Méthodologie d'évaluation au sens du développement durable des aménagements souterrains

Yaarob Audi

▶ **To cite this version:**

Yaarob Audi. Méthodologie d'évaluation au sens du développement durable des aménagements souterrains. Eco-conception. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2016. Français. NNT : . tel-01459521

HAL Id: tel-01459521
https://hal.science/tel-01459521

Submitted on 7 Feb 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Thèse de Doctorat

Yaarob AUDI

Mémoire présenté en vue de l'obtention du

Grade de Docteur de l'Ecole Centrale de Nantes

Sous le label de L'Université Nantes Angers Le Mans

École doctorale : SPIGA

Discipline : Aménagement de l'espace – Urbanisme

Unité de recherche : ***IFSTTAR/AME - CETU***

Soutenue le 09/12/2016

Méthodologie d'évaluation au sens du développement durable des aménagements souterrains

JURY

Président : **Frédéric GRONDIN**, Professeur, Ecole Centrale de Nantes

Rapporteurs : **François BUYLE-BODIN**, Professeur des universités, Université Lille 1

Youssef DIAB, Professeur des universités, Université Paris-Est Marne la Vallée

Examinateurs : **Ben Mourad AMOR**, Professeur assistant, Université de Sherbrooke – Canada

Natacha GONDRAN, HDR – Maitre assistante - Ecole des Mines - Saint Etienne

Directrice de thèse : **Agnès JULLIEN**, Directrice de recherche, IFSTTAR – Centre de Nantes

Co-encadrantes de thèse : **Adélaïde FERAILLE**, Co-directrice de thèse ; docteur HDR, Université Paris-Est.

Laetitia D'ALOIA SCHWARTZENTRUBER, docteur – Centre d'Etudes des Tunnels, Bron.

Remerciements

En premier lieu, Je souhaite exprimer ma reconnaissance à mon cher pays « **la Syrie** » où j'ai passé mon enfance ainsi qu'à l'université de Damas où j'ai fait ma formation d'architecte. Ma reconnaissance est également à mon deuxième pays « **la France** », où j'ai vécu de très bonnes expériences et je me suis enrichi d'une nouvelle culture.

Mes remerciements et ma gratitude vont à **Mme. Agnès JULLIEN** pour avoir dirigé cette thèse, ainsi que pour sa contribution à l'aboutissement de ce projet de recherche.

Je suis reconnaissant à **Mme. Laetitia D'ALOIA** du Centre d'études des tunnels et à **Mme. Adélaïde FERAILLE** de l'Ecole des Ponts ParisTech qui m'ont accompagné dans mon projet de recherche durant les trois dernières années. Merci à elles pour leur soutien, leur implication et leurs conseils qui m'ont permis de surmonter les difficultés et de me motiver.

Je tiens à remercier **M. Youssef DIAB** et **M. François BUYLE-BODIN** pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse, ainsi que **Mme. Natacha GONDRAN**, **M. Mourad BEN AMOR** et **M. Frédéric GRONDIN** pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury de la soutenance de ma thèse.

Ce travail de thèse a été conduit au sein du laboratoire **EASE –IFSTTAR**. J'adresse mes sincères remerciements à toute son équipe, dirigée par **Véronique CEREZO**. Je cite en particulier : **Michel DAUVERGNE** pour son expertise et son aide infinie. **Tristan LORINO** pour m'avoir accompagné dans ma première année de thèse. **Denis FRANCOIS**, **Bogdane MURESAN PASLARU** et **Pascal GASTINEAU** pour vos bonnes humeurs et vos conseils tout au long de ma thèse, j'espère que nos chemins professionnels se recroiseront un jour.

Je tiens à remercier **Mme. Roula MAYA** architecte et professeur - université de Damas, pour ses conseils et son aide tout au long de ma carrière.

Je remercie ma princesse **Anaïs** qui m'a offert autant de soutien que d'amour. Mes remerciements vont aussi à mes amis et à mon entourage pour leur aide et leur soutien. Je cite en particulier : **Joao, Abboud, Hussam, Elias, Hassan, Lydie, Jérome, Hanan, Mona, Jonathan, Charlène, Varvara, Guillaume, Nathalie, Clément, David, Azin, Stephane, Pierre, Chiraz, Nadia, Yosra** et tous mes amis en Syrie, en France et partout dans le monde.

Enfin, un grand merci à **l'âme de mon père** et à toute ma famille : **Mona, Dima, Samar, Safaa, Rana, Maher, Samer, Fadi, Basel, Azzam, Kinan, Tim, Hala, Tala, Rama, Ismail,** É**ias, Karam et** É**lina**. Ce travail n'aurait jamais pu se faire sans leur soutien.

إلى روح أبي الغالي.. إلى أمي و عائلتي أهدي هذا العمل, شكرا لكل ما قدمتموه لي

Résumé

Cette thèse a pour objectif de développer une méthodologie d'évaluation au sens du développement durable des aménagements souterrains, afin de mettre en évidence leurs spécificités. La construction et l'exploitation des aménagements souterrains ont de forts impacts sur l'environnement et représentent un investissement financier conséquent le plus souvent déterminant dans le processus décisionnel. Or, ces aménagements offrent de nombreux avantages pour la ville, et pour leurs usagers. Cette méthodologie, qui propose une évaluation complète d'aménagements souterrains, prend en compte les différents volets : environnemental, social et économique. La dimension « gouvernance » est intégrée en balayant les normes et les textes réglementaires liés à chaque étape du travail. La première partie du mémoire comprend une étude approfondie de types de projets souterrains permettant d'étudier leur fonctionnalité et de mettre en évidence la place du souterrain dans la ville durable. Dans les parties suivantes, une évaluation environnementale menée par la méthode d'analyse du cycle de vie (ACV) et une évaluation au sens du développement durable se basant sur la méthode Haute Qualité Environnementale (HQE) sont présentées. L'objectif est d'évaluer tous les aspects du développement durable en s'appuyant sur un système de notation avantages/inconvénients construit spécifiquement pour le souterrain. La méthodologie appliquée à un cas d'étude de tunnel urbain est capable d'évaluer plusieurs variantes et de proposer un système de hiérarchisation des résultats d'indicateurs. Grâce à la méthodologie développée, les différentes variantes proposées peuvent être classées en choisissant les plus avantageuses au sens du développement durable.

Mots clés : développement durable, analyse du cycle de vie, haute qualité environnementale, souterrain, urbain.

Abstract

This thesis aims to develop a methodology for evaluating the sustainable development of underground constructions, so that we can highlight their specificities. The construction and operation phases of underground facilities have a strong environmental impact; they represent also a consequent financial investment, which is usually a key factor in the decision-making process. In the other hand, these facilities offer many benefits to the city and to their users. This methodology, that proposes a complete evaluation of underground constructions, takes into account the different dimensions of sustainable development: environmental, social, economic. The governance dimension is also integrated through analyzing standards and legislation related to every step of this work. The first part of this thesis contains a detailed study of underground construction projects: functionality and their contribution in the sustainable city. The other parts contain an evaluation of environmental impacts carried out by the Life-Cycle Assessment (LCA) and the analysis of social and economic impacts carried out by the High Environmental Quality (HQE). The aim is to evaluate all the sustainable development aspects on the basis of a scoring system "benefits / drawbacks" for underground constructions. This methodology, applied to an urban tunnel case study, enables to evaluate several alternatives and then to propose a prioritization system of indicator results. By using the developed methodology, the different proposed alternatives can be classified by choosing the most advantageous ones within the meaning of sustainable development.

Keywords: sustainability, life-cycle Assessment, High Environmental Quality, underground, urban.

Table des matières

Remerciements 2
Résumé 4
Abstract 4
Tableau des figures 13
Table des tableaux 15
Table d'équations 17

Introduction générale 18
1. Contexte de la thèse 20
1.1. Conception environnementale du sous-sol 20
1.2. Articulation sous-sol/surface 20
2. Objectifs de la thèse 21
3. Déroulement de la thèse 21
3.1. Présentation du projet national Ville 10D – Ville D'Idées 21
3.2. Réalisation d'un questionnaire en amont de la thèse 22
4. Contenu scientifique 23
4.1. Le souterrain urbain et la ville durable - Chapitre 1 23
4.2. Développement méthodologique fondé sur l'ACV – Chapitre 2 23
4.3. Développement méthodologique fondé sur la HQE – Chapitre 3 23
4.4. Synthèse sur la méthodologie développée – Chapitre 4 24

Chapitre 1 : le souterrain urbain et la ville durable 26
Introduction du chapitre 28
Partie I : La ville et le souterrain urbain 30
1- L'urbanisme et la « ville durable » 30
1.1. Compositions urbaines 30
1.2. Aménagement urbain durable (surface) 31
2- Qu'est-ce qu'un souterrain ? 31
2.1. Le souterrain à travers l'histoire 31
2.2. De l'espaces souterrain à l'ouvrage souterrain 32
2.3. Configuration des ouvrages de construction souterrains 33
2.3.1. Ouvrage linéaire 33
2.3.2. Ouvrage ponctuel 34

2.3.3. Complexe d'ouvrages 34
3- Accessibilité au souterrain 35
3.1. Articulation souterrain - surface 35
3.2. Accès au souterrain 35
4- Fonctionnalité du souterrain 36
4.1. Fonctions souterraines 36
4.1.1. Expression de « fonction » 36
4.1.2. Classification selon la fonction de l'ouvrage 37
4.1.3. Classification selon la géométrie de l'ouvrage 37
4.1.4. Synthèse des fonctions souterraines 39
4.2. Multifonctionnalité souterraine 40
4.2.1. Zonage vertical 40
4.2.2. Notion de profondeur 41
5- Cadre règlementaire 43
5.1. Contraintes règlementaires relatives à l'urbanisme de la ville 43
5.1.1. Documents d'urbanisme 43
5.1.2. Jeu d'acteurs relatif au projet urbain souterrain 44
5.2. Contraintes règlementaires relatives à l'urbanisme souterrain 45
5.2.1. Règlementations relatives aux ouvrages linéaires 45
5.2.2. Règlementations relatives aux ouvrages ponctuels 47
5.3. Synthèse et conclusion 50
Partie II : Pratiques d'aménagement souterrain au niveau international 51
1. Introduction 51
2. Pratiques concernant les ouvrages linéaires 51
2.1. Réseaux souterrains 51
2.2. Complexe d'ouvrages linéaires - Tunnel de la Croix-Rousse – Lyon 53
3. Pratiques concernant les ouvrages ponctuels 54
3.1. Ouvrage ponctuel simple - Université EWHA - Séoul 54
3.2. Complexes d'ouvrages souterrains 54
3.2.1. Gare de Noisy-Champs – Paris 54
3.2.2. Le Grand Louvre - Paris 55
3.2.3. Site d'Orly-Rungis, Paris 56
4. Pratiques concernant les villes souterraines 57
4.1. Monaco – France 57

4.2. Helsinki- Finlande 58
4.3. Expérience singapourienne 59
5. Souterrain pour les années futures 60
5.1. Espaces verts souterrains 60
5.2. Gratte-terre 61
Conclusion du chapitre 62

Chapitre 2 : Approche méthodologique fondée sur l'ACV 64
Introduction du chapitre 66
Partie I : Evaluation environnementale des projets urbains 67
1. Introduction 67
2. L'évaluation environnementale et l'urbanisme 67
1.1. Cadre règlementaire 67
1.2. Approche environnementale sur l'urbanisme (AEU) 68
3. Méthodes d'évaluation environnementale 69
3.1. La méthode « bilan carbone® » 70
3.1.1. Domaine d'application 70
3.1.2. Atouts et limites 70
3.2. L'empreinte écologique 71
3.2.1. Domaine d'application 71
3.2.2. Atouts et limites 72
3.3. L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) 72
3.3.1. Objectifs et champ d'étude 73
3.3.2. Inventaire des émissions et des extractions 73
3.3.3. Evaluation de l'impact environnemental 74
3.3.4. Interprétation des résultats 75
3.3.5. Outils logiciels 75
3.4. Conclusion sur les méthodes d'évaluation environnementales 77
Partie II : ACV dans le domaine de construction - Application à un complexe souterrain 79
1. Introduction 79
2. Littérature de l'ACV dans le domaine de construction 79
2.1. ACV d'ouvrages de construction aériens 79
2.1.1. ACV Bâtiment 79
2.1.2. ACV d'ouvrages du génie civil 80

2.1.3. ACV Quartier 82
2.1.4. Cadre normatif de l'ACV des ouvrages de construction 83
2.2. ACV d'ouvrages de construction souterrains 85
2.2.1. Champs d'étude 85
2.2.2. Unité fonctionnelle et phases de cycle de vie 85
2.2.3. Système, Limites et données prises en compte 86
2.2.4. Evaluation de l'impact environnemental 87
2.3. Synthèse sur les apports de la bibliographie 88
3. Application de la méthode ACV à un complexe souterrain 89
3.1. Tunnel de la Croix-Rousse : Approche multimodale 89
3.1.1. Unité fonctionnelle 89
3.1.2. Choix de variantes de scénario permettant l'ACV 89
3.2. Système évalué et données prises en compte 91
3.2.1. Limite du système évalué 91
3.2.2. Données communes entre les deux scénarios 92
3.2.3. Scénario mixte : Galerie de sécurité simple et chemin aérien des modes doux 95
3.2.4. Scénario souterrain : Tunnel de sécurité et des modes doux 96
3.3. Choix de logiciels et de bases de données 97
3.3.1. Outil logiciel ECORCE 97
3.3.2. Outil logiciel OpenLCA 98
4. Problématiques étudiées avec les résultats ACV 100
4.1. Impacts liés à la construction et à l'entretien (*ECORCE)* 100
4.1.1. Présentation des résultats obtenus 100
4.1.2. Affectation des impacts aux modes d'usagers 102
4.2. Comparaison des résultats obtenus par les deux logiciels 104
4.3. Impacts environnementaux de l'ensemble du cycle de vie des scénarios d'aménagement étudiés 106
4.3.1. Présentation des résultats obtenus 107
4.3.2. Discussion des résultats obtenus 109
4.3.3. Optimisation de l'usage avec le modèle ACV développé, étude d'un futur usage par bus électrique 114
4.3.4. Indicateur « Toxicité humaine » 119
4.3.5. Indicateur « Total énergie renouvelable » 120
4.3.6. Indicateur « Changement climatique » 121
4.3.7. Conclusion intermédiaire 122

5. Discussion sur l'ensemble des résultats obtenus 122
Discussion et Conclusion du chapitre 124
Difficultés rencontrées et limites de l'ACV 124
Conclusion 125

Chapitre 3 : Approche méthodologique fondée sur la HQE 126
Introduction du chapitre 128
Partie I : Bibliographie - Approche d'évaluation par « HQE® » 129
1. Introduction 129
2. Méthodes de certification et d'évaluation HQE® 129
2.1. Méthode pour un ouvrage simple « HQE™ bâtiment » 129
2.1.1. Présentation 129
2.1.2. Principes et objectifs 130
2.1.3. Synthèse et utilité 133
2.2. Méthode pour l'infrastructure « Route durable™ » 134
2.2.1. Présentation 134
2.2.2. Principes et objectifs 134
2.2.3. Synthèse et utilité 135
2.3. Méthode pour un ensemble d'ouvrages « HQE Aménagement™» 136
2.3.1. Présentation 136
2.3.2. Principes et objectifs 136
2.3.3. Synthèse et utilité 138
2.4. Pratique d'application, projet « HQE²R » 139
2.4.1. Description et Objectifs 139
2.4.2. Modèles d'application 140
2.4.3. Synthèse et utilité 141
3. Besoins de la méthodologie MEDDAS et conclusion de la partie I 142
Partie II: Développement de la méthodologie pour un complexe souterrain - Tunnel de la Croix-Rousse 143
1. Introduction 143
2. Volet social 143
2.1. Proposition d'un jeu d'indicateurs sociaux adaptés au souterrain 143
2.2. Sélection des indicateurs sociaux 145
2.2.1. Objectifs sociaux liés à la fonction de l'ouvrage 146

2.2.2. Objectifs sociaux liés aux structures 149
3. Volet économique 155
3.1. Proposition d'un jeu d'indicateur pour l'évaluation économique 155
3.2. Sélections et évaluation d'indicateurs économiques 156
4. Volet environnemental 157
4.1. Proposition d'un jeu d'indicateurs environnementaux 157
4.2. Sélection et évaluation d'indicateurs environnementaux 157
Discussion et conclusion du chapitre 160

Chapitre 4 : Synthèse sur la MEDDAS 162
Introduction du chapitre 164
1. Principes de la MEDDAS 165
2. Etape 1 : Définir l'ensemble « fonction – structure » 167
2.1. Hiérarchisation des fonctions 167
2.2. Analyse Fonctionnelle - Structurelle 168
2.3. Articulation souterrain – surface 169
2.4. Résultat de l'étape : grille de lecture de projets souterrains 171
3. Etape 2 : Sélectionner et calculer les indicateurs DD 171
3.1. Méthodes d'aide à la sélection d'indicateurs pour un projet donné 171
3.1.1. Méthode de sélection par élimination 171
3.1.2. Méthode de priorités par « aspects spécifiques » au souterrain 172
4. Etape 3 : Noter et rassembler les résultats sous l'angle «Avantage/Inconvénient» 176
4.1. Pourquoi noter ? 176
4.2. Quoi noter ? 177
4.3. Comment noter ? 177
4.3.1. Méthode de notation [0 ; 1] 177
4.3.2. Méthode de notation [-1 ; +1] 179
4.4. Quels résultats pour le cas de la Croix-Rousse ? 180
4.4.1. Volet environnemental 180
4.4.2. Volet social 181
4.4.3. Volet économique 183
Discussion et conclusion du chapitre 184
Conclusion générale 187
Références bibliographiques 191

Annexes de la thèse 211
ANNEXE 1 : Procédés utilisés dans le logiciel *OpenLCA* 213
1. Procédés modifiés dans *OpenLCA* pour les deux scénarios 213
2. Données d'ICV - Phase de construction 215
2.1. Scénario souterrain (Tunnel modes doux – scénario existant) 215
2.2. Scénario mixte (Galerie de sécurité simple + chemin en surface pour les modes doux) 223
3. Données d'ICV – Phase d'exploitation 227
3.1. Scénario mixte : (Galerie de sécurité simple + chemin en surface modes doux) 227
3.2. Scénario souterrain : (Tunnel des modes doux) 228
ANNEXE 2 : Procédés utilisés dans le logiciel *ECORCE* 229
ANNEXE 3 : Sommaire des limites du système prises en compte pour l'évaluation 231
ANNEXE 4 : Indicateurs d'ACV et méthodes de calculs 232
1. Cumulative Energy Demande (CED) 232
2. Déchets en vrac 233
3. Déchets radioactifs 233
4. Ecotoxicité 233
5. Toxicité humaine (HTP) 234
6. Acidification 236
7. Changement climatique 236
8. Eutrophisation 237
9. Epuisement de l'ozone stratosphérique 238
10. Formation de photo-oxydants 238
ANNEXE 5 : Jeu d'indicateurs sociaux 240
ANNEXE 6 : Jeu d'indicateurs économiques 245
ANNEXE 7 : Jeu d'indicateurs environnementaux 247
1. Projet évalué 251
1.1. Informations générales 251
1.2. Type de l'ouvrage 251
2. Analyse de l'ensemble « fonction – structure » 251
2.1. Analyse fonctionnelle du besoin 251
2.2. Analyses structurelle - spatiale 251
2.2.1. Analyse structurelle 251
2.2.2. Solution constructive adaptée 251
2.2.3. Périmètres spatiaux selon l'accès et la solution constructive 252

Tableau des figures

Figure 1 : Compositions urbaines [www.lavilledemain.com] 30
Figure 2 : Ouvrage de construction souterrain linéaire (tunnel) 34
Figure 3 : Ouvrage de construction souterrain ponctuel (bâtiment souterrain) 34
Figure 4 : Complexe d'ouvrage de construction souterrain 34
Figure 5 : Ouvrages partiellement souterrains accessibles de plein pied 35
Figure 6 : Ouvrages totalement souterrains accessible à une profondeur 36
Figure 7 : zonage vertical des fonctions souterraines 42
Figure 8: Phases d'un projet sous maîtrise d'ouvrage État. 44
Figure 9 : Jeu d'acteurs dans le projet urbain. 44
Figure 10 : Sous-sol au sens de la réglementation incendie 48
Figure 11 : Villes ayant utilisé leur souterrain à travers le monde 51
Figure 12 : Schéma du procédé de la société ENVAC de collecte des déchets sous vide 52
Figure 13: Simulation du réseau CARGO CAP de transport de marchandises en souterrain 52
Figure 14 : Principe de la multifonctionnalité souterraine au Japon 52
Figure 15 : Deux tubes du tunnel de la Croix-Rousse 53
Figure 16 : Université de jeunes filles EWHA -Seoul 54
Figure 17 : Nouvelle gare de Noisy Champs dans le cadre du projet Grand Paris 55
Figure 18 : Axonométrie du Musée du Louvre à Paris, France 55
Figure 19 : développement du pôle Orly-Rungis grâce à son espace souterrain. 56
Figure 20 : La nouvelle gare de Monaco - Monte Carlo dans la montagne 57
Figure 21 : Schéma directeur du souterrain urbain la ville d'Helsinki. 58
Figure 22 : L'exploitation souterraine à Singapour 59
Figure 23 : Projet "Pasona02", Ferme industriel à Tokyo - Japon 60
Figure 24 : Projet "LowLine" NewYork - USA 60
Figure 25 : vision souterraine de la "gratte-terre" dans la ville de Mexico 61
Figure 26 : Démarche d'évaluation environnementale. 68
Figure 27 : Cadre de l'ACV 72
Figure 28 : Démarche générale de l'analyse de l'impact des émissions sur les sujets à protéger 74
Figure 29 : Prise en compte du génie civil dans les normes de la durabilité pour les ouvrages de construction 84
Figure 30 : scénarios proposés pour assurer la sécurité du tube routier 89
Figure 31 : Représentation de deux variantes d'aménagement des deux scénarios 90
Figure 32 : itinéraires proposés par les deux scénarios 90
Figure 33 : Répartition en sous-systèmes (chaussées - voûte) 91
Figure 34 : Matériaux et procédés de creusement et soutènement 93
Figure 35 : Matériaux et procédés de construction de la voûte 93
Figure 36 : Chaussées proposées pour le chemin aérien (mêmes chaussées pour le tunnel modes doux) 94
Figure 37 : Procédés de construction des chaussées 94
Figure 38 : Données prises en compte pour l'utilisation des voûtes et des chaussées 95
Figure 39 : Galerie de sécurité simple (Scénario mixte). 96
Figure 40 : Section traversable du tunnel modes doux (scénario souterrain). 97
Figure 41 : Ecart entre les deux scénarios pour la phase de construction 101
Figure 42 : Contribution des différentes opérations dans la phase de construction - ECORCE 102

Figure 43: Affectation des impacts aux différents modes doux (échelle logarithmique) - ECORCE ... 103
Figure 44 : Comparaison des résultats de la construction et de l'entretien utilisant les deux logiciels ... 104
Figure 45 : Comparaison entre les deux résultats après avoir modifié ceux d'*ECORCE* ... 105
Figure 46 : indicateurs environnementaux à la phase de construction du tunnel - OpenLCA ... 109
Figure 47 : Ecart entre les deux scénarios concernant la phase d'exploitation – OpenLCA ... 110
Figure 48 : Contribution de différentes opérations d'exploitation pour les deux scénarios ... 111
Figure 49 : Contribution des phases du cycle de vie aux impacts ... 112
Figure 50 : Ecart des impacts du scénario souterrain par rapport au scénario mixte ... 113
Figure 51 : Contribution des différentes opérations de la phase d'exploitation (Utilisation du bus électrique) ... 115
Figure 52 : Comparaison entre les impacts liés au scénario souterrain par rapport au scénario de référence (scénario mixte = 0%) pour les deux hypothèses d'un bus électrique et diesel. ... 117
Figure 53 : Contribution des différentes opérations à l'indicateur "Toxicité humaine" ... 119
Figure 54 : Contribution des différentes opérations à la consommation de l'énergie renouvelable. 120
Figure 55 : Contribution des différentes opérations à l'indicateur "changement climatique" ... 121
Figure 56 : Les trois volets de la démarche HQE^{TM} Bâtiment ... 130
Figure 57 : Quatre phases d'un projet urbain définies pour la démarche HQE²R. ... 139
Figure 58 : carrefours possibles avec les réseaux routiers existants dans le cas d'un chemin en surface ... 153
Figure 59 : Graphe récapitulatif pour l'ensemble des résultats ... 160
Figure 60 : Différentes étapes constituant la MEDDAS ... 165
Figure 61 : Architecture "Fonction - Structure" de systèmes répondant à un besoin ... 167
Figure 62 : Représentation schématique des périmètres spatiaux ... 169
Figure 63 : exemples de périmètres spatiaux pour un ouvrage souterrain suivant l'accès et la méthode de construction ... 170
Figure 64 : Système de notation entre [0 ; 1] ... 177
Figure 65 : échelle proposée pour une notation dans l'angle Avantage/Inconvénient ... 179
Figure 66 : Sommaire des limites du système prises en compte ... 231

Table des tableaux

Tableau 1 : Méthodes de creusement des tunnels 33
Tableau 2 : Types d'accès à l'ouvrage de construction souterrain construit en tranchées couvertes . 35
Tableau 3 : Classification des ouvrages urbains souterrains selon leur géométrie (projet Deep-City) 38
Tableau 4 : Exemple de classification des équipements souterrains selon leur géométrie 38
Tableau 5 : Proposition de classification des ouvrages souterrains selon leur géométrie et leurs fonctions 39
Tableau 6 : Profondeur d'espaces souterrains selon l'usage 41
Tableau 7 : Exemples de méthodes de calculs d'impacts 75
Tableau 8: Liste des problèmes rencontrés en ACV [Reap et al. 2008a] 78
Tableau 9: Thèmes environnementaux évalués dans la littérature et leur méthode d'évaluation utilisées 87
Tableau 10 : Indicateurs environnementaux retenus pour l'évaluation par OpenLCA 99
Tableau 11 : Impacts liés à la construction et l'entretien des chaussées et de la voûte pour le scénario mixte 100
Tableau 12 : Impacts liés à la construction et l'entretien des chaussées et de la voûte pour le scénario souterrain 101
Tableau 13 : Valeurs ajoutées aux résultats *ECORCE* pour la compariason 105
Tableau 14 : Résultats obtenus pour le scénario mixte - OpenLCA 107
Tableau 15 : Résultats obtenus pour le scénario souterrain - OpenLCA 108
Tableau 16 : Groupes d'indicateurs selon le changement du comportement selon l'hypothèse posée 118
Tableau 17 : Sensibilité de l'indicateur "Toxicité humaine" 119
Tableau 18: Sensibilité de l'indicateur "Totale énergie renouvelable" 120
Tableau 19 : Sensibilité de l'indicateur "changement climatique" 121
Tableau 20 : tableau récapitulatif de plusieurs références effectuant ACV Tunnel 122
Tableau 21 : comparaison des résultats obtenus dans ce travail avec la bibliographie (résultats ramenés pour 1 km tunnel sur 100 ans). 123
Tableau 22: La dimension « écoconstruction » de la démarche HQE™ Bâtiment 131
Tableau 23: La dimension « éco-gestion » de la démarche HQE™ Bâtiment. 131
Tableau 24 : La dimension « Confort » de la démarche HQE™ Bâtiment. 132
Tableau 25 : La dimension « Santé » de la démarche HQE™ Bâtiment 132
Tableau 26 : Dimension « vie sociale et économique » de la démarche "Route Durable ™" 134
Tableau 27 : Dimension « Aménagement de l'espace et qualité de vie » de la démarche "Route Durable ™" 135
Tableau 28 : Dimension « Homme et terre » de la démarche "Route Durable ™" 135
Tableau 29 : Dimension « aménagement du territoire » de la démarche HQE Aménagement™ 136
Tableau 30 : Dimension « Gestion des ressources » de la démarche HQE Aménagement ™ 137
Tableau 31 : Dimension « Vie sociale » de la démarche HQE Aménagement ™ 138
Tableau 32: Analyse des impacts environnementaux par le modèle ENVI [Outrequin, 2004]. 141
Tableau 33 : Originalité et besoin de la méthodologie développée 142
Tableau 34 : Jeu d'indicateurs sociaux pour l'évaluation 144
Tableau 35 : Les besoins exprimés au départ du projet et les fonctions y répondant 145
Tableau 36 : Les fonctions et leurs structures correspondantes 146
Tableau 37 : Indicateurs retenus pour évaluer l'efficacité du service fourni par l'ouvrage 147

Tableau 38 : Indicateurs retenus liés à la santé et au confort à l'intérieur de l'ouvrage..... 148
Tableau 39 : Indicateurs retenus pour évaluer la faisabilité au sens d'aménagement 150
Tableau 40 : Indicateurs retenus pour évaluer l'adaptabilité de l'ouvrage 151
Tableau 41 : Indicateurs retenus pour évaluer les impacts sur le voisinage 151
Tableau 42 : indicateurs retenus pour évaluer la sécurité et la sûreté d'un ouvrage 153
Tableau 43 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus pour le volet social..... 154
Tableau 44 : Jeu d'indicateurs économiques proposé pour l'évaluation d'un ouvrage souterrain.... 155
Tableau 45 : Indicateurs pour l'évaluation économique..... 156
Tableau 46 : Jeu d'indicateurs pour l'évaluation environnementale..... 157
Tableau 47 : Indicateurs environnementaux calculés par l'ACV 158
Tableau 48 : Ecart des impacts du scénario souterrain par rapport au scénario mixte 159
Tableau 49: Problématiques et besoins pour appliquer la méthodologie..... 165
Tableau 50 : Priorité donnée aux objectifs d'évaluation proposés dans le jeu d'indicateurs environnementaux..... 173
Tableau 51 : Priorité donnée aux objectifs d'évaluation proposés dans le jeu d'indicateurs sociaux 174
Tableau 52 : Priorité donnée aux objectifs d'évaluation proposés dans le jeu d'indicateurs économiques..... 175
Tableau 53 : Souhaits exprimés par les parties prenantes..... 176
Tableau 54 : Notations des indicateurs environnementaux 181
Tableau 55 : Notation des indicateurs sociaux 182
Tableau 56 : Notation des indicateurs économiques..... 183
Tableau 57 : la prise en compte des différents facteurs demandés par l'ITA [ITA, 2004] concernant un bilan Avantages/Inconvénients. 184
Tableau 58: Procédés OpenLCA modifiés et adabtés..... 213
Tableau 59 : Système des procédés « creusement » utilisant OpenLCA pour le scénario souterrain.215
Tableau 60 : Système des procédés « Voûte » utilisant OpenLCA pour le scénario souterrain. 219
Tableau 61 : Système des procédés « Chaussées » utilisant OpenLCA pour le scénario souterrain. . 220
Tableau 62: Système des procédés « creusement » utilisant OpenLCA pour le scénario mixte. 223
Tableau 63 : Système des procédés « Voûte» utilisant OpenLCA pour le scénario mixte..... 224
Tableau 64 : Système des procédés « Chaussées » utilisant OpenLCA pour le scénario mixte..... 225
Tableau 65 : Système des procédés « Exploitation » utilisant OpenLCA pour le scénario mixte. 227
Tableau 66 : Système des procédés « Exploitation» utilisant OpenLCA pour le scénario souterrain. 228
Tableau 67 : Base de données routières ACV pour ECORCE (légende: gris clair pour les matières premières ; gris foncé pour les matériaux élaborés ; Noir pour les mélanges des matériaux ; blanc pour les équipements) [Jullien et al, 2015]..... 229
Tableau 68 : Jeu d'indicateurs sociaux (Indicateurs quantifiables en bleu, qualitatifs en vert) 240
Tableau 69: Jeu d'indicateurs économiques (Indicateurs quantifiables en bleu, qualitatifs en vert) 245
Tableau 70 : Jeu d'indicateurs environnementaux (Indicateurs quantifiables en bleu, qualifiables en vert) 247
Tableau 71 : Aspects environnementaux représentant des spécificités pour le souterrain..... 248
Tableau 72 : Aspects socioéconomiques représentant des spécificités pour le souterrain 249

Table d'équations

Équation 1 : méthode de notation pour les aspects où la petite valeur est la meilleure 177
Équation 2 : notation pour les aspects inversés – la grande valeur est la meilleure 178
Équation 3 : méthode de notation pour les aspects avantageux 179
Équation 4 : méthode de notation pour les aspects désavantageux 180
Équation 5 : Somme des notes par variante 180
Équation 6 : Classement des variantes par leurs notations 180

Introduction générale

1. Contexte de la thèse

La réalisation et l'exploitation d'infrastructures et d'aménagements souterrains ont généralement de forts impacts sur l'environnement et représentent un investissement financier conséquent le plus souvent déterminant dans le processus décisionnel.

Un projet souterrain se révèle souvent fortement pénalisé en comparaison d'un projet équivalent en surface (importance du dimensionnement, des quantités de matériaux, des moyens et solutions techniques à mettre en œuvre pour la construction, importance des équipements et de la consommation énergétique de ces derniers en phase d'exploitation). Cependant, le passage en souterrain ou la réalisation en sous-sol constitue parfois la seule possibilité d'aménagement dans des sites urbains denses et fortement contraints. La solution souterraine s'impose donc de fait dans ces seuls cas et c'est le besoin qui amène alors la solution. Force est de constater donc que dans la plupart des cas la solution en sous-sol est ignorée ou très vite abandonnée au profit d'une solution en surface. C'est ce qui explique que le sous-sol soit actuellement, en France, absent du schéma directeur des villes. Il constitue cependant une réelle opportunité pour la ville durable que l'on ne peut désormais plus se permettre d'ignorer dans un contexte où limiter l'étalement urbain et densifier la ville priment.

L'enjeu est donc de repenser la verticalité de la ville en incluant le sous-sol, de répondre aux nouveaux besoins de mobilité par des infrastructures souterraines, d'allier projets d'infrastructures et projets urbains. Pour cela de nouveaux outils sont nécessaires afin d'évaluer objectivement les impacts des projets souterrains. Ces outils et les indicateurs associés, doivent être adaptés aux projets souterrains. Ils doivent permettre de mettre en avant et de quantifier les avantages qu'apporte une réalisation en sous-sol : libération d'espaces en surface qui peuvent être dédiés à d'autres usages, diminution de la pression foncière, mobilité facilitée, etc.

1.1. Conception environnementale du sous-sol

Les innovations scientifiques et techniques permettent non seulement d'envisager une meilleure maîtrise des impacts de proximité, mais également de s'orienter vers une optimisation de la conception et de la réalisation des structures souterraines. En effet, l'aménagement du sous-sol constitue une véritable ressource qui offre de nombreuses opportunités face aux attentes d'une ville durable (géothermie, eaux d'exhaure, matériaux excavés, etc.). L'exploitation de ces ressources peut permettre de contrebalancer les impacts sur l'environnement de l'aménagement seul en s'orientant vers des solutions plus respectueuses de l'environnement : des aménagements souterrains « à énergie positive » par exemple. Une économie des ressources naturelles et une limitation des nuisances due à l'isolation naturelle de l'espace et au transport de matériaux en site urbain peuvent être visées en réutilisant les matériaux excavés en matériaux de construction que ce soit pour le projet en sous-sol lui-même ou bien un projet concomitant en surface.

1.2. Articulation sous-sol/surface

Au-delà même de faire la démonstration de l'intérêt de la solution souterraine, il s'agit également de montrer tout l'intérêt d'une meilleure articulation entre surface et souterrain. Cette réflexion doit nécessairement être appréhendée à plusieurs échelles spatiales et temporelles. On chemine ainsi de l'évaluation d'un projet isolé à celle d'un ensemble de projets, voire d'une politique d'aménagement avec le souci d'être en mesure d'évaluer les impacts de projets très détaillés (niveau avancé de

définition), mais aussi celles de projets à l'étude dont seules les grandes lignes sont connues au moment où les premiers choix se font.

2. Objectifs de la thèse

Les objectifs de la thèse sont les suivants : mettre en place des indicateurs d'impacts capables de mettre en évidence les spécificités et les avantages de la construction et de l'aménagement souterrains ; développer une méthodologie d'évaluation au sens du développement durable adaptée au souterrain.

Dans la dernière étape de la thèse, cette méthodologie est appliquée à un projet souterrain. Les indicateurs définis et utilisés concernent délibérément l'ensemble des dimensions du développement durable. En effet les seuls indicateurs environnementaux habituels, issus des méthodes de type Analyse du Cycle de Vie (ACV) ne sont pas suffisants pour mettre en avant les avantages du sous-sol. Il est nécessaire de faire également appel aux critères sociaux et économiques, en prenant en compte le souci de simplification et de disponibilité des données.

3. Déroulement de la thèse

3.1. Présentation du projet national Ville 10D – Ville D'Idées

La thèse s'inscrit dans le cadre du projet de recherche collaborative « Ville 10D – Ville d'Idées » soutenu par la Direction de la Recherche et de l'Innovation (DRI) du Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer, dans le cadre du dispositif des « Projets Nationaux ». Le Projet National Ville 10D (Différentes Dimensions pour un Développement urbain Durable et Désirable Décliné Dans une Dynamique « Dessus / Dessous ») a pour un objectif de permettre au sous-sol des villes de mieux contribuer à leur aménagement durable pour faire face aux enjeux sociaux, économiques et environnementaux auxquels elles sont confrontées. Ce projet a été monté en collaboration avec l'AFTES[1]. Il mobilise des partenaires aussi nombreux que variés : chercheurs de toutes disciplines concourant au développement durable dans le champ économique, social ou environnemental, entreprises du bâtiment, des travaux publics, des transports ou de la logistique, agences et entreprises d'ingénierie urbaines, aménageurs urbains, établissements publics et collectivités territoriales, etc.

Ville 10D pose la question du besoin d'une démarche et d'outils de planification et d'aménagement du sous-sol en complémentarité avec les orientations définies en surface. La particularité de Ville10D est de déboucher sur des recommandations méthodologiques et des outils d'information intéressant les milieux de la recherche mais aussi et surtout ceux de l'aménagement urbain qu'ils soient décideurs ou opérateurs et qu'ils œuvrent à l'échelle locale ou métropolitaine.

Il comprend quatre thèmes principaux auxquels vient s'ajouter un thème transversal « aspect juridiques et cyndinique » :

- Le thème « socio-économie » : Il cherche, grâce à l'économie de projet, à rendre plus clair le débat entre réalisations souterraines et réalisations en surface.

