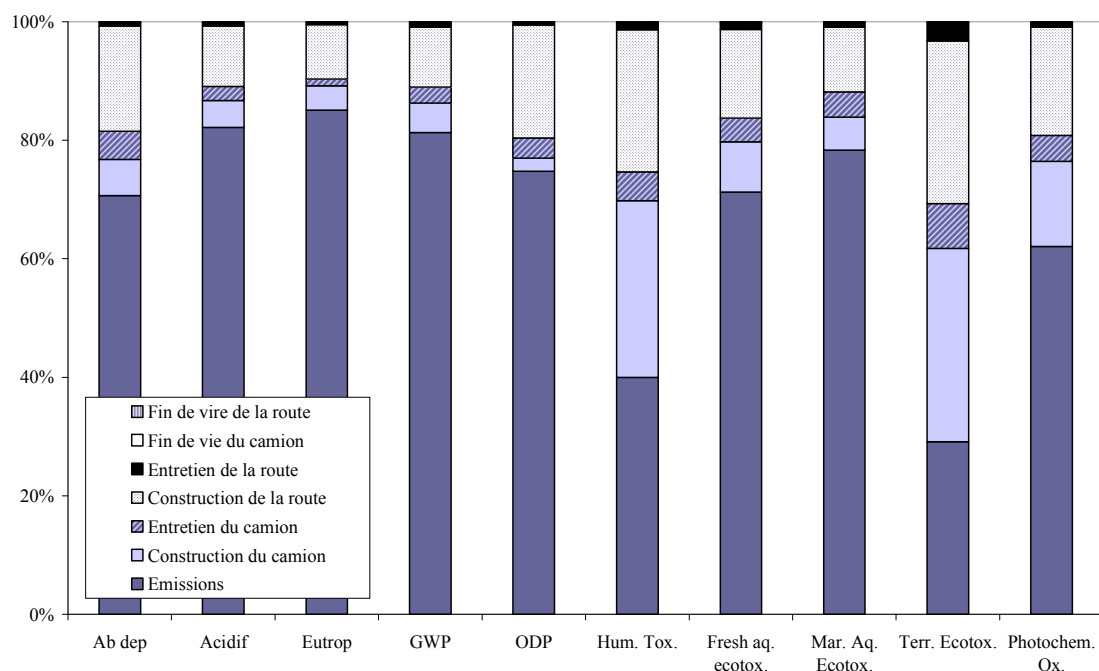


Figure 11: Contribution relative des impacts de l'utilisation d'un camion et des impacts associés liés à la construction de la route et son entretien, à la construction du camion et son entretien

Ainsi, si dans notre modélisation on prend en compte l'amortissement des engins de chantier, il est nécessaire de ne pas se limiter aux seuls engins de chantier mais d'inclure également l'amortissement des voitures utilisées, des routes et de toutes les infrastructures liées à ce chantier. On observe alors que l'impact de l'amortissement des engins de chantier est négligeable par rapport à l'amortissement de l'ensemble des autres infrastructures.

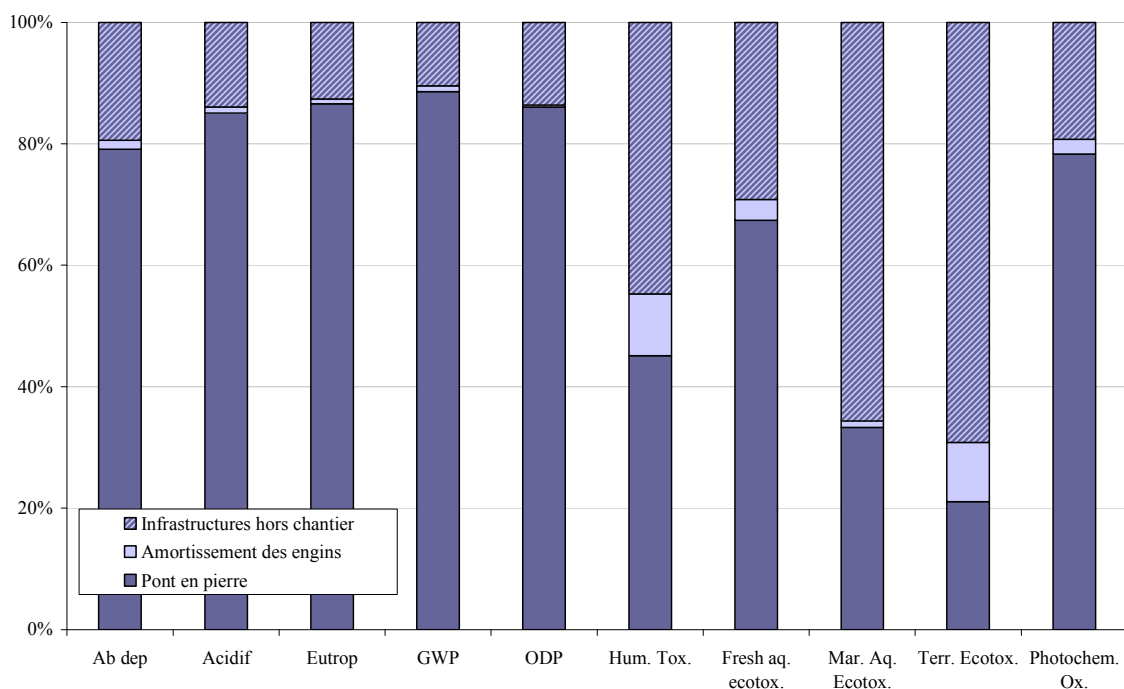


Figure 12: Contribution de l'amortissement des engins de chantier et des autres amortissement comparé aux impacts liés à la construction proprement dite.