[1] AFTES : Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain : http://www.aftes.asso.fr/

- Le thème « environnemental » : Il a pour objet de permettre d'évaluer et de maîtriser l'impact des projets souterrains à l'échelle du projet et du territoire. Il met en évidence les spécificités des aménagements souterrains et apporte les éléments d'évaluation et de bilans environnementaux qui permettent de justifier leur caractère durable.
- Le thème « psycho-social » : Il cherche comment garantir l'acceptabilité et la qualité des aménagements en déterminant les conditions grâce auxquelles les espaces urbains implantés en sous-sol peuvent participer et s'articuler à la ville en offrant des lieux répondant aux attentes d'usage et d'agrément.
- Le thème « visibilité » : Il cherche comment rendre accessible le sous-sol aux différents acteurs du projet en adaptant la lisibilité de ses données à leurs niveaux de besoin, et apporte les outils nécessaires à la connaissance du sous-sol, aux croisements de ses enjeux et à la maitrise de l'ensemble des risques inhérents à l'utilisation de l'espace souterrain.

3.2. Réalisation d'un questionnaire en amont de la thèse

Au début de la thèse, un questionnaire a été réalisé à destination des chercheurs et des maitres d'ouvrages afin de collecter les informations concernant les différents aspects du travail de thèse, de positionner ce travail par rapport aux différentes disciplines, d'identifier les apports de la thèse du point de vue professionnel et de trouver des pistes de développement pour la suite (ANNEXE 11).

Plusieurs acteurs ont été consultés (19 personnes, dont 12 chercheurs et 7 spécialistes professionnels), il y a eu 8 réponses.

Les questions ont été abordées selon les trois points principaux suivants :

1. La surface : bâtiment, quartier, planification urbaine, évaluation environnementale,
2. l'espace souterrain,
3. le développement durable et l'évaluation du souterrain.

Les différents acteurs sollicités pensent qu'il est nécessaire de prendre la totalité des volets du développement durable (DD) en compte. Pour eux un des intérêts majeurs du souterrain est le gain de temps obtenu à travers la concentration de la surface urbanisée. Ainsi cela conduit à redonner à tous les habitants du temps pour d'autres activités, comme par exemple les trajets domicile-travail. Les personnes interrogées ont recommandé d'évaluer l'utilité publique du projet en comparant plusieurs scénarios entre eux, ainsi que de mettre en place des indicateurs et des outils concernant l'évaluation environnementale adaptée aux aménagements souterrains.

Ils se sont posé la question : quelle fonction urbaine déplacer en priorité au sous-sol ? Dans quel ordre ? Il faudrait aussi penser à la végétalisation des espaces souterrains et à l'agriculture souterraine comme une fonction capable de se développer dans le futur. Ils ont enfin recommandé de simplifier les résultats et de penser d'une manière simple et opérationnelle.

4. Contenu scientifique

Le contenu scientifique de la thèse se divise en trois thèmes principaux et une synthèse sur la méthodologie proposée. Cette méthodologie prend en compte les différents volets du DD : environnemental, social et économique. La dimension gouvernance a aussi été prise en compte tout au long du travail de thèse en analysant à chaque étape les réglementations, les certifications, les labellisations, les normes, les circulaires concernées, etc. Les thèmes retenus sont les suivants.

4.1. Le souterrain urbain et la ville durable - Chapitre 1

L'objectif de ce chapitre est de définir des notions telles que la ville durable, le souterrain, etc. et de conduire une réflexion sur l'échelle ou les échelles pertinente(s). Il aborde plusieurs sujets : la caractérisation d'un ouvrage souterrain ; l'identification des fonctions urbaines qu'il est possible de mettre en souterrain ; la prise en compte la notion de profondeur ; une description de la fonctionnalité et multifonctionnalité de l'espace souterrain (déplacement, stationnement, service, utilisation mixte, etc.) ; la compréhension des différents systèmes de gestion des risques (sécurité et accessibilité au souterrain) ; la connaissance de la capacité d'un ouvrage à évoluer, c'est-à-dire son potentiel de mutabilité.

Ensuite, la présentation de plusieurs expériences internationales en matière de projets souterrains permet d'identifier ce qui a conduit certaines villes à privilégier le souterrain dans certains cas et parfois à intégrer le sous-sol dans leur planification. L'objectif est donc d'identifier les éléments de contexte qui conduisent à privilégier le souterrain ou tout du moins à l'intégrer systématiquement dans les réflexions.

4.2. Développement méthodologique fondé sur l'ACV – Chapitre 2

Ce chapitre traite les méthodologies d'évaluation environnementale, l'ACV par exemple, des outils, indicateurs et bases de données associés. Les méthodologies peuvent être générales et concerner l'ensemble des dimensions du DD ou bien être restreintes aux impacts sur l'environnement. Ce chapitre concerne la partie environnementale, il s'intéresse alors aux méthodologies d'évaluation environnementale.

Ensuite, une de ces méthodologies est appliquée à un des projets qui sont présentés dans le chapitre 1. Il s'agit d'un complexe d'ouvrages souterrains : le tunnel de la Croix-Rousse. L'objectif est de sélectionner des indicateurs environnementaux permettant de comparer plusieurs variantes d'aménagements entre elles afin d'en choisir une parmi les moins impactantes en terme environnemental.

4.3. Développement méthodologique fondé sur la HQE – Chapitre 3

Les projets souterrains étant généralement fortement pénalisés lorsqu'on ne considère que les seuls impacts sur l'environnement, l'idée est d'élargir aux différentes dimensions du DD pour permettre de mettre en avant les avantages des projets souterrains. Enfin, les méthodologies abordant les différentes dimensions du DD sont généralement plus pertinentes au stade amont des projets. Les objets auxquels s'appliquent ces méthodologies et outils peuvent être divers (bâtiment, quartier, infrastructures, etc.), ainsi que leurs utilisateurs potentiels.

Il s'agit d'une évaluation par le biais de différents indicateurs. Ceux-ci sont généralement regroupés selon les dimensions du DD comme suit :

- économique : coûts directs, coûts indirects, mixité fonctionnelle et évaluation économique à long-terme, etc. ;
- sociale : mixité sociale, mixité fonctionnelle et densité, etc. ;
- environnementale : qui comprend les indicateurs de l'écologie, de la gestion de l'énergie, de l'eau, ou des déchets, etc.

Une recherche des indicateurs adaptés à l'évaluation du souterrain urbain est également réalisée. Ces indicateurs du DD sont regroupés par thèmes, les mêmes que précédemment (économique, social, environnemental). A la fin de ce chapitre, l'application au tunnel de la Croix-Rousse est complétée, on obtient donc les résultats pour l'ensemble des volets du DD.

4.4. Synthèse sur la méthodologie développée – Chapitre 4

La méthodologie proposée, d'évaluation au sens du développement durable des aménagements souterrains (MEDDAS), doit permettre de comparer les différentes variantes d'aménagements urbains, dont la solution souterraine fait partie. En principe, le projet souterrain doit également prendre en compte le projet en surface. Ainsi la thèse ne met-elle pas en évidence des indicateurs que pour le souterrain lui-même, mais aussi l'interaction entre les deux parties du projet urbain.

Dans ce chapitre, on propose également un système de notation des avantages – inconvénients du souterrain par rapport à une autre variante d'aménagement en surface.

Enfin, une conclusion générale et une synthèse des thèmes sont données. La présentation de la méthodologie est faite de manière générique. Elle doit être applicable à tout type de projet souterrain comme ceux déjà présentés au chapitre 1.

Chapitre 1 : le souterrain urbain et la ville durable

Introduction du chapitre

En 2007, la moitié de la population mondiale, soit trois billions personnes, vit dans des zones urbaines. Il est prévu que ce chiffre augmente à cinq billions de personnes en 2030 et à 6,4 billions en 2050 [UN, 2007]. Angel a estimé une croissance de la construction des zones urbaines dans les pays développés de 250 000 km^2 en 2000 à 820 000 km^2 en 2030 [Angel et al, 2005]. La croissance démographique et urbaine produit un besoin supplémentaire de développer les infrastructures existantes. Ce développement est cependant limité par plusieurs contraintes : manque d'espace, haute densité démographique, existence d'un patrimoine culturel, etc.

La solution souterraine représente alors une chance de répondre à ce besoin, surtout dans les métropoles dites « jeunes », afin d'éviter les erreurs déjà comprises dans nombreuses ville plus anciennes [Bobylev, 2009]. Pour Hanamura, il est impossible pour les villes modernes d'exister ou d'être durable sans les tunnels de l'eau ou d'assainissement [Hanamura, 1998] cité par [Sterling et al, 2012]. L'espace souterrain constitue également une réelle opportunité pour la ville en repensant sa verticalité tant pour répondre aux nouveaux besoins de mobilité par des infrastructures souterraines que pour allier les projets d'infrastructures et les projets d'aménagements urbains.

En matière d'urbanisme, le souterrain ne se conçoit pas en dehors de l'urbanisme en général, mais il en est une partie méconnue, et complètement absente des enseignements [Duffaut, 2010]. Or, une étude a été menée par l'association internationale de tunnels (ITA) en 2000. Celle-ci avait pour but de comparer les pratiques souterraines dans neuf pays : Australie, République Chèque, Finlande, Italie, Japon, Pays-Bas, Norvège, Suède, Turquie [ITA, 2000]. L'objectif étant de mettre en évidence la planification des espaces souterrains et leur rôle important en cas d'indisponibilité de l'espace en surface.

En effet, l'urbanisme souterrain peut apporter une contribution importante à la solution de certains problèmes urbains. Mais en même temps cet urbanisme doit chercher à accentuer l'importance du soleil, de la lumière naturelle, des espaces verts et de la vue sur l'extérieur pour les utilisateurs de la surface qui sont les véritables bénéficiaires d'une politique de la mise en sous-sol des ouvrages utilitaires de la ville. Le premier objectif vise à réduire les impacts négatifs ; par exemple : la circulation de camions associée à une activité industrielle est difficilement compatible avec un environnement résidentiel. Le bruit peut également constituer une source de nuisance de même que la présence de cheminées de ventilation (concentration de la pollution de l'air et agression visuelle).

D'ailleurs, le développement vertical de la ville entraîne des changements dans sa forme urbaine et la répartition horizontale de ses fonctions et activités. Cela permet de densifier la zone urbaine visée. Ainsi, faire un schéma directeur pour les espaces souterrains permet de réaliser une planification stratégique de la ville. Cela permet à la fois de préserver certaines zones historiques, d'avoir une vision globale de la planification urbaine, et de fournir les différents services demandés par les habitants. Deux facteurs doivent être pris en compte pour la planification de l'urbanisme souterrain : le premier est la nécessité de se baser sur le schéma directeur de la ville ou du territoire visés, le deuxième est l'ensemble des conditions géologiques du sol [ITA, 2000].

A l'échelle internationale, plusieurs pays ont des pratiques réglementaires, en ce qui concerne l'élaboration des schémas directeurs de leurs villes, qui comprennent l'utilisation de l'espace

souterrain. Cela est dû à la pression exercée sur l'utilisation du sol ou les opportunités offertes tant par les politiques nationales que par les politiques locales [Sterling et al, 2012]. Parmi ces pays, on peut citer par exemple : le Japon, la Chine, les Pays-Bas, et Singapour.

Au Japon, la porte était grande ouverte aux nouvelles technologies de construction des tunnels, cela a permis un développement extensif de l'usage de l'espace souterrain en sol meuble sous les villes de Tokyo et d'Osaka pour répondre aux besoins en infrastructures [Hanamura, 2002]. Pour faciliter un tel développement, le Japon a légalement ouvert l'exploitation de l'espace souterrain profond, même sous les fonciers privés [Matsumoto, 2005]. En Chine, une politique[2] affichée dès octobre 1997 offre des bases réglementaires pour le développement et l'utilisation de l'espace souterrain urbain [Li et al, 2009]. Aux Pays-Bas, l'agence nationale de planification a consacré en 2000 sa publication annuelle aux espaces souterrains urbains, représentant la première étape officielle pour la reconnaissance du besoin de l'utilisation des espaces souterrains dans les villes hollandaises [Admiraal, 2006]. A Singapour, suite à une pression foncière et à une croissance démographique élevée, le pays s'est mis en voie de développer des espaces souterrains. Un schéma directeur des espaces souterrains est alors en élaboration tant pour les zones urbaines que pour celles moins développées [Sterling et al, 2012].

En revanche, dans d'autres pays tels que la France et le Royaume-Uni, malgré l'utilisation vaste des espaces souterrains, on constate l'absence d'efforts pour établir un schéma directeur global de ces espaces [Sterling et al, 2012]. En France, il n'existe pas de réglementation globale et cohérente sur l'urbanisation du souterrain, ni de document d'urbanisme spécifique qui le concerne [IAU, 2011].

Ce chapitre introductif du travail de thèse concerne les différents aspects liés au domaine du souterrain et se divise en deux parties. La première concerne les définitions, fonctionnalités et réglementations utiles aux réflexions menées dans le cadre de la thèse, ainsi que 'à la mise en place d'une méthodologie d'évaluation des aménagements souterrains. Elle comprend les définitions des différentes notions utilisées dans ce domaine. Cette partie recense également les fonctions urbaines pouvant être mises en souterrain (pratiques actuelles), ainsi que celles qui pourront y être mises dans le futur. Cette partie explique également la notion de la multifonctionnalité souterraine et celle de planification verticale des fonctions urbaines en prenant en compte la profondeur. Elle comprend enfin une analyse des aspects réglementaires français. Elle a pour objectifs : de présenter les différents textes réglementaires définissant les ouvrages souterrains ou les parties souterraines des ouvrages aériens, selon leurs fonctions. Il s'agit d'identifier les limites réglementaires (en termes de sécurité et d'accessibilité) portant sur la mise en sous-sol des différentes fonctions urbaines et sur la conception des ouvrages souterrains. La seconde partie comporte une présentation de quelques exemples de pratiques en matière de projets souterrains nationaux et internationaux. Cette présentation s'avère utile aux réflexions méthodologiques.

[2] Management regulation of the development and utilization of urban underground space of China

Partie I : La ville et le souterrain urbain

1- L'urbanisme et la « ville durable »

Au sens premier, « La composition urbaine a eu pour rôle de définir l'organisation de l'espace de la ville ou du quartier à aménager » [Candon, 1996]. Il s'agit essentiellement d'une science ou d'un art qui vise à aider à projeter. C'est un domaine intitulé « *Urban design* » en langue anglaise, c'est-à-dire la conception de l'espace urbain. Cette science, qui est un mode de conception visant à produire des parties et la totalité d'un projet d'aménagement urbain, est fondée sur le principe de l'unité. Aussi est-il important de définir et présenter les différentes unités urbaines.

1.1. Compositions urbaines

Une unité urbaine est définie, en France, comme un ensemble de communes comptant au moins 2000 habitants et présentant une continuité du bâti, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de coupure supérieure à 200 m entre deux constructions [INSEE, 2013]. Cette définition, selon l'INSEE, est fondée sur le principe de continuité de l'habitat, s'ajoutant à un critère de population minimale. Selon les nations unies : « Il existe presque autant de définitions du mot –V*ille*- dans le monde, que de pays » [UN, 2002].

Insérée dans le territoire, la ville se compose de quartiers et d'îlots situés en surface, eux-mêmes constitués de bâtis. Selon le dictionnaire Hachette, un quartier « c'est une partie de ville qui présente certains caractères distinctifs en termes de fonctions, de fréquentation, de population » [Boujnah et al, 2013]. La Figure 1 illustre la classification des unités urbaines du bâtiment au territoire.

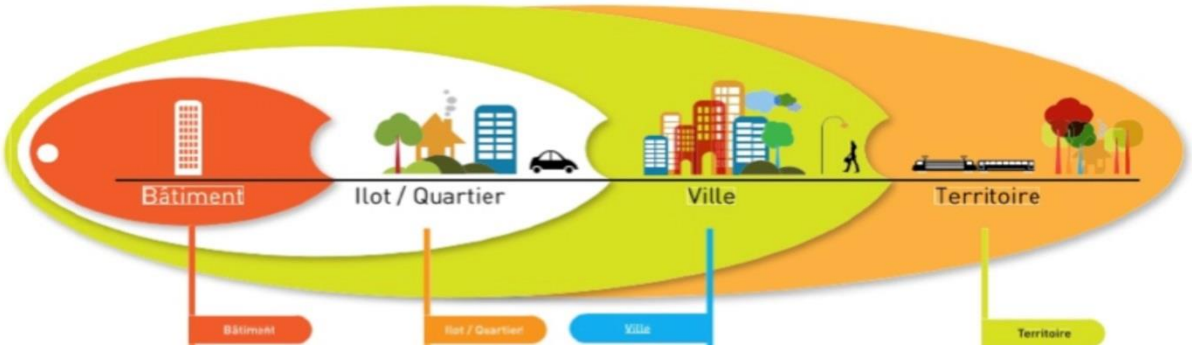


Figure 1 : Compositions urbaines [www.lavilledemain.com]

La notion de « Grand Quartier » est définie, selon l'INSEE, comme un groupement de plusieurs îlots contigus à l'intérieur d'une même commune. Lorsque cette commune est partagée en plusieurs cantons (une subdivision administrative territoriale), les limites de quartiers peuvent ne pas respecter les limites des cantons [INSEE, 2013]. Par exemple, une commune de 20000 habitants n'est généralement pas découpée en plus de deux ou trois quartiers.

1.2. Aménagement urbain durable (surface)

La durabilité se base sur les trois piliers du développement durable (environnemental, économique et social) dans un cadre réglementaire (gouvernance). L'aménagement urbain durable constitue l'un des moyens majeurs de mise en œuvre de la durabilité urbaine, au sein des politiques de planification urbaine mais aussi d'autres outils politiques territoriaux comme les Agenda 21[3] et les Plans Climat Air Énergie Territorial (PCAET)[4] [Jégou, 2011].

Selon l'architecte Richard Rogers, la ville durable est « juste, belle, créatrice, écologique, accueillante et connectée, compacte et polycentrique, et diversifiée » [Roger, 2008]. Selon Rogers, un éco-quartier intègre en amont de sa conception dix critères : le choix d'un site pertinent ; la proximité et les solutions alternatives à la voiture ; la mixité sociale et fonctionnelle ; la diversité spatiale et la lutte contre l'étalement urbain ; la sobriété énergétique ; la conception d'espaces publics structurants ; le respect du cycle de l'eau ; le renforcement de la biodiversité ; la gestion des déchets ; l'implication des habitants. En France, le Ministère de du logement et de l'habitat durable a lancé en 2008 une démarche de labélisation d'un éco-quartier, il s'agit d'un projet d'aménagement urbain qui respecte les principes du DD, tout en s'adaptant aux caractéristiques de son territoire.

Éco-concevoir un quartier, c'est concevoir la composition, l'organisation et le fonctionnement du quartier en respectant l'environnement, la société et l'économie [Boujnah et al, 2013]. Selon Crepon, réaliser un éco-quartier, c'est fédérer un grand nombre de problématiques sociales, fonctionnelles, économiques, environnementales autour d'un retour aux fondamentaux de l'urbanisme et de l'architecture : mieux vivre avec les ressources localement disponibles et mieux vivre ensemble [Crepon, 2008]. La difficulté réside dans la mise en place d'une synthèse entre de nombreux aspects : gestion de l'énergie, diversité sociale, qualité de l'air, réseaux de transports, qualité de l'eau, gestion des déchets, aspect économique, etc. [Cherqui, 2005].

2- Qu'est-ce qu'un souterrain ?

2.1. Le souterrain à travers l'histoire

Historiquement, les différentes utilisations du sous-sol à travers les siècles ont façonné une image négative et parfois angoissante de l'espace souterrain. Cependant, l'homme a toujours intégré cet espace au sein de ses différents usages : que ce soit pour l'exploiter, se cacher, se protéger ou par manque de place [Labs, 1976 ; Dunkel, 1985].

À travers le monde, les premières agglomérations ont eu recours à des citernes enterrées, longtemps avant de construire des aqueducs en partie souterrains, des galeries de captage d'eau, et les égouts. Les temples et les sépultures ont suivi, comme à Louqsor en Egypte et Ajanta en Inde. Les tufs volcaniques de Cappadoce en Turquie ont hébergé de véritables villes souterraines pour protéger les habitants des pillards. Plusieurs passages souterrains ont été construits dans les villes médiévales

[3] Agenda 21 est un plan d'action pour le XXIe siècle. Adopté par 173 chefs d'État lors du sommet de la Terre, à Rio de Janeiro, en 1992.

[4] Les plans climat air énergie territorial (PCAET) sont des outils d'animation du territoire qui définissent les objectifs stratégiques et opérationnels afin d'atténuer le changement climatique, de le combattre efficacement et de s'y adapter, de développer les énergies renouvelables et de maîtriser la consommation d'énergie, en cohérence avec les engagements internationaux de la France. Il intègre pour la première fois les enjeux de qualité de l'air.

avec pour objectif d'évacuer les habitants. Ils font partie inhérente de la conception de ces villes [Bobylev, 2009].

En France, plusieurs chambres souterraines ont été principalement construites au moyen âge pour des raisons défensives. Au cours des 17ème et 18ème siècles, l'usage des cavernes, dans la vallée de la Loire, a été étendu à l'habitation, jusqu'à permettre le logement de plusieurs centaines de milliers de personnes dans le courant du 18ème siècle [Carmody and Sterling, 1993]. En France, on estimait qu'au cours du 20ème siècle 20000 personnes habitaient toujours dans des cavernes [Charneau and Trebbi, 1981].

Depuis le 19ème siècle, le sous-sol a été dévolu aux ouvrages techniques en même temps qu'il est devenu le lieu de l'excellence technique et le domaine des ingénieurs [Labbé, 2016]. En revanche, en France comme dans de trop nombreux pays, aucune organisation ni planification, aucun schéma directeur n'a régi son occupation. Une station à trois lignes de métro comme celle de l'Étoile ouverte à Paris en 1900 est un exemple d'urbanisme souterrain par la compacité qui facilite les correspondances.

Le 20ème siècle est marqué par des avancées technologiques en matière de construction souterraine et de géotechnique. Cela concerne par exemple l'introduction du béton armé dans le domaine de construction, le creusement en sol meuble, la création d'espaces souterrains ouverts avec le minimum d'affaissement du terrain adjacent, le creusement de grands volumes souterrains. Ces avancées ont permis le développement de l'espace souterrain dans des villes denses en parallèle de leur croissance démographique (ex. Paris, Stockholm et Tokyo) [Bobylev, 2009].

2.2. De l'espaces souterrain à l'ouvrage souterrain

L'espace souterrain est défini en termes spatial [Labbé, 2016] comme un espace en dessous du terrain naturel. Il peut être un espace dans un sol en relief qui profite des pentes pour être accessible à tout niveau. En terrain plat, il est un espace en contrebas dans une ville que l'on peut, dès lors, considérer comme s'approfondissant et se développant dans toutes ses dimensions.

Deux types d'espace souterrain peuvent être distingués selon leur origine : **naturel** (ex. les cavernes) ou **anthropique** (tout espace de fabrication humaine et dont l'utilisation finale est également humaine) [Carmody and Sterling, 1993].

Un « **espace souterrain urbain** [5]» est défini en termes fonctionnels [He et al, 2012] comme tout espace au sous-sol urbain dont la fonction est d'ordre civil : production souterraine et services urbains, loisirs et commerces, hôtels, usines, bureaux, hôpitaux, stationnements publics, galeries de connexion, etc.

Selon les normes NF EN 15643-1 [AFNOR, 2010] et ISO 6707-1 [ISO, 2014], un « **ouvrage de construction** » est un terme général désignant tout ce qui est construit ou qui est le résultat d'une opération de construction. Cela couvre aussi bien le bâtiment que les ouvrages de génie civil et les éléments structurels et non structurels.

Selon la norme NF EN 15643-1 [AFNOR, 2010], un « **bâtiment** » est un ouvrage de construction dont l'une des fonctions principales est d'abriter ses occupants ou son contenu ; habituellement clos et

[5] Urban Underground Space (UUS)

conçu pour demeurer en place de façon permanente. Un ensemble de bâtiments selon la même norme est un « **cadre bâti** », il s'agit des ouvrages extérieurs (zones aménagées), infrastructures et autres ouvrages de construction dans un périmètre défini.

Ainsi, un « **ouvrage de génie civil** » est identifié selon la norme ISO/TS 21929-2 [ISO, 2015] comme un ouvrages de construction comprenant une structure, telle que barrage, pont, route, voie ferrée, piste, équipements d'exploitation, conduites ou système d'assainissement, ou résultant des opérations telles que dragage, terrassement, travaux géotechniques, mais excluant le bâtiment et les travaux qui lui sont associés.

L'ouvrage de construction souterrain fait partie des projets d'infrastructures. He a indiqué que le terme « **infrastructure souterraine** » comprend les stations d'énergie et les égouts, les gares, l'espaces consacré aux annexes techniques, les tunnels, etc. [He et al, 2012].

Un ouvrage de construction souterrain est à la fois un ouvrage de génie civil, une sorte de bâtiment, et une infrastructure. Il est situé au sous-sol. Il représente un espace anthropique, aménagé au sous-sol pour une utilisation humaine. Il peut être construit pour une utilisation civile ou militaire, publique ou privée, comme les puits (des trous excavés verticalement), les tunnels ou micro-tunnels (des tubes excavés horizontalement) et les espaces construits en tranchées couvertes (entièrement excavés puis recouverts).

Pour le construire, deux grandes méthodes de construction peuvent être distinguées, le **creusement en souterrain** ou la **construction en tranchées couvertes**. Concernant les tunnels, plusieurs méthodes de creusement sont définies par le Centre d'études des tunnels en France (CETU) et données dans le Tableau 1 [CETU, 1990].

Tableau 1 : Méthodes de creusement des tunnels

Ouvrage creusé			**Ouvrage construit en tranchées couvertes**
Méthode conventionnelle		**Méthode mécanisée**	
A l'explosif	Attaque ponctuelle	Tunnelier	

2.3. Configuration des ouvrages de construction souterrains

Duffaut avait schématisé les ouvrages de construction souterrains, autrement dits « vides creusés par l'homme », selon leur forme géométrique en « tubes » et « boites » [Duffaut, 2010]. Différentes configurations d'un ouvrage de construction souterrain peuvent ainsi être distinguées selon leur forme géométrique : ouvrage linéaire (tubes), ouvrage ponctuel (boîtes) ou ouvrage mixte (une complexe d'ouvrages).

2.3.1. Ouvrage linéaire

Ce type d'ouvrage est utilisé par les flux (trafic, réseaux, service, etc.) plutôt pour circuler. Ils entrent alors d'un côté et sortent d'un autre côté (Figure 2). D'après Duffaut, ces ouvrages sont caractérisés par une grande longueur par rapport au diamètre de la section quelle que soit leur inclinaison sur l'horizontale [Duffaut, 2010]. Exemples : tunnels, puits, galeries des réseaux (électricité, eaux, assainissement, etc.)

Figure 2 : Ouvrage de construction souterrain linéaire (tunnel)

2.3.2. Ouvrage ponctuel

Il s'agit de tout ouvrage dont la forme ressemble à un bâtiment souterrain (Figure 3). Selon Duffaut, ces ouvrages sont souvent proches d'un parallélépipède à plancher et toit horizontaux, murs verticaux, et souvent ouverts en surface puis recouverts [Duffaut, 2010]. Exemple : Centres commerciaux, espaces de stockage, annexes techniques, etc.

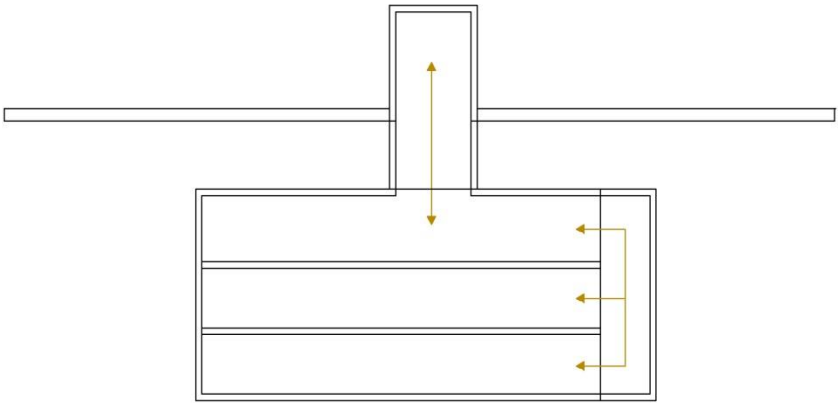


Figure 3 : Ouvrage de construction souterrain ponctuel (bâtiment souterrain)

2.3.3. Complexe d'ouvrages

Il s'agit d'une combinaison d'ouvrages qui contient au moins deux ouvrages, du même type ou des types différents, ils peuvent s'articuler entre eux par d'autres ouvrages annexes d'accès (Figure 4). Exemple : égout d'assainissement avec des galeries de réseaux, gare souterraine avec un tunnel du métro, quartier souterrain, etc.

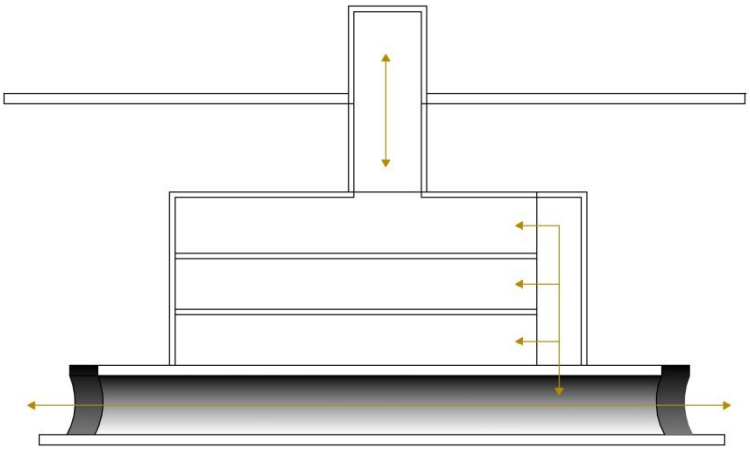


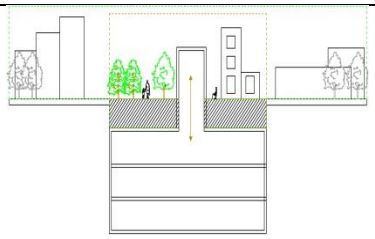
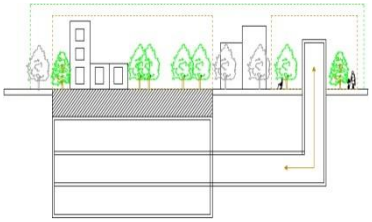
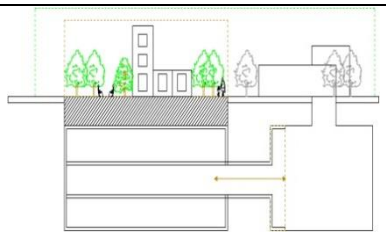
Figure 4 : Complexe d'ouvrage de construction souterrain

3- Accessibilité au souterrain

3.1. Articulation souterrain - surface

Un ouvrage de construction souterrain peut être accessible selon trois cas de figures (Tableau 2) : depuis sa parcelle, de dehors de sa parcelle ou depuis un autre ouvrage souterrain. Selon la ministère de l'économie et des finances (MEF) : une parcelle représente la portion de territoire communal d'un seul tenant située dans une subdivision de section et appartenant à un même propriétaire [MEF, 2013]. Dans le cas d'un ouvrage souterrain, la parcelle d'un ouvrage souterrain ponctuel représente la partie du terrain qui est juste au-dessus de l'ouvrage. Les tunnels sont accessibles de l'extérieur de leurs parcelles et parfois depuis un autre ouvrage souterrain.

Tableau 2 : Types d'accès à l'ouvrage de construction souterrain construit en tranchées couvertes

Depuis sa parcelle	**Dehors de sa parcelle**	**Depuis un autre ouvrage souterrain**
L'accès se fait depuis la partie en surface juste au-dessus de l'ouvrage	L'accès se fait depuis la surface mais pas sur la partie au-dessus de l'ouvrage	L'accès se fait depuis un autre ouvrage souterrain
		

3.2. Accès au souterrain

L'accès à l'ouvrage de construction souterrain constitue une des caractéristiques de référence qui contribue à sa classification et à l'articulation surface-souterrain. Il peut se faire soit de plein pied, soit à une profondeur donnée qui peut être limitée par la réglementation en vigueur. Ainsi, une analyse des types d'accès à un ouvrage enterré est présentée dans les deux figures suivantes. Elle est basée sur une classification proposée par Labs et citée par Carmody et Sterling [Labs, 1976 ; Carmody and Sterling, 1993].

Dans le cas I (Figure 5), l'ouvrage souterrain peut être « **partiellement enterré** ». Il est accessible de plein pied, en faisant partie d'un bâtiment aérien comme dans A, ou indépendamment construit comme dans B et C.

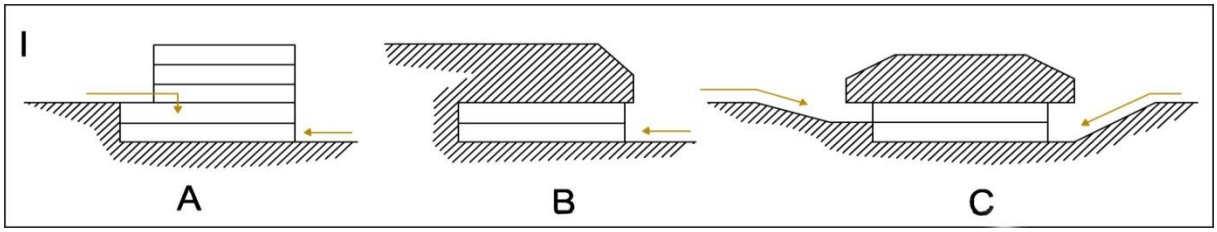


Figure 5 : Ouvrages partiellement souterrains accessibles de plein pied

Dans le cas II (Figure 6), l'ouvrage peut être « **totalement enterré** ». Son accès s'effectue depuis un autre bâtiment aérien (dont l'ouvrage souterrain peut faire partie) comme dans A. Il peut également être accessible depuis la surface à travers sa couverture comme dans B. Enfin, il peut aussi être accessible depuis d'autres ouvrages de construction souterrains comme dans C.

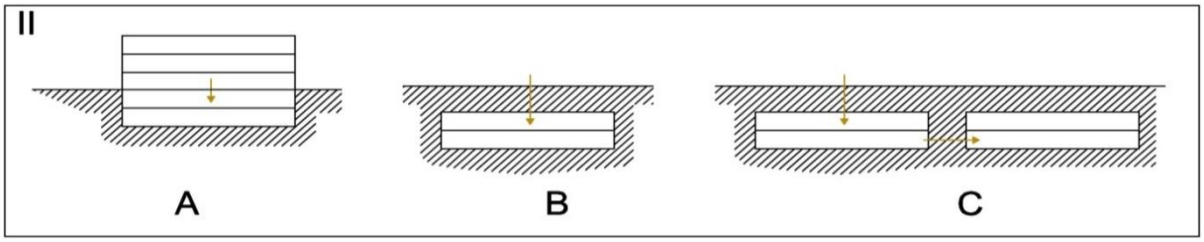


Figure 6 : Ouvrages totalement souterrains accessible à une profondeur donnée

En conclusion, un ouvrage de construction souterrain peut se définir selon trois états : totalement enterré, partiellement enterré, ou faisant partie d'un ouvrage aérien. La difficulté se résume en trois points principaux : la définition des notions « partiellement » ou « totalement » enterrés, autrement dit, la définition du taux enterré de l'ouvrage pour qu'il soit considéré comme souterrain ; la définition de la notion de « sous-sol » par l'identification du niveau du sol si naturel ou d'un niveau de référence ; enfin, la définition de l'épaisseur de la couverture nécessaire pour considérer que l'ouvrage est en sous-sol, par exemple la construction d'une dalle de couverture, crée un souterrain « artificiel » mais physiquement toujours en surface.

4- Fonctionnalité du souterrain

Par la suite, une analyse des fonctions urbaines pouvant être mises en sous-sol, est abordée. Elle est ensuite poursuivie par une étude de la multifonctionnalité urbaine à travers les aménagements souterrains.

4.1. Fonctions souterraines

En regardant la fonctionnalité des ouvrages urbains souterrains, deux façons de les classer peuvent être citées : La première correspond à la nature de l'usage « **fonction** », alors que la deuxième correspond à la nature de l'ouvrage « **géométrie** ».

4.1.1. Expression de « fonction »

L'utilisation de l'espace souterrain urbain a commencé en tant qu'annexe d'un bâtiment aérien, ou en tant qu'infrastructure. Elle s'est ensuite développée pour répondre à plusieurs autres besoins. La fonctionnalité de l'ouvrage souterrain représente un attribut défini à la conception de l'ouvrage de construction souterrain.

Une fonction autrement dite « destination » d'un ouvrage de construction exprime ce pourquoi une construction a été conçue, réalisée ou transformée [Inserguet, 2012]. Une fonction s'exprime littérairement par un verbe accompagné de compléments. Le verbe correspond à la forme grammaticale permettant de définir une action, les compléments permettent ensuite de donner des informations supplémentaires sur cette action [Fund, 2016]. Cela nous parait indispensable pour exprimer les différentes fonctions repérées dans l'analyse bibliographique ci-après, et ensuite pour exprimer l'unité fonctionnelle de l'évaluation environnementale dans le chapitre 2.

4.1.2. Classification selon la fonction de l'ouvrage

La classification selon la nature de l'usage a été adoptée par Carmody et Sterling. Ils ont regroupé les fonctions urbaines en 4 catégories : résidentielle, non résidentielle, infrastructure et militaire [Carmody and Sterling, 1993]. Ensuite, ces catégories ont été développées en ajoutant d'autres fonctions [Edelenbos et al, 1998]. **La première catégorie** est relative à un usage résidentiel. On y trouve l'habitat d'une ou plusieurs familles. Edelenbos y a ajouté les activités résidentielles urbaines et rurales (suburbaines**). La seconde catégorie** est relative à un usage non résidentiel. On y trouve les usages religieux, industriels, commerciaux, ou les parcs de loisirs (ex. usines, stationnements, stockage, agriculture, etc.). Edelenbos y a ajouté les salles de sport et de détente, les activités culturelles, les équipements de loisirs (bars, discothèques, etc.). Il a également ajouté l'usage pour le travail, qui peut comprendre les activités économiques et services, les activités de distribution, les laboratoires de recherche, etc. **La troisième catégorie** est relative aux infrastructures (linéaires et ponctuelles à la fois). Elle comprend le transport des personnels ou des biens, services, centraux d'énergie ou de déchets, les galeries techniques. **La quatrième catégorie** est relative à un usage militaire. On y trouve les ouvrages de défense civile, et les autres ouvrages militaires.