### **3.3.2. Maintenance**

On peut également s'intéresser à la phase dite d'utilisation ce qui revient dans le cas d'un pont à de la maintenance. Quelle que soit la technique envisagée, l'objectif en terme de durée de vie de chacun de ces ouvrages est 100 ans.

En théorie, le pont en pierre ne devrait pas nécessiter de maintenance particulière, ou alors ponctuelle (rejointoiement ponctuel de pierres), tandis que l'étanchéité des buses béton devrait être changée tous les 30 ans soit deux fois. Ici nous n'avons considéré qu'une chape (d'autres équipements auraient pu être considérés sur la voûte béton tels que les dispositifs de retenue, non évalués dans l'étude). On doit donc rajouter la production et la mise en décharge d'une chape ainsi que le transport des ouvriers et le fioul consommé durant les opérations. Du fait de la présence d'une couverture de chaux sur l'extrados de la maçonnerie faisant également office d'étanchéité ainsi que de l'absence d'éléments vulnérables à la corrosion (armatures métalliques), on peut considérer qu'il ne sera pas nécessaire de remplacer la chape sur la voûte maçonnée pendant la période considérée, à savoir 100 ans (cette hypothèse est validée par les ouvrages anciens du même type présents sur le territoire).

De plus, les ouvrages d'art doivent faire l'objet de divers niveaux de surveillance et doivent être ainsi inspectés à intervalles réguliers. Si l'on considère les ouvrages d'art du Réseau Routier National, on distingue trois niveaux de surveillance :

- La surveillance continue : elle se fait tous les ans. Pour le pont, cette solution est relativement aisée puisque le maire et les artisans se trouvent à proximité.
- La visite périodique de type Image Qualité Ouvrages d'Arts (IQOA) : un expert est mandaté afin de procéder à une inspection visuelle pour observer l'apparition possible de désordres. Elle a lieu tous les 3 ans.
- L'Inspection Détaillée Périodique : elle est réalisée tous les 6-9 ans. Elle consiste en une inspection très poussée de l'ouvrage afin de constater de manière précise les différents problèmes que l'ouvrage peut rencontrer.

Il est difficile de jauger des pratiques réelles et de les simuler. Les collectivités territoriales possèdent leur propre système de surveillance (généralement proche de la surveillance du RRN), mais certaines communes, eu égard aux coûts associés à ce système, ne peuvent pas toujours le mettre en œuvre. Dans le cas des buses, l'inspection détaillée serait réalisée par une société telle que Socotec qui devrait venir d'Alès tandis que ces inspections détaillées pour le pont en pierre pourraient être réalisées par les artisans eux-mêmes. Elles ne nécessiteraient qu'un petit déplacement contrairement aux voûtes béton. La comparaison entre les solutions montre clairement l'avantage du pont en pierre.