Parker a proposé un regroupement similaire des fonctions souterraines en trois catégories [Parker, 2004] : **circulation** (gares, tunnels et micro-tunnels), **stockage** (énergie, liquides, matériaux, etc.), et puis **habitat et commerce**. La dernière a été appelée par Admiraal « **usage urbain** » et désigne un usage qui se trouve essentiellement dans les villes, tels que les centres commerciaux, les ouvrages hébergeant des loisirs, les parcs des stationnements, et les espaces de travail [Admiraal, 2007 ; Thewes et al, 2012]. Admiraal avait également ajouté un « **usage d'archives** » qui comprend les ressources souterraines, les ressources archéologique et de sciences de la terre, ainsi que la biodiversité souterraine.

De la même façon, les études menées par le thème 1 (aspects socioéconomiques) du projet national « Ville10D – ville d'idées » ont conduit à une classification similaire [Gautier et al. 2014a ; Gautier et al. 2014b] : usage de circulation ; usage de loisirs et commerces ; usage économique et industriel ; usage agricole ; usage pour l'intérêt général ; usage d'habitation.

4.1.3. Classification selon la géométrie de l'ouvrage

La deuxième classification, selon la nature de l'ouvrage, a été adoptée par Duffaut qui propose cinq catégories d'ouvrages [Duffaut, 2007] : Les **petits réseaux** classiques et indépendants qui sont utilisés pour la circulation des fluides (assainissement, eaux, électricité, etc.) ; les **grands réseaux** qui sont pour le transport en commun de masse ou les véhicules particuliers, pour les personnes et pour le fret souterrain ; les **annexes souterraines aux réseaux** qui sont utilisés pour les activités de traitement des eaux et des déchets, la production de chaleur et de froid, le parking et les stations-services, les postes de comptage et de vannage, d'interconnexion, les plates-formes logistiques, etc. ; les ouvrages **d'entrepôt et de stockage** qui représentent une extension du concept de cave d'immeuble privé, mais utilisée pour l'entrepôt de grand magasin et pour les stocks industriels ; les **autres ouvrages** qui comprennent les usages correspondant au commerce, aux activités culturelles ou sportives, aux loisirs. C'est-à-dire toute activité où l'accès du public n'est ni permanent, ni obligatoire.

En rapprochant ces cinq catégories proposées par Duffaut des configurations géométriques présentées dans le paragraphe précédent, on peut les reclasser en : ouvrages linéaires (petits

réseaux, grands réseaux) ; ouvrages ponctuels (annexes aux réseaux, entrepôts et stockage, autres ouvrages). Cette façon de classifier a été également adoptée dans le cadre du projet Deep-City conduite en Suisse [Parriaux et al. 2010], comme le montre le Tableau 3.

Tableau 3 : Classification des ouvrages urbains souterrains selon leur géométrie (projet Deep-City)

Géométrie	Fonction	Ouvrages réalisés
Linéaire horizontale	Transport	Rail
		Route
		Piétons
	Technique	Technique
Linéaire verticale	Technique	Fondations profondes
		Captage d'eau souterraine
		Exploitation géothermique
Ponctuelle	Technique et industrie	Parking
		Stockage/technique/industrie
	Tertiaire	Gares, pôles d'échange
		Bâtiments commerciaux
		Bâtiments récréatifs

Auparavant, Barles et Jardel en ont donné un exemple [Barles and Jardel, 2005], (Tableau 4), il s'agit d'une analyse des équipements souterrains (espaces publics) dans la ville de Montréal selon leur géométrie.

Tableau 4 : Exemple de classification des équipements souterrains selon leur géométrie

Géométrie	Equipements souterrains à la ville souterraine de Montréal
linéaire	Corridors simples : axes à vocation de circulation, de connexion et de distribution
	Galeries commerciales ajoutant la fonction commerciale à la fonction de circulation
ponctuelle	Places souterraines aveugles (sans éclairage naturel)
	Places souterraines avec puits de lumière
	Places souterraines avec mezzanines
	Places semi-enterrées ou atriums avec mezzanines, autour desquelles se s'élèvent des immeubles à vocations multiples, dont le commerce, et à partir desquelles rayonnent les galeries commerciales et corridors souterrains

4.1.4. Synthèse des fonctions souterraines

En résumé des différents éléments bibliographiques abordés ci-dessus, la fonctionnalité des ouvrages de construction souterrains façonne leur géométrie. Le Tableau 5 propose une classification des ouvrages souterrains selon leur géométrie et leur usage (identifié comme nature de la fonction) avec des exemples actuellement existants.

Tableau 5 : Proposition de classification des ouvrages souterrains selon leur géométrie et leurs fonctions

Type de l'ouvrage	Type de la fonction	Expression de la fonction	Activités correspondantes	Exemple d'ouvrages
linéaire	Circulation	Assurer la circulation entre deux points donnés pour X de personnes ou biens	Transport de biens	Galeries techniques (câbles électriques, téléphoniques, data), conduites (de gaz, d'eau, d'assainissement), etc.
			Transport de personnels et de fret	Tunnels routiers, ferroviaires, piétonniers, etc.
Ponctuel			stationnement public	Parking public
			Gare	Gare de métro (ou de train), gare routière, etc.
	Résidentielle	Loger X de personnes ou annexes résidentielles	Habitat	Etage en sous-sol pour un bâtiment en surface ; maison enterrée ou semi-enterrée
			Annexes techniques en utilisation résidentielle	Annexes de logement, stationnement, canalisation, etc.
	Non résidentielle	Assurer une activité urbaine non-résidentielle pour X de personnes	Activités agricoles et forestières	Caves, abris pour les animaux, etc.
			Activités culturelles et spirituelles, loisirs.	Salle de sport, piscine, cinéma, théâtre, centre religieux, bibliothèques, évènementiel, salle de congrès, salle d'expositions, salle de spectacles
			Activités d'intérêt général : administratives, financières, sanitaires, et sociales.	Bureaux, banques, studios d'enregistrement, de radio et de télévision, poste, laboratoire et centre de recherche, hôpitaux, cliniques, cimetières
			Activités économiques / industrielles	Supermarché, magasin, stations de service, centre d'achats, discothèque, restaurant, bar, etc.
	Logistique	Assurer une activité logistique	Vocation industrielle	Installations industrielles pour l'équipement ou les marchandises, usine de traitement des eaux usées, installation pour le chauffage urbain, etc.
			Stockage	Stockage des marchandises commerciales, salle d'archive, data centers, réservoir d'eau, d'hydrocarbures, d'autres biens (nourritures, liquides, gaz, produits chimiques, etc.)

Ainsi, Les fonctions urbaines associées à un ouvrage de construction souterrain répondent essentiellement à des besoins des utilisateurs, ou à des contraintes précises. Elles sont catégorisées comme suit :

- **Fonction principale ou destination de l'ouvrage (FP)** : définie comme « fonction de service » dans les normes NF X50-101 [AFNOR, 1995] et NF EN 1325 [AFNOR, 2014c]. Elle répond à un besoin principal pour lequel l'ouvrage a été construit. **Fonction annexe (FA)** : définie comme « fonction de contrainte » dans les normes NF EN 16271 [AFNOR, 2013a] et NF EN 1325 [AFNOR, 2014c], elle est nécessaire pour assurer une fonction principale.
- **Fonction secondaire (FS)** : Elle répond à un besoin différent et secondaire par rapport à l'ouvrage principal, elle est créée grâce à la réalisation de l'ouvrage.

Cela introduit la notion de la « multifonctionnalité souterraine », on trouve en effet rarement dans la ville un ouvrage souterrain monofonctionnel.

4.2. Multifonctionnalité souterraine

Le souterrain urbain n'est pas construit pour une seule fonction, il faut qu'il soit multifonctionnel pour qu'il soit rentable [Barles and Jardel, 2005]. La multifonctionnalité offerte par l'espace souterrain a pour but de permettre la densification des zones urbaines car on déplace certaines activités de la ville de la surface vers le souterrain. Ceci permet de diminuer le gaspillage d'espace, la longueur des réseaux, les besoins et la durée des transports, les besoins de chauffage (sinon de climatisation estivale) [Duffaut, 2010]. Les paragraphes ci-après expliquent comment est conçu un espace souterrain afin d'assurer différentes fonctions à la fois, pour ses usagers.

4.2.1. Zonage vertical

L'idée du zonage spatial des activités urbaines avait été introduite par une proposition menée par Le Corbusier. Il avait découpé les espaces urbains entre zones d'habitat, zones de travail et zones d'amusement. *« Zoning, according to the key functions – living, working and recreating – will put order into the urban environment* » [Corbusier et al, 1957]. Un autre zonage l'a ensuite remplacé, selon Labbé, pour des raisons des cloisonnements multiples, du morcèlement de l'espace public relatifs à la protection contre les risques d'incendie ou à la surveillance contre la malveillance, des contrôles d'accès [Labbé, 2016].

Le Corbusier avait également proposé un zonage urbain qui sépare d'une part les zones proprement habitables « *Clean, living space housing* » ce qu'on appelle actuellement « éco-quartier[6] » et d'autre part, les zones techniques qui comprennent les industries, les commerces, la logistique, etc. [Corbusier et al, 1957]. Les zones proprement habitables doivent être sans véhicule ni camion (un espace idéal sans bruit, sans pollution, sans danger, etc.), elles comprennent l'habitat, le tertiaire et des équipements scolaires et culturels. Cette séparation renvoie à l'idéal de l'urbanisme souterrain, où l'on utilise l'espace souterrain pour enterrer les infrastructures et les équipements techniques de la ville, d'ailleurs la surface reste libre pour d'autres activités ou l'utilisation d'espaces verts [Labbé, 2016].

[6] Selon le MEEM (http://www.developpement-durable.gouv.fr/EcoQuartier), un éco-quartier est un projet d'aménagement urbain qui respecte les principes du DD, tout en s'adaptant aux caractéristiques de son territoire.

Au Japon, le centre des espaces urbains souterrains[7] milite pour un zonage vertical en milieu urbain dense, et pour la nécessité de multiplier les sources de financement. Elles conduisent la plupart du temps à affecter aux circulations piétonnières et aux activités commerciales les deux premiers niveaux de sous-sol [Barles and Jardel, 2005].

L'urbanisme tridimensionnel peut jouer un rôle essentiel dans le développement urbain durable. Un urbanisme souterrain doit prendre en considération l'interaction tridimensionnelle entre le souterrain urbain et la planification de la surface [Lavagno and Schranz, 2012]. L'affectation verticale des fonctions est essentiellement liée à la mobilité. Plus un espace est public et effectivement occupé par un grand nombre de personnes, plus cet espace devrait se localiser près de la surface. C'est le cas des centres commerciaux, des cinémas et des théâtres [Leveson, 1975].

Ainsi, il est important de souligner que malgré le zonage vertical des fonctions urbaines selon la profondeur[8], la multifonctionnalité dans les zones urbaines reste demandée. Selon Labbé, deux écueils majeurs sont à éviter en matière d'aménagement des villes et des territoires : d'une part, la séparation de l'espace aérien et de l'espace souterrain dans la conception de la ville ; d'autre part, le morcellement de fonctions urbaines différentes et leur l'assignation à des zones ou espaces séparés [Labbé, 2016].

4.2.2. Notion de profondeur

L'étude des fonctions urbaines dans un plan vertical nécessitent que l'on s'intéresse de façon beaucoup plus détaillée à la compatibilité de ces diverses fonctions avec l'espace souterrain aménagé. Boivin avait identifié trois espaces souterrains en termes de profondeur : proche-espace, moyen-espace et lointain-espace [Boivin, 1989]. L'objectif était d'établir non seulement la compatibilité de certaines activités et fonctions avec l'environnement souterrain mais aussi de leur position verticale selon le principe de mobilité envisagé. La notion de mobilité concerne également les marchandises. Ainsi, les commerces ou les industries qui manipulent des objets lourds ou de grandes dimensions devront se localiser près de la surface. Carmody et Sterling ont identifié les profondeurs moyennes des espaces souterrains mentionnés par rapport à l'usage souterrain dans chaque espace (Tableau 6) [Carmody and Sterling, 1993].

Tableau 6 : Profondeur d'espaces souterrains selon l'usage

Terme	Services locaux	Bâtiments	Services régionaux / transite urbain	Exploitation minières
Espace proche	0-2m	0-10m	0-10m	0-100m
Espace à profondeur moyenne	2-4m	10-30m	10-50m	100-1000m
Espace lointain	Plus de 4m	Plus de 30m	Plus de 50m	Plus de 1000m

[7] *Urban Underground Space Center Of Japan* : http://www.toshimirai.jp/usj/english.html

[8] Selon l'Article CO39 de l'arrêt de 25 juin 1980 portant approbations générales du règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public (ERP), c'est important d'indiquer que la profondeur peut changer selon différents critères (nombre des personnes accueillies, activités exercées, accessibilité, etc.), cela est important pour la sécurité des personnels et de biens.

Le principe, selon Boivin, est de loger les services et espaces publics au sommet de l'édifice souterrain, incluant les espaces de stationnement, et d'assigner aux étages intérieurs des fonctions plus privées ou à trafic réduit [Boivin, 1989], comme suit (Figure 7) :

- **Proche-espace** : 1) Canalisations, fils électriques et téléphoniques, conduites de gaz, pipelines et tunnels utilitaires. 2) Accès au moyen-espace et au lointain-espace ; Maisons enterrées et autres ouvrages faits à faible profondeur. 3) Etages en sous-sol d'un ouvrage en surface. 4) Installation commerciales telles que supermarchés, magasins à rayons, centre d'achats, discothèques, cinémas, restaurants, etc. 5) Installations publiques telles que musées, bibliothèques, théâtres, etc. 6) Tunnels piétonniers. 7) Stationnements souterrains. 8) Voies routières excavées en tranchées.
- **Moyen –espace :** 1) Installations industrielles dont l'équipement et les marchandises sont de dimensions et de poids peu importants. 2) Abris nucléaires et autres installations militaires. 3) Accès au lointain-espace. 4) Réservoirs d'eau, d'hydrocarbures et autres liquides ou gaz. 5) Métro. 6) Voies routières. 7) Salles d'archives, voûtes. 8) Stationnements souterrains. 9) Entrepôts divers. 10) Intercepteurs, collecteurs et tunnels d'eaux usées. 11) Usines de traitement des eaux. 12) Centrales hydro-électriques ou nucléaires. 13) Laboratoires et centres de recherche. 14) Studios d'enregistrement, de radio et de télévision. 15) Installations de chauffage urbain.
- **Lointain-espace :** 1) Mines. 2) Centrales hydro-électriques ou nucléaires. 3) Centrales énergétiques à air comprimé. 4) Stockage de déchets industriels ou radioactifs. 5) Réservoirs d'hydrocarbures ou de liquides divers.

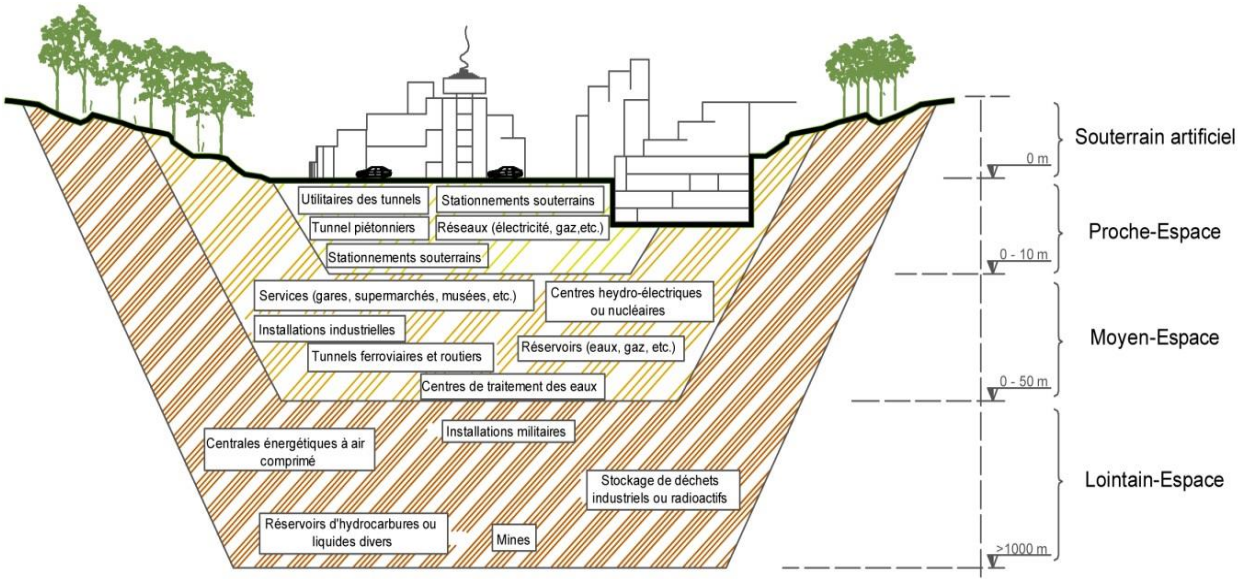


Figure 7 : zonage vertical des fonctions souterraines, reproduit de [Boivin, 1989] et [Carmody and Sterling, 1993]

Un autre exemple de la prise en compte de l'homme dans la planification verticale de la ville, a été donné par Barles. Il concerne les fonctions souterraines de la ville de Montréal qui existent dans la majorité des édifices qui s'échelonnent du moins profond au plus profond, de la manière suivante [Barles and Jardel, 2005] : 1) Les espaces commerciaux et voies piétonnes. 2) Les services de courrier et de livraison / réception. 3) Les salles d'ordinateurs. 4) Les services de polycopie. 5) Les espaces de rangement et ceux qui sont nécessaires à l'entretien de l'édifice. 6) Les salles des machines. 7) Les stationnements. 8) Les abris.

5- Cadre règlementaire

5.1. Contraintes règlementaires relatives à l'urbanisme de la ville

5.1.1. Documents d'urbanisme

En France, la loi de solidarité et de renouvellement urbains (SRU)[9], datée de 2000, précise entre autres choses la portée du développement durable au sein des documents d'urbanisme, tels que les directives territoriales d'aménagement (DTA), les schémas de cohérence territoriale (SCOT), les plans locaux d'urbanisme (PLU) et les cartes communales.

Cette loi représente une réponse à une volonté de promouvoir un aménagement des aires urbaines plus cohérent, plus solidaire et plus soucieux du DD. Elle améliore aussi les dispositions d'urbanisme s'appliquant au monde rural avec le même objectif. Elle apporte dans les domaines de l'urbanisme, de l'habitat et des transports profonds.

À l'échelle d'une commune, et en cohérence avec les orientations du SCOT, le PLU définit le projet territorial des élus, dans le respect des principes énoncés par le code de l'urbanisme. Depuis la loi SRU, il intègre un projet d'aménagement et du DD (PADD). Le PLU précise le droit des sols et présente le projet de la commune sur l'intégralité de son territoire, avec tous les projets d'aménagement prévus (y compris les zones d'aménagement concerté). Il peut aussi exposer les actions envisagées en matière d'espaces publics, de transport, de paysage, d'environnement et de renouvellement urbain.

Dans le respect des orientations définies par le PADD, le document d'orientations et d'objectifs (DOO) détermine les orientations générales de l'organisation de l'espace. Il définit les grands équilibres entre les espaces urbains et à urbaniser et les espaces ruraux, naturels, agricoles et forestiers. Il établit les conditions d'un développement urbain maîtrisé et les principes de : 1) restructuration des espaces urbanisés ; 2) revitalisation des centres urbains et ruraux ; 3) mise en valeur des entrées de ville ; valorisation des paysages et de prévention des risques. La Loi « Grenelle II » a renforcé le rôle et le contenu de ce DOO par la création de l'article L.122-1-5 du Code de l'urbanisme [IFIJ, 2015].

La Figure 8 illustre les trois phases majeures d'un projet sous maîtrise d'ouvrage État. On retrouve ici des notions introduites dans la loi MOP[10] et le Code de l'environnement.

[9] https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000005630252 (Consulté le 5 aout 2016).
[10] Loi no 85-704 du 12 juillet 1985 relative à la maîtrise d'ouvrage publique et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée.

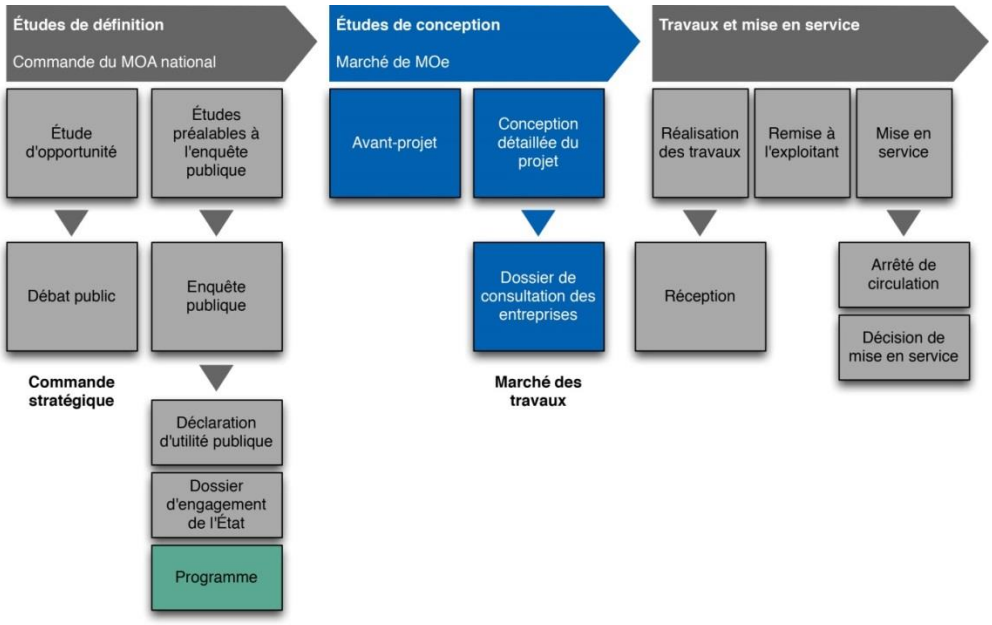


Figure 8: Phases d'un projet sous maîtrise d'ouvrage État.

5.1.2. Jeu d'acteurs relatif au projet urbain souterrain

Le projet urbain présente un ensemble nécessairement interdisciplinaire et intersectoriel, où chaque acteur n'en connaît qu'une partie. L'étude des ensembles urbains constitue une illustration de ces problématiques intersectorielles en associant les secteurs du bâtiment, du transport de l'énergie, de procédés (eau, traitement des déchets, etc.), de l'industrie (produits de construction…) et même de l'agriculture (production locale d'aliments, végétalisation) [Peuportier, 2013]. La Figure 9 présente le jeu des différents acteurs dans la procédure de planification urbaine.

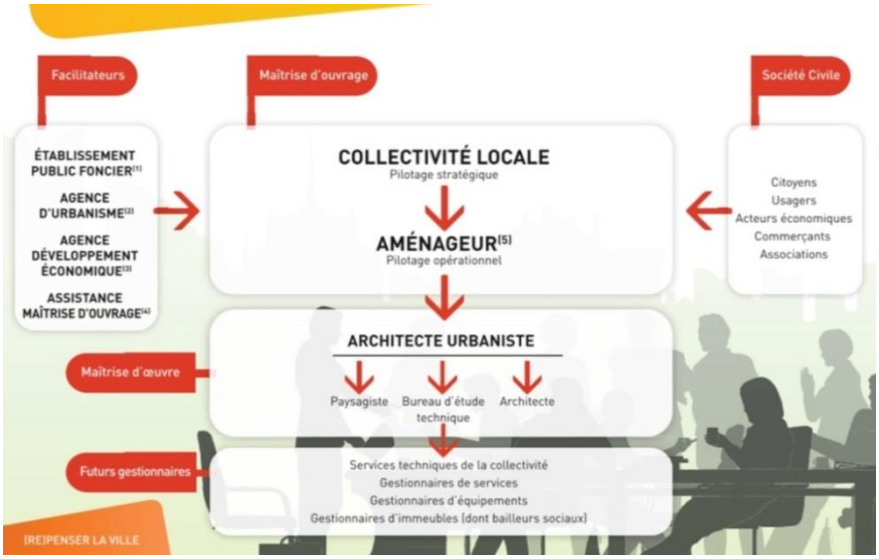


Figure 9 : Jeu d'acteurs dans le projet urbain. (Source : Repenser la ville, http://www.lavilledemain.com)

Le terme « partie prenante » apparait dans la norme NF EN 1325 [AFNOR, 2014c] relative au mangement de la valeur, il désigne une personne ou un organisme ayant un intérêt dans, et une incidence sur le produit à tout moment pendant son cycle de vie.

Concernant l'utilisation du sous-sol, selon Godard et Sterling, ce terme est employé pour désigner l'ensemble des groupes socioéconomiques, qui comprennent, d'une part, les personnes physiques (individus), d'autre part, les personnes morales (sociétés, entreprises, associations, collectivités locales ou nationales, organismes institutionnels et politiques) [Godard and sterling, 1995].

Les parties prenantes suivantes sont concernées directement par l'utilisation du sous-sol : Le maître d'ouvrage, l'utilisateur, la société exploitante, l'employé de la société exploitante, les organismes institutionnels et politiques qui exercent une responsabilité fonctionnelle ou territoriale vis-à-vis de l'ouvrage considéré [Godard and sterling, 1995]. Parmi les parties prenantes directement concernées, on adopte dans le cadre de ce travail, les suivantes : le maître d'ouvrage, la société exploitante, les utilisateurs, et les employés.

Les parties prenantes suivantes sont concernées indirectement par l'utilisation du sous-sol : les propriétaires des ouvrages environnants et les maîtres d'ouvrages des aménagements projetés, les utilisateurs des ouvrages environnants et de l'environnement naturel, les sociétés exploitantes des ouvrages environnants et leurs employés, les organismes institutionnels et politiques qui exercent une responsabilité fonctionnelle et territoriale vis-à-vis des ouvrages environnants et de l'environnement naturel [Godard and sterling, 1995]. Parmi les parties prenantes indirectement concernées, on s'intéresse aux suivantes : les riverains et la communauté qui représente la partie de la population de la ville plus éloignée de l'ouvrage.

5.2. Contraintes règlementaires relatives à l'urbanisme souterrain

L'état de l'art ci-après définit des caractéristiques liées à certains ouvrages sur lesquels des règlementations spécifiques sont appliquées. Il représente également des contraintes règlementaires limitant la conception des ouvrages de construction souterrains. Ces contraintes (auxquelles notre méthodologie fera référence dans le chapitre 3) concernent l'accessibilité, la sécurité incendie et la panique potentielle des usagers (Objectif « sécurité et sûreté » - Tableau 68 en ANNEXE 5). Cela peut ainsi limiter la mise en sous-sol des certaines fonctions urbaines.

Ce travail se base en grande partie sur le travail effectué par le thème 5 du PN Ville10D portant sur les aspects juridiques [Cocquière, 2014]. Il considère deux grandes catégories d'ouvrages : ouvrages linéaires (tunnels) et ouvrages ponctuels (essentiellement des Etablissements Recevant du Public – ERP-).

5.2.1. Règlementations relatives aux ouvrages linéaires

Par la suite, trois types de tunnels sont abordés : les tunnels routiers, les tunnels ferroviaires, et les tunnels de transport guidé.

Tunnels routiers

Le code de la voirie routière donne une définition d'un tunnel routier sur lequel s'appliquent ses constitutions [Article R.118-1-1]. « *Un tunnel désigne toute route ou chaussée située sous un ouvrage de couverture qui, quel que soit son mode de construction, crée un espace confiné. Une section de route ou de chaussée située sous un ouvrage de couverture n'est pas un espace confiné dès lors que l'ouvrage de couverture comporte des ouvertures vers l'extérieur dont la surface est égale ou supérieure à 1 m^2 par voie de circulation et par mètre de chaussée* ». Cette définition est reprise dans l'Instruction technique relative aux dispositions de sécurité dans les nouveaux tunnels routiers,

annexée au circulaire n° 2006-20 du 29 mars 2006 relative à la sécurité des tunnels routiers d'une longueur supérieure à 300 mètres.

Les tunnels d'une longueur supérieure à 500 mètres sont soumis à des exigences supplémentaires qui découlent de la directive européenne du 29 avril 2004. Concernant ces tunnels, les principales exigences supplémentaires sont la mise en place de postes de secours dans les ouvrages neufs plus rapprochés (150 mètres au lieu de 200 mètres) et la désignation par le maître d'ouvrage d'un agent de sécurité après accord du préfet dont la mission est de coordonner les mesures de prévention et de sauvegarde contre le risque d'incendie.

Tunnels ferroviaires

L'instruction technique interministérielle relative à la sécurité dans les tunnels ferroviaires, n° 98 300 du 08 juillet 1998, considère les tunnels ferroviaires nouveaux[11] dont la longueur totale est supérieure à 400 mètres et inférieure à 10 km.

Pour la sécurité d'un tunnel ferroviaire, plusieurs exigences sont à prendre en compte dans sa conception, par exemple : pistes autorisant le croisement des véhicules de secours, parkings permettant le stationnement et le retournement des véhicules de secours à proximité de chaque tête de tunnel, aménagement permettant aux véhicules de secours de passer d'un tube à l'autre dans le cas d'un tunnel à deux tubes, cheminements pour évacuer les personnes en tout point du tunnel, trottoir ou radier adaptés, etc.

Tunnels de transport guidé

Un tunnel, auquel s'appliquent ces règlements, est défini dans l'article 1 de l'arrêté du 22 novembre 2005, relatif à la sécurité dans les tunnels des systèmes de transport public guidés urbains de personnes : « *tout ouvrage couvert, quel que soit le mode de construction : tunnel creusé ou immergé, tranchées couvertes, couverture acoustique, semi-couverture présentant une surface d'ouverture continue vers l'extérieur inférieure au cinquième de la surface du radier* ».

La sécurité dans ce type des tunnels a été réglementée dans le même arrêté du 22 novembre 2005, contre les principaux risques visés sont les risques d'incendie et de panique, et les accidents. Il concerne à la fois le génie civil, les équipements du tunnel et le matériel roulant appelé à y circuler. Cela comprend des dispositions concernant : la résistance au feu des structures, des locaux techniques et des câbles ; les véhicules et la communication avec les voyageurs ; l'évacuation des personnes transportés par des cheminements spécifiques ainsi que leurs conditions (ventilation, éclairage, etc.) ; les équipements de ventilation et de désenfumage.

L'accès des secours aux tunnels peut se faire par une gare, une station, une tête de tunnel ou un dispositif spécifique. La distance entre deux accès ne peut être supérieure à 800 mètres. Lorsque les voies se trouvent entre 15 mètres et 30 mètres de profondeur, un puits de dimensions minimale 1 x 2 mètres avec poulie de descente de matériel (force minimale de 50 kg) est mis en place. Au-delà de 30 mètres de profondeur, un ascenseur permettant le transport du brancard normalisé est prévu dans les dispositifs d'accès. Cet appareil peut être confondu avec celui de la station, il est alors équipé d'un système d'appel prioritaire.

[11] Un tunnel nouveau est défini comme un tunnel qui n'a pas encore fait l'objet d'un avant-projet sommaire (APS) lors de l'application de cette circulaire.

5.2.2. Règlementations relatives aux ouvrages ponctuels

En termes de fonctions, les ouvrages souterrains ponctuels font essentiellement partie des ERP, qui sont identifiés dans l'article R.123-2 du code de la construction et de l'habitation (CCH) [IFIJ, 2016] « *Tous bâtiments, locaux et enceintes dans lesquels des personnes sont admises, soit librement, soit moyennant une rétribution ou une participation quelconque, ou dans lesquels sont tenues des réunions ouvertes à tout venant ou sur invitation, payantes ou non* ». Il est considéré comme faisant partie du public *« Toutes les personnes admises dans l'établissement à quelque titre que ce soit en plus du personnel* ».

Selon l'article GN1 de l'arrêté du 25 juin 1980, portant approbation des dispositions générales du règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les ERP, ces établissements comprennent notamment : Les salles d'auditions, de conférences, de réunions, de spectacles ou d'usage multiple ; les magasins de vente, les centres commerciaux ; les restaurants et débits de boissons ; les établissements sanitaires ; les établissements sportifs couverts ; les musées ; les parcs de stationnement couverts ; les gars…

L'analyse suivante concerne les limitations de la mise en souterrain de certaines fonctions, l'accessibilité et la sécurité des ouvrages de construction souterrains ponctuels.

Limitations règlementaires de la mise en souterrain

Les conditions permettant à un ERP de s'appeler « souterrain » peuvent être inspirées de l'article GA3 de l'arrêté[12] du 24 décembre 2007, portant approbation des règles de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les gares. Cet article spécifie qu'une « gare souterraine » réponde simultanément aux trois conditions suivantes : 1) Ses emplacements sont situés au-dessous du niveau de référence[13] ; 2) Au moins la moitié de la surface de chaque face verticale longitudinale ne donne pas à l'air libre ; 3) Ses emplacements sont couverts en totalité. Si une gare ne répond pas aux dispositions ci-dessus, elle est alors soit aérienne, soit mixte si elle comporte à la fois une partie aérienne et une partie souterraine. De plus, l'article CO39 de l'arrêt de 25 juin 1980, a défini un local souterrain comme « *un local ou niveau (partiel ou total) est dit en sous-sol quand il remplit une des deux conditions suivantes :*

- *la sous-face du plancher haut est à moins de 1 mètre au-dessus du niveau moyen des seuils des issues sur l'extérieur*[14] *de ce local ou niveau ;*
- *le plancher bas est à plus de 1 mètre en contrebas du niveau moyen des seuils des issues sur l'extérieur de ce local ou niveau* ».

La profondeur des ERP, pour une raison de l'enfouissement des personnels, est limitée puisque sauf dispositions contraires. L'article CO40 de l'arrêté du 25 juin 1980 indique que « *Sauf dispositions particulières prévues dans la suite du présent règlement, l'établissement ne doit comprendre qu'un*

[12] (ELI : https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2007/12/24/DEVE0772580A/jo/texte) consulté le 5 aout 2016.

[13] Un niveau de référence d'un établissement de type gare accessible au public (GA) est celui de la voirie desservant l'adresse de l'établissement et utilisable par les engins des services publics de secours et de lutte contre l'incendie.

[14] Selon la jurisprudence CE 16 mai 1975, SCI Richelieu, n°91527 (Lebon), « *le niveau d'un seuil extérieur doit être apprécié au point où, la sortie devenant libre, les personnes qui quittent l'établissement ne sont plus soumises aux risques résultant de l'incendie ou de la panique et peuvent recevoir les soins que requiert éventuellement leur état, …*».

seul niveau de sous-sol accessible au public et son point le plus bas doit être au plus à 6 mètres au-dessous du niveau moyen des seuils extérieurs ». En revanche, ce niveau ne correspond pas nécessairement au niveau du sol naturel. Il s'agit du niveau d'accès des secours, celui-ci pouvant se trouver, par exemple, au niveau inférieur d'une dalle, mais aussi, selon la configuration, dans le sol naturel (ex : relief de plateau) (Figure 10) [Cocquière, 2014].

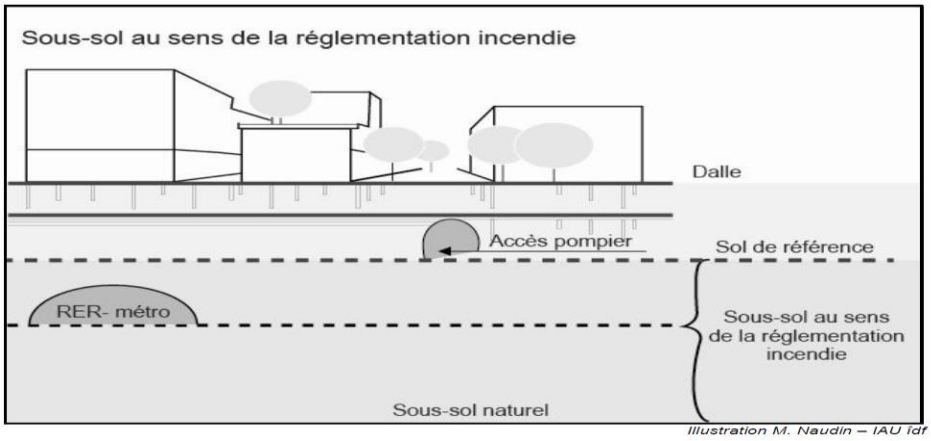


Figure 10 : Sous-sol au sens de la réglementation incendie [Cocquière, 2014]

Les règlements français ont ainsi limité l'utilisation du sous-sol pour certaines fonctions urbaines. Par exemple, l'article U14 de l'arrêté du 10 décembre 2004 (V), pour les locaux recevant du public en sous-sol, interdit l'existence des locaux à sommeil à plus de 6m de profondeur. Un établissement de soins hospitaliers ne peut donc être totalement souterrain. Aussi, l'Article R1 de l'arrêté du 25 juin 1980 interdit au sous-sol les installations de locaux accessibles aux élèves, pour les écoles maternelles, les crèches, les haltes-galeries et jardins d'enfants.

Concernant les lieux de travail, la circulaire du 14 avril 1995 rappelant que le code du travail a « *pour but de limiter l'implantation des locaux de travail en sous-sol, qui ne peuvent bénéficier de conditions d'éclairage naturel optimales et dont les conditions de sécurité (évacuation, désenfumage) sont généralement moins bonnes* ». L'article R. 4216-10 du code de travail précise « *n'interdit pas l'implantation de locaux techniques ou de locaux d'archives situés à plus de 6 mètres en dessous du sol, dès lors qu'ils ne comportent pas de poste de travail permanent* ».

Le règlement sécurité incendie prévoit néanmoins un régime spécifique s'agissant des parcs de stationnement couverts[15] et les gares[16]. Pour les parcs de stationnement, le plancher du niveau le plus bas peut être construit jusqu'à 28 mètres en-dessous du niveau de référence[17]. Pour les gares, l'article GA23 de l'arrêté du 24 décembre 2007 indique que les gares souterraines peuvent être enfouies à plus de 6 mètres en-dessous du niveau de référence. Le règlement ne prévoit pas de limitation de profondeur. L'article GA18 du même arrêté exclut, au-delà de cette profondeur de 6 mètres, certaines activités : 1) les activités à risques particulier. 2) les bibliothèques, centre de

[15] Un parc de stationnement peut considérer couvert, selon l'arrêté 25 juin 1980, s'il était aménagé sous un établissement relevant du présent type à condition d'être placé obligatoirement sous la même direction.
[16] Une gare a été définie, selon l'arrêté du 24 décembre 2007, comme un bâtiment d'un système de transport ferroviaire guidé, ou d'une remontée mécanique, principalement destiné à l'accueil, au transit, à l'embarquement et au débarquement des voyageurs.
[17] Niveau de référence : « niveau de la voirie desservant la construction et utilisable par les engins des services publics de secours et de lutte contre l'incendie » (article. PS 3, Règlement de sécurité incendie).

documentation ou d'archives, les salles de danse et de jeux. 3) les magasins de vente non équipés d'un système d'extinction automatique. 4) les salles d'exposition non équipées d'un système d'extinction automatique. 5) toute activité dont la commission de sécurité estime que les modes d'exploitation ou la nature des marchandises stockées ne permettent pas la mise en place de mesures de protection efficace des emplacements à caractère d'exploitation ferroviaire adjacents.

Règlements relatifs à l'accessibilité aux ERP

La mise en accessibilité peut être inspirée de la définition donnée dans le cadre du projet Grand-Paris pour l'accessibilité aux gares souterraines : c'est de conjuguer des mesures lourdes sur le bâti afin de supprimer les entraves au déplacement (circulations verticales –ascenseur-, horizontales –cheminements-, rampes de 5 %) et des mesures légères facilitant l'orientation et la qualité d'usage (matériaux, signalétique visuelle, auditive) [IDF, 2012].

L'accessibilité aux ERP est règlementée par les articles L. 111-7-3 à L.111-8-4 et R. 111-19 à R. 111-19-30 du CCH, essentiellement pour qu'ils soient accessibles aux personnes à mobilité réduite (PMR). Au sens plus large, la loi n° 2005-102 du 11 février 2005, relative à l'égalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées, introduit l'obligation de rendre accessible tous les ERP et les services de transports a toute personne handicapées, Cela concerne tous les types d'handicap : physique, sensoriel, cognitif, mental, psychique..

Concernant les lieux de travail, l'accessibilité est réglementée par les articles R. 4214-26, R. 4214-27 et R.4214-28 du code du travail. Cela concerne les locaux annexes, aménagés dans un bâtiment neuf ou dans la partie neuve d'un bâtiment existant. Ils indiquent que les lieux de travail doivent être conçus de manière à permettre l'adaptation des postes de travail aux personnes handicapées, ou à rendre ultérieurement possible l'adaptation des postes de travail.

Règlements relatifs à la sécurité des ERP

La sécurité aux ERP concerne essentiellement la sécurité incendie. Les articles R. 4216-1 à R.4216-34 du code de travail portent des dispositions relatives aux obligations du maître d'ouvrage pour la conception des lieux de travail en matière de risques d'incendie et d'explosion et d'évacuation.

Concernant les gares souterraines, un exemple peut être donné des instructions obligatoires pour la sécurité dans l'arrêté du 24 décembre 2007. Il prévoit deux règles très contraignantes : la première est que le dimensionnement des dégagements est défini en fonction de l'effectif théorique du public de telle sorte que l'évacuation du public vers une zone hors sinistre[18] soit réalisée en moins de 10 min... ; la deuxième règle indique qu'un emplacement où le public stationne et transite doit disposer d'au moins deux dégagements... En revanche, en cas d'impossibilité d'atteinte ces objectifs, l'espace serait à examiner par la commission de sécurité, comme dans le cadre de gares à une très grande profondeur, il peut être recouru à des mesures de substitution comme la création d'emplacements d'attente sécurisés adaptés [Cocquière, 2014].

Le règlement de protection contre le risque d'incendie dans les ERP aborde ponctuellement la question des usages mixtes d'un même espace. La question est de savoir quelle réglementation de

[18] Selon le même arrêté, une zone hors sinistre est un volume accessible au public et situé à l'air libre. Elle peut également considérer « zone hors sinistre » un volume répondant aux dispositions suivantes : l'ensemble du public se trouve à l'abri des effets thermiques et à l'abri des fumées générées par un sinistre ; il est possible de gagner l'extérieur par au moins deux dégagements

protection contre le risque d'incendie appliquer dans un espace partagé par des usages relevant d'autres réglementations muettes sur cet aspect et qui relèvent d'approches de sécurité différentes. C'est surtout problématique lorsque sont concernés à la fois des ouvrages dédiés à la circulation automobile et des ouvrages ou installations dédiées à d'autres fonctions impliquant la circulation de piétons, c'est le cas de La Défense à Paris où la rénovation des entreponts sous la dalle, se pose la question des règles de sécurité applicables dans un espace partagé par les véhicules motorisés et les piétons [Cocquière, 2014].

5.3. Synthèse et conclusion

En conclusion, pour assurer la sécurité et l'accessibilité aux espaces souterrains, plusieurs exigences et contraintes réglementaires sont à prendre en compte, sauf dans le cas où le contexte étudié serait hors cadre réglementaire. Les réglementations ont limité la mise en souterrain, qui plus est à grande profondeur, de certains fonctions urbaines (ex. habitat, espaces à sommeil). Cela est dû à des raisons de sécurité ou des exigences de santé. D'autres fonctions urbaines ne sont déjà pas réputées au sous-sol (ex. parc, fermes), il n'y a pas d'ailleurs de réglementation française qui y associe.

Partie II : Pratiques d'aménagement souterrain au niveau international

1. Introduction

Dans certaines villes du monde, la construction en surface est compromise par la réduction de l'espace disponible. La problématique de la densité des grandes villes est majeure dans les sociétés d'aujourd'hui. La Figure 11 représente la carte du monde, sur laquelle sont repérées les villes ayant utilisé le souterrain dans leur développement urbain.

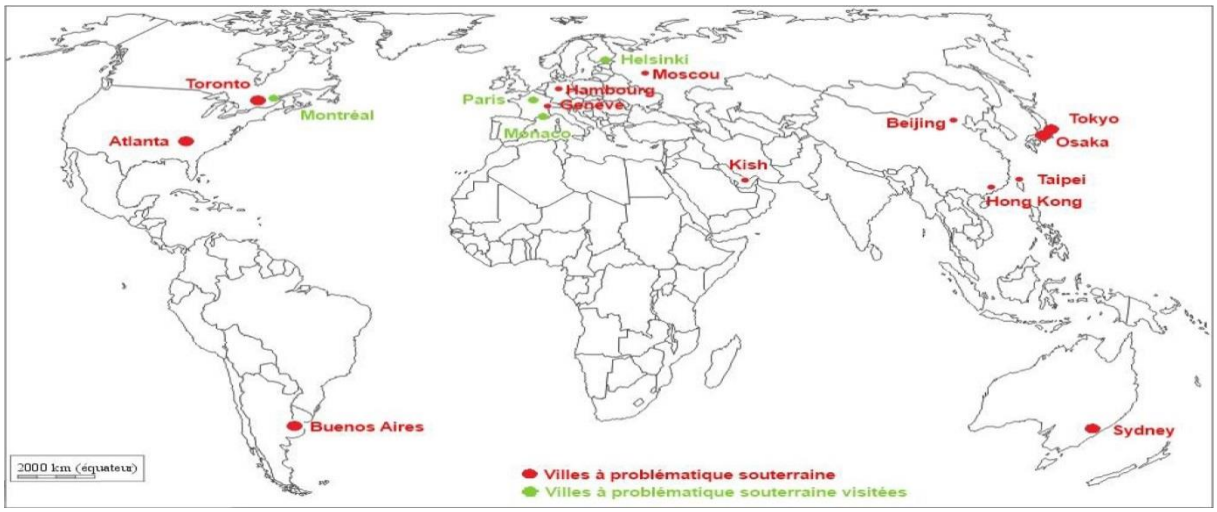


Figure 11 : Villes ayant utilisé leur souterrain à travers le monde [Dondel et al, 2011]

Par la suite, une présentation de certaines pratiques françaises et internationales est abordée. Elle comprend des pratiques ayant pour but de densifier la ville ou le territoire interurbain, de répondre aux contraintes du manque d'espace dans la zone urbaine, d'organiser et réglementer la planification souterraine dans une démarche d'ordre politique et d'humaniser l'espace souterrain. Ces exemples révèlent une progression des degrés d'approche de l'utilisation du sous-sol.

2. Pratiques concernant les ouvrages linéaires

2.1. Réseaux souterrains

L'idée de la densification urbaine par les réseaux souterrains a commencé dans les années 1960, par un système de collecte souterrain des déchets, il a été exploité par la société suédoise ENVAC[19] (Figure 12). Les déchets triés par les utilisateurs dans des bornes étaient aspirés dans des conduites souterraines jusqu'à des stations de collecte. Il existe aujourd'hui environ 700 installations dans le monde, dont trois en France [Labbé, 2009].

[19] ENVAC : une société suédoise des technologies de la gestion environnemental (textitleading environmental technology company and the global leader in the vacuum waste collection industry http://www.envacgroup.com/)

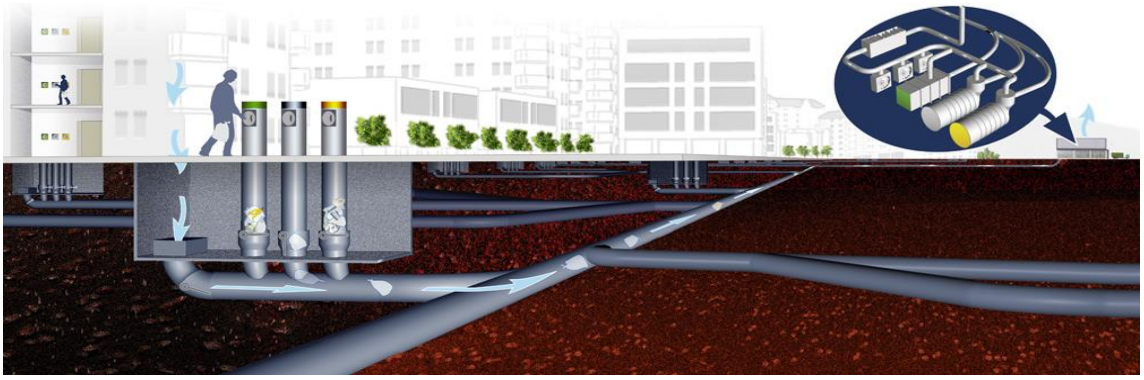


Figure 12 : Schéma du procédé de la société ENVAC de collecte des déchets sous vide [http://www.envacgroup.com/]

Un autre exemple, de densification par les réseaux souterrains, est illustré par le réseau CARGO-CAP du transport de marchandises (Figure 13). Un système ferré automatique de transport souterrain par des capsules sur rails circulant dans un réseau de pipelines adaptable à différents types de chaînes logistiques. Ce système a fait l'objectif de plusieurs recherches : à Amsterdam pour le transport des fleurs vers l'aéroport Schiphol [Van der Heijden et al, 2002] ; aux États-Unis pour le transport intérieur de conteneurs entre les ports maritimes [Rijsenbrij et al, 2006] ; en Allemagne, un système prototype de CARGO-CAP pour le fret entre les villes [Beckmann, 2007] ; Ce système a été ensuite développé en Italie [Cotana et al, 2008].

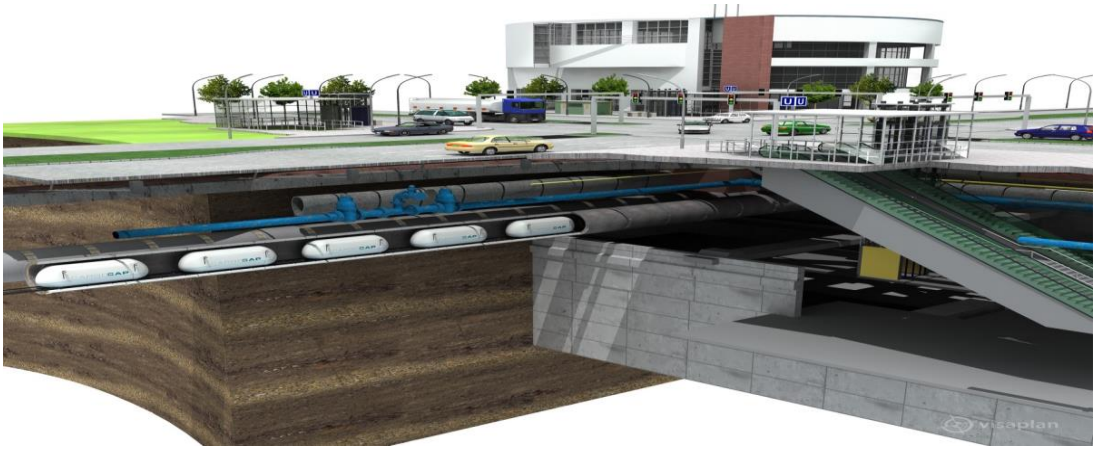


Figure 13: Simulation du réseau CARGO CAP de transport de marchandises en souterrain [http://www.cargocap.com/]

Un exemple est donné par Barles et Jardel de la densification par des galeries commerciales souterraines au Japon. En effet, les espaces souterrains au Japon ont été créés indépendamment, ils ont été ensuite reliés les uns aux autres par des corridors (arcades commerciales). La Figure 14 représente ces galeries qui relient les ouvrages souterrains ponctuels entre eux (gare, centre de services publics, centre commercial, etc.) [Barles and Jardel, 2005].

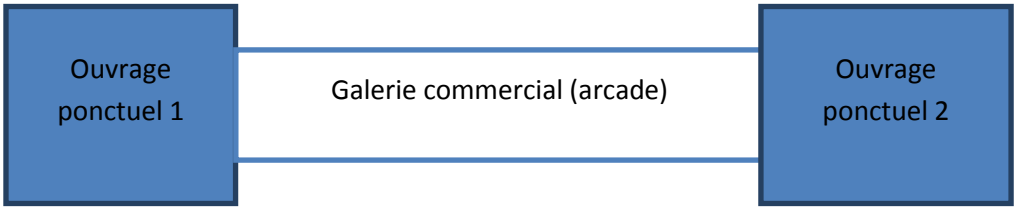


Figure 14 : Principe de la multifonctionnalité souterraine au Japon

2.2. Complexe d'ouvrages linéaires - Tunnel de la Croix-Rousse – Lyon

Le projet du tunnel de la Croix-Rousse comprend deux tubes. Le premier tube, dit « historique », a été construit en 1952 sous la colline de Croix-Rousse pour permettre le trafic des véhicules légers (VL) et des bus. Afin d'être en conformité avec les nouvelles normes de sécurité en matière d'ouvrages souterrains[20] [IT CI 2000-63, CI 2006-20], il a été rénové en 2010 avec, notamment, la création d'un dispositif d'évacuation des usagers et d'accès des secours, conformément à la solution de rénovation du tunnel adoptée par le Conseil de communauté du 9 juillet 2007. Ce dispositif comprend un second tube (Figure 15), relié au premier par 11 issues de secours permettant l'évacuation et la protection des usagers en cas d'accident grave.

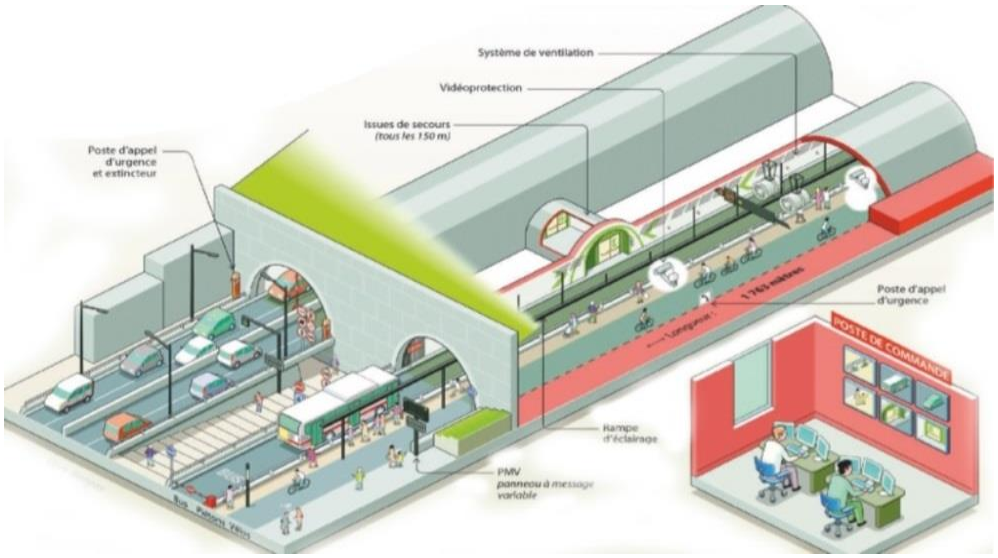


Figure 15 : Deux tubes du tunnel de la Croix-Rousse [Grand-Lyon, 2013]

La construction de ce second tube a été l'occasion d'aménager un nouvel espace dédié aux modes de transport doux : outre sa fonction de dispositif de sécurité obligatoire, ce second tube accueille le transit des piétons, des cyclistes et des bus [Grand-Lyon, 2013]. Ainsi, le Grand Lyon a exprimé les besoins pour lesquels un ouvrage de construction était nécessaire pour la ville de Lyon :

Besoin 1 : L'évacuation piétonne sécurisée des usagers du tube routier.

Besoin 2 : Relier, en évitant la colline de la Croix-Rousse, la rive gauche du Rhône et la rive droite de la Saône par un système du transport en commun (bus) et un passage des modes doux (vélos, piétons).

[20] En effet, suite à l'incendie du tunnel du Mont-Blanc en 1999, l'instruction technique annexée à la circulaire interministérielle 2000-63 remplacée depuis par la 2006-20, fixe désormais les exigences en matière de sécurité, afin de permettre d'évacuer les usagers d'un tunnel en cas d'incendie. Ces exigences s'appliquent également aux ouvrages existants dans le cadre d'un vaste programme de mise en conformité.

3. Pratiques concernant les ouvrages ponctuels

3.1. Ouvrage ponctuel simple - Université EWHA - Séoul

L'Université de jeunes filles EWHA à Séoul, en Corée du Sud propose un exemple où la topographie des lieux a été utilisée pour créer une continuité entre une partie haute de la ville et une partie basse (Figure 16). Entre les deux, se situe un grand espace public ouvert, des équipements de services administratifs, commerciaux et autres qui ont permis d'étendre cet équipement. Elle se compose de deux bâtiments souterrains séparés dont seules les façades sur un passage intermédiaire, révèlent l'équipement, caché sous un espace vert parcourable. La construction d'un bâtiment aérien aurait consacré la limite du campus et la séparation avec la ville.

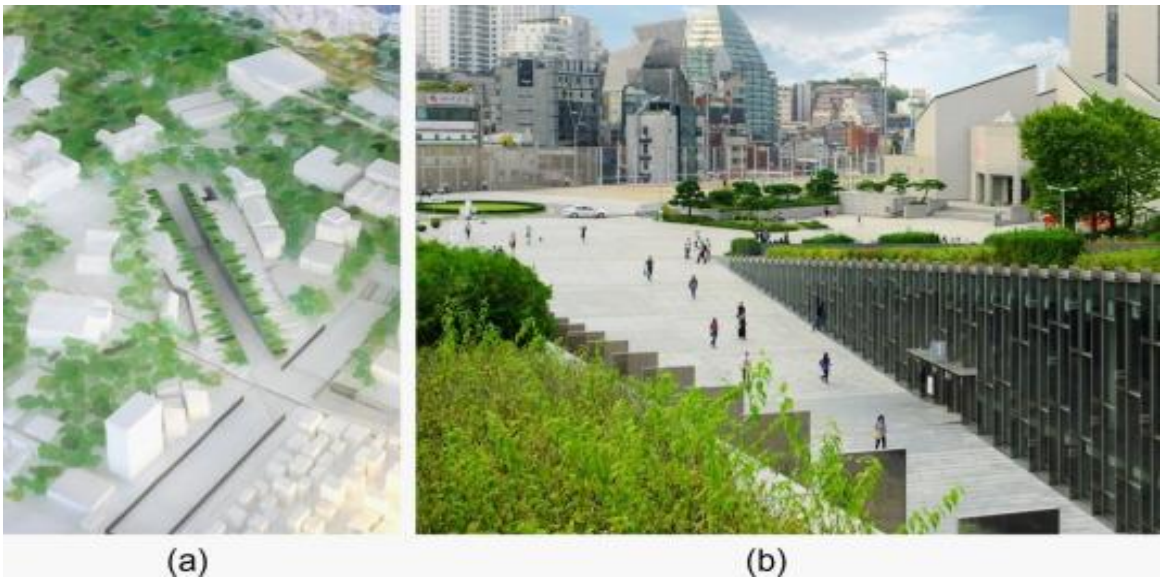


Figure 16 : Université de jeunes filles EWHA -Seoul, (a) maquette numérique de l'université ; (b) vue depuis le toit de l'université vers la ville [Labbé, 2016]

Un intérêt majeur de cette implantation souterraine est qu'en affirmant une rue puis un parvis au-dessus de la ligne de chemin de fer, elle a ouvert un axe de communication fort avec le nouveau quartier qui s'est construit depuis. Ce projet représente une meilleure articulation surface – souterrain par son lien offert pour la continuité urbaine de la ville.

3.2. Complexes d'ouvrages souterrains

3.2.1. Gare de Noisy-Champs – Paris

Elle se trouve à l'est parisien, actuellement sur la ligne RER A. C'est une gare déjà existante mais dans la vision provisoire du projet du Grand Paris, elle sera une gare principale de plusieurs lignes de métro et de bus, notamment la ligne du Grand Paris Express (Figure 17). Trois scénarios d'implantation de la gare souterraine ont ainsi été étudiés. La solution retenue dessert une zone de commerce, de logement, d'enseignement supérieur et de bureaux et renforce le développement commercial et urbain des quartiers voisins (Cité Descartes, quartier du Champy...).

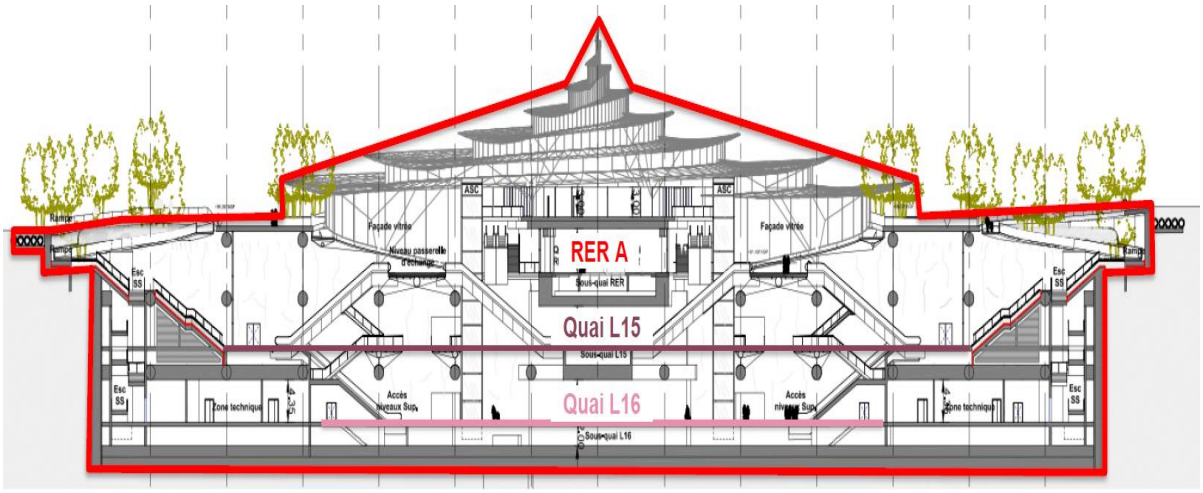


Figure 17 : Nouvelle gare de Noisy Champs dans le cadre du projet Grand Paris [Grand-Paris, 2015]

Ce projet représente un complexe multifonctionnel souterrain dont l'intérêt est régional, donc l'objectif est d'étudier le développement d'un projet souterrain complexe dans un milieu urbain.

3.2.2. Le Grand Louvre - Paris

Il a été conçu par les architectes I.M. Peï et M. Macary en 1993. En profitant de la vastitude du Palais du Louvre, du Carrousel, l'Établissement public du Grand Louvre a su avoir une démarche ample. L'ensemble accueille, outre le Musée du Louvre, la galerie commerciale du Carrousel, un centre des congrès ainsi que parking public et parking pour autocars et logistique (Figure 18).

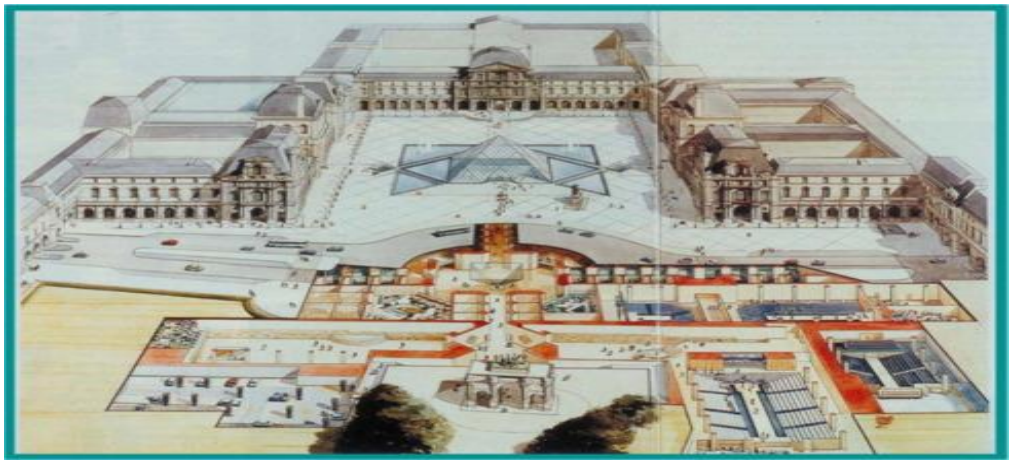


Figure 18 : Axonométrie du Musée du Louvre à Paris, France, image [http://p.maillefaud.free.fr/]

Le Grand Louvre à Paris est un bon exemple de la densification urbaine par des complexes d'ouvrages souterrains. L'intérêt de cet ensemble est sa connexion multiple à la ville : pour les piétons, tant depuis la rue extérieure que directement depuis les quais du métro. Pour les véhicules, c'est la rue qui descend au niveau de l'entrée du parking puis remonte, évitant du même coup la vue de véhicules qui couperait la perspective de l'Arc de Triomphe du Carrousel et du Jardin des Tuileries. C'est aussi une relation visuelle entre le musée du bas et les façades des ailes du musée à travers le verre des pyramides ou la maille fine du toit de la nouvelle salle des Arts.

3.2.3. Site d'Orly-Rungis, Paris

Le pôle d'Orly-Rungis, créé en 2005, est le premier pôle économique du sud de l'Ile-de-France et le troisième pôle économique de la région parisienne [Labbé, 2009]. L'utilisation du sous-sol était sous le marché d'intérêt national (MIN) (Figure 19), un plateau calcaire de 40 m d'épaisseur, accessible de plain-pied depuis la vallée de la Seine. Actuellement, la zone accuse un déficit de liaisons avec les pôles économiques nationaux et les bassins de vie environnants. Le tissu urbain est fragmenté par les infrastructures de transport viaire ou ferré.

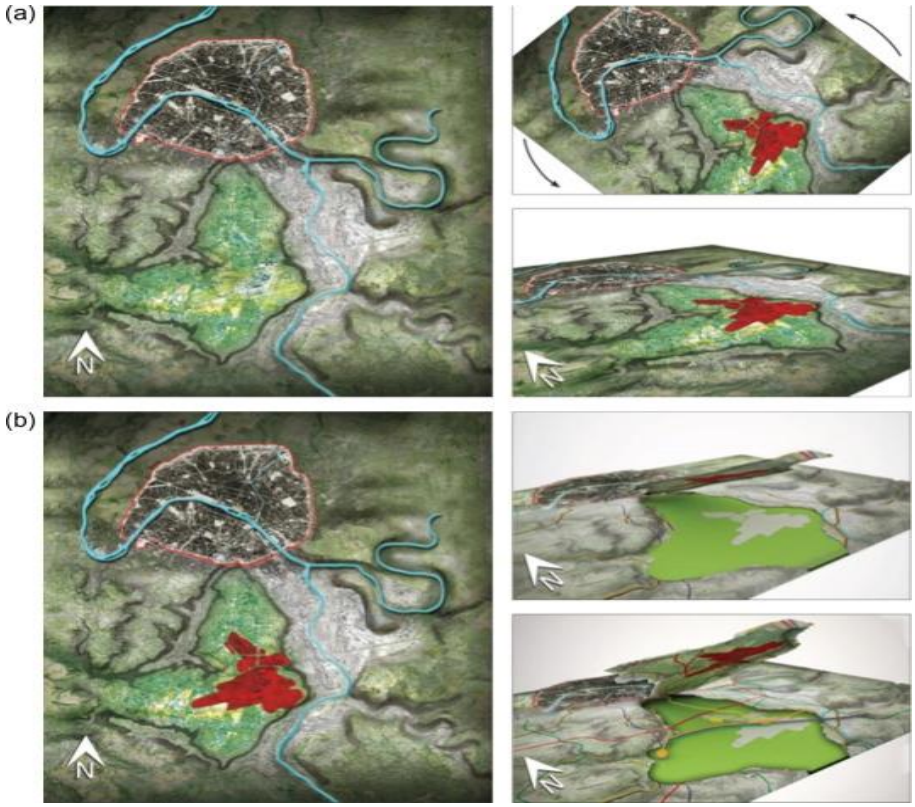


Figure 19 : développement du pôle Orly-Rungis grâce à son espace souterrain. (a) le plateau et ses reliefs ; (b) la partie souterraine du plateau. [Labbé, 2016]

L'utilisation de l'espace souterrain contribue à la densification des territoires interurbains. Le pôle d'Orly-Rungis représente un exemple de ce type de densification avec pour objectif le développement économique. Ce secteur possède, en effet, un potentiel de développement important autour de deux grands pôles d'activités : l'aéroport d'Orly et le marché d'intérêt national (MIN) de Rungis.

D'ailleurs, de grands projets d'infrastructure sont programmés dans cette zone : barreau et gare TGV, développement du pôle économique (quartier d'affaires international). Ces projets permettent aux équipements existants de s'agrandir en plongeant dans leur sous-sol pour rejoindre les réseaux souterrains. Son sous-sol se révèle ainsi un espace idéal pour la logistique, l'implantation d'entrepôts, de chambres froides, d'activités de transformation et de conditionnement, entre l'autoroute A86 devenant souterraine, la future gare TGV – si elle reçoit du fret – et le futur métro automatique.

4. Pratiques concernant les villes souterraines

Pour des motivations diverses, des puissances publiques, prennent conscience de la nécessité de gérer leur territoire dessus et dessous et de recomposer les fonctions urbaines : une présentation de plusieurs pratiques de planification urbaine souterraine à l'échelle de la ville est proposée dans l'optique du développement méthodologique envisagé pour la thèse.

4.1. Monaco – France

L'aménagement de Monaco (Figure 20), territoire exigu en bordure de mer, et de son sous-sol, est géré par l'autorité publique. Monaco tire avantageusement partie de son relief pour enfouir logistique (plate-forme de transfert multimodal, parkings, entrepôts), usines (traitement d'eau, de déchets) et, en façade des collines, ouvrir ses circulations et ses équipements sur le jour et offrir souvent des vues magnifiques sur la mer. Les déblais rocheux issus de ces travaux souterrains sont réutilisés pour créer de nouveaux territoires pris sur la mer.

Figure 20 : La nouvelle gare de Monaco - Monte Carlo dans la montagne [Photo : B RIVIERE]

Monaco est condamnée à l'hyperdensité car incapable de se développer entre la mer et la montagne. Cet espace souterrain est sous le niveau de la mer, avec des puits de lumière. Il représente un exemple de contexte d'hyperdensité, de lieux desservis à l'extrême et de recherche de production nouvelle [AFTES, 2010].

4.2. Helsinki- Finlande

Helsinki, Finlande, considère son sous-sol rocheux et ses espaces naturels comme une richesse à préserver. Pour mettre en œuvre son choix d'une qualité de vie, Helsinki a réalisé le premier schéma directeur du sous-sol pour son territoire. La précision de ce schéma directeur qui représente chaque rue, issu d'études minutieuses, garantit sa faisabilité réelle. En effet, un schéma directeur ne fonctionne et ne se réalise que s'il allie échelles différentes allant d'un territoire élargi à un bassin géographique à une définition fine des intentions à l'échelle de la rue [Labbé, 2016].

Plus de 400 espaces souterrains ont ainsi été répertoriés sur le territoire de la ville, selon leurs profondeurs et leurs usages, que ce soient des galeries techniques ou des équipements. Toutes les infrastructures souterraines, les projets à venir ainsi que les accès de sécurité, sont également répertoriés dans l'Underground Master Plan (Figure 21). Il comprend également toutes les ressources souterraines des roches réservées à la construction.

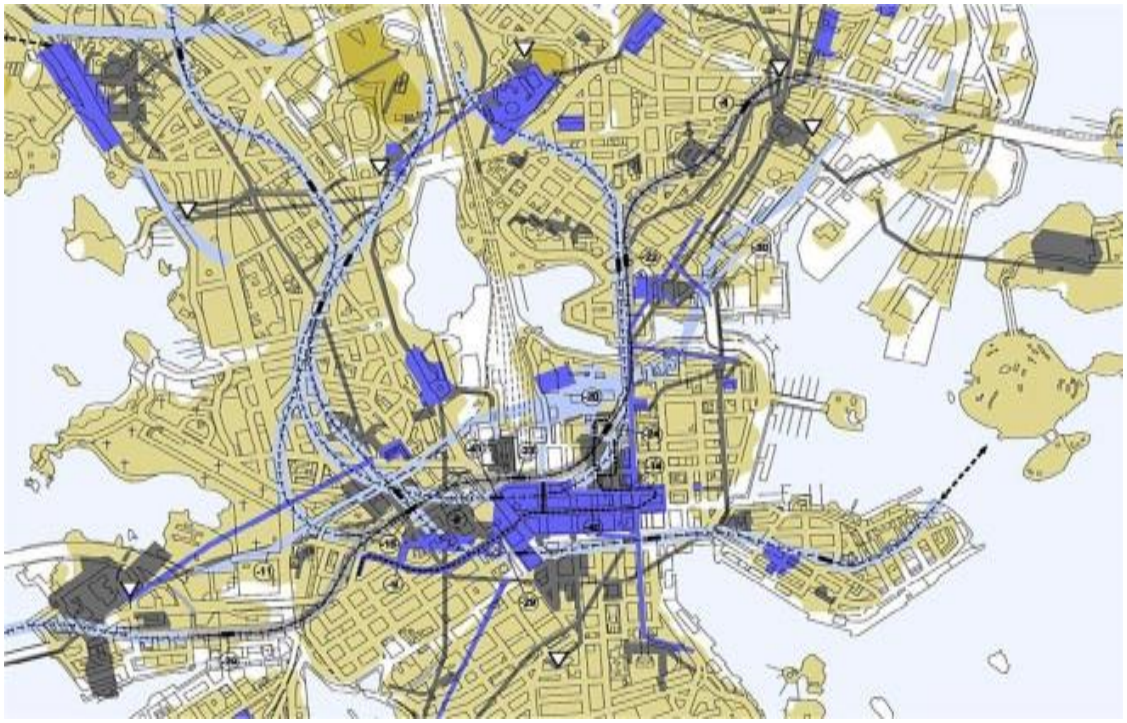


Figure 21 : Schéma directeur du souterrain urbain la ville d'Helsinki [Helsinki City Planning Department].

(Bleu claire : routes réservées pour de futurs tunnels. Bleu foncé : espaces réservés pour de futurs aménagements. Gris : tunnels et aménagement souterrains existants)

En effet, le but du schéma directeur élaboré est de permettre aux futurs projets, qui seront amenés à être en sous-sol, d'utiliser les entrées des infrastructures souterraines existantes, cela permet de localiser les futures fonctions adaptées au souterrain [Vähäaho, 2014]. Le coût de la construction souterraine en Finlande est moins élevé, cela est dû à l'absence d'utilisation de béton coffré en sol rocheux dur, et aux expériences et technologies de mise en œuvre de la méthode conventionnelle de creusement des espaces souterrains dans les zones urbaines.

4.3. Expérience singapourienne

Singapour, territoire en pleine expansion économique et démographique mais dont la surface est limitée par la mer, se voit contraint de gérer ses ressources, d'organiser l'occupation de son territoire pour se donner les lieux de son développement. Ainsi, dans le relief vallonné du campus de l'université technique de Nanyang (NTU) où existent à moyenne et grande profondeur deux nappes de galeries d'anciennes carrières, un plan conceptuel du développement des espaces souterrains est venu compléter le schéma directeur de la surface afin d'identifier ses potentiels d'utilisation à faible profondeur et de réutilisation des galeries existantes, en rapport avec les possibilités d'accès et les activités de surface. L'étude propose différents types d'occupation suivant les configurations des espaces souterrains.

A Singapour, l'utilisation de plusieurs couches du sous-sol, du plus haut au plus bas, est illustré en Figure 22 : (1m – 3m) : des liens piétonniers entre les bâtiments ou pour traverser les rues ; (1m-10m) : réseaux souterraines et services des tunnels ; (15m – 50m) : tunnels routiers et ferroviaires ; (20m – 50m) : réseaux d'assainissement ;(jusqu'à 100m) : carrières et stockes pétrochimique ou autre [Labbé, 2016].