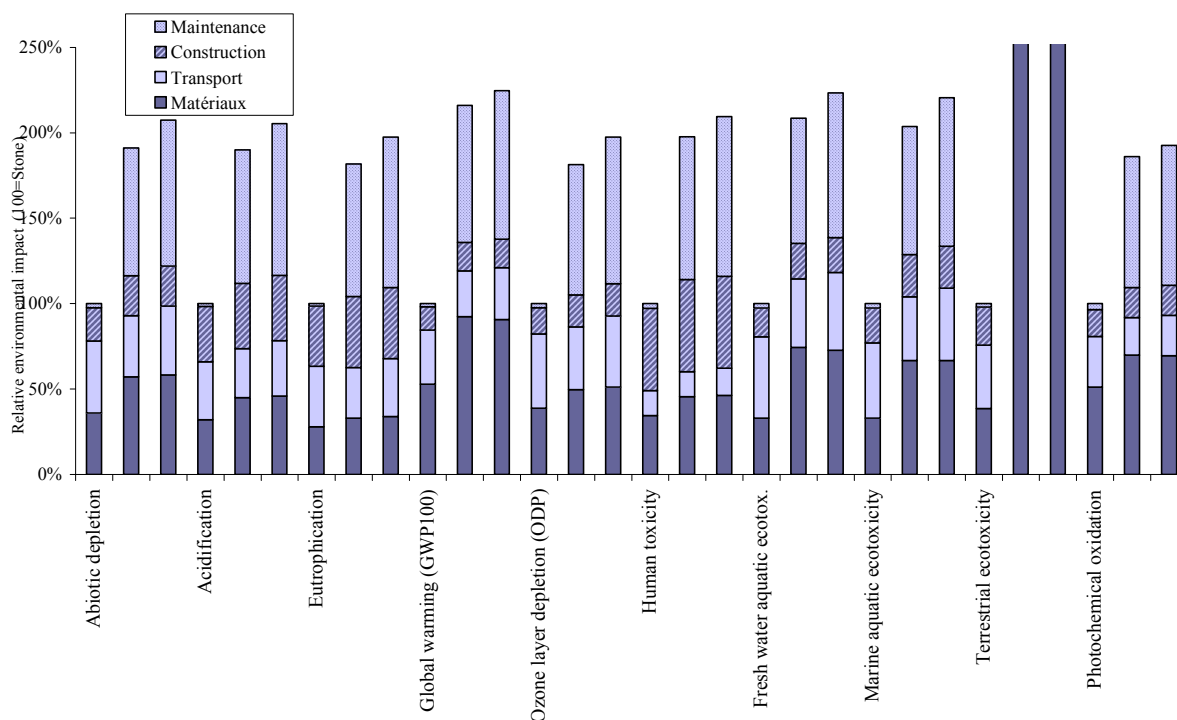


Figure 13 : Contribution de la maintenance sur les 3 solutions de pont.

Le détail des impacts pour les voûtes en béton montre la contribution importante des chapes d'étanchéité.

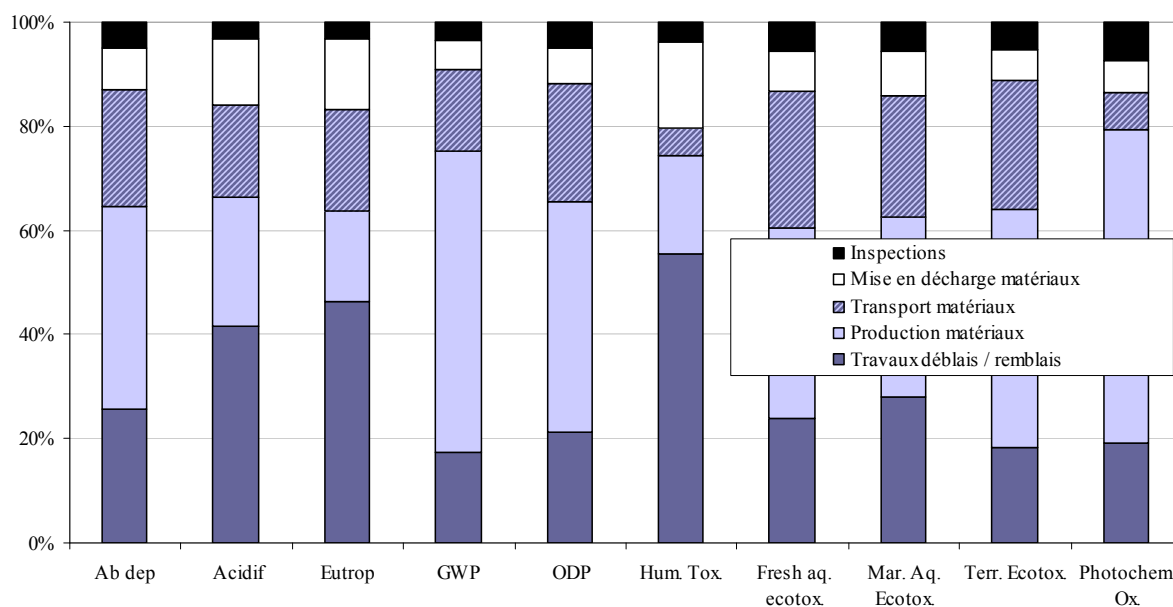


Figure 14 : Détail de la phase de maintenance d'une voûte en béton préfabriqué.

Si la chape d'étanchéité est changée, les impacts des voûtes béton augmentent et si elles ne le sont pas, leur durée de vie sera réduite. En conséquence, si l'on considère cette phase d'entretien, la solution du pont en pierre est très clairement plus favorable. Néanmoins, il existe un manque de visibilité sur cet aspect. En effet, il est impossible de prévoir ce qui sera fait dans 25, 50 ou 100 ans

sans introduire dans l'étude de grandes incertitudes. Nous ne savons pas à quel point les différents ouvrages (notamment les voûtes béton) seront entretenus, quelle sera leur durée de vie réelle. Enfin, il est possible que dans quelques années le trafic de cette route ait complètement changé : une plus forte circulation obligerait peut être à des modifications sur les ouvrages voire la construction d'un nouveau pont ou cette route pourrait également être abandonnée.

## 4. Analyse économique et sociale

La méthode de l'Analyse de Cycle de Vie se focalise sur l'aspect environnemental et délaisse les questions sociales et économiques par exemple. Cette partie se propose ainsi d'inclure d'autres composantes non prises en compte par l'ACV telles qu'une analyse de coûts ou les questions sociales et patrimoniales de ces chantiers. Ces aspects sont normalement pris en compte par des méthodes du type LCC (Life Cycle Cost) ou SLCA (Social Life Cycle Analysis) et sont nécessaires pour une approche "développement durable" du problème.