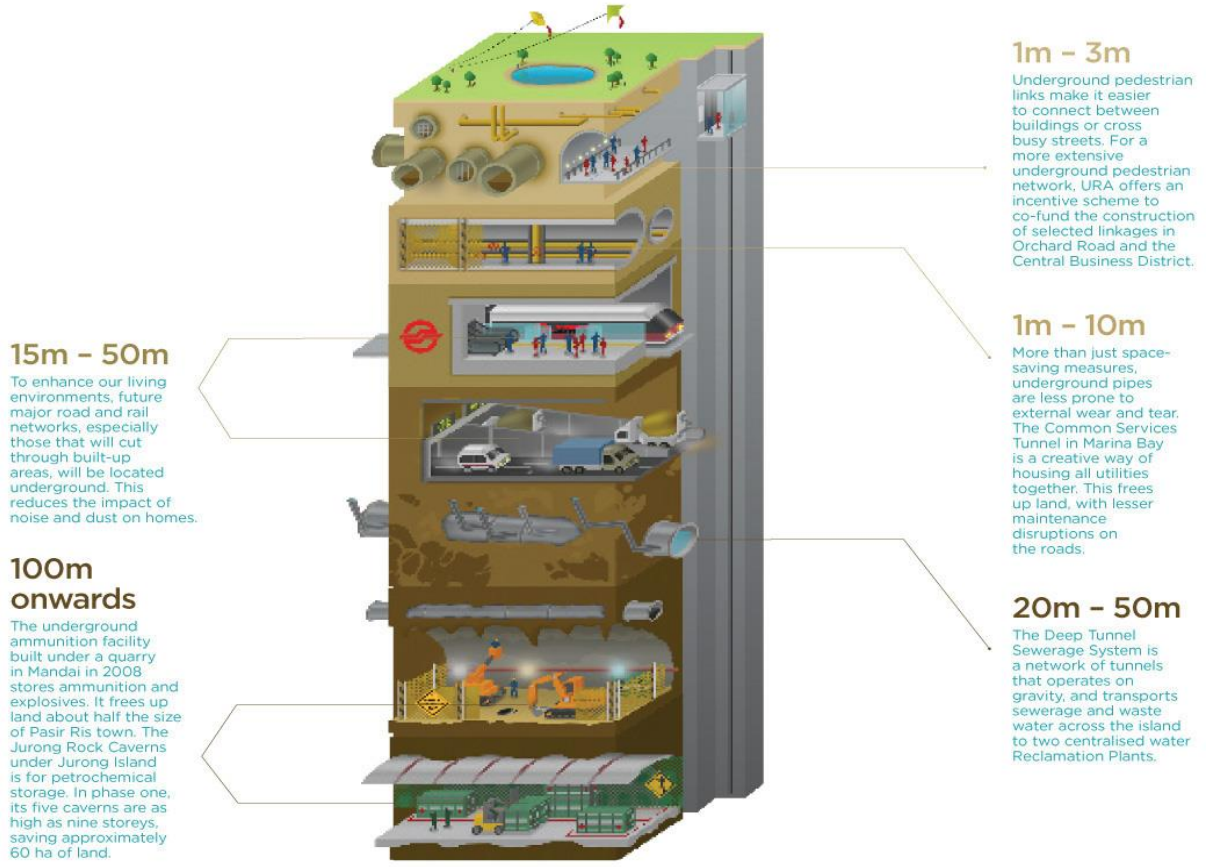


Figure 22 : L'exploitation souterraine à Singapour [https://www.ura.gov.sg/]

L'expérience singapourienne représente un bon exemple de la mise en pratique de la multifonctionnalité souterraine et de l'exploitation des ressources souterraines disponibles dans les villes, notamment l'espace, dans des villes où l'expansion en surface est limitée.

5. Souterrain pour les années futures

L'espace souterrain n'est pas limité aux infrastructures, ou aux activités humaines, mais il est également capable d'accueillir la Nature, une fois que des conditions presque idéales peuvent y être assurées. Cela permet de valoriser une multifonctionnalité souterraine en intégrant la biodiversité par des nouvelles technologies. A ce stade, deux exemples peuvent être donnés, l'un au Japon qui permet de créer artificiellement la lumière idéale pour le développement des plantes, l'autre aux Etats-Unis où la lumière naturelle est transmise au souterrain. Une autre idée futuriste d'un immeuble de grande profondeur multifonctionnelle fait l'objectif d'un troisième exemple.

5.1. Espaces verts souterrains

Le projet Pasona02 (Figure 23), créé[21] entre 2003 à 2009, représente une ferme souterraine située sous une banque dans le quartier d'affaires à Tokyo. Sur un kilomètre carré, fleurs, légumes, fruits et même riz sont cultivés pour être vendus.

Figure 23 : Projet "Pasona02", Ferme industriel à Tokyo - Japon photo [http://konodesigns.com/portfolio/Urban-Farm/]

Un ancien dépôt souterrain des tramways de la *LowLine*[22] à New-York (Manhattan) a été transformé en parc public souterrain (Figure 24). Pour ce faire, une solution technologique a été inventée pour capter et répartir la lumière solaire/naturelle extérieure.

Figure 24 : Projet "LowLine" NewYork - USA, (A) avant (B) après [Labbé, 2016]

[21] Par une entreprise des ressources humaines (http://architizer.com/projects/pasona-hq-tokyo/)

[22] L'idée du projet LowLine a été démarrée en 2009, l'ouverture est prévu en 2020 (http://www.thelowline.org/about/project/). La technologie de la transmission des rayons du soleil a été désignée par James Ramsey et Raad Studio (http://raadstudio.com/)

5.2. Gratte-terre

L'Earth-Scraper de Mexico (Figure 25) se présente sous la forme d'une pyramide inversée. Il plongerait sous la place Zocalo, l'une des plus vastes du monde, au cœur du quartier historique de la capitale mexicaine. Il s'enfonce sur 65 niveaux et accueillerait des commerces, des bureaux, des logements et un musée sur la civilisation aztèque. A sa base, située sur la place, un plancher de verre permet d'avoir une vue plongeante et transparente sur l'ensemble de la structure.

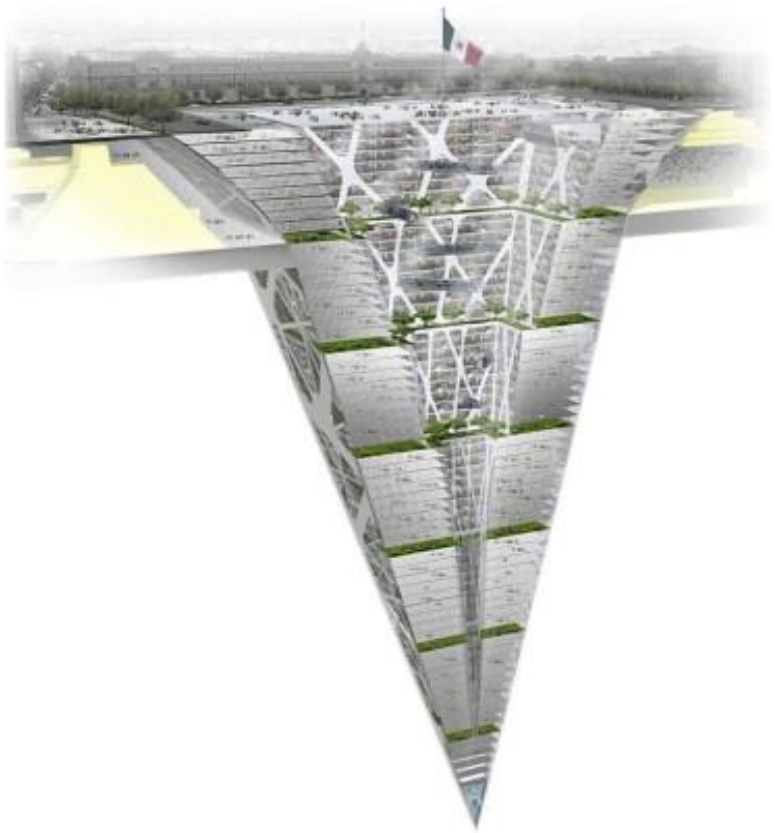


Figure 25 : vision souterraine du "gratte-terre" dans la ville de Mexico [http://www.bunkerarquitectura.com/]

Ces solutions innovantes permettent ainsi de concrétiser une multifonctionnalité urbaine grâce à l'utilisation de l'espace souterrain. Elles ouvrent les portes à la fois à la densification des zones urbaines et à l'humanisation des espaces de la ville, y compris ceux souterrains. Ainsi, ces projets confirment que la technique pourrait rendre agréable et vivable tous les lieux où qu'ils soient.

Conclusion du chapitre

Ce chapitre avait pour objectif de donner une vision globale du souterrain. Il a débuté par le positionnement du souterrain dans la ville et la description des pratiques urbaines en surface, y compris la contribution que le souterrain pouvait avoir à la ville durable. En effet, le souterrain étant souvent méconnu, une partie a été consacrée à sa définition et à son développement tant historique que réglementaire. Il est apparu important d'approfondir deux aspects en particulier : l'accessibilité et la sécurité des ouvrages souterrains. Ensuite, une illustration des fonctions urbaines pouvant être placées en sous-sol a été présentée, ainsi que les différentes typologies capables de catégoriser les ouvrages souterrains selon leur fonction ou bien leur géométrie. Enfin, une présentation des pratiques nationales et internationales concernant ces aménagements a été abordée. L'intérêt étant de considérer les pratiques actuelles puis de choisir un cas d'étude pour tester la méthodologie proposée dans la suite du travail de thèse.

L'étude de cas choisie est le tunnel de la Crois-Rousse à Lyon - France. Ce tunnel représente un cas unique en France grâce à sa complexité et multi-modalité. Le choix de l'étude de cas s'est porté sur le tunnel de la Croix-Rousse pour deux raisons : La première est qu'il représente un ouvrage complexe attaché à une zone urbaine ; La seconde est qu'il représente un bon exemple de multi-modalité souterraine (plusieurs voiries, plusieurs types d'usagers). Il se situe dans la ville de Lyon, mais son intérêt ne se réduit pas à l'échelle de la ville : il est également présenté à l'échelle régionale puisque le tunnel relie deux arrondissements lyonnais en traversant un obstacle naturel (la colline de la Croix-Rousse).

Le projet urbain présente un ensemble nécessairement interdisciplinaire et intersectoriel. L'étude des ensembles urbains constitue une illustration de ces problématiques intersectorielles en associant les secteurs du bâtiment, du transport de l'énergie, des procédés (eau, traitement des déchets…), de l'industrie (produits de construction…) et même de l'agriculture (production locale d'aliments, végétalisation). L'évaluation environnementale est ainsi une démarche importante qui accompagne le projet urbain pendant sa conception, sa réalisation et son fonctionnement. Cela fait l'objet du chapitre suivant qui concerne donc l'évaluation environnementale de ce type d'aménagement.

Chapitre 2 : Approche méthodologique fondée sur l'ACV

Introduction du chapitre

La sensibilisation des décideurs aux problématiques environnementales a suscité diverses initiatives comme le développement des démarches d'évaluation des impacts environnementaux. En effet, les décisions prises en matière d'architecture et d'urbanisme ont une forte influence sur les secteurs du bâtiment et des transports, qui contribuent de manière très importante à la plupart des impacts environnementaux [Peuportier, 2012].

Concernant la contribution du volet environnemental au DD, l'évaluation environnementale à l'échelle de la ville et du territoire ainsi que l'étude d'impact à l'échelle du quartier ou de l'îlot, représentent des démarches réglementaires d'évaluation, intégrées respectivement à l'élaboration des documents de planification et aux projets d'aménagement. Elles proposent un cadre méthodologique pour la réalisation des projets et la planification du territoire, elles font également partie du processus d'aide à la décision entre différents scénarios d'aménagement. D'ailleurs, ces démarches interviennent en phase de programmation pour évaluer l'impact des choix opérés, mais aussi à plusieurs moments du projet pour examiner la performance environnementale de l'opération d'aménagement.

Ce chapitre est la première étape d'une méthodologie d'évaluation des ouvrages souterrains au sens du DD. Il se focalise sur le volet environnemental uniquement en balayant un ensemble large des contraintes et travaux de recherches disponibles permettant d'aboutir à une évaluation environnementale d'un complexe souterrain.

Parmi plusieurs méthodes d'évaluation environnementale présentées dans la première partie de ce chapitre, ce travail adopte l'ACV pour répondre aux problématiques envisagées. L'ACV est une méthode analytique et multicritères destinée à évaluer la performance environnementale d'un système de produits sur la base d'une même fonction. Pour cela, le concept d'unité fonctionnelle est introduit notamment pour comparer différents produits d'un point de vue environnemental. L'ACV est également une méthode de management environnemental utilisée depuis de nombreuses années. Elle a bénéficié à la fois de travaux théoriques, citons par exemple [Heijungs et Suh, 2002] et d'applications destinées aux acteurs des différents secteurs économiques, comme [IFPEB, 2010]. Dans ce contexte, l'approche ACV est actuellement considérée comme une approche holistique intéressante pour, dans un premier temps, analyser puis finalement contribuer à la diminution des impacts environnementaux d'un système (démarche d'écoconception).

Ensuite, dans la deuxième partie de ce chapitre, une application de la méthodologie de l'ACV à un complexe souterrain linéaire, sera menée. Cette application traite une problématique composée, qui comprend à la fois : une ACV d'un objet complexe (tunnels + route) attaché à une zone urbaine donnée ; une comparaison entre deux variantes d'aménagement rendant le même service afin de savoir laquelle est la moins impactante du point de vue environnemental ; une sensibilisation des indicateurs à un changement du futur usage possible.

Ce travail s'inscrit dans une méthodologie d'évaluation large qui aura pour objectif de mettre en avant les aspects spécifiques qu'une solution souterraine pourrait offrir pour la ville.

Partie I : Evaluation environnementale des projets urbains

1. Introduction

Cette partie du chapitre représente une analyse bibliographique de l'évaluation environnementale des projets urbains. Elle débute par un cadre réglementaire et une présentation de l'approche environnementale sur l'urbanisme (AEU), cette approche est importante car elle contribue au respect des exigences réglementaires en matière d'environnement, à faciliter l'intégration des politiques environnementales dans le projet urbain, à concrétiser les principes d'une qualité urbaine plus durable, ainsi qu'à contribuer concrètement à la qualité environnementale des projets urbains. Enfin, trois méthodes d'évaluation environnementale réputées pour ce genre de projets sont présentées, ce sont le Bilan Carbone, l'Empreinte Ecologique et l'Analyse du Cycle de Vie (ACV).

2. L'évaluation environnementale et l'urbanisme

1.1. Cadre règlementaire

Postérieurement à la loi de solidarité et de renouvellement urbains (SRU), la directive européenne de juin 2001 relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement (EIPPE) a introduit une évaluation environnementale des plans et programmes, dont les documents d'urbanisme font partie.

Elle a renforcé et précisé le contenu attendu d'une telle évaluation, et introduit la consultation spécifique d'une autorité environnementale. La traduction en droit français[23] de cette directive prévoit que l'évaluation environnementale soit intégrée au rapport de présentation des documents d'urbanisme. Elle a précisé les documents de planification locaux soumis à cette évaluation : outre les Directives Territoriales d'Aménagement (DTA), il s'agit de tous les Schémas de Cohérence Territoriale (SCoT) et de certains Plan Local d'Urbanisme (PLU), selon l'importance de la commune ou l'ampleur des projets de développement urbains.

Le PLU, préalablement à son adoption, doit faire l'objet d'une évaluation environnementale (Figure 26). C'est pourquoi les demandes de permis dans les communes dotées d'un PLU sont en règle générale dispensées d'une évaluation environnementale.

[23] Par l'ordonnance du 3 juin 2004 et le décret du 27 mai 2005, accompagnés d'une circulaire du Ministère en charge de l'équipement du 6 mars 2006

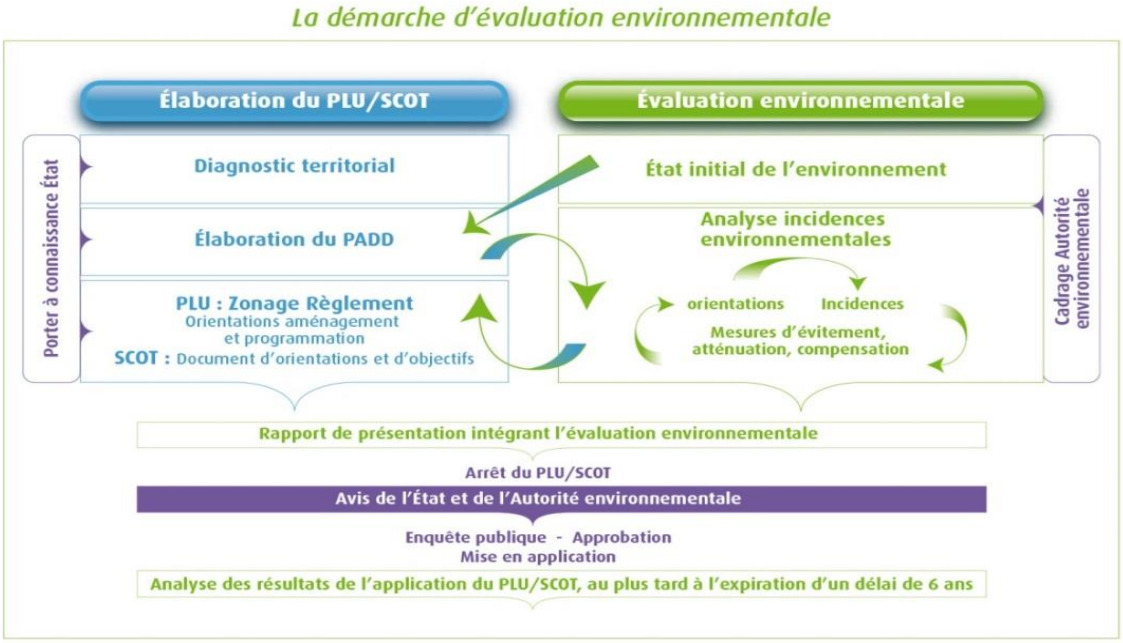


Figure 26 : Démarche d'évaluation environnementale. (Source : MEDDE http://www.developpement-durable.gouv.Fr)

En France, la démarche d'évaluation environnementale accompagne l'élaboration des PLU et des SCOT. Cela montre le rôle important de cette évaluation dans le cadre de la planification urbaine. La méthodologie développée dans le cadre de ce travail considère nécessairement l'évaluation environnementale comme un composant dans une vision d'évaluation au sens large des ouvrages souterrains, cette méthodologie a donc débuté par cette réflexion.

1.2. Approche environnementale sur l'urbanisme (AEU)

L'AEU a été mise en place en 1996 par le département Bâtiment et Urbanisme de l'ADEME[24] [Ademe, 2007]. Elle propose aux maîtres d'ouvrage et aux maîtres d'œuvre une démarche d'accompagnement des projets d'urbanisme en matière d'environnement et d'énergie à l'intérieur de la commune dont le PLU devient le document de référence. Elle peut également être appliquée à l'élaboration de documents généraux mais plus thématiques, tels que les PLU, les programmes locaux de l'habitat, les schémas d'équipement commercial, et d'autres types de projets plus volontaires. L'AEU conduit également à la réduction d'un Projet d'Aménagement et du Développement Durable (PADD) comprenant les orientations générales, mais aussi des orientations d'aménagement plus précises.

Elle se base sur la loi d'orientation pour l'aménagement et le DD du territoire, relative au renforcement et à la simplification de la coopération intercommunale, ainsi que la loi SRU. Elle s'intéresse aux thèmes suivants : choix énergétiques, environnement climatique, gestion des déplacements, gestion de l'eau, gestion des déchets, environnement sonore, sites et sols pollués, diversité biologique. Elle permet ainsi d'intégrer les préoccupations énergétiques et environnementales en amont des projets d'urbanisme et d'aménagement et concourt à l'amélioration de leur qualité environnementale.

L'AEU représente une démarche d'aide à la décision, elle propose aux collectivités locales un état des lieux de l'environnement, une assistance à la conduite du projet de façon à ce que les préoccupations

[24] Agence de l'environnement et de la maitrise de l'énergie : http://www.ademe.fr/

environnementales soient intégrées tout au long du processus de projet, et aussi une identification de thématiques ou de problématiques qui nécessitent des réflexions ou des analyses plus approfondies qui devront être menées par des spécialistes. Sur ce point, l'AEU peut aider à l'élaboration de cahiers des charges des prestations complémentaires à mener et à en analyser les résultats.

C'est une démarche adaptable à la demande locale, et au rythme des projets. Elle peut potentiellement concerner tout type de projets territoriaux et urbains, visant à la fois à initier une réflexion à partir des phases très amont sur l'ensemble des aspects environnementaux, et à permettre aux responsables de la planification territoriale, de l'urbanisme et de l'aménagement urbain d'intégrer les contraintes liées à la gestion des questions environnementales en amont des projets et aux différentes échelles de projets.

L'approche environnementale sur l'urbanisme n'est pas exploitée dans le cadre de ce travail, mais il paraissait important de la présenter dans cette partie bibliographique, car elle représente une démarche d'accompagnement des projets urbain sur l'environnement, adaptable à tous type de projets et peut être que son exploitation pourra s'avérer utile une fois les principes de la méthodologie mis en place.

3. Méthodes d'évaluation environnementale

Trois méthodes d'évaluation environnementale sont présentées dans ce chapitre : le bilan carbone, l'empreinte écologique et l'ACV. Ces méthodes représentent des spécificités résumées par la suite. On cherche à en choisir une dans le cadre du développement d'une méthodologie d'évaluation adaptée au souterrain :

- Le Bilan Carbone, développé par l'ADEME, est un des outils les plus connus et les plus utilisés en France pour l'évaluation de l'impact environnemental d'un produit ou service en quantifiant les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) du système étudié.
- L'Empreinte Ecologique a été longtemps portée et utilisée par l'association *World Wild Fund*, en diffusant tous les ans, un rapport des résultats d'empreinte selon les comptes des différentes nations et permettant ainsi de connaître l'empreinte écologique de différents pays en termes d'utilisation des sols et des ressources biotiques.
- L'ACV inclut les principaux problèmes environnementaux connus à ce jour (ex. extraction des ressources, impacts des substances toxiques sur l'homme et l'écosystème, utilisation du sol, etc.). Il s'agit d'un outil d'évaluation, qui fournit des informations pouvant être utilisées par des parties prenantes dont les entreprises lors d'une prise de décision ou bien par les consommateurs.

3.1.La méthode « bilan carbone® »

Dans un contexte de dépendance énergétique et de prise de conscience de la problématique du changement climatique, l'ADEME a développé un outil de comptabilisation des émissions de GES qui permet d'évaluer l'impact sur le changement climatique d'une activité économique quelconque.

Cette méthode est compatible avec la norme NF EN ISO 14064-1 [AFNOR, 2012b], l'initiative *GreenHouse Gas* (GHG) Protocol et les termes de la Directive « permis » n° 2003/87/CE relative au système d'échanges de quotas de CO.

3.1.1. Domaine d'application

Le principe de la méthode repose sur l'identification et la quantification des postes émetteurs de GES et le calcul de leur impact sur l'augmentation de l'effet de serre par l'intermédiaire d'un Facteur d'émission permettant d'exprimer les résultats en kg équivalent CO ou carbone. Trois périmètres d'étude existent allant du plus restreint au plus étendu permettant de prendre en considération les émissions directes et indirectes de l'activité évaluée.

La méthode « Bilan Carbone® » se décline en deux versions[25] : la version « entreprises » et la version « collectivités ». Cette dernière se décompose en deux modules :

- Le module « patrimoine & services » qui évalue les émissions de fonctionnement de la collectivité pour ses propres activités ;
- Le module « territoire » qui évalue les émissions de toutes les activités (industrie, tertiaire, résidentiel, agriculture transport...) prenant part sur le territoire de la collectivité.

3.1.2. Atouts et limites

Cette méthode a bénéficié d'une large utilisation depuis une dizaine d'années permettant de faire croître encore la prise de conscience de la contribution des activités humaines sur l'effet de serre et d'amorcer une réflexion sur les actions pour limiter les émissions de GES. Son succès est, en partie, dû à la mise à disposition de bases de données et d'outils de calcul simplifiés permettant une utilisation de cette méthode par des non-experts [Site officiel ABC].

L'existence de trois périmètres d'études autorise l'utilisateur à se placer dans une réflexion Cycle de Vie permettant une vue globale des émissions directes et indirectes dont l'activité évaluée est responsable.

> *Le Bilan Carbone n'a pas été choisi dans le cadre de ce travail parce qu'il est un outil monocritère, il permet d'évaluer uniquement un seul impact sur l'environnement : le changement climatique. L'évaluation de ce critère et la prise de mesures de prévention pour le limiter sont, certes, une des priorités des politiques environnementales nationales et internationales, mais une prise de décision se basant uniquement sur ce critère peut présenter d'importants biais notamment la non prise en compte de transferts d'impact sur d'autres types d'impacts environnementaux tels que, entre autres, l'épuisement des ressources, la toxicité ou l'acidification.*

[25] Référence : site officiel de l'Association Bilan Carbone (ABC) : http://www.associationbilancarbone.fr/

3.2.L'empreinte écologique

L'Empreinte Ecologique a été développée par deux chercheurs canadiens William Rees et Mathis Wackernagel aux années 90 [Rees, 1992] [Wackernagel and Rees, 1998] permettant d'évaluer la pression exercée par l'Homme sur l'environnement par une quantification de la surface productive nécessaire à une population pour vivre durablement. Puis en 2003, le Global Footprint Network (GFN)[26] a été créé afin de diffuser et améliorer l'utilisation de la méthodologie de l'empreinte écologique dans le cadre des politiques publiques. Il réunit plusieurs centaines de partenaires (individus, villes, nations, entreprises, scientifiques).

3.2.1. Domaine d'application

L'Empreinte écologique permet d'évaluer la surface nécessaire pour installer les infrastructures, exploiter des ressources et absorber leurs déchets de manière continue, durable et à partir des technologies courantes. Cette méthode évalue l'intensité d'exploitation par l'Homme de la bio-capacité naturelle de son environnement. L'Empreinte écologique s'exprime en unité de surface, notamment l'hectare.

Il s'agit de déterminer si les milieux naturels sont capables de répondre durablement aux besoins de la société humaine en assurant le maintien de son niveau de consommation et en permettant son développement. Le déficit peut être mesuré en comparant donc la consommation des ressources naturelles renouvelables (l'Empreinte) à la capacité biologiquement productive de la nature (la Bio-capacité).

Pour le calcul de l'empreinte écologique d'un système, un inventaire des flux entrants et sortants, matière et énergie doit être réalisé. Il existe deux approches pour réaliser cet inventaire :

- L'approche *Compound* ou *top-down* (échelle macroscopique) : se base sur des données agrégées nationales et sur un Facteur d'Ajustement ;
- L'approche *Component based* ou *bottom-up* (échelle microscopique) : inventaire spécifique au système étudié.

Une fois ces données d'inventaire recueillies, il faut convertir ces flux en surface de terre bio-productive. Pour cela, ces flux doivent être convertis en surface physique simple de sols productifs en ha/an au moyen d'un facteur de conversion surfacique (ha/unité de masse, volume ou énergie). Puis, un ajustement est fait avec le facteur de rendement (adimensionnel) et le facteur d'équivalence (Gha/ha) pour fournir une surface générique moyenne mondiale.

La méthodologie de calcul se base, dans un premier temps, sur la différenciation de rendement bio-productif de différents types de sol à partir d'un facteur de rendement (pâturage, forêt, terre arable, espace marin, agglomération urbaine, sol énergétique capable d'absorber le CO). Puis pour agréger ces différents résultats, un facteur d'équivalence permet de passer d'hectare (ha) au global-hectare (Gha). Il ne s'agit pas réellement d'un indicateur permettant de mesurer la pression exercée par les Hommes sur l'environnement par une quantification de la surface productive nécessaire à une population pour vivre durablement [Wernet, 2006].

[26] Le réseau global de l'empreinte écologique : http://www.footprintnetwork.org/fr/

3.2.2. Atouts et limites

L'Empreinte écologique est essentiellement utilisée, actuellement, pour des objectifs de communication et de sensibilisation du fait de son unité très parlante souvent imagée par la mention du nombre de terrains de foot correspondant. Depuis quelques années, l'Empreinte écologique fait l'objet de recherche pour améliorer son utilisation à l'échelle microscopique (*component based*). Le suivi dans le temps de l'Empreinte peut permettre d'évaluer l'évolution des contraintes exercées par l'Homme au regard des politiques environnementales en vigueur.

> *L'Empreinte Ecologique n'a pas été choisie dans le cadre de ce travail pour trois raisons : la première est qu'elle présente une vision anthropocentrique de l'évaluation environnementale en prenant en compte uniquement l'épuisement des ressources biotiques au regard des besoins humains. L'impact sur les écosystèmes n'est donc pas évalué mais les facteurs de rendement et d'équivalence sont censés refléter la dégradation de la qualité des écosystèmes. La deuxième raison est que les résultats d'Empreinte Ecologique sont généralement considérés comme statiques reflétant l'état de l'environnement à un instant donné et pas sur l'ensemble du cycle de vie. La troisième raison est que sa méthodologie du calcul ne fait pas encore l'objet d'une formalisation consensuelle sous la forme d'une norme ou de lignes directrices.*

3.3.L'Analyse de Cycle de Vie (ACV)

L'ACV est une méthode permettant d'évaluer les impacts potentiels d'un produit ou d'un service tout au long de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination des déchets. Le système étudié est défini par une unité fonctionnelle qui sert de référence et qui représente une quantification de la fonction du produit évalué.

La méthode d'ACV est régie par la série de normes NF EN ISO 14040 [AFNOR, 2006a] et NF EN ISO 14044 [AFNOR, 2006b]. Les étapes obligatoires (Figure 27) pour la réalisation d'une ACV sont identifiées dans ces normes et détaillées dans la suite.

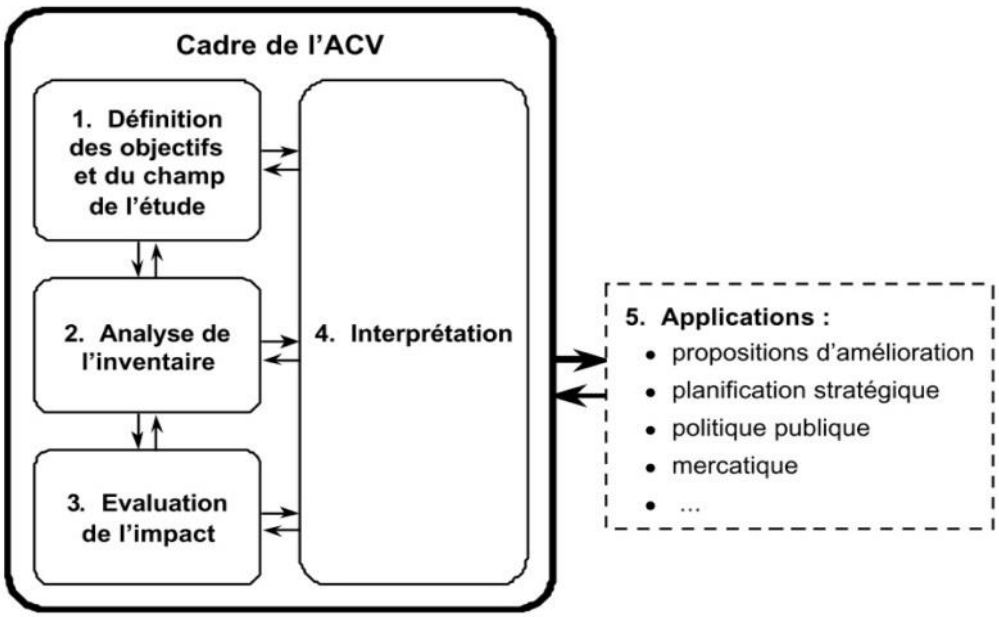


Figure 27 : Cadre de l'ACV [AFNOR, 2006a]

3.3.1. Objectifs et champ d'étude

La norme NF EN ISO 14040 [AFNOR, 2006a] exige que les objectifs et le champ de l'étude d'une ACV soient clairement définis et cohérents avec l'application envisagée. L'ACV permet d'identifier les possibilités d'amélioration des performances environnementales dans toutes les étapes de vie du produit ; d'informer les décideurs dans un souci de planification stratégique et de préciser les interactions entre les procédés techniques les leurs effets sur l'environnement [Jolliet et al, 2010].

Il est recommandé de faire l'ACV en deux temps [Jolliet et al, 2010] : 1) Une évaluation préliminaire ou « screening » : réalisation d'une ACV de A à Z de manière rapide et simplifiée en évaluant l'ordre de grandeur des contributions de différentes étapes du cycle de vie. Elle est accompagnée d'une première étude de sensibilité définissant les points environnementaux clés de l'ACV. 2) Une analyse détaillée reprend les phases de définition des objectifs, d'inventaire et d'analyse de l'impact, en approfondissant les points ayant les plus grands impacts environnementaux. Cette étape débouche sur l'interprétation finale, complétée par une étude de sensibilité détaillée et l'estimation des incertitudes.

3.3.2. Inventaire des émissions et des extractions

La définition des objectifs et du champ d'étude fournit le plan initial pour la réalisation de la phase d'inventaire du cycle de vie d'une ACV [AFNOR, 2006b]. La norme NF EN ISO 14040 [AFNOR, 2006a] a précisé que l'inventaire doit inclure le recueil des données et les modes opératoires de calcul pour quantifier les intrants et les extrants pertinents d'un système de produits. L'inventaire permet de déterminer les quantités de matières et d'énergie extraites ainsi que les émissions dans l'eau, l'air et le sol.

Ce bilan énergie / matière est normalisé par rapport à l'unité fonctionnelle définie au préalable. Cette identification donne alors lieu à l'établissement d'un diagramme de flux de processus auquel sont associées les conditions de fonctionnement du système. Le processus élémentaire correspond à la plus petite partie prise en compte dans l'inventaire du cycle de vie pour laquelle les données de flux entrants et de flux sortants sont quantifiées.

Les flux de produits, de matières ou d'énergie entrant dans un processus élémentaire sont nommés « intrants ». Les flux de produits, de matières ou d'énergie qui en sortent sont les « extrants ». Les flux intermédiaires correspondent aux flux de produits, de matières ou d'énergie intervenant entre des processus élémentaires du système étudié. Les flux élémentaires comprennent l'utilisation des ressources et les émissions dans l'air, l'eau et le sol associées au système dans la norme NF EN ISO 14044 [AFNOR, 2006b].

Selon Leroy, la collecte des données s'effectue souvent en deux étapes [Leroy, 2009] : Dans un premier temps, la collecte se base sur une analyse bibliographique afin de dresser un premier modèle sommaire du système. Puis une collecte de données plus spécifique est amorcée afin de combler les carences d'information et de valider la première ébauche. Pour ce faire et en fonction des objectifs de l'étude, ces données peuvent à nouveau être issues de la littérature ou être collectées auprès de l'industriel pour plus de spécificité.

3.3.3. Evaluation de l'impact environnemental

Chaque substance peut être comparée aux autres substances sur la base de sa capacité à endommager l'environnement. Lorsqu'une substance polluante est émise, elle a un cheminement dans l'environnement (changement ou transformation). Elle a finalement une conséquence, par exemple sur la santé humaine, ou sur la qualité de l'environnement, etc. Ce cheminement s'appelle « voie d'impact » (*Impact pathway*) [Jolliet et al, 2010]. Il s'agit de tous les processus environnementaux qui amènent la substance à son impact final.

Les résultats de l'inventaire conduisant à des impacts similaires sont regroupés dans des catégories d'impact à orientation « pression » nommées « catégories intermédiaires », pour lesquelles des indicateurs intermédiaires sont définis [Jolliet et al, 2010]. Une étape supplémentaire permet d'allouer ces catégories intermédiaires à une ou plusieurs catégories de dommages représentées par un indicateur de dommages. La Figure 28 montre la démarche générale de l'analyse de l'impact environnemental. Elle présente le schéma général du cadre méthodologique liant les résultats d'inventaire aux catégories de dommages à travers les catégories intermédiaires.

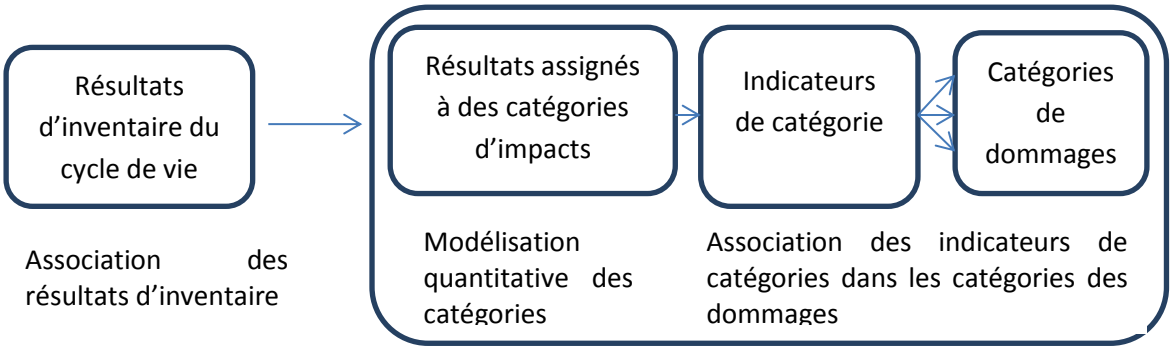


Figure 28 : Démarche générale de l'analyse de l'impact des émissions sur les sujets à protéger [AFNOR, 2006b]

Les indicateurs d'impacts ou facteurs de caractérisation traduisent l'effet potentiel sur l'environnement d'une quantité de substance émise par un système. Ces indicateurs sont construits à partir des propriétés intrinsèques de la substance et, parfois, à partir des conditions des milieux impactés. Les caractéristiques d'élaboration de ces indicateurs sont regroupées dans un ensemble plus vaste appelé méthode de caractérisation [Jolliet et al, 2010].

Différentes méthodes d'évaluation des impacts ont été développées, elles permettent d'analyser les résultats de l'inventaire et d'évaluer leurs effets potentiels sur l'environnement. Elles modélisent également les voies d'impacts des différentes substances et relient chaque donnée d'inventaires à ses dommages environnementaux potentiels, sur la base de ces voies. L'évaluation des impacts du cycle de vie consiste à convertir les divers flux identifiés en phase d'inventaire en impacts environnementaux.

Il existe plusieurs méthodes d'estimation des impacts, toutes visent à transformer les données d'inventaire en dommages environnementaux potentiels. Le Tableau 7 fournit une liste non exhaustive de méthodes proposées entre 2001 et 2009.