### 4.1 Analyse des coûts

Il est délicat de comparer les coûts d'un chantier réel et terminé avec des chantiers techniquement viables mais théoriques dont l'estimation des montants peuvent fluctuer de manière conséquente. Le coût du pont en pierre a été de 153 851 euros. Cependant, les artisans ne sont pas rentrés dans leur frais et estiment à 20 à 30 000 euros leurs pertes.

Les données que nous avons à disposition pour faire cette analyse de coût était le détail des subventions accordées et le détail des factures de matériaux payées par les artisans. Nous avons de plus une estimation très succincte de la DDT effectuée pour évaluer la hauteur des travaux à la suite de la disparition de la buse métallique, ainsi que la facture pour le pont en buse béton effectué le même été dans une commune limitrophe.

Les coûts totaux des travaux sont donc de 153 000 € pour le pont en pierre. Si l'on additionne toutes les factures des matériaux et que l'on estime le temps de travail à 3000 h (dont 300h de formation) on arrive à un manque à gagner de l'ordre de 34 000 € au vu de la facture du lot maçonnerie. On peut cependant considérer que le bureau d'étude a surfacturé son étude puisque celle-ci proposait dans un premier temps un pont en béton... On peut donc retirer la moitié des 24 000 € attribués. Pour ce qui est de la buse béton : l'estimation effectuée par la DDT était de 77 000€ alors que la facture payée pour le pont de St-Privat de Vallongue était de 277 000 €. La dispersion des prix pour la solution béton montre que l'analyse va dépendre énormément du marché, du moment et des opportunités, cependant, il est intéressant de noter que la moyenne de ces 2 prix donne un résultat similaire au pont en pierre. Il faut noter que nous ne disposons pas des hypothèses précises des différentes études de prix (dimensions, type de structure envisagé ...).

Une analyse des subventions permet d'affiner ce résultat. Les deux principales sources de financement du pont sont les subventions données par l'État, la région Languedoc-Roussillon et le Conseil Général en raison des « intempéries » (environ 70 000 euros) et les subventions au nom du « patrimoine » débloquées par le Conseil Général et le Parc National des Cévennes (à hauteur de 50 000 euros). Le total restant soit 30 000 euros revient à la commune de Saint-Andéol de Clerguemort. Pour la solution en béton, les subventions liées à la préservation du patrimoine n'auraient pas été versées. En choisissant de construire un pont en pierre, le maire de la commune a pu donc obtenir 50 000 euros qu'il n'aurait pas eu autrement. De plus, au delà de la construction du pont où du fait de sa difficulté d'accès et de l'absence d'implantation locale d'entreprises de GC, la solution béton est à un prix similaire à la pierre, il faudra rajouter pour la voûte en béton un changement de l'étanchéité (assimilé au poste terrassement + étanchéité + couverture) ainsi que la venue d'experts d'Ales (e.g. Socotec) pour les inspections détaillées. Tous ces frais additionnels étant à assumer par le budget de fonctionnement de la commune.

**Ainsi on voit très clairement que la solution en pierre nécessite un léger surcoût initial en terme d'investissement, mais qui est largement compensé par les subventions supplémentaires qu'il est possible d'avoir au titre du patrimoine ; puis cette solution est très économe en budget de fonctionnement.**

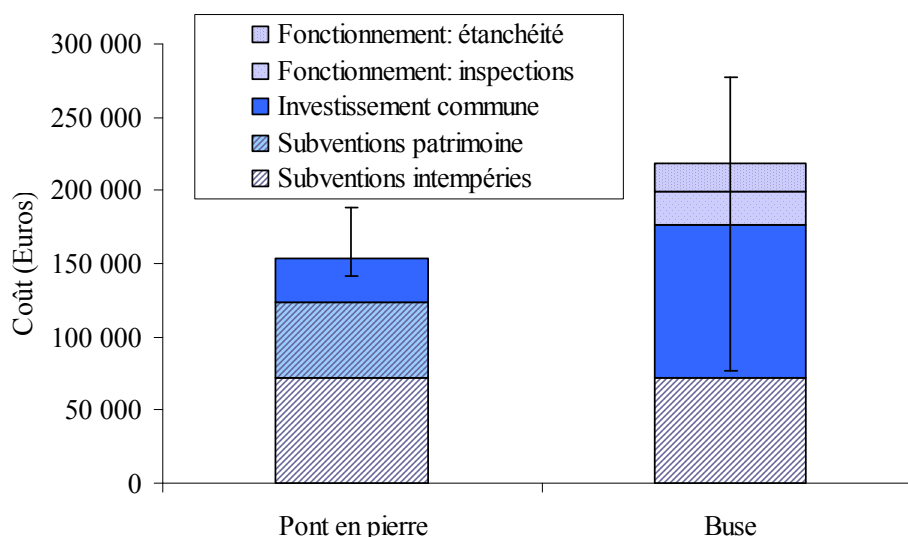


Figure 15 : Analyse des coûts pour chacune des parties et détail entre les parts investissement et fonctionnement à assumer par la commune.