Tableau 7 : Exemples de méthodes de calculs d'impacts

Méthode	Orientation	Références
CML2001	Problème	[Guinée et al, 2001]
Eco-indicateur 99	Dommage	[Geodkoop and Spriensma, 2001]
TRACI	Problème	[Bare, 2002]
IMPACT 2002+	Problème et dommage	[Jolliet et al, 2003]
LIME	Problème et dommage	[Itsubo and Inaba, 2003]
EDIP 2003	Problème	[Potting et al, 2005]
LUCAS	Problème	[Toffoletto et al, 2007]
ReCIPE	Problème et dommage	[Geodkoop et al, 2009]

3.3.4. Interprétation des résultats

Cette étape permet la validation des différentes étapes notamment en identifiant les éventuels problèmes rencontrés et en mettant en avant les points cruciaux de modélisation. Ainsi l'ensemble des hypothèses telles que la définition de l'unité fonctionnelle ou encore du périmètre d'étude sont vérifiées et validées en accord avec les objectifs de l'analyse. Il en va de même pour l'évaluation des données de l'inventaire qui requiert en général une évaluation qualitative. Pour clore cette phase, il convient de déterminer les enjeux significatifs. Ceux-ci peuvent comprendre les données d'ICV, les catégories d'impacts ou encore les contributions significatives à certaines phases de cycle. Ceci permet notamment au praticien de structurer ses résultats d'ACV et les données à l'origine de la modélisation dans la norme NF EN ISO 14044 [AFNOR, 2006b].

3.3.5. Outils logiciels

Les bases de données (*ECOINVENT*, *INIES*,…) fournissent, pour chaque produit ou procédé, un inventaire de cycle de vie indiquant les quantités des différentes substances puisées ou émises dans l'environnement. Des catégories d'impacts environnementaux sont ensuite évaluées. Dans ce travail on utilise le logiciel *OpenLCA*[27] (Version 1.4.1) appuyé sur la base de données *ECOINVENT*[28] et *ECORCE*[29] (version M) qui est une application Java version 7 appuyé sur une base de données environnementales qui sont essentiellement issues des producteurs (FDES[30]) et des données publiées dans des revues scientifiques [Jullien et al, 2015]. Les deux logiciels et leurs bases de données sont détaillés par la suite.

Outil logiciel « ECORCE » et sa base de données dédiée

Le logiciel *ECORCE* est un outil d'évaluation de la construction et de l'entretien de chaussées routières utilisant des indicateurs d'impacts tirés de la littérature scientifique notamment du domaine de l'ACV. Ce logiciel permet de saisir des informations sur les structures de chaussées, de couche de forme et de partie supérieure des terrassements (PST), des formules de matériaux

[27] OpenLCA est un logiciel gratuit (http://www.openlca.org) pour quantifier les impacts environnementaux d'un produit tout au long de son sycle de vie, il est développé par GreenDelta. C'est une entreprise indépendante fondée en 2001 spécialiste de la consultation et programmation des logiciels du cycle de vie de produits, http://www.greendelta.com/ :

[28] Base de données suisse qui regroupe les différentes données, élaborées selon une méthodologie harmonisée et disponibles sous un format unique. La plupart de données sont européennes, suisses ou allemandes. Elle est également la base de données la plus complète et la plus utilisée http://www.ecoinvent.org

[29] Développé par l'Institute français de science, des technologies de transport, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR), anciennement LCPC : http://ecorce2.ifsttar.fr/presentation.php

[30] FDES : fiches des déclarations environnementales et sanitaires

routiers, des cas de traitement de sol, afin de comparer plusieurs variantes constructives de la phase de construction jusqu'à la phase d'entretien.

Les types de matériaux utilisés sont principalement les granulats naturels, les liants, les matériaux bitumineux, les graves traitées aux liants hydrauliques, les bétons, les enduits bitumineux, les couches d'accrochage, les graves non traitées, les aciers et les sols non traités des terrassements. Les données d'entrée concernent la géométrie des couches de chaussée (épaisseur, longueur et largeur), la composition et la masse volumique des matériaux constitutifs des couches, les distances d'acheminement des matériaux, la consommation unitaire des engins de chantier [Jullien et al, 2015].

Le manuel de référence du logiciel *ECORCE* précise : qu'une méthode d'évaluation de tronçons routiers, modulaire, faisant appel à une démarche systémique et appelée méthode des modules routiers est développée à l'IFSTTAR depuis 2002. Cette méthode vise à réaliser une évaluation globale, au sens du développement durable, selon deux volets :

- l'un désigné par le terme Module Routier Élémentaire (MRE). Il concerne des effets très globaux dans le temps et dans l'espace des pratiques de construction et de maintenance de routes, pour une durée de service à définir : terrassements, assainissement, chaussées. Dans le cadre d'évaluation environnementale des chaussées, le Module Routier Élémentaire (MRE) est un outil développé à partir de modules séparant chaussées et terrassement comme suit : La modélisation des différentes phases de construction/entretien de la chaussée : pour reconstituer les différentes couches de chaussée (technique de mise en œuvre et engins associés). Le calcul d'inventaire qui consiste à répertoire et à quantifier les flux de consommations et de rejets, d'une part entre les différents sous-systèmes identifiés, d'une autre part entre l'intérieur et l'extérieur du système.
- l'autre désigné par le terme de Module Routier Assemblé (MRA) qui se rapporterait à des effets locaux sur le territoire liés à l'insertion même de la route et aux services qu'elle rend.

Ce logiciel est donc capable de calculer, pour certains indicateurs, les impacts environnementaux liés aux chaussées utilisées dans les ouvrages souterrains linéaires (tunnels).

Outil logiciel « OpenLCA » et la base de données ECOINVENT

OpenLCA est est un logiciel Open Source fourni sans base de données, il est possible d'importer une base de données sous les formats *ecospold* : *ECOINVENT*, *ELCD*[31], etc.

La base de données *ECOINVENT* est une base de données générique d'inventaire de cycle de vie regroupant près de 4000 procédés [Frischknecht et al, 2007]. Cette base a été le fruit d'une collaboration entre différents organismes de recherche suisses. Les données contenues dans cette base ont une représentativité géographique mondiale, européenne ou suisse en fonction des procédés. Les modules d'inventaire sont fournis à la fois au format *Ecospold* et *Excel*. Chaque module contient des flux élémentaires d'émissions dans l'air, l'eau et sol ainsi que de consommations de ressources énergétiques, non énergétiques et d'usage du sol. Par ailleurs, douze méthodes d'analyse des impacts du cycle de vie sont implémentées dans la version 2.0. En outre, chaque module dispose

[31] Base ELCD : European Life Cycle Database, gratuite : http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/index.xhtml

de métadonnées permettant de renseigner les choix méthodologiques et les personnes responsables de l'étude ACV.

Ce logiciel avec sa base de données sont donc adaptés pour calculer les impacts environnementaux liés à l'ensemble du cycle de vie des ouvrages souterrains complexes.

3.4.Conclusion sur les méthodes d'évaluation environnementales

Les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux, leurs indicateurs et leurs bases de données associés sont capables d'identifier et de calculer les impacts environnementaux liés à un système de produits ou un service. Pour rappel de ce qui était précédemment indiqué, le bilan carbone est un outil monocritère, il ne prend en compte que les émissions de GES. L'Empreinte Ecologique agrège différents impacts environnementaux en un indicateur unique et l'appuie la plupart du temps sur des données d'inventaire résultant d'Analyses du Cycle de Vie. Par contre l'ACV est particulièrement intéressante dans la perspective du DD puisqu'elle couvre l'ensemble du cycle de vie d'un produit et évalue différentes catégories d'impacts environnementaux. Elle présente l'avantage d'engendre une forte interaction entre performance environnementale et fonctionnalité puisque les émissions polluantes et l'utilisation de matière première sont rapportées à la fonction du produit ou système étudié.

Au regard de sa méthodologie complexe mais conceptualisée par l'intermédiaire des normes, l'ACV présente des forces mais également des faiblesses. L'ACV, par ses caractères systémique et global, apparaît à ce jour comme un outil indispensable de l'évaluation des performances environnementales des systèmes complexes. Elle permet le développement d'outils d'écoconception en mettant l'accent sur les points critiques de conception et les leviers de réduction des impacts environnementaux [Leroy, 2009]. Une des principales forces de l'ACV est également son caractère holistique qui permet d'identifier des transferts d'impact potentiel tant d'une étape à l'autre du cycle de vie (grâce à la pensée cycle vie) que d'un impact à l'autre (grâce à l'exhaustivité des impacts évalués) [Aissani et al, 2012].

La mise en application de la pensée cycle de vie entraîne cependant des limites inhérentes à son caractère holistique donc des limites, en grande majorité, d'ordre pratique. Il apparaît également sans conteste, que l'étape d'évaluation des impacts est l'étape soumise au plus grand nombre de limites. Ces limites sont d'ordre méthodologique pour la plupart. Réaliser une ACV requiert des moyens importants en temps et/ou en moyens humains et économiques pour le recueil des données, pour l'acquisition des bases de données et de logiciel ACV [Ollivier-Dehaye, 2008]. Le Tableau 8 présente les résultats des travaux de Raep relatifs aux limites de l'ACV [Reap et al. 2008a ; Reap et al. 2008b].

Tableau 8: Liste des problèmes rencontrés en ACV [Reap et al. 2008a]

Phase ACV	Problème
Phase de définition des objectifs et du champ de l'étude	Définition de l'unité fonctionnelle Définition des limites du système Appréhension des aspects sociaux et économiques Considération des scénarios
Inventaire de cycle de vie	Allocations Définition des contributions négligeables
Evaluation de l'impact environnemental	Sélection de l'éco indicateur et des catégories d'impacts à évaluer Prise en compte de la variabilité spatiale Prise en compte de la dynamique de l'environnement Prise en compte du facteur temporel
Interprétation	Evaluation et pondération Incertitude
Toute	La disponibilité de l'information et sa qualité

L'ACV se caractérise par le nombre de choix laissés à la discrétion du praticien et du groupe projet. En effet, la définition de l'unité fonctionnelle, la définition du périmètre d'étude, la définition des clefs d'allocation dans le cas de systèmes multi-produits ou multifonctionnels ou encore le choix de l'indicateur environnemental influencent grandement les résultats d'analyse [Le Borgne, 1998]. En outre, l'ACV est un outil complexe nécessitant un degré d'expertise relativement élevé tant sur le volet de l'implémentation que sur celui de l'interprétation [Jolliet et al. 2010]. De plus l'information en elle-même est une limite majeure.

En effet la phase primordiale de l'ACV est l'inventaire et le praticien se heurte souvent à un problème de disponibilité ou de collecte de l'information [Millet et al. 2003]. L'incertitude et l'accumulation d'incertitudes au cours de la procédure compromettent également les résultats d'ACV [Jolliet et al. 2010]. Afin de diminuer l'ampleur de ces moyens, il est possible et recommandé d'apporter des simplifications à la méthodologie selon les objectifs de l'étude et la complexité des systèmes étudiés [Aissani et al, 2012]. Ainsi, les résultats d'une ACV sont très fortement soumis aux hypothèses posées, à la qualité des données et aux méthodes de calculs utilisées. Il faut veiller à la reproductibilité et à l'objectivité des méthodes employées. Ces hypothèses et méthodes de calculs peuvent orienter sciemment les résultats de l'ACV.

Par la suite, une focalisation est menée de l'application de l'ACV dans le domaine de la construction, plus particulièrement les ouvrages du génie civil. Les particularités d'un ouvrage du génie civil se représentent par leur complexité, leur attachement à une zone géographique, et leur utilisation par différentes populations pendant son cycle de vie. le nombre d'indicateurs environnementaux semble une difficulté pour comparer des scenarios d'aménagement et les différencier, la méthode mise au point pour le souterrain devra prendre cela en compte.

Partie II : ACV dans le domaine de construction - Application à un complexe souterrain

1. Introduction

Cette partie du chapitre débute par une étude bibliographique, elle se compose des pratiques de l'ACV dans le domaine de la construction (bâtiment, quartier, génie civil, etc.), puis dans le domaine de construction souterraine. L'objectif est d'identifier ce qui peut être retenu dans l'existant en termes d'unités fonctionnelles, de systèmes, d'indicateurs et de méthodologies ainsi que la possibilité de les adapter aux problématiques de ce travail.

L'autre partie de ce chapitre consiste en une application de l'ACV à une première étude de cas : un ouvrage de construction souterrain linéaire (tunnel de la Croix-Rousse – Lyon). Ce tunnel a été choisi car il représente un exemple important de complexe souterrain multimodal et multifonctionnel. Cependant, ayant une disponibilité partielle des données (à partir des documents publics concernant le tunnel de la Croix-Rousse), des hypothèses ont dû être faites pour les données manquantes. Cet exemple repose sur la comparaison de plusieurs variantes d'aménagement assurant les mêmes fonctions. Des indicateurs sont alors sélectionnés, et les impacts environnementaux associés sont calculé en prenant en compte les différentes phases du cycle de vie.

Enfin, les résultats des calculs sont exploités en comparant les variantes proposées. Les objectifs de cette application sont : 1) de savoir quelle variante, quelle partie du système, ou quel procédé est le plus impactant et pendant quelle phase du cycle de vie, afin d'affiner les analyses et les hypothèses sur les données ; 2) de valider le choix de logiciel et de base de données les plus adaptés à l'évaluation souhaitée ; 3) de sélectionner les indicateurs capables d'analyser la sensibilité des résultats au futur changement.

2. Littérature de l'ACV dans le domaine de construction

La littérature de l'ACV dans le domaine de la construction était à deux niveaux : Le premier concerne les ouvrages de construction aériens, ceux qui se composent d'un seul ouvrage (bâtiment, pont, route) ou d'un complexe d'ouvrages (quartier : bâtiments + infrastructures). Il est suivi par une analyse des normes concernant l'ACV dans le domaine de la construction et du génie civil. Le second représente l'objet de ce travail : les ouvrages de construction souterrains.

2.1. ACV d'ouvrages de construction aériens

2.1.1. ACV Bâtiment

Kohler a commencé le développement de la méthode d'ACV pour les bâtiments [Kohler, 1986], il a fait l'ACV d'un bâtiment en prenant en compte la construction, l'entretien et la démolition. Plus tard, le projet européen REGENER [Peuportier, 1997] a permis de proposer les grandes lignes d'une méthodologie pour l'application de l'ACV à l'échelle d'un bâtiments, et d'étudier l'intérêt de

l'intégration des énergies renouvelables au bâti. Par la suite la phase d'usage a été de plus en plus prise en compte.

Les recherches de l'évaluation des impacts environnementaux liés à un bâtiment par l'ACV a été poursuivie par [Peuportier, 2003], ces impacts sont sur plusieurs échelles (planétaire, régionale, locale, et à l'échelle du bâtiment lui-même). Peuportier a évalué les différents aspects de la construction, l'exploitation et l'utilisation d'un bâtiment et en incluant différentes « éco-techniques[32] » liées à l'amélioration de la qualité d'usage des bâtiments, ensuite plusieurs projets expérimentaux ont été présentés. On peut également citer la thèse de Lasvaux qui a fait une application de l'ACV au secteur du bâtiment [Lasvaux, 2010], dans le but de comparer les méthodologies appliquées et d'évaluer les tentatives de simplification du processus d'établissement d'une ACV, un des enjeux majeurs de la démarche pour favoriser son implémentation généralisée. Au niveau mondial, il existe des travaux principalement au Canada, en Australie, en Nouvelle Zélande et aux États-Unis [IEA, 2004].

2.1.2. ACV d'ouvrages du génie civil

Les enjeux environnementaux tout au long du cycle de vie des ouvrages du génie civil dédiés au transport et à la mobilité urbaine sont divers [Le Feon, 2014] : citons par exemple les émissions de gaz à effet de serre (GES), les polluants réglementés des transports (les oxydes d'azote, NOx), le monoxyde de carbone (CO), les particules fines, les composées organique volatils, etc. En France, un travail a été mené par un groupe de l'agence française du génie civil (AFGC) pour créer une base de données environnementale (DIOGEN[33]), relative aux matériaux constitutifs des ouvrages de génie civil sur le territoire national.

Concernant un ouvrage du génie civil, l'unité fonctionnelle doit désigner l'ouvrage dans son ensemble, elle doit aussi porter une projection de son usage pendant une durée prédéfinie, parce qu'il représente une partie importante de ces impacts.

ACV du terrassement

Les travaux du terrassement accompagnent souvent la construction des ouvrages du génie civil, ils ont fait l'objet de plusieurs études, dont une qui consiste à modifier la configuration du sol en extrayant, déplaçant, amoncelant des terres [ATILF, 2000 ; Capony, 2013]. L'unité fonctionnelle considérée, dans ce cas, correspond à un kilomètre de terrassement [Anderson et al, 2003 ; Hoang, 2005 ; Mroueh et al, 2001] pour une durée de service de 40 ans par exemple [Stripple, 2001].

ACV de ponts

Concernant les ponts, les études d'ACV dans la littérature visent à comparer les impacts environnementaux liés aux différents types de ponts [Collings, 2006 ; Horvath et al, 1998 ; Itoh et al, 2003 ; Thiebault, 2010], aux matériaux composants le tablier [Kendall, 2004 ; Keoleian et al, 2005 ; Lounis et al, 2007] ou aux structures innovantes [Bouhaya et al, 2009]. Plusieurs études relatives présentent clairement l'unité fonctionnelle d'un pont, elle considère la longueur de la traversée ou du tablier [Bouhaya et al, 2009 ; CIMbéton et al, 2010 ; Hammervold et al, 2009], le type du pont étudié (unité de produit) [Bouhaya et al., 2009 ; CIMbéton et al., 2010], et la durée de vie d l'ouvrage

[32] Regarder la glossaire.
[33] Développé par l'association française de génie civil (AFGC) en 2010 : (http://diogen.fr/)

(unité de temps) [Bouhaya et al, 2009 ; CIMbéton et al, 2010 ; Hammervold et al, 2009 ; Thiebault, 2010 ; Kendall, 2004].

Pour les ponts, l'outil logiciel *BridgeLCA*[34] a pour but d'évaluer les impacts environnementaux liés aux ponts, utilisant comme indicateurs : l'acidification, l'eutrophisation, le changement climatique, la destruction de l'ozone stratosphérique, la création d'ozone photochimique, l'épuisement des ressources abiotiques. L'ensemble du cycle de vie est évalué depuis la production des matières premières jusqu'à la fin de vie de l'ouvrage. Les données d'entrée sont les quantités de matériaux et d'énergie, et les distances de transport des matériaux de construction et d'entretien tout au long de la vie de l'ouvrage.

ACV des structures routières

La méthodologie de l'ACV a commencé à être appliquée sur les structures routières dans les années 90, elle a fait l'objet de plusieurs études visant à évaluer les impacts environnementaux des différentes phases du cycle de vie des chaussées asphaltes et bétonnes [AzariJafari et al, 2016]. La différence significative entre ces études concerne essentiellement la définition de l'objectif et le champ d'étude de l'ACV ainsi que la collecte des données. Un rapport mené par Stripple a éclairé la possibilité d'appliquer l'ACV aux ouvrages de génie civil dédiés au transport, y compris les structures routières et ferroviaires, l'objectif de ce rapport était de traiter la partie environnementale de la procédure d'aide à la décision [Stripple et al, 2004].

Concernant l'ACV des structures routière, on peut repérer une revue récapitulative de la littérature et des recherches liées à l'ACV des chaussées, menée par Santero et al, elle fournit un résumé exhaustif des pratiques de l'application de l'ACV aux structures routières jusqu'à l'année de cette étude [Santero et al, 2011], elle comprend également des recommandations et des actions à prendre en compte pour toutes les phases du cycle de vie d'une structure routière.

D'autres études ont également appliqué l'ACV aux structures routières. elles ont focalisé sur : la comparaison entre plusieurs chantiers d'entretien routier, où les impacts environnementaux ont été quantifiés par l'ACV [Jullien et al, 2014] ; les impacts liés à la mise en œuvre des nouvelles technologies concernant les méthodes de construction, ou à l'utilisation des matériaux recyclés [Blankendaal et al, 2014 ; Wang et al, 2014 ; Anthonissen et al, 2015 ; Noland and Hanson, 2015] ; la modélisation des impacts environnementaux liés aux travaux du terrassement des structures routières par l'ACV [Capony et al, 2011].

Dans le domaine routier, l'outil logiciel *SEVE*[35] est un éco-comparateur basé sur une architecture Internet. Il n'y a pas d'application à installer localement par les utilisateurs. *SEVE* permet de saisir les paramètres de chaque solution évaluée : nature des couches, constituants, condition de fabrication de la chaussée, composition des ateliers d'application, distances et modes de transports, etc. Sept indicateurs quantitatifs sont évalués : la consommation énergétique, l'émission de CO_2, l'économie de ressources naturelles, la tonne kilométrique, et deux indicateurs déclaratifs : la gestion de l'eau et la prise en compte de la biodiversité. Ils sont présentés sur un modèle unique de document reprenant, de façon exhaustive, les hypothèses retenues et les impacts de chaque solution.

[34] Logiciel développé par NTNU (Université norvégienne de sciences et de technologie : (https://www.ntnu.edu/)

[35] Système d'Evaluation des Variantes Environnementales, développé en 2009 par l'union des syndicats de l'industrie routière française (http://www.seve-tp.com/Security/UserLogin.aspx?ReturnUrl=%2fdefault.aspx)

Le logiciel *ECORCE* (Cf. Outil logiciel *ECORCE* P.97) est également un éco-comparateur de la construction et de l'entretien de chaussées routières utilisant des indicateurs d'impacts tirés de la littérature scientifique notamment du domaine de l'ACV [Jullien et al, 2015]. *ECORCE* est utilisé partiellement dans le cadre de ce travail.

2.1.3. ACV Quartier

Dans une optique d'écoconception, la plupart des impacts environnementaux, liés aux bâtiments et aux systèmes urbains, se produit généralement en dehors de ces systèmes : dans les usines de fabrication des produits de construction, lors de la production d'électricité et d'eau potable, dans les équipements de traitement des déchets et des eaux usées, etc. Il convient également de citer le déplacement en milieu urbain comme une des pistes importantes de réflexion en termes d'impacts. Les modes de ce déplacement peuvent être classés en plusieurs catégories selon qu'ils sont individuels ou collectifs, terrestres ou guidés, relatifs aux personnes ou aux marchandises [Peuportier, 2013]. Un exemple d'une comparaison entre plusieurs ensembles urbains de densité et nature différentes (maisons individuelles, tours, barres, terrasses, cité solaire de Fribourg - Allemagne), mené par Vorger [Vorger, 2011], montre que la densité urbaine peut influencer fortement le mode de transport, en effet la prise en compte du transport augmente d'environ 80% l'énergie primaire consommée dans le cas des maisons et de 40% dans les autres cas, pour une durée de vie de 80 ans. En ce qui concerne la contribution à l'effet de serre, l'augmentation est respectivement de 140% et de 20% (le transport pris en compte est un trajet domicile-travail identique de 14 km) [Peuportier, 2013].

En revanche, dans la phase de conception, les fabricants et donc les lieux de fabrications ne sont généralement pas encore connus. Or c'est durant cette phase que sont prises les décisions influençant le plus le bilan environnemental. Les données moyennées sont alors utilisées et la méthode d'ACV est la plus appropriée dans l'état actuel des connaissances. Cependant, cela n'empêche pas de réaliser une étude d'impact [AFNOR, 2013b] en complément, surtout si le bâtiment ou le quartier comporte une ressource de pollution importante comme une chaufferie de grande taille ou un axe de circulation très fréquenté [Peuportier, 2013].

L'application de l'ACV aux ensembles urbains a été étudiée par [Kohler, 2003 ; Popovici, 2006 ; Herfray et Peuportier, 2010 ; Herfray, 2011]. Pour cette application, le problème est plus complexe que pour le bâtiment par l'apparition de degrés de liberté supplémentaires dans le processus de décision (interaction entre les bâtiments, mutualisation des équipements et des réseaux, mobilité,…). On peut noter que l'aspect social acquiert un poids significatif par rapport au bâtiment seul [Cherqui, 2005].

Le projet ACV Quartiers[36] est un projet de recherche industrielle subventionné par l'ANR et coordonné par ARMINES. Un modèle a été élaboré, incluant les bâtiments, les espaces publics (voiries, espaces verts…) et les réseaux (eau, chauffage urbain…). Afin de pouvoir étudier des quartiers à énergie positive, les besoins et productions énergétiques des bâtiments sont évalués heure par heure par simulation dynamique. Les résultats de ces simulations sont ensuite transférés à l'outil d'ACV des bâtiments.

[36] Projet de recherche a commencé en janvier 2009 et a duré 36 mois, il a été mené par ANR pour l'aide à l'écoconception des quartiers par l'analyse de cycle de vie : http://www.agence-nationale-recherche.fr/projet-anr/?tx_lwmsuivibilan_pi2[CODE]=ANR-08-VILL-0011

Pour un ensemble urbain, l'ACV représente un outil intéressent et réputé pour la quantification des impacts environnementaux. La littérature de l'ACV dans le domaine de la construction s'est basée sur le fait de comparer plusieurs variantes d'aménagements ou méthodes de réalisation des ouvrages de construction. La littérature indique également la contribution importante des infrastructures du transport à ces impacts ; ainsi que l'importance d'une évaluation sociale accompagnant l'évaluation environnementale, cela est dû à la forte concentration de populations dans l'ensemble urbain, et au fait que ces populations sont directement concernées par ces impacts.

2.1.4. Cadre normatif de l'ACV des ouvrages de construction

Une nouvelle norme est disponible depuis août 2012 pour l'évaluation de la contribution d'un ouvrage de construction au développement durable au niveau du produit : la norme NF EN 15804+A1 [AFNOR, 2014a] (Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction+ Annexes nationales) qui remplace la norme NF P01-010 [AFNOR, 2004] . Cette norme européenne est complétée d'une annexe nationale XP P 01-064/CN [AFNOR, 2014b]. Elle fournit une structure des Déclarations Environnementales des Produits (DEP) et la norme NF EN 15804+A1 [AFNOR, 2014a] permet de s'assurer que les DEP sont obtenues, vérifiées et présentées de façon harmonisée. En parallèle, la norme NF EN 15978 [AFNOR, 2012a] définit la méthode de calcul de la performance environnementale au niveau du bâtiment. Ces nouvelles normes se distinguent des précédentes par la prise en compte d'un nouveau pan de la vie du bâtiment : les possibilités de recyclage ou valorisation des matériaux de construction en fin de vie via l'utilisation du module D.

La série des normes NF EN 15643 évalue la contribution au développement durable des bâtiments. Elle fournit par sa première partie NF EN 15643-1 [AFNOR, 2010] un cadre méthodologique général comportant des principes, des exigences et des lignes directrices pour l'évaluation. Les méthodologies d'évaluation proposées pourraient également s'étendre à une évaluation du quartier et d'un environnement bâti plus large. La deuxième partie NF EN 15643-2 [AFNOR, 2011] met en évidence les principes et exigences de l'évaluation des performances environnementales des bâtiments. Elle précise que cette évaluation doit appliquer des mesures en rapport avec les aspects et les impacts environnementaux d'un bâtiment pendant la durée du cycle de vie du bâtiment. Elle doit s'appuyer sur l'analyse du cycle de vie conformément aux lignes directrices et aux exigences de la norme NF EN ISO 14044 [AFNOR, 2006b] et à d'autres informations environnementales quantifiables. La norme, NF EN 15643-2 [AFNOR, 2011], exclut l'évaluation de l'influence d'un bâtiment sur les impacts et aspects environnementaux liés à l'infrastructure locale au-delà de la parcelle, et sur les impacts et aspects environnementaux liés au transport des utilisateurs du bâtiment. Elle ne comprend pas non plus l'analyse des risques environnementaux.

La partie cinq prEN 15643-5 [AFNOR, 2016], toujours en élaboration en 2016, fait partie des normes fournies par le comité européen de normalisation (CEN/TC350)[37]. Elle s'intéresse à la contribution du

[37] CEN/TC 350 : comité européen de normalisation / comité technique : est responsable de l'élaboration de méthodes transversales normalisées d'application volontaire, pour l'évaluation de la contribution au développement durable des ouvrages neufs et existants, ainsi que de l'élaboration de normes relatives à la déclaration environnementale portant sur les produits de construction. Ces normes seront d'application générale (normes horizontales) et pertinente pour l'évaluation des performances globales des bâtiments tout au long de leur cycle de vie [http://www2.afnor.org/espace_normalisation/structure.aspx?commid=60462].

génie civil au développement durable (Figure 29), et donc à l'évaluation des performances environnementale, sociale, économique.

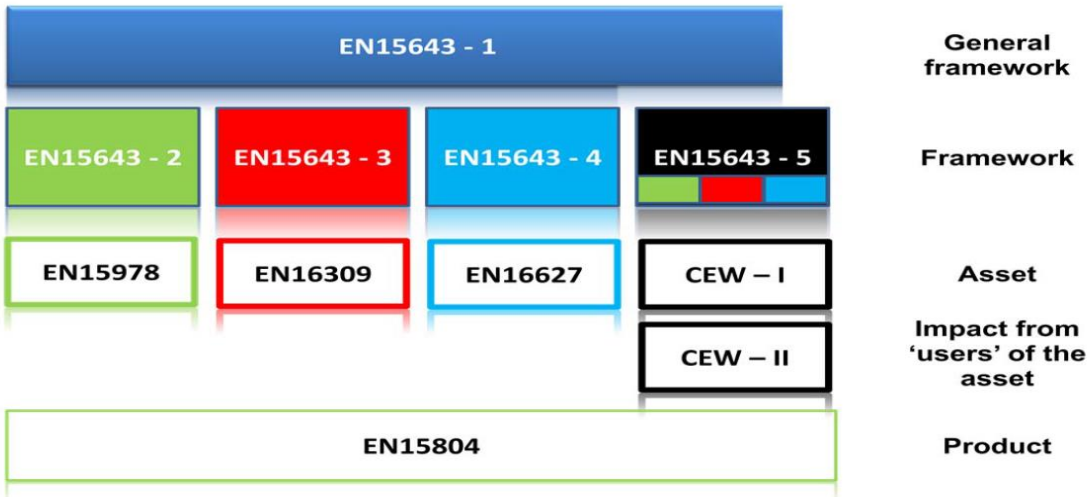


Figure 29 : Prise en compte du génie civil dans les normes de la durabilité pour les ouvrages de construction (CEN/TC 350). (vert : volet environnemental, rouge : volet social, bleu : volet économique, noir : en élaboration).

L'évaluation de la performance technique et fonctionnelle du génie civil ne fait pas partie de l'objectif de cette série de normes, par contre les caractéristiques techniques et fonctionnelles sont prises en considération pour identifier l'équivalent fonctionnel[38]. La méthodologie proposée prend en compte l'ouvrage du génie civil lui-même, sa zone d'influence, et l'usage de l'ouvrage. La partie « usage » (B-8 *User's use*), des ouvrages d'infrastructure, est spécifiquement intégrée dans ce projet de norme, mais pas encore détaillée.

Les normes présentées concernant les ouvrages de construction (bâtiments et ouvrage du génie civil), ne prennent pas en compte l'intégralité des aspects abordés dans le cadre de la thèse, mais elles représentent une base normative harmonisée avec le fond de ce travail. Ce travail prend en compte les normes de l'ACV NF EN ISO 14040 et NF EN ISO 14044, ainsi que les catégories d'impacts définies dans la norme NF EN 15804+A1. Il prend en compte l'usage de l'ouvrage souterrain comme recommandé dans le projet de norme prEN 15643-5.

[38] La norme NF EN 15643-1 [AFNOR, 2010] a défini « l'équivalent fonctionnel » comme des exigences fonctionnelles et/ou exigences techniques quantifiées, relatives à un bâtiment ou à un système assemblé (partie d'ouvrage) et servant de base de comparaison.

2.2. ACV d'ouvrages de construction souterrains

2.2.1. Champs d'étude

Dans le cadre du travail du Centre d'étude des tunnels en France (CETU), une identification et quantification des différentes contributions d'un tunnel dans les projets d'infrastructures ont été menées grâce aux outils multicritères comme les grilles d'évaluation. Ainsi, l'adaptation de la grille RST_{02}[39] au champ des tunnels est étudiée en l'appliquant sur des projets réels, en prenant en compte le choix des solutions techniques adoptées. Les tunnels sont normalement limités par des considérations économiques et géologiques. Les impacts environnementaux peuvent être limités et compensés en prenant en totalité l'ensemble du cycle de vie, parce qu'il y a d'autres ressources éventuelles (énergie géothermique, eaux souterraines, etc.) qui peuvent être disponibles pour exploitation.

Dans la procédure de prise de la décision, les maitres d'ouvrages ont besoin d'informations concernant les impacts environnementaux. Le CETU applique actuellement l'ACV afin de comparer les impacts environnementaux potentiels des solutions techniques de l'excavation, du soutènement et du revêtement du tunnel [D'Aloia et al, 2010]. Cette approche doit être complétée par des considérations socioéconomiques où plusieurs indicateurs spécifiques aux tunnels peuvent être identifiés, par exemple : les effets nuisibles pour les riverains lors des phases de construction et d'exploitation.

2.2.2. Unité fonctionnelle et phases de cycle de vie

Stripple a évalué la performance environnementale des tunnels typiques qui font partie d'une infrastructure ferroviaire de 190 km en Suède, ce projet comprend 90 ponts, 16 tunnels [Stripple et al, 2010]. L'unité fonctionnelle concernant les tunnels ferroviaires construits était «réaliser 1km de tunnel » avec prise en compte des phases de construction, d'exploitation et de maintenance pour une durée de service de 60 ans. Des sous-unités fonctionnelles ont été définies pour la construction « excaver un m^3 de matériaux » et pour l'usage du système de transport « transporter une personne par kilomètre ou un tonne par kilomètre ».

Dans une étude d'ACV comparative entre un pont et un tunnel, [Boulenger, 2011] a donné un exemple d'unité fonctionnelle dans le cas d'un tunnel : « permettre de faire passer pendant un certain nombre d'années un flux de véhicules d'un point A à un point B, où la distance de référence est de X km », indiquant que la distance de référence n'est pas forcément la distance directe. Il a choisi une unité fonctionnelle pour la comparaison entre le pont et le tunnel comme suit : « construire une structure de 1km de longueur et trois voies de circulation dans chaque sens, permettant de passer un trafic annuel de AADT[40] = 1600 véhicules par jour ».

L'application de l'ACV au creusement des tunnels a fait l'objet de plusieurs études. Pour la méthode traditionnelle (attaques ponctuelles et à l'explosif) [Huang et al, 2015] a précisé l'unité fonctionnelle pour la construction du tunnel comme suit : « l'excavation d'un mètre de tunnel creusé en méthode traditionnelle ». Cette unité fonctionnelle lie également la quantité de l'explosif (kg/m^3) demandé

[39] Grille développée par le CERTU anciennement qui est devenu une partie du CEREMA : (http://www.est.cerema.fr/la-grille-rst-02-a2336.html)
[40] AADT : Annual Average Daily Trafic

pour exploser les roches à un degré demandé de fragmentation (50% des roches est taillé de moins de 250mm [Zare, 2007 ; Zare et al, 2013]).

D'autres études ont également appliqué l'ACV au creusement en méthode traditionnelle [D'Aloia et al, 2010 ; D'Aloia et al, 2012] les unités fonctionnelles dans ces deux études étaient respectivement : « le passage d'un côté à l'autre par un tunnel » ; « Assurer la continuité d'un itinéraire routier par une traversée souterraine ». Une autre étude menée sur un creusement tunnelier [D'Aloia et al, 2015] a indiqué que plusieurs unités fonctionnelles peuvent décrire l'ensemble des solutions techniques, elles sont utilisées pour présenter les résultats et systématiser l'approche, elles sont de type : « 1 mètre linéaire de « profil type » pour un trafic et un environnement géologique donnés et une durée d'exploitation de 100 ans ».

Le cycle de vie des ouvrages souterrains ne prend pas en considération une phase de fin de vie, considérant qu'elle est une phase de fin d'exploitation ; [D'Aloia et al, 2012] a défini les phases du cycle de vie du tunnel comme suit :

- La réalisation ou construction : elle comprend la production des matériaux ; On distingue les étapes suivantes liées à la réalisation d'un tunnel : Le creusement ; Le soutènement ; L'étanchement ; Le drainage ; L'assainissement ; La plate-forme ; Le revêtement. Cette décomposition permet de présenter les résultats en distinguant les impacts des matériaux mis en œuvre au cours de ces différentes étapes de réalisation du génie civil.
- L'exploitation : elle comprend l'entretien du génie civil, et la maintenance et le renouvellement des équipements, ainsi que les interventions d'exploitation ;
- La réhabilitation : cette étape éventuelle entre deux étapes d'exploitation permet de revoir l'usage du tunnel de façon majeure ;
- La fin de vie : elle est la fin d'exploitation, dans cette étape on peut imaginer qu'un projet futur réutiliserait le tunnel fermé à l'exploitation pour éviter les impacts liés à un nouveau creusement. L'absence d'une réelle fin de vie d'un tunnel pourrait conduire à une fin définitive d'exploitation après plusieurs phases d'exploitation et des phases plus lourdes de réhabilitation.

2.2.3. Système, Limites et données prises en compte

Dans l'étude menée par Stripple pour évaluer les infrastructures et les systèmes du transport de la ligne ferroviaire Bothnia – Suède, le système évalué prend en compte à la fois la construction et l'exploitation de l'infrastructure ferroviaire et la fabrication et l'exploitation du système du transport utilisé [Stripple et al, 2010]. Plusieurs DEP ont été réalisées pour ce projet d'infrastructure, y compris des tunnels. Dans les DEP des tunnels, la piste des rails, les réseaux électriques et les systèmes de signalisation et de télécommunication ont été exclu du système. Concernant la partie souterraine de cette étude, le système évalué a pris en compte :

- Dans la phase de construction : L'excavation des roches et du sol, le forage, déforestation, les services des routes, la ventilation, l'injection du ciment, le boulonnage, la projection du béton, les réseaux de drainage et d'assainissement, les pare-feu, les têtes du tunnel, les gaines des câbles, systèmes d'eaux d'extinction d'incendies, les équipements intérieures.
- Dans la phase d'exploitation : Eclairage, les mesures de protection contre les incendies, l'exploitation des systèmes électroniques et d'électricité.
- Maintenance du tunnel : Réinvestissements selon le cycle de vie des composants.

Dans le système d'évaluation d'un projet d'aménagement souterrain, il faut prendre en compte les différentes fonctions (surface et sous-sol) qui peuvent être en interaction, quel qu'en soit l'objectif. Pour cela l'identification des frontières du système complet peut comprendre trois parties, une partie souterraine, une partie aérienne et la troisième représente l'interaction entre les deux parties précédentes.