## 4.2 Localisation des bénéfices

Un autre aspect qui semble intéressant dans la comparaison entre une solution pierre et une solution béton est d'observer l'origine et la destination des fonds engagés lors de la construction de ce pont. En effet, on peut voir que l'argent investi va essentiellement être investi localement (artisans bâtisseurs, artisans carriers) ou à l'échelle du département (entreprises BTP pour terrassement). Pour une solution en béton, très peu sera investi sur le territoire de la commune, une grande partie sur le département avec des entreprises de BTP d'Alès et une partie importante sera investie à l'extérieur au niveau des bureaux d'étude et des usines de préfabrication localisées à Montpellier, Nîmes et autres grands centres économiques régionaux ou nationaux. C'est ce que nous avons schématisé dans le graphique suivant, mais un manque de données précises sur la solution béton empêche d'affiner le commentaire. Il semble cependant évident que cette solution en pierre permet à la Commune, au Parc et au Département d'utiliser l'argent qu'ils dépensent pour stabiliser des emplois locaux et injecter de l'argent dans l'économie locale.

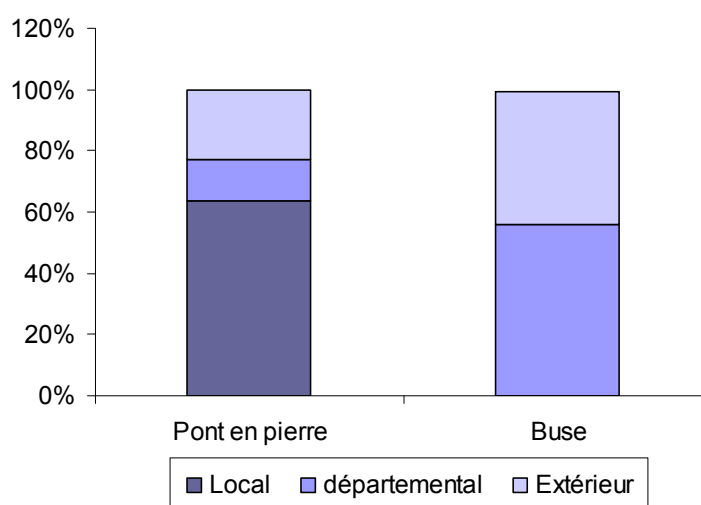


Figure 16 : Répartition géographique de la destination de l'argent selon les deux solutions envisagées.

Une autre façon de représenter cet aspect est d'analyser la destination de l'argent investi dans le projet en fonction du type d'emploi impliqué. En effet, dans ces communes situées assez loin de centres économiques nationaux ou internationaux, les emplois qualifiés liés à l'ingénierie vont avoir du mal à s'installer du fait du peu de possibilité de marché offerte. Hors, à la différence d'une solution en voûte préfabriquée qui demande une ingénierie spécialisée et en ce sens fait appel à des emplois localisés à Nîmes ou Montpellier, la construction en pierre s'appuie surtout sur un savoir faire d'artisans qui eux peuvent maintenir une activité locale.

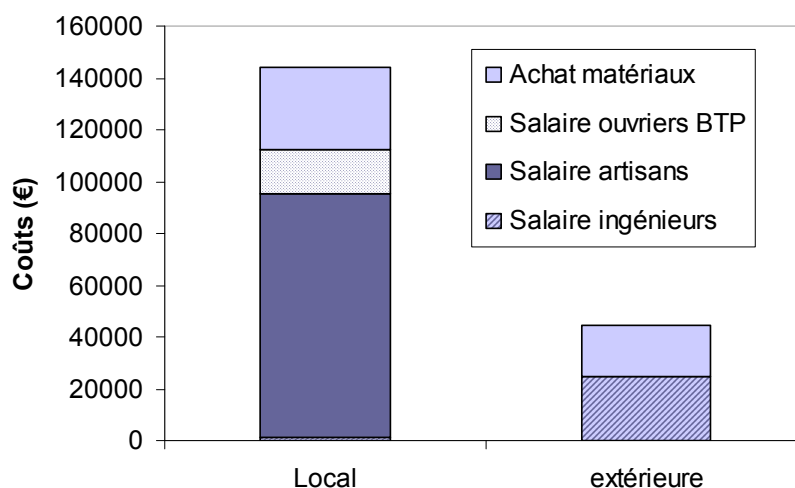


Figure 17 : Répartition selon la qualification de l'argent investi dans la construction du pont

C'est ce qui est illustré dans cette figure 17 où le manque à gagner de 34 000 euros des artisans a été intégré.

**On voit très clairement qu'avec cette technique constructive, l'argent qui est investis lors de la construction sert essentiellement à payer des emplois locaux, puisque même l'achat de matériaux permet de maintenir en activité des artisans carriers locaux.**

Enfin, il reste à aborder l'aspect patrimonial de cet ouvrage. Cet aspect est plus subjectif et non quantifiable par l'outil ACV mais il ne peut être mis de côté sur cet appel d'offres particulier. Le pont de Chaldecoste se trouve dans le Parc National des Cévennes dont la particularité est d'abriter de nombreux ouvrages d'arts en pierre sèche datant du début du siècle dernier. Cette caractéristique est le moteur d'une volonté de préserver un patrimoine riche et ancien. Les solutions des voûtes en béton sont à la fois techniquement, financièrement et dans une certaine proportion environnementalement viables mais le choix d'un tel ouvrage serait fait au détriment d'une logique de protection d'un territoire et d'un savoir-faire artisanal. En effet, le pont a été réalisé par les membres de l'association Artisans Bâtisseurs Pierre Sèche (ABPS) dont l'un des principales objectifs est la transmission de techniques de constructions en pierre sèche aux nouvelles générations. Ce chantier a ainsi mobilisé plus d'une dizaine d'artisans locaux entraînant une dynamique de développement économique et durable créateur d'emplois.

Enfin, il existe une dernière différence et non la moindre entre les deux types d'ouvrages : l'impact sur le paysage. Une des principales ressources de revenus de ce département provient du tourisme. La préservation du paysage cévenole est un enjeu économique important pour les différents acteurs de cette région.

## 5. Conclusion

Début 2012, s'est achevée la construction d'un pont en pierre sèche dans la commune de Saint-Andéol de Clerguemort (Lozère, France). Cet ouvrage remplace une buse métallique détruite par un épisode cévenol. Il s'agit d'une voûte en plein cintre, de 6 mètres d'ouverture, dont la structure est constituée de pierres de schistes maçonnées par un mortier de chaux.

Ce chantier a été l'occasion de mener une étude environnementale du projet. Celui-ci a réuni des acteurs du monde académique (ENTPE, Ecole Centrale de Lyon, IFSTTAR), de l'ingénierie publique (SETRA) et des entreprises artisanales locales (Artisans Bâisseurs en Pierres Sèches et carriers traditionnels locaux). L'analyse environnementale a été complétée par une réflexion sur les enjeux économiques, patrimoniaux et sociaux liés au pont.

Le bilan environnemental du pont montre clairement que les principaux impacts générés proviennent de la production de la pierre (de par la grande quantité utilisée) et de la chaux (matériau au lourd impact environnemental). Il a été ensuite intéressant de mettre en relief ces valeurs par rapport à celles d'autres solutions envisageables, mais offrant le même service. Deux voûtes en béton préfabriqué ont été évaluées. Les résultats des modélisations ont montré que le pont en pierre présentait un meilleur impact environnemental de l'ordre de 20%. Cette faible différence est due au fait que les phases de transport et de mise en œuvre sont similaires pour les trois solutions atténuant ainsi la différence importante (de l'ordre 50%) qui existe entre la production des matériaux pour la solution en pierre et celles en béton.

La question de la maintenance a également été évoquée. En effet, une fois construits les différents ouvrages doivent faire l'objet d'un suivi régulier et d'opérations de maintenance. Un pont en pierre nécessite très peu de maintenance, alors qu'une solution béton, pour durer 100 ans nécessite des opérations d'entretien spécialisé, dont le remplacement de l'étanchéité. Ce remplacement entraîne une augmentation considérable des impacts rendant la solution en pierre largement favorable.

D'un point de vue économique, il est apparu que les différentes solutions avaient des coûts de construction comparables. Ceci étant dû à la difficulté d'accès de la région. Par contre, il est très clair que la construction d'un pont en pierre permet de diminuer les frais en terme d'investissement direct pour la commune du fait de subventions pour le caractère patrimonial et architectural de l'ouvrage. Cette solution constructive diminue également les coûts futurs d'entretien qui devront être assumés sur le budget de fonctionnement de la commune. Enfin, nous avons pu montrer que l'argent investi par le département, la commune et le parc était essentiellement réinvesti localement en majorité dans des salaires favorisant ainsi un maintien de l'emploi local.





## Annexes

### Distances et itinéraires choisis pour les matériaux utilisés

| Départ                         | Arrivée                        | Distance | Pierre de la voute | Pierre à maçonner | Sable | Chaux | Ciment | GNT 0/20 | étanchéité & drain | Bois – Charpente | Bois – Coffrage |
|--------------------------------|--------------------------------|----------|--------------------|-------------------|-------|-------|--------|----------|--------------------|------------------|-----------------|
| Nasbidals                      | Collet de Dèze                 | 187 km   |                    |                   | x     |       |        |          |                    |                  |                 |
| Les bondons                    | Col de Banette                 | 42,6 km  |                    |                   |       |       |        | x        |                    |                  |                 |
| Col de Banette                 | St Andéol                      | 3,5 km   |                    |                   |       |       |        | x        |                    |                  |                 |
| St Julien du Tournel           | St Andéol                      | 50,1 km  | x                  |                   |       |       |        |          |                    |                  |                 |
| St Astier                      | Collet de Dèze                 | 422 km   |                    |                   |       | x     |        |          |                    |                  |                 |
| Collet de Dèze                 | St Andéol                      | 10,6 km  |                    |                   | x     | x     | x      |          | x                  |                  |                 |
| Lachamp                        | St Andéol                      | 85,3 km  |                    | x                 |       |       |        |          |                    |                  |                 |
| Beucaire                       | Collet de Dèze                 | 94 km    |                    |                   |       |       | x      |          |                    |                  |                 |
| Cocurès                        | St Andéol                      | 36 km    |                    |                   |       |       |        |          |                    |                  | x               |
| Cocurès                        | Saint etienne vallée française | 48 km    |                    |                   |       |       |        |          |                    | x                |                 |
| Saint etienne vallée française | St Andéol                      | 34 km    |                    |                   |       |       |        |          |                    | x                |                 |
| Fos sur mer                    | Collet de Dèze                 | 150 km   |                    |                   |       |       |        |          | x                  |                  |                 |