Ce découpage est de caractère « spatial », il permet de faciliter le fait d'associer les impacts à un sous-système précis, en prenant en compte qu'un sous-système ne peut être seul, mais il est complémentaire avec les autres sous-systèmes. Des indicateurs pourraient être spécifiques à chaque sous-système selon la fonction et la population occupant l'espace.

2.2.4. Evaluation de l'impact environnemental

Dans la littérature, les indicateurs calculés étaient associés à des thèmes environnementaux définis, le Tableau 9 capitalise ces plusieurs thèmes selon la référence bibliographique, ainsi que la méthode du calcul utilisé pour calculer l'indicateur environnemental associé.

Tableau 9: Thèmes environnementaux évalués dans la littérature et leur méthode d'évaluation utilisées

Thème environnemental	NF EN 15804+A1 [AFNOR, 2014a]	[Peuportier, 2001]	[Boulenger, 2011]	[Miliutenko et al, 2012]	[Huang et al, 2015]
Consommation des ressources d'énergie énergétique	Méthode non définie	CED	Méthode non définie	CED	Indicateur non défini
Production de déchets	Méthode non définie	CML	Indicateur non défini	Indicateur non défini	Indicateur non défini
Ecotoxicité	Indicateur non défini	CML	Indicateur non défini	Indicateur non défini	ReCiPe
Toxicité humaine	Indicateur non défini	CML	Indicateur non défini	Indicateur non défini	ReCiPe
Acidification des sols ou de l'eau	CML	CML	ReCiPe	Indicateur non défini	ReCiPe
Réchauffement climatique	CML	CML	ReCiPe	ReCiPe	ReCiPe
Eutrophisation	CML	CML	Indicateur non défini	Indicateur non défini	Indicateur non défini
Occupation du sol	Méthode non définie	Indicateur non défini	Indicateur non défini	Indicateur non défini	Indicateur non défini
Formation d'ozone photochimique	CML	CML	ReCiPe	Indicateur non défini	ReCiPe
Epuisement des ressources abiotiques	CML	Indicateur non défini	ReCiPe	Indicateur non défini	Indicateur non défini
Appauvrissement de la couche d'ozone	CML	CML	ReCiPe	Indicateur non défini	Indicateur non défini

Ce tableau représente la base qui sert à choisir les indicateurs et ses méthodes de calculs pour ce travail.

2.3. Synthèse sur les apports de la bibliographie

L'ACV a été choisie pour quantifier le volet environnemental de ce travail, elle est l'outil méthodologique approprié pour ce type d'évaluation parce qu'elle permet d'évaluer plusieurs catégories d'impacts liés à l'ouvrage, en prenant en compte toutes les phases du cycle de vie, de la production des matériaux, la construction, l'exploitation, la maintenance, et puis la phase de la fin de vie de l'ouvrage (ou la fin d'exploitation). L'application de l'ACV au domaine de la construction et des infrastructures a montré l'importance de prendre en compte la totalité du cycle de vie de l'ouvrage.

Dans le domaine du souterrain, l'ACV a été appliquée à la production des matériaux, aux différentes méthodes de creusement et de construction et leurs solutions techniques, etc. L'usage de ce type d'aménagements n'a pas été clairement pris en compte dans la littérature, il n'y a donc pas un exemple complet d'application de l'ACV à un ouvrage de construction souterrain multifonctionnel, ou qui comprend plusieurs modes d'usages. Toutes les études consultées ont été faites pour un seul usage (routier, ferroviaire, réseaux techniques, etc.). D'où l'importance d'appliquer l'ACV à un cas d'étude multifonctionnel, multimodal dans une zone urbaine, cela va permettre de passer du volet environnemental au volet social, en prenant en compte les différentes populations utilisant l'ouvrage souterrain ou affectées plus ou moins par le fait de sa réalisation.

La difficulté reste toujours de définir l'unité fonctionnelle la plus appropriée, intégrant les différents fonctions et modes d'usage. Le système évalué doit prendre en compte la réalisation des différentes structures (creusement et soutènement, construction de voûte ou boîte couvrante, construction de chaussées ou planchers, étanchéité, etc.). La qualité des données prises en compte, et les hypothèses posées pour les données manquantes, influencent fortement les résultats obtenus. Les indicateurs choisis à évaluer doivent comprendre les catégories d'impacts environnementaux les plus répandues, qui répondent également aux exigences de la norme NF EN 15804+A1 [AFNOR, 2014a].

L'ACV doit aider à comparer plusieurs variantes d'aménagements urbains assurant les mêmes fonctions (solution souterraine, solution aérienne, solutions intermédiaires, etc.). Cependant la problématique posée dans ce travail, dans le cadre du développement d'une méthodologie d'évaluation appropriée au souterrain, est : est-ce qu'elle est suffisante pour caractériser les spécificités du souterrain ? En particulier peut-elle montrer le bénéfice que peut en tirer la ville pour son développement respectueux des principes du DD ?

3. Application de la méthode ACV à un complexe souterrain

3.1. Tunnel de la Croix-Rousse : Approche multimodale

3.1.1. Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle est définie comme suit : « **Assurer la sécurité d'un tube routier, et la continuité d'un itinéraire entre deux points pour les bus, les piétons et les vélos sur une durée de 100 ans** ». Cette unité fonctionnelle prend en compte les fonctions principales assurées par l'ouvrage construit pour répondre aux besoins (exprimés dans le chapitre 1, P.54) : « assurer la sécurité du tunnel routier », et « assurer la traversée des modes doux d'un point donnée à un autre (en traversant un obstacle naturel) ». On considère la durée de service est égale à 100 ans. Cette durée est régulièrement utilisée pour l'ACV des ouvrages du génie civil et a été prise en compte dans nombreuses études bibliographiques d'ACV des tunnels [Boulenger, 2011 ; Miliutenko et al, 2012 ; D'Aloia et al, 2012 ; D'Aloia et al, 2015].

3.1.2. Choix de variantes de scénario permettant l'ACV

Afin d'effectuer l'ACV de ce tunnel, il est nécessaire de choisir un scénario de référence pour comparer les impacts environnementaux entre le tunnel à l'état actuel à un autre état fictif mais a été envisagé lors de la phase de conception.

Le nouveau tunnel a été principalement construit pour assurer la sécurité du tube existant, une autre fonction a été ajoutée par la suite concernant le passage des modes doux. Trois scénarios (Figure 30) étaient envisagés au départ du projet en 2007 [Grand-Lyon, 2013] :

Scénario 1 : réalisation d'une galerie de sécurité simple, parallèle au tube existant, avec pour but d'évacuer les usagers du tube routier en cas de besoin.
Scénario 2 : réalisation d'un tube circulé parallèle au tunnel existant dédié aux modes doux (bus, vélo, piétons), ce scénario a été retenu par la société de Grand-Lyon.
Scénario 3 : réalisation d'un tube circulé parallèle au tunnel existant et réservé aux véhicules légers en réservant une voie du tunnel existant aux transports en commun.

Les deux premiers scénarios ont été donc retenus dans le cadre de ce travail. Le troisième scénario a été rejeté dans ce travail, car la fonction du nouveau tube reste toujours comme un tube routier, cela ne porte pas une originalité par rapport à la littérature.

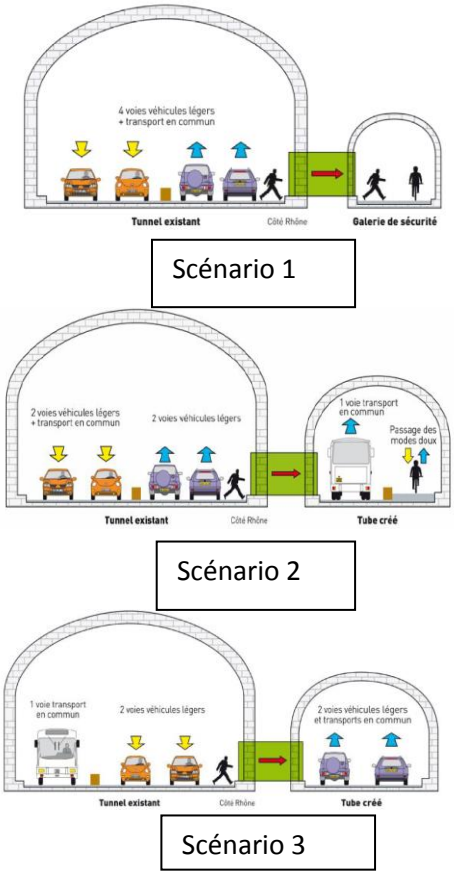


Figure 30 : scénarios proposés pour assurer la sécurité du tube routier [Grand-Lyon, 2013]

Pour pouvoir comparer les scénarios 1 et 2 (Figure 31) sur la base d'une même fonction, il est nécessaire d'ajouter une partie trajet en site propre dédié aux modes doux en aérien, au scénario 1 (scénario mixte).

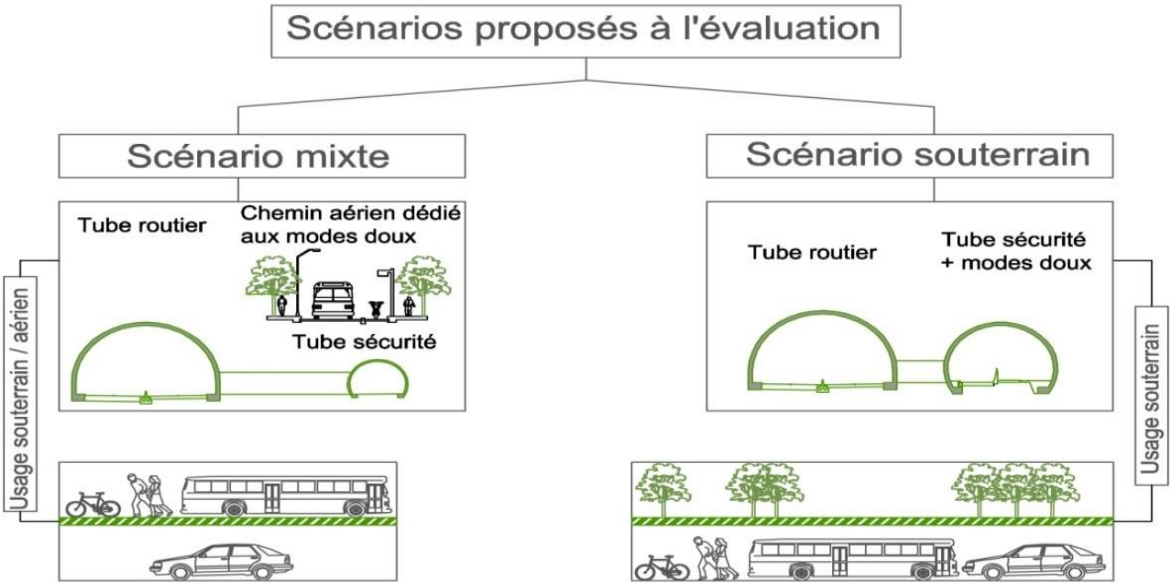


Figure 31 : Représentation de deux variantes d'aménagement des deux scénarios

Le scénario mixte correspondrait à un itinéraire aérien qui tourne autour de la colline de la Croix-Rousse de **4000 m** pour passer du point A au point B. Le scénario souterrain propose un itinéraire souterrain qui traverse la colline de **1750 m**, c'est la longueur du tunnel (Figure 32).

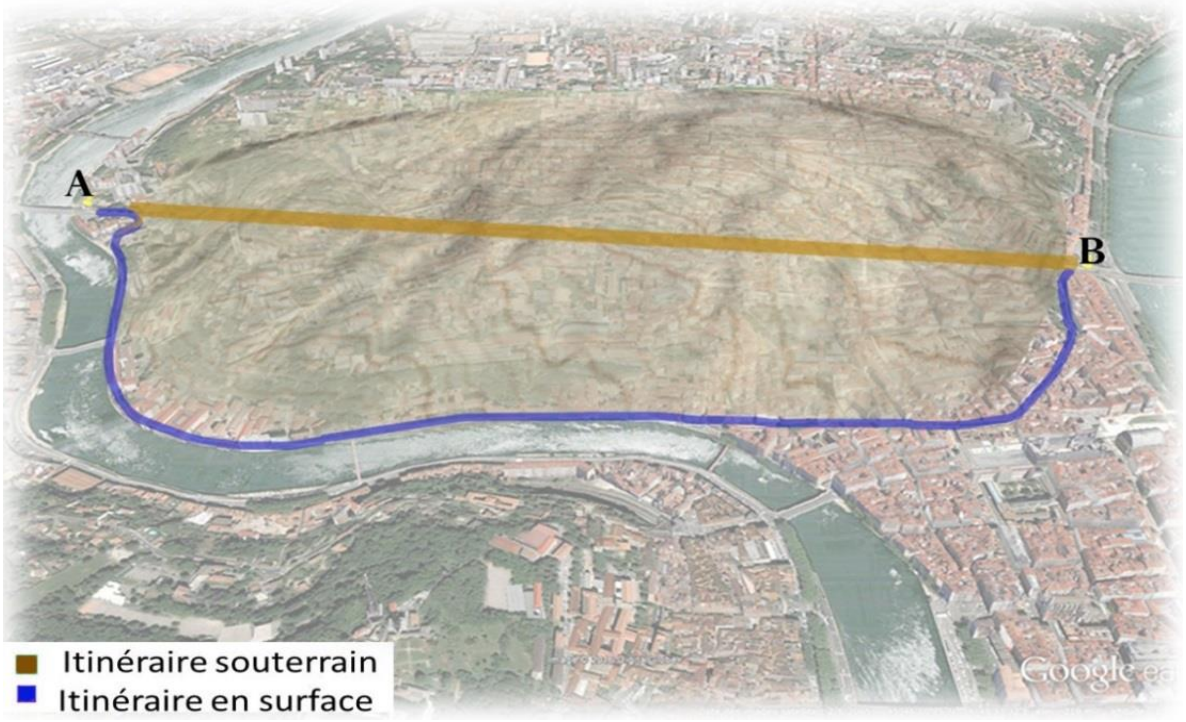


Figure 32 : itinéraires proposés par les deux scénarios

3.2. Système évalué et données prises en compte

Ce paragraphe présente le système évalué, ses limites et la collecte des données associées. Les détails des différents procédés proposés sont donnés dans les tableaux en ANNEXE 1. Lorsqu'un procédé *ECOINVENT* est ajouté sans modification, il est en Italique. Cependant, le logiciel *ECORCE* ne donne pas la possibilité de changer ses procédés, ils sont présentés en ANNEXE 2.

3.2.1. Limite du système évalué

L'évaluation doit prendre en compte :

- les phases de construction et d'exploitation du nouveau tube et des autres structures assurant la fonctionnalité du tunnel.
- la fonction : Passage des modes doux fournie par le tunnel en scénario souterrain et par les chaussées aériennes en scénario mixte. La fonction : « Assurer la sécurité du tube routier » est identique dans les deux scénarios. Le système est rappelé en Figure 33.

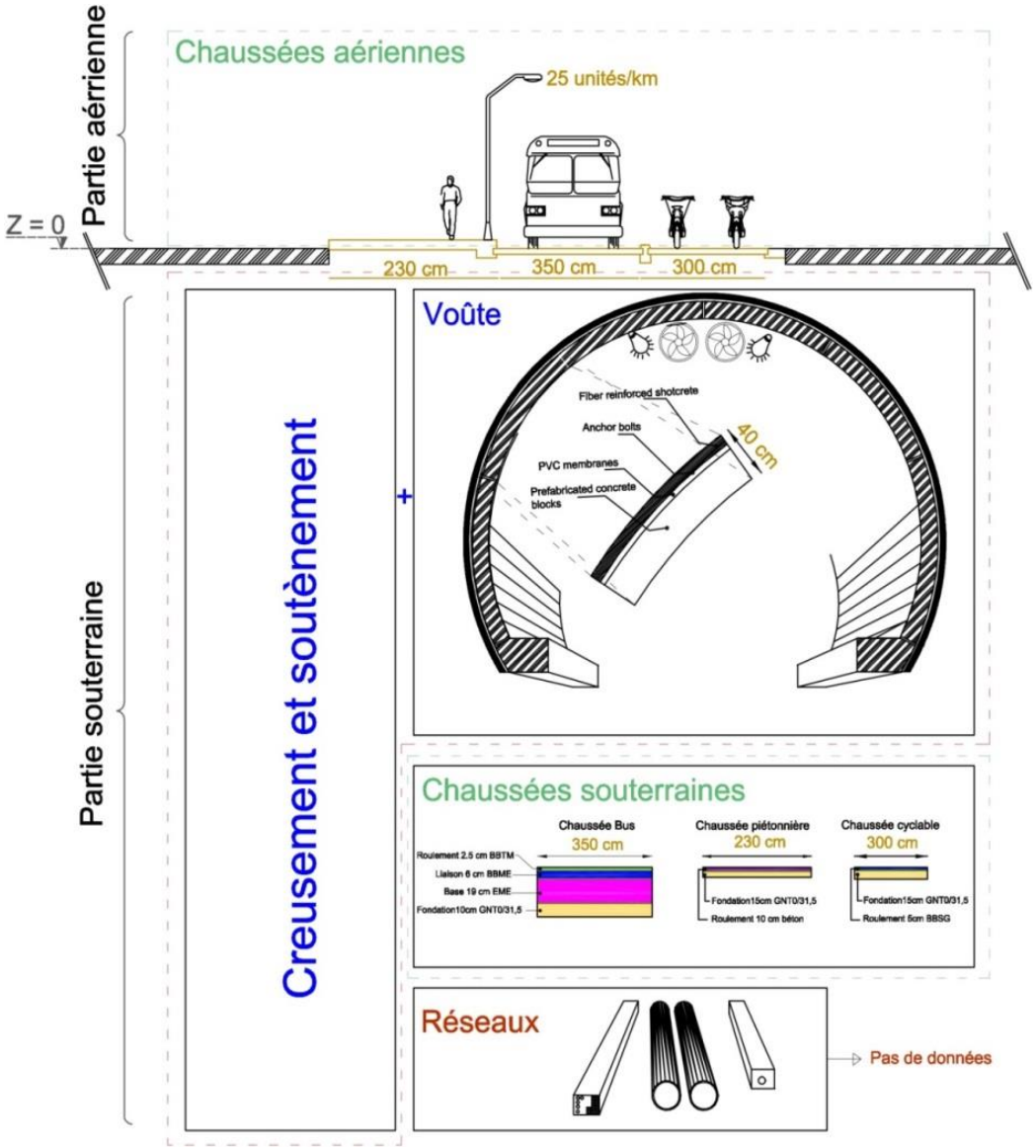


Figure 33 : Répartition en sous-systèmes (chaussées - voûte)

Le système évalué pour les deux scénarios se compose donc de deux sous-systèmes : le premier comprend la voûte (son creusement, son soutènement et sa construction) ; le second comprend les chaussées (aériennes dans le scénario mixte et souterraine dans le scénario souterrain). Les réseaux sont exclus du système pour une raison du manque des données. Ces deux sous-systèmes sont accompagnés des équipements associés nécessaires pour assurer leur exploitation. Les limites du système adoptées pour l'évaluation sont décrites en détails dans l'ANNEXE 3.

3.2.2. Données communes entre les deux scénarios

Le scénario mixte est fictif, toutes les valeurs de données de ce scénario sont donc hypothétiques. Les valeurs de ce scénario sont calculées proportionnellement aux dimensions (volume et quantité des matériaux excavés) de la galerie des modes doux réalisée.

Phase de construction

Creusement et soutènement de voûte

On considère que la galerie de sécurité aurait été construite en utilisant la même méthode que celle du tunnel modes doux (méthode traditionnelle à l'explosif). Le creusement (Figure 34) a été réalisé par le biais d'attaques ponctuelles pour les entrées qui sont composées de terrain meuble (**56 m** côté Saône et **79 m** côté Rhône). Le creusement à l'explosif a été réalisé pour la partie centrale de tunnel de **1500 m**, par cycles, chacun incluant plusieurs phases (foration, chargement de l'explosif, purge, soutènement, marinage - Tableau 59 et Tableau 62 en ANNEXE 1 -) [Sie, 2014]. Les matériaux excavés ont été stockés ou valorisés à **100 %** comme suit :

- **15%** sont réemployés en couche de roulement pour les voies du tunnel, dont une partie a été transportée pour la concasser[41] et puis elle a été ramenée au chantier (par camions) pour la réutilisation en fondation des chaussées.
- **78%** sont évacués par voie fluviale[42] jusqu'à Chasse-sur-Rhône **30 km**. Ces matériaux excavés ont été dirigés vers les bas-ports du quai d'Arloing à **3 km** du chantier, où un espace était disponible pour le stockage et un concasseur mobile était positionné.
- **7%** des matériaux excavés qui avaient été stockés temporairement sur le site de la Feyssine à **6 km** du chantier, ont été réutilisés dans d'autres chantiers à proximité.

[41] Un concasseur (TEREC PEGSON XA400S) a été mis en place en contrebas du quai Arloing, à 3km du chantier, à partir de mi-janvier 2011. Ce concasseur a été utilisé dès sa réception 6 jours sur 7 à partir de 8h30 et en continue jusqu'au soir, ce jusqu'à septembre 2011 [Sie, 2014].

[42] Barge de type "Apus" (82 m - 2.200 tonnes), chargement quotidien, en journée, sur une durée d'environ 6 heures, de 2 000 tonnes. Trois rotations sont effectuées chaque semaine (soit l'équivalent de 250 camions) permettant l'évacuation de 6 000 tonnes par semaine environ.

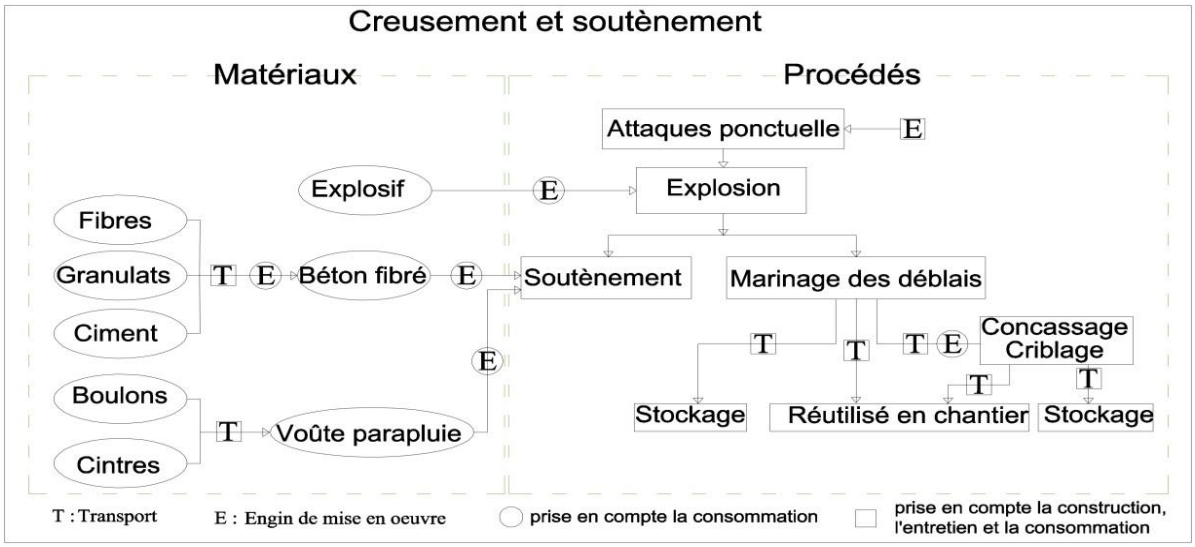


Figure 34 : Matériaux et procédés de creusement et soutènement

Construction de voûte

La construction de la voûte (Figure 35) se compose de : Le soutènement est fait par projection de béton fibré[43] avec un dosage en fibres[44] de **6kg/m³** [Larive et Chamoley, 2011 ; Bailly et Gluzicki, 2012]. Les cintres, les boulons d'ancrage (**Ø16mm**) et les boulons de pré-soutènement sont en acier. Le revêtement de la voûte a été réalisé par des blocs préfabriqués [Larive et Chamoley, 2011]. L'étanchéité de la voûte a été réalisée par des membranes PVC qui ont été mises en œuvre manuellement, les lés étaient de 2 mm d'épaisseur [Bailly et Gluzicki, 2012].

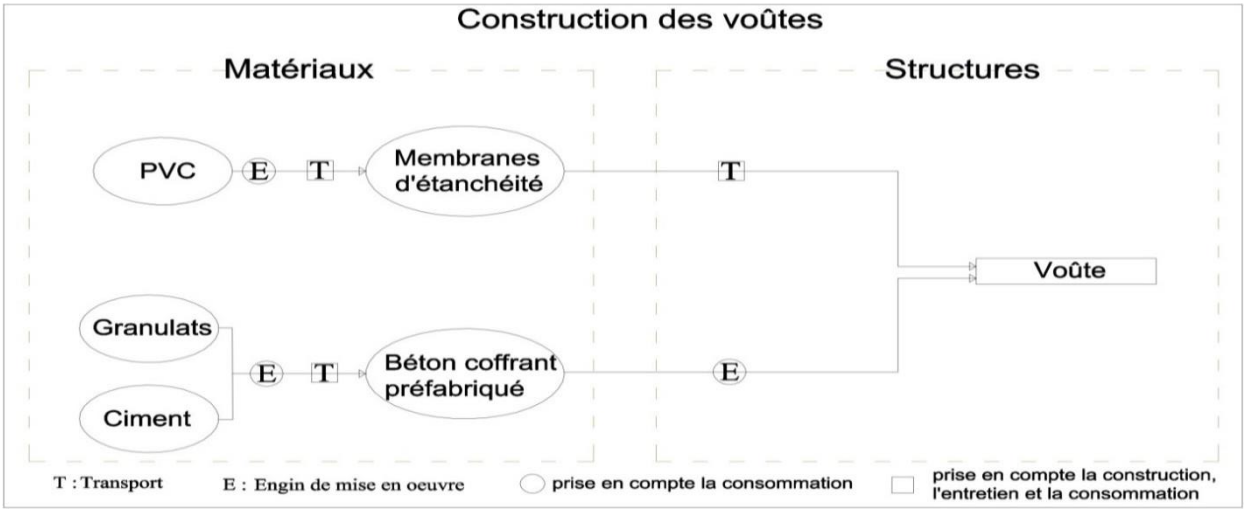


Figure 35 : Matériaux et procédés de construction de la voûte

Construction des chaussées

Les chaussées des modes doux sont identiques dans les deux scénarios, celles des chaussées actuellement existantes dans le tunnel de la Croix-Rousse [Grand-Lyon and Egis Tunnels, 2012], (Figure 37) :

[43] Dosage pris : ciment 380kg/m³ ; granulat 1750kg/m³ ; eau 160 kg/m³ ;
[44] Des fibres polymère (Meyco Fib SP650 de BASF CC)

- **Chaussée bus** : de type TC5, contient une couche de fondation de 10 cm de GNT 0/31.5 ; une couche de base de 19 cm d'EME ; une couche de liaison de 6 cm de BBME ; et une couche de roulement de 2.5 cm de BBTM.
- **Chaussée cyclable** : de type BBSG / GNT, contient une couche de base de 15 cm de GNT 0/31.5 ; et une couche de roulement de 5 cm de BBSG.
- **Chaussée piétonnière** : chaussée en béton, contient une couche de base de 15 cm de GNT 0/31.5 ; et une couche de 10 cm de béton.

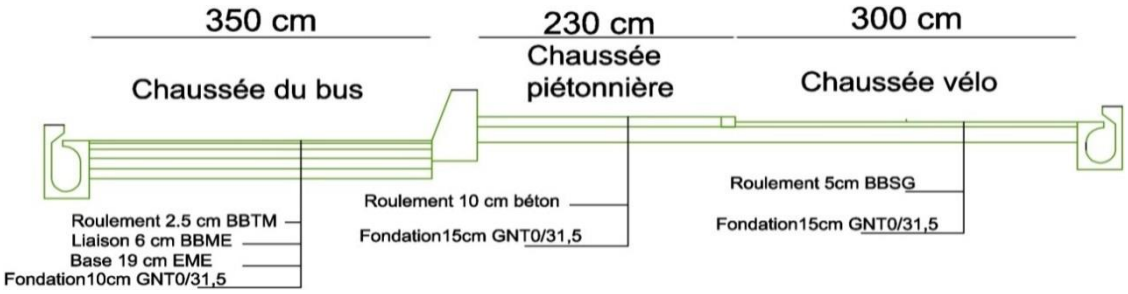


Figure 36 : Chaussées proposées pour le chemin aérien (mêmes chaussées pour le tunnel modes doux)

Les matériaux utilisés et les opérations de la construction des chaussées sont décrits dans le schéma suivant (Figure 37) :

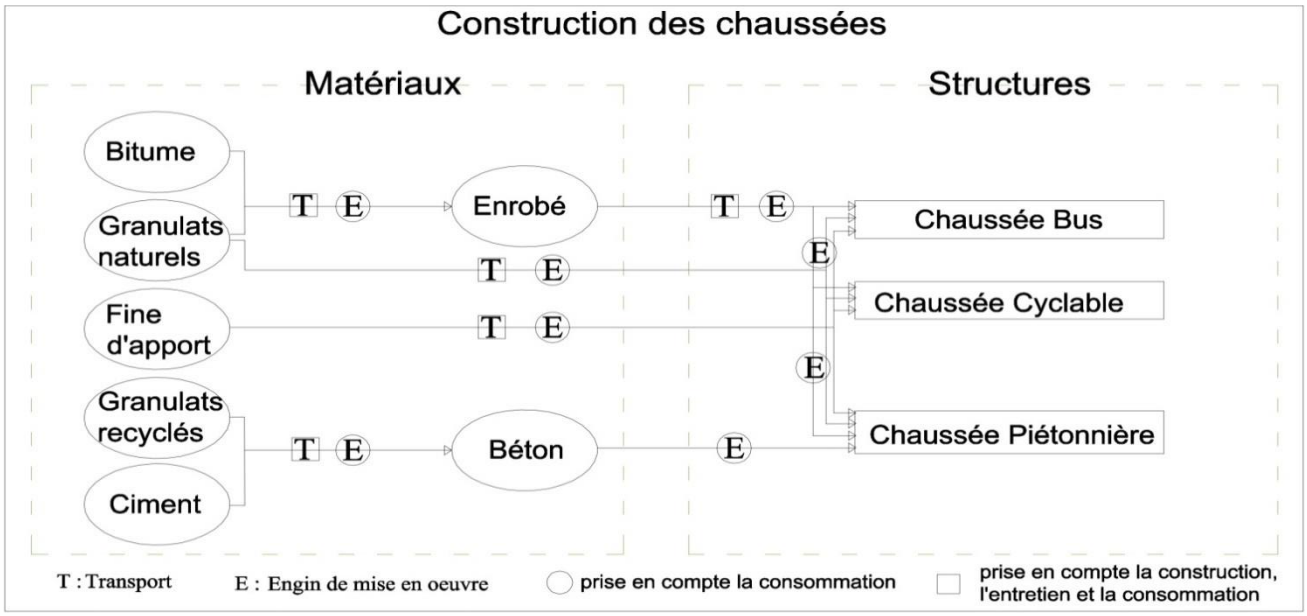


Figure 37 : Procédés de construction des chaussées

Phase d'exploitation

Concernant la phase d'exploitation (Figure 38, et Tableau 65, Tableau 66 en ANNEXE 1), la partie commune entre les deux scénarios est l'entretien et l'usage des chaussées, l'entretien des voûtes a été négligé pour une durée d'observation de 100 ans.

Entretien

Chaussée de bus : reconstruction de la couche de roulement tous les **10 ans**, et de la couche de liaison tous les **20 ans**. Ce scénario d'entretien semble surestimé étant donnée le trafic faible sur les chaussées.

Chaussées cyclable et piétonnières (aérienne et souterraine) : pas d'entretien compte tenu du trafic faible et de la nature des chaussées.

Exploitation

Pour les deux scénarios, elle comprend la ventilation et l'éclairage du tunnel, et l'éclairage des chaussées des modes doux, la valeur de sa consommation électrique est variée selon le scénario.

Usage

La phase d'usage est modélisée en faisant l'hypothèse d'un trafic de **62 bus** par jour[45]. En supposant un chiffre estimé de **14 passagers**[46] en moyenne par bus. Cela fait **868 personnes par jour**. Pour les vélos et les piétons une estimation de **770 personnes** par jour a été menée par la ville de Lyon [Grand-Lyon, 2013]. Les impacts pris en compte sont seulement ceux qui sont liés à l'usage du bus, donc la construction du bus, et la consommation du carburant.

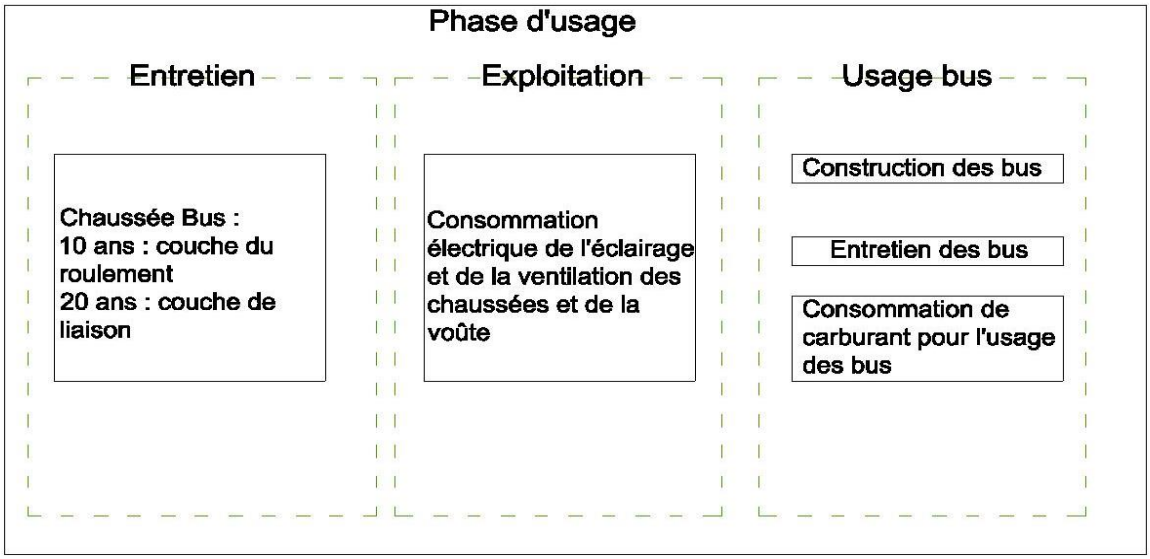


Figure 38 : Données prises en compte pour l'utilisation des voûtes et des chaussées

3.2.3. Scénario mixte : Galerie de sécurité simple et chemin aérien des modes doux

Ce scénario consiste à réaliser une galerie de sécurité simple pour évacuer les usagers du tunnel routier en cas d'urgence et pour permettre aux pompiers d'y arriver le plus rapidement. L'UF prend en compte les chaussées en surface. Le scénario mixte contient une phase de construction et une phase d'exploitation détaillées dans la suite.

Phase de construction : le tunnel est composé d'une voûte (Figure 39) de rayon de **275 cm** et d'hauteur de **380 cm** (dimensionnements issus de [CETU, 1990]). La longueur totale de la galerie est **1750 m**. La voûte creusé en méthode traditionnelle (à l'explosif) se compose d'une couche de béton projeté (avec les centres, les boulons d'ancrage et les boulons de pré soutènement) une couche de PVC pour assurer l'étanchéité et une couche de blocs de béton coffrant préfabriqué. Cette galerie de

[45] Bus C6 : http://www.tcl.fr/

[46] Le procédé « *Transport, regular bus, CH* » dans la base de données Ecoinvent prend en compte la construction de 0.071429 bus pour transporter une personne, ce qui revient à considérer un taux de remplissage de 14 personnes par bus.

sécurité comprend une chaussée piétonnière de largeur **500 cm** composée d'une couche de base GNT0/31.5 et une couche de béton (Tableau 63 en ANNEXE 1).

La Figure 36 a montré la structure commune des chaussées modes doux (Tableau 64 en ANNEXE 1), ces chaussées sont de longueur de **4000 m** dans ce scénario.

Phase d'exploitation : L'exploitation de la galerie de sécurité simple concerne l'éclairage (minimal et déclenché) et une ventilation automatique lors de l'utilisation. On fait l'hypothèse que cette galerie de sécurité est utilisée, dans le cas d'une évacuation, une fois tous les **10 ans**, et à chaque fois pour une durée de **10 h** (Tableau 65 en ANNEXE 1)**.**

L'exploitation du chemin en surface comprend la consommation électrique liée à l'éclairage, d'un seul côté comportant **100 ampoules** (pour chacune : puissance de **130 Wh** et durée d'utilisation de **10 h/j,** Tableau 65 en ANNEXE 1).

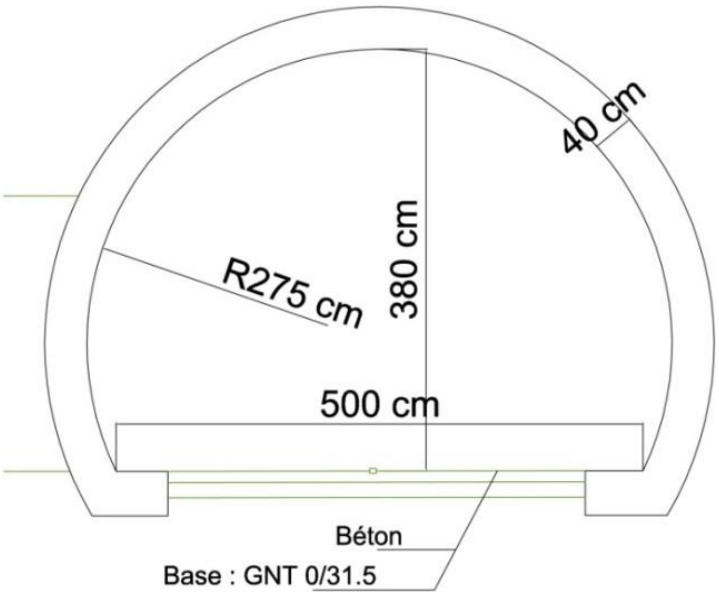


Figure 39 : Galerie de sécurité simple (Scénario mixte).