| Départ                         | Arrivée                        | Distance | Béton de propreté |       |          | Buse préfabriquée |       |         | Remblais |          |       |                    |
|--------------------------------|--------------------------------|----------|-------------------|-------|----------|-------------------|-------|---------|----------|----------|-------|--------------------|
|                                |                                |          | Ciment            | Sable | Granulat | Ciment            | Sable | Gravier | Acier    | GNT 0/20 | Chaux | étanchéité & drain |
| Nasbidals                      | Collet de Dèze                 | 187 km   |                   | x     |          |                   |       |         |          |          |       |                    |
| Les bondons                    | Col de Banette                 | 42,6 km  |                   |       | x        |                   |       |         |          | x        |       |                    |
| Col de Banette                 | St Andéol                      | 3,5 km   |                   |       | x        |                   |       |         |          | x        |       |                    |
| St Julien du Tournel           | St Andéol                      | 50,1 km  |                   |       |          |                   |       |         |          |          |       |                    |
| St Astier                      | Collet de Dèze                 | 422 km   |                   |       |          |                   |       |         |          |          | x     |                    |
| Collet de Dèze                 | St Andéol                      | 10,6 km  | x                 | x     |          |                   |       |         |          |          | x     | x                  |
| Lachamp                        | St Andéol                      | 85,3 km  |                   |       |          |                   |       |         |          |          |       |                    |
| Beucaire                       | Collet de Dèze                 | 94 km    | x                 |       |          |                   |       |         |          |          |       |                    |
| Cocurès                        | St Andéol                      | 36 km    |                   |       |          |                   |       |         |          |          |       |                    |
| Cocurès                        | Saint etienne vallée française | 48 km    |                   |       |          |                   |       |         |          |          |       |                    |
| Saint etienne vallée française | St Andéol                      | 34 km    |                   |       |          |                   |       |         |          |          |       |                    |
| Fos sur mer                    | Collet de Dèze                 | 150 km   |                   |       |          |                   |       |         |          |          |       | x                  |
| Moyenne nationale              | Ciment                         | 150 km   |                   |       |          | x                 |       |         |          |          |       |                    |
|                                | Acier                          | 600 km   |                   |       |          |                   |       |         | x        |          |       |                    |
|                                | Sable                          | 94 km    |                   |       |          |                   | x     | x       |          |          |       |                    |

## Ensemble des données environnementales utilisées pour les trois ouvrages

| Grille d'évaluation    |  |
|------------------------|--|
| OK                     |  |
| Légère modif possibles |  |
| A revoir               |  |

| Objet étudié       | Processus utilisé                                                    | Référence       | Commentaire                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Matériaux</b>   |                                                                      |                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Ciment             | Portland cement, strength class Z 52.5, at plant/CH                  | Ecoinvent       | C'est une données suisse générique. Il existe des données françaises plus précises. Ca ne changera pas beaucoup le résultat, mais prend beaucoup plus de temps à construire la donnée                                                                                                          |
| Chaux              | Lime, hydrated, packed, at plant/CH                                  | Ecoinvent       | Les impacts de la chaux sont très important. Le process est construit à partir des fours à cimenterie. Des données plus précises sont nécessaires.                                                                                                                                             |
| Gravier            | Gravel, round, at mine/CH                                            | Ecoinvent       | Données suisse générique. Gravier roulé. Il existe données française, mais ne change pas le résultat                                                                                                                                                                                           |
| Sable              | Sand at mine/CH                                                      | Ecoinvent       | Données suisse générique. Gravier roulé. Il existe données française, mais ne change pas le résultat                                                                                                                                                                                           |
| Plastifiant        | Superplastifiant                                                     | Chen, 2009      | Donnée reconstruite à partir de données du SYNAD                                                                                                                                                                                                                                               |
| Pierre de la voute | Pierre à maçonner                                                    | Carrière Rocher | Donnée construite à partir de la visite de la carrière Rocher. Aucun autre travail n'a été comptabilisé. Rq: le fioul des disquieuses est intégré dans le calcul pour la construction du pont.                                                                                                 |
| Pierre des murs    | Pierre à maçonner                                                    | Carrière Rocher |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| GNT                | Gravel, unspecified, at mine/CH                                      | Ecoinvent       | Donnée très générale mélange gravier roulé (79%) et concassé (21%). On peut faire beaucoup mieux. L'impact de 100% gravier concassé serait de l'ordre de 30% supérieur. Cependant dans le remplissage du pont, chaux et bitume contrôlent les impacts. Donc peu de changement <i>in fine</i> . |
| Bois (Charpente)   | Sawn timber, hardwood, raw, air / kiln dried, u=10%, at plant/RER    | Ecoinvent       | Pas de transport inclus. Données allemandes                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Bois (Coffrage)    | Sawn timber, hardwood, planed, air / kiln dried, u=10%, at plant/RER | Ecoinvent       | Pas de transport inclus. Données allemandes                                                                                                                                                                                                                                                    |

|                   |                                             |                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------|---------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Boulons/Rondelles | Steel, low-alloyed, at plant/RER            | Ecoinvent         | Donnée Europe. Pas de process compliqué (juste laminage à chaud) 63% haut fourneau, 37% électrique                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Barres d'acier    | Reinforcing steel, at the site work/FR      | Gomes et al. 2012 | Etude conduite par DIOGEN sur barre d'acier vendues en France. Donnée très différente de la donnée générique europe (beaucoup plus faible)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Géomembrane       | Bitumen sealing V60, at plant/RER           | Ecoinvent         | Donnée très générale pour une couche d'étanchéité. Comprend du bitume (70%), du filler calcaire (20%) et du sable (10%) + électricité, etc... Cette donnée n'est probablement pas adaptée au matériau mis en œuvre pour l'étanchéité d'un ouvrage. Cependant, il n'existe pour le moment pas d'autres données. Une modif de cette donnée peut avoir des conséquences importantes car la prod du bitume représente > 30% de la prod des matériaux pour le remplissage. |
| Drain (PVC)       | Polyvinylechloride, at regional storage/RER | Ecoinvent         | Transport entre l'usine et le centre de dépôt inclus.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

#### Transport\*

|                  |                                    |           |                                                                                                                                      |
|------------------|------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Camion 10t       | Transport, Lorry 7-16t, EURO4/RER  | Ecoinvent |                                                                                                                                      |
| camion de 15-19t | Transport, Lorry 16-32t, EURO4/RER | Ecoinvent |                                                                                                                                      |
| Camion 32t       | Transport, Lorry 16-32t, EURO4/RER | Ecoinvent |                                                                                                                                      |
| semi-remorque    | Transport, Lorry >32t, EURO4/RER   | Ecoinvent |                                                                                                                                      |
| voiture          | Transport, passenger car/RER       | Ecoinvent |                                                                                                                                      |
| utilitaire       | Operation, van <3,5t/RER           | Ecoinvent | on a pris operation et pas transport pour considérer des trajets de van et pas des trajet en fonction du poid tranbsporté par le van |

\* Pour tous les transports de marchandise, on a systématiquement multiplié les distances par 5/3 pour considérer un retour à vide sur la même distance en consommant 1/3 de moins qu'à vide.

\*\* On pourrait essayer d'être plus précis dans le choix des véhicules. En particulier sur l'age et leur performance (EURO 1 à 5), ainsi que sur le choix du poid total en charge. Ecoinvent, bien que très complet sur les type de véhicule est souvent un peu léger dans les options pour les gros camion utilisés pour les transport des matériaux du génie civil.

### Consommé sur le chantier

|                  |                                                      |                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------|------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fioul            | Diesel burned in diesel-electric generating set /GLO | Ecoinvent          | Impacts lié au fait que cela rentre dans un groupe électrogène. Émissions / conso d'autres fluides.                                                                                                                                                                                                                                |
| Essence          | Diesel burned in building machine /GLO               | Ecoinvent          | C'est du diesel et pas de l'essence, mais l'intérêt est d'avoir également les impacts lié au fait que cela rentre dans une machine. Émissions / conso d'autres fluides.                                                                                                                                                            |
| Huile            | Lubricating oil, at plant/RER                        | Ecoinvent          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Disques diamants | Ferrochromium, high carbon, 68%Cr, regional storage  | Ecoinvent          | On a pris cet acier pour simuler le carbure de tungsten ou les diamants synthétiques utilisés sur le disque. On considère que seulement 2,5cm du diamètre du disque sont fait avec cet alliage. Ce choix est discutable. De manière générale cela amène des impacts importants; mais difficile d'évaluer si c'est justifié ou non. |
|                  | Reinforcing steel, at the site work/FR               | Gomes et al., 2012 | Le reste du disque est de l'acier 100% électrique.                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

### Mise en décharge

|             |                                                                  |           |                                                                                                                             |
|-------------|------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Géomembrane | Disposal, bitumen, 1,4% water, to sanitary landfill/CH           | Ecoinvent | Pb: quelle quantité exacte de bitume doit on considérer. Pour le moment l'ensemble de la géomembrane va dans cette décharge |
| GNT         | Disposal, inert waste, 5% water, to inert material landfill/CH   | Ecoinvent |                                                                                                                             |
| PVC         | Disposal, polyvinylchloride, 0,2% water, to sanitary landfill/CH | Ecoinvent |                                                                                                                             |