3.2.4. Scénario souterrain : Tunnel de sécurité et des modes doux

Phase de construction : la voûte a un rayon de **515 cm**, une épaisseur de **40 cm** et hauteur de **650 cm** (Figure 40). La quantité de matériaux excavés est de **160000 m^3** [Sie, 2014] (Tableau 59 en ANNEXE 1). Le soutènement s'est fait par projection de béton fibré (**15000 m^3**) composé du béton fabriqué sur place mélangé avec de fibre polymère. Les cintres (**1300 t**), les boulons d'ancrage (**20000 m, Ø16mm**) et boulons de pré-soutènement (**6.5 t**) sont en acier. La quantité des blocs préfabriqués pour le revêtement est **20000 m^3** [Larive et Chamoley, 2011] (Tableau 60 en ANNEXE 1). Les chaussées dans ce scénario sont de longueur de **1750 m** (Tableau 61 en ANNEXE 1).

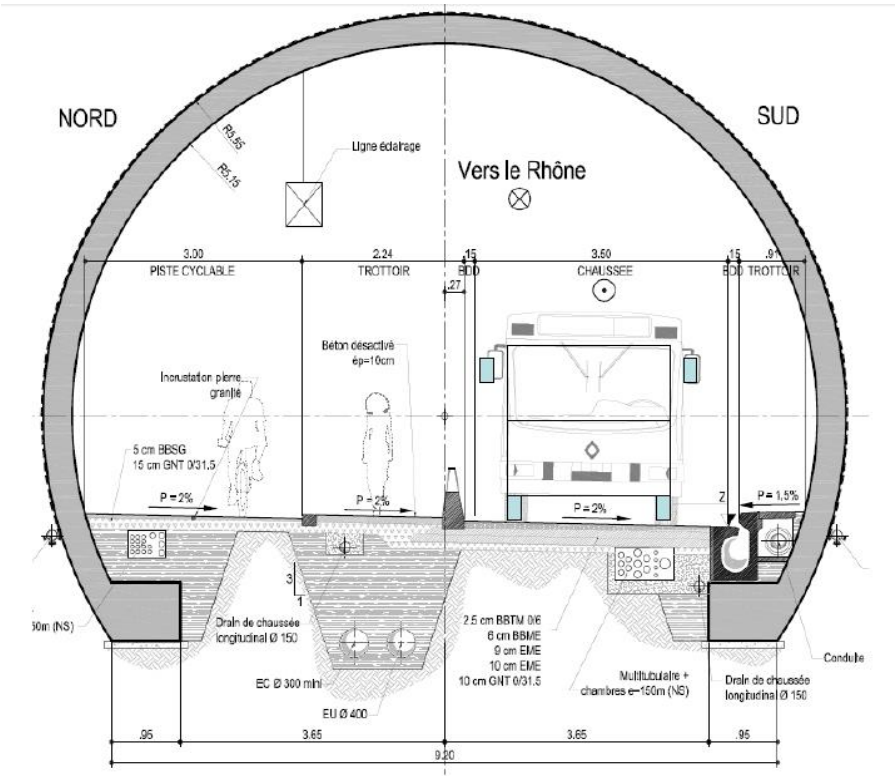


Figure 40 : Section traversable du tunnel modes doux (scénario souterrain). Source : **[Larive et Chamoley, 2011]**

Phase d'exploitation : cela comprend la consommation électrique de la ventilation, l'éclairage et la sécurité du tunnel. Cette donnée s'est basé sur les retours d'expériences dans les tunnels routiers 250 kWh/m/an [D'aloia et al, 2011]. L'hypothèse retenue est 20% de cette valeur soit 50 kWh/m/an, vu le faible trafic passé par le tunnel. On tient également compte du fait que le tunnel se ferme 5h par jour entre minuit et 05h du matin (soit **19 h** d'exploitation) [Grand-Lyon, 2013], (Tableau 66 en ANNEXE 1).

3.3. Choix de logiciels et de bases de données

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés à deux logiciels, *ECORCE* et *OpenLCA*. Ces deux logiciels ont été présentés en détails dans la première partie de ce chapitre. Ils ont été choisis parce que chacun entre eux représente une capacité différente à quantifier les impacts environnementaux. *ECORCE* est un éco-comparateur pour les structures routières, il est capable à quantifier les impacts environnementaux liés aux chaussées [Jullien et al, 2015], il prend uniquement en compte la phase de construction et la maintenance mais pas l'exploitation. OpenLCA a la capacité à accueillir différentes bases de données, notamment *ECOINVENT* qui est représentative à l'échelle européenne voire mondiale et contient des données génériques.

3.3.1. Outil logiciel ECORCE

En utilisant le logiciel *ECORCE*, nous ne pouvons pas calculer de manière complète les flux associés à un tunnel, car il y a d'autres matériaux utilisés pour sa construction dont les données ne sont pas incluses dans *ECORCE* (les matériaux des travaux d'étanchéité PVC, PE, explosif, etc.) ; Les cintres, les boulons d'ancrage et tous les travaux de mise en forme et d'assemblage de l'acier ne peuvent pas être calculés car *ECORCE* prend en compte un seul type d'acier, celui du ferraillage [Jullien et al, 2015] ; Les valeurs prises en compte pour la construction de la voûte en utilisant *ECORCE* sont seulement les quantités du béton et de l'acier utilisées. Aussi, pour la consommation du carburant

des engins du creusement, elle a été calculée en fonction du volume des matériaux excavés et des heures du travail.

Les indicateurs disponibles sur le logiciel *ECORCE* sont : 1) Consommation d'énergie (MJ) ; 2) Changement climatique (kg eq.CO_2/t) ; 3) Consommation d'eaux (m^3/t) ; 4) Acidification (kg eq.SO_2/t) ; 5) Eutrophisation (kg eq.PO_4/t) ; 6) Formation d'ozone (kg eq.éthylène/t) ; 7) Eco-toxicité chronique (kg eq. 1,4DCB/t) ; 8) Toxicité chronique (kg eq. 1,4DCB/t).

3.3.2. Outil logiciel OpenLCA

L'utilisation du logiciel *OpenLCA* a offert la possibilité de créer une méthode de calcul des impacts en ressemblant à la fois plusieurs méthodes déjà existantes (présentées dans le Tableau 7). Le choix de ces indicateurs (Tableau 10) s'est basé sur les méthodes utilisées dans la littérature (Tableau 9), les méthodes du calcul sont présentées en ANNEXE 4. Une méthode a donc créée à partir de trois méthodes existantes :

- **Cumulative energy demand (CED)** [Frischknecht, 2007] pour la consommation des ressources énergétiques (flux): Cette méthode se focalise sur l'énergie et l'intègre la consommation en énergie primaire tout au long du cycle de vie que ce soit l'énergie directe ou indirecte. Cette énergie indirecte appelée également énergie grise correspond à l'énergie associée à l'utilisation de matières premières notamment.
- **EDIP 2003** [Potting et al, 2005] pour la production des déchets (flux) : elle est une méthodologie danoise dont la première version date de 1997, elle a été mise à jour en 2003, elle comprend 18 catégories d'impacts, le but de la méthode est de spatialiser les impacts où la zone géographique concerné est l'Europe.
- Les autres catégories d'impacts ont été évaluées dans la littérature selon deux méthodes ReCiPe et CML. La méthode retenue dans ce travail est **CML2001** [Guinée et al, 2001] car elle est la méthode la plus utilisée en Europe [Jolliet et al, 2010].

Tableau 10 : Indicateurs environnementaux retenus pour l'évaluation par OpenLCA

N°	Indicateur (nom original en anglais donné dans le logiciel)	Thème environnemental	Unité	Méthode du calcul retenue
1	Biomass - renewable energy resources, biomass	Consommation des ressources d'énergie renouvelable	MJ-Eq	CED [Frischknecht, 2007]
2	geothermal - renewable energy resources, geothermal, converted			
3	wind - renewable energy resources, kinetic (in wind), converted			
4	solar - renewable energy resources, solar, converted			
5	water - renewable energy resources, potential (in barrage water), converted			
6	fossil - non-renewable energy resources, fossil	Consommation des ressources d'énergie non-renouvelable		
7	primary forest - non-renewable energy resources, primary forest			
8	nuclear - non-renewable energy resources, nuclear			
9	environmental impact - land filling, bulk waste	Production de déchets	kg waste	EDIP 2003 [Potting et al, 2005]
10	environmental impact - land filling, radioactive waste			
11	freshwater aquatic ecotoxicity - FAETP infinite	Ecotoxicité	kg 1,4-DCB-Eq	CML2001 [Guinée et al, 2001]
12	freshwater sediment ecotoxicity - FSETP infinite			
13	marine aquatic ecotoxicity - MAETP infinite			
14	marine sediment ecotoxicity - MSETP infinite			
15	terrestrial ecotoxicity - TAETP infinite			
16	human toxicity - HTP infinite	Toxicité humaine	kg 1,4-DCB-Eq	CML2001 [Guinée et al, 2001]
17	acidification potential - average European	Acidification des sols et de l'eau	kg SO_2-Eq	CML2001 [Guinée et al, 2001]
18	climate change - GWP 100a	Réchauffement climatique	kg CO_2-Eq	CML2001 [Guinée et al, 2001]
19	eutrophication potential - generic	Eutrophisation	kg PO_4-Eq	CML2001 [Guinée et al, 2001]
20	land use - competition	Occupation du sol	m^2a	CML2001 [Guinée et al, 2001]
21	photochemical oxidation (summer smog) - high NOx POCP	Formation d'ozone photochimique	kg ethylene-Eq	CML2001 [Guinée et al, 2001]
22	resources - depletion of abiotic resources	Epuisement des ressources abiotiques	kg antimony-Eq	CML2001 [Guinée et al, 2001]
23	stratospheric ozone depletion - ODP steady state	Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC-11-Eq	CML2001 [Guinée et al, 2001]

4. Problématiques étudiées avec les résultats ACV

Les calculs et résultats ACV permettent d'envisager différentes problématiques en lien avec le développement d'une méthodologie spécifique à l'évaluation d'aménagements souterrains :

- **Problématique I** : Quantification des impacts environnementaux liés à la construction et à l'entretien, en utilisant le logiciel *ECORCE*. Ces calculs sont faits avec ce logiciel parce qu'il était disponible au début du travail de thèse avec un niveau d'expertise sur son utilisation. L'affectation des impacts aux différents modes d'usages n'est pas une question du logiciel, elle est abordée avec *ECORCE* en début de thèse, malgré sa base de données incomplète pour le souterrain. Cela peut représenter un point méthodologique qui permet de mettre en évidence l'importance des modes de transport et des phases du cycle de vie de l'ouvrage sur le volet environnemental.
- **Problématique II** : Utilisation du logiciel *OpenLCA* avec la base de données *ECOINVENT* pour quantifier les mêmes impacts liés à la construction et à l'entretien mais pour toute la structure des ouvrages. La comparaison, entre les résultats obtenus avec les deux logiciels, permet de comprendre les différences entre les deux logiciels et d'en choisir un pour la suite des calculs. La question dans ce cas est de retenir un logiciel qui permet de faire l'ACV la plus complète possible des aménagements étudiés. Cela se fait en choisissant les mêmes indicateurs.
- **Problématique III** : Quantification des impacts environnementaux liés à l'ensemble du cycle de vie avec le logiciel choisi en prenant en compte la phase d'exploitation de 100 ans. La comparaison, entre les deux scénarios, permet de choisir les indicateurs qui peuvent mettre en avant la spécificité du souterrain. On examine ensuite un futur usage de l'ouvrage. On cherche à déterminer dans quelle mesure le modèle ACV réalisé permet de répondre à ce type de question en différenciant des usages.

4.1. Impacts liés à la construction et à l'entretien (*ECORCE*)

4.1.1. Présentation des résultats obtenus

Les Tableau 11 et Tableau 12 présentent les résultats obtenus en utilisant l'outil logiciel *ECORCE*. Ces résultats prennent en compte la phase de construction de la voûte et des chaussées et l'entretien des chaussées pour une période de service de 100 ans.

Tableau 11 : Impacts liés à la construction et l'entretien des chaussées et de la voûte pour le scénario mixte

Indicateur	Scénario mixte (SC1) (galerie de sécurité simple + chemin aérien)			
	Creusement	Voûte	Chaussées	Total
Consommation d'énergie (MJ)	3,70E+06	5,14E+07	1,02E+07	6,53E+07
Changement climatique (kg eq.CO_2/t)	2,92E+05	7,09E+06	9,17E+05	8,29E+06
Consommation d'eau (M^3/t)	3,40E+02	1,82E+04	1,71E+03	2,03E+04
Acidification (kg eq.SO_2/t)	2,81E+02	6,62E+03	1,15E+03	8,06E+03
Eutrophisation (kg eq.PO_4/t)	7,48E+01	9,72E+02	2,13E+02	1,26E+03
Formation d'ozone (kg eq.éthylène/t)	3,33E+02	2,11E+03	6,25E+02	3,07E+03
Eco-toxicité chronique (kg eq. 1,4DCB/t)	6,47E+06	3,31E+08	4,05E+07	3,78E+08
Toxicité chronique (kg eq. 1,4DCB/t)	3,64E+04	3,92E+05	5,24E+04	4,81E+05

Tableau 12 : Impacts liés à la construction et l'entretien des chaussées et de la voûte pour le scénario souterrain

Indicateur	Scénario souterrain (SC2) (Tunnel modes doux)			
	Creusement	Voûte	Chaussées	Total
Consommation d'énergie (MJ)	1,22E+07	9,78E+07	3,58E+06	1,14E+08
Changement climatique (kg eq.CO_2/t)	9,62E+05	1,35E+07	2,80E+05	1,48E+07
Consommation d'eau (M^3/t)	1,12E+03	3,49E+04	4,53E+02	3,64E+04
Acidification (kg eq.SO_2/t)	9,58E+02	1,27E+04	3,80E+02	1,40E+04
Eutrophisation (kg eq.PO_4/t)	2,52E+02	1,85E+03	7,14E+01	2,18E+03
Formation d'ozone (kg eq.éthylène/t)	1,11E+03	3,98E+03	2,30E+02	5,32E+03
Eco-toxicité chronique (kg eq. 1,4DCB/t)	2,14E+07	6,34E+08	1,19E+07	6,67E+08
Toxicité chronique (kg eq. 1,4DCB/t)	1,20E+05	7,44E+05	1,59E+04	8,80E+05

La Figure 41 montre l'écart entre les deux scénarios qui est quasiment le même pour les sept indicateurs. En considérant le scénario mixte est le scénario de référence (100%), on constate que le scénario souterrain est plus impactante en gardant toujours le même écart. Cela est justifié par les dimensionnements proportionnels posés pour le scénario mixte par rapport au scénario souterrain.

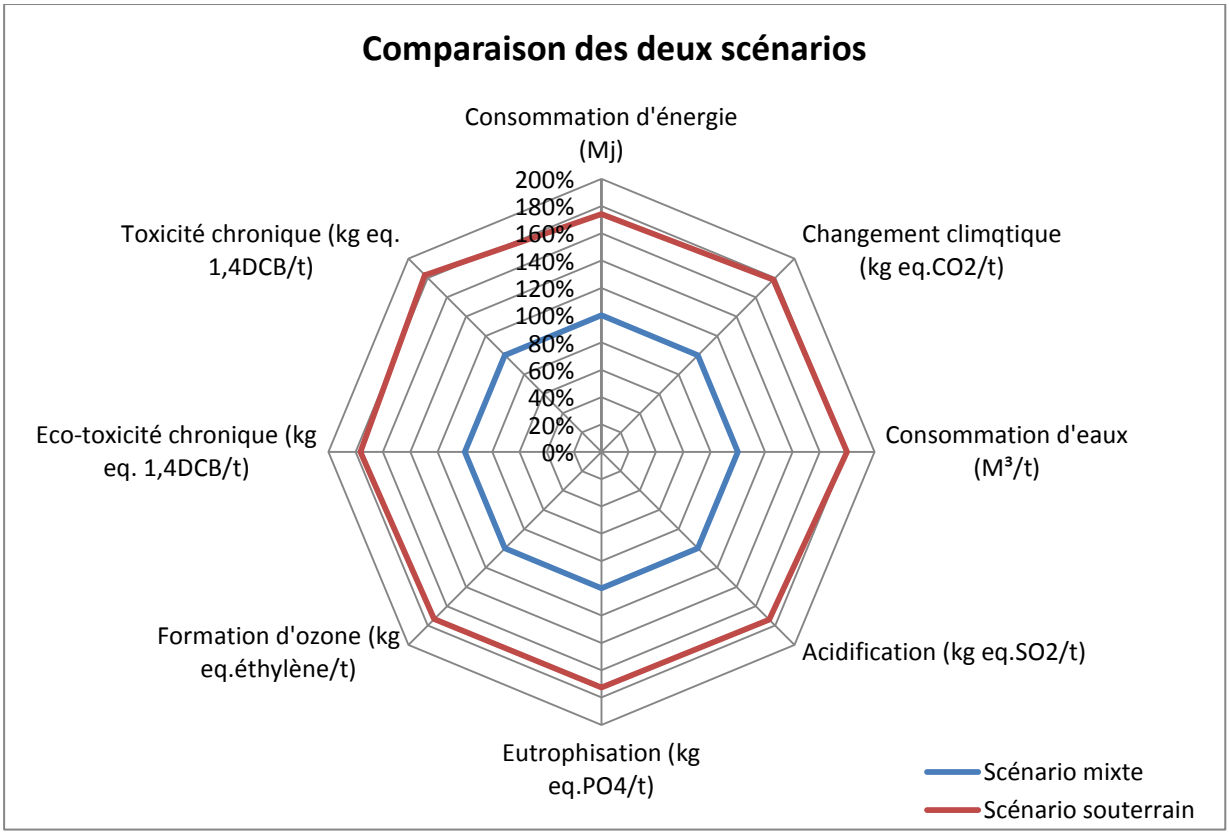


Figure 41 : Ecart entre les deux scénarios pour la phase de construction

La partie importante des impacts est liée à la construction de la voûte, Figure 42. Cela est dû au fait que le tunnel du scénario souterrain est proportionnellement plus grand. Ainsi que la construction des chaussées du scénario mixte est plus importante, cela est lié au chemin plus long.

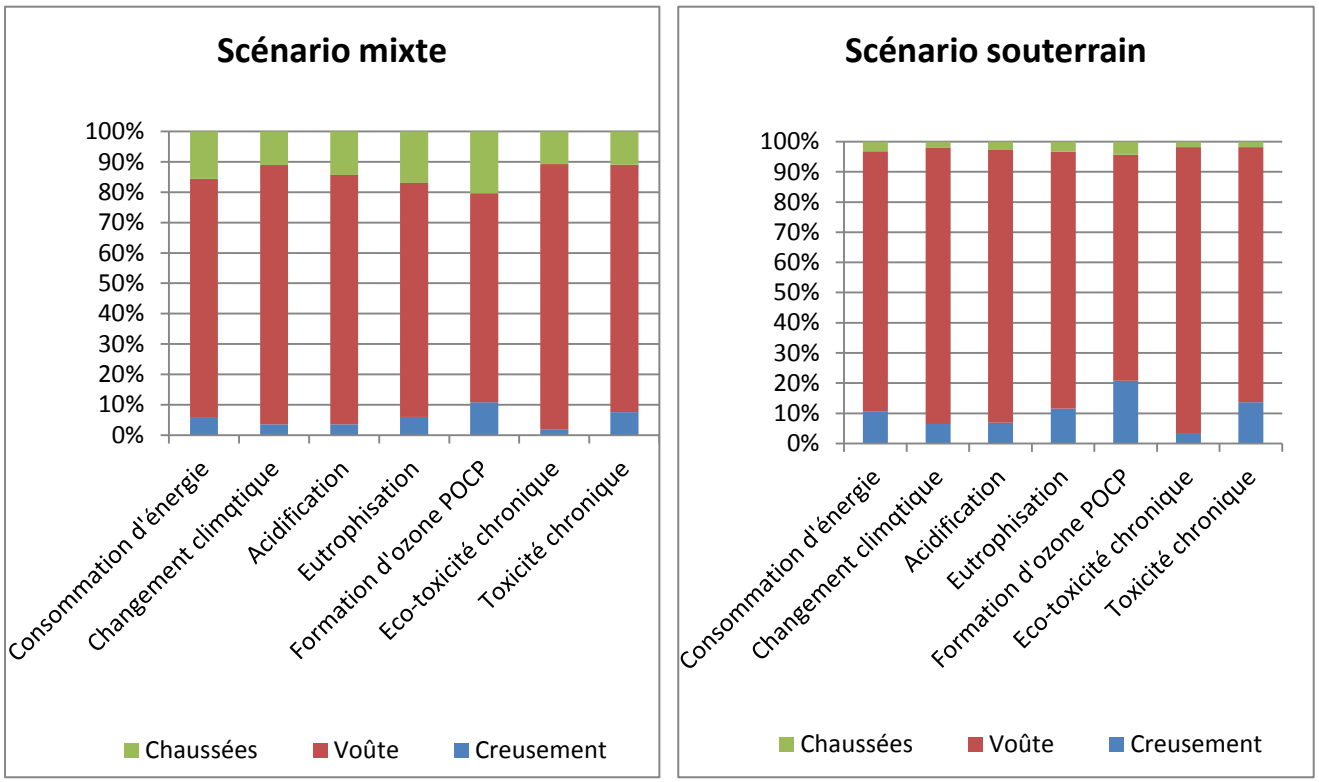


Figure 42 : Contribution des différentes opérations dans la phase de construction - ECORCE

Les résultats indiquent l'importance du creusement et de la construction des voûtes dans les deux scénarios, alors que les modes doux n'en profitent que dans le scénario souterrain.

4.1.2. Affectation des impacts aux modes d'usagers

Cela conduit à poser la première problématique : affecter les impacts environnementaux dans les deux scénarios à plusieurs modes de transport. L'affectation des impacts se veut alors un point méthodologique purement illustratif, elle permet de mettre en évidence l'importance du mode/scénario pour étudier leur poids environnemental [Audi et al, 2015].

Selon le Grand-Lyon [Grand-Lyon, 2013], trois modes de transport sont concernés : « Piétons » 335 personnes/jour, « vélos » 335 personnes par jour et « bus » 868 personnes/jour. Les impacts sont alloués aux modes doux selon les hypothèses suivantes :

- Pour le scénario mixte, les modes doux exploitent seulement les chaussées aériennes, l'affectation concerne ainsi les impacts liés à la construction et l'entretien des chaussées.
- Pour le scénario souterrain, les modes doux utilisent le tunnel et les chaussées, l'affectation concerne donc l'ensemble des impacts liés au tunnel et aux chaussées.

Ces hypothèses peuvent changer selon l'objectif de l'étude. L'affectation des impacts se fait par règle de trois, et donne les résultats suivants (Figure 43). Dans cette figure les modes « vélos » et « piétons » ont les mêmes valeurs, alors ils sont présentés par une seule barre (Piétons ou vélos).

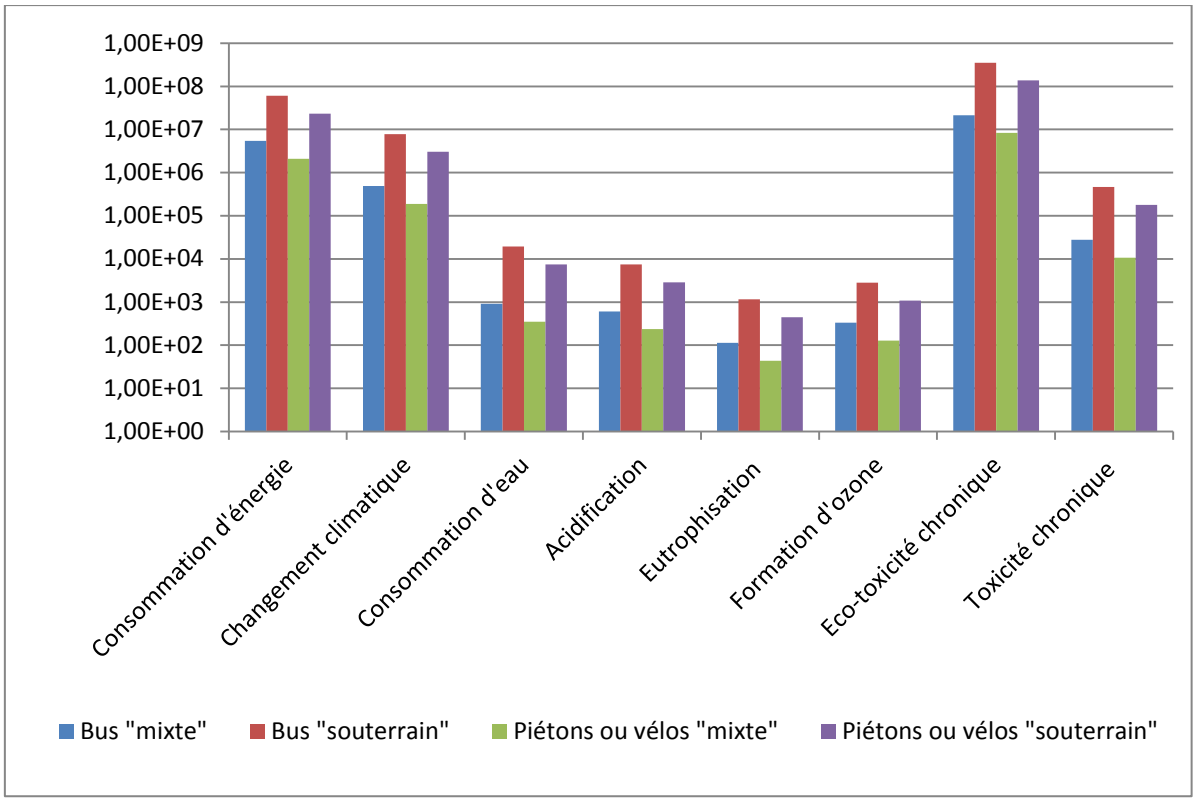


Figure 43: Affectation des impacts aux différents modes doux (échelle logarithmique) - ECORCE

Dans les deux scénarios, le mode « bus » prédominant par rapport aux deux autres modes parce que le nombre des usagers de ce mode est plus important.

D'ailleurs, les modes doux dans le scénario souterrain montrent plus d'impacts que dans le scénario mixte, cela est dû à l'intégration du creusement et de construction du tunnel au calcul des modes doux.

4.2. Comparaison des résultats obtenus par les deux logiciels

Une comparaison des résultats obtenus avec les deux logiciels n'est possible que sur la phase de construction et cela uniquement pour les indicateurs communs[47] (Figure 44). On n'observe une différence que pour deux indicateurs : la consommation totale d'énergie (renouvelable et non renouvelable) et la formation de la couche d'ozone (POCP).

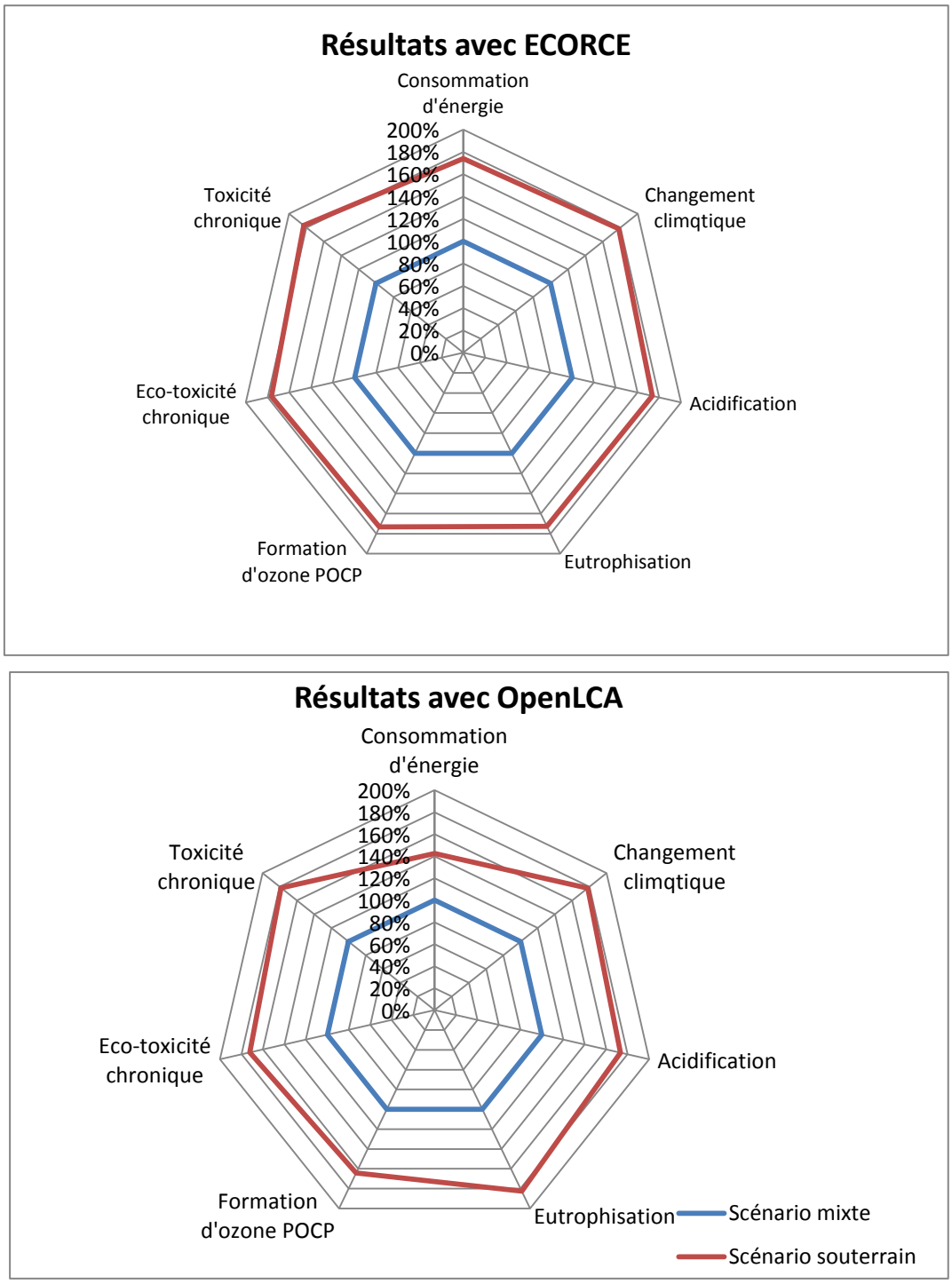


Figure 44 : Comparaison des résultats de la construction et de l'entretien utilisant les deux logiciels

[47] Sachant que les deux bases de données n'ont pas les mêmes méthodes du calcul, mais la comparaison a pour but d'illustrer les différences de des résultats obtenus, données et les raisons pour lesquelles nous avons choisi l'une des deux.

Indicateur « consommation d'énergie » : Les résultats obtenus avec OpenLCA utilisent la méthode de calculs CED (cumulative energy demand) et la valeur indiquée regroupe les indicateurs d'énergie renouvelable et non renouvelable. Cette méthode du calcul intègre l'énergie matière, ce qui n'est pas le cas dans *ECORCE*. Le seul matériau présent dans *ECORCE* qui contient de l'énergie matière en quantité importante est le bitume. Le classement des variantes d'aménagement est le même.

Indicateur « POCP » : La différence majeure semble provenir du procédé lié à la centrale d'enrobage. Dans la base de données *ECORCE* la centrale d'enrobage compte pour **25%** à **30%** de la POCP totale. Dans *OpenLCA*, cette valeur est très faible (**0.2%** à **1%** de la POCP totale). Premièrement, les deux méthodes de calcul du POCP sont différentes (pas les mêmes facteurs de caractérisation). Les émissions des centrales d'enrobage dans *ECORCE* proviennent de valeurs mesurées représentatives du procédé (par exemple un flux de CO multiplié par 30).

On cherche à se mettre ensuite dans une situation comparable. On estime la valeur de l'énergie matière dans le bitume en multipliant la quantité du bitume de chaque scénario par (41.87 MJ/kg, NF EN 15804+A1 [AFNOR, 2014a], facteur de caractérisation concernant l'épuisement des ressources abiotiques). On peut ajouter à cette valeur la consommation d'énergie obtenue par *ECORCE* pour avoir des résultats comparables à ceux d'*OpenLCA*. On rajoute également l'impact manquant de POCP dans la base de données *ECOINVENT* lié à la centrale d'enrobage (Tableau 13).

Tableau 13 : Valeurs ajoutées aux résultats *ECORCE* pour la compariason

	Scénario mixte	Scénario souterrain
Energie (MJ)	2,34E+07	1,03E+07
POCP (kg eq.éthylène/t)	1,76E+02	7,68E+01

Les nouveaux résultats obtenus (Figure 45) deviennent proches, cela confirme la comparabilité des logiciels en termes de classement de variantes.

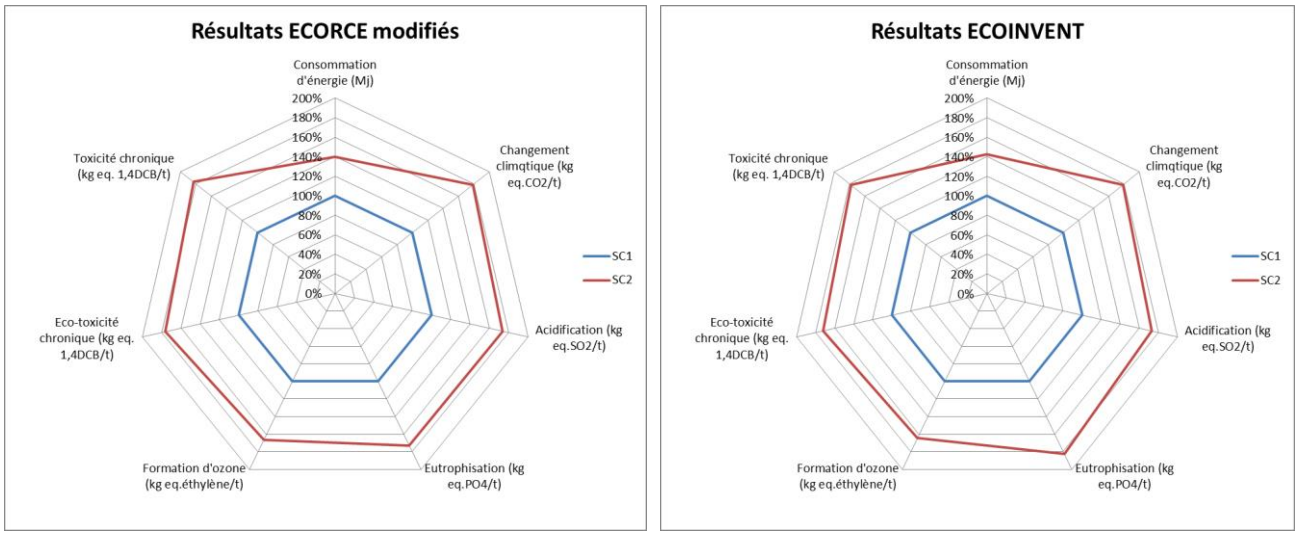


Figure 45 : Comparaison entre les deux résultats après avoir modifié ceux d'*ECORCE*

On peut conclure sur le fait que les procédés *OpenLCA* ne sont pas toujours parfaitement adaptés au contexte parce que les données sont moyennées et pas forcément représentatives du procédé réel contrairement à *ECORCE* où les données sont mesurées (ex. centrale d'enrobage). Cependant

ECOINVENT est une base de donnes environnementales plus complète que celle d'*ECORCE* qui est spécialisé aux structures routières.

4.3. Impacts environnementaux de l'ensemble du cycle de vie des scénarios d'aménagement étudiés

Les tableaux (Tableau 14, Tableau 15) présentent les résultats obtenus à partir des procédés issus du logiciel *OpenLCA*, et des méthodes de calculs des impacts définies dans le Tableau 10. Ces résultats sont des impacts liés à l'ensemble du cycle de vie : la phase de la construction et de l'exploitation.

4.3.1. Présentation des résultats obtenus

Tableau 14 : Résultats obtenus pour le scénario mixte - OpenLCA

Indicateur	Scénario mixte (Galerie de sécurité simple + Chemin aérien)								TOTAL SC1
	Phase de construction			Total Const.	Phase d'exploitation			Total Exploit.	
	Creusement +	Voûte	Chaussées		Eclairage +	Entretien	Usage		
Energie renouvelable - Biomasse (MJ-Eq)	2,06E+05	1,23E+05	6,15E+04	3,91E+05	2,60E+05	5,15E+04	1,64E+05	4,76E+05	8,67E+05
Energie renouvelable - Géothermie (MJ-Eq)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Energie renouvelable - Eolienne (MJ-Eq)	5,27E+04	1,48E+04	1,51E+04	8,26E+04	3,23E+04	1,50E+04	6,06E+04	1,08E+05	1,91E+05
Energie renouvelable - Solaire (MJ-Eq)	9,16E+02	4,19E+02	3,37E+02	1,67E+03	9,61E+01	2,82E+02	1,18E+03	1,56E+03	3,23E+03
Energie renouvelable - Hydrolique (MJ-Eq)	1,21E+06	1,03E+06	5,29E+05	2,77E+06	2,13E+06	3,53E+05	1,73E+06	4,22E+06	6,98E+06
Total énergie renouvlable	**1,47E+06**	**1,17E+06**	**6,06E+05**	**3,24E+06**	**2,42E+06**	**4,20E+05**	**1,96E+06**	**4,80E+06**	8,05E+06
Energie non-renouvelable - Fossile (MJ-Eq)	3,30E+07	1,95E+07	3,73E+07	8,98E+07	5,05E+06	4,96E+07	1,80E+08	2,34E+08	3,24E+08
Energie non-renouvelable - Forêt primaire (MJ-Eq)	5,55E+01	4,63E+01	7,43E+01	1,76E+02	3,49E+00	8,05E+01	2,26E+02	3,10E+02	4,86E+02
Energie non-renouvelable - Nucléaire (MJ-Eq)	5,20E+06	4,33E+06	2,43E+06	1,20E+07	5,09E+07	1,73E+06	7,73E+06	6,03E+07	7,23E+07
Total énergie non-renouvlable	**3,82E+07**	**2,38E+07**	**3,98E+07**	**1,02E+08**	**5,59E+07**	**5,13E+07**	**1,88E+08**	**2,95E+08**	3,96E+08
Mise en décharge - Déchets en vrac (kg waste)	4,50E+05	2,88E+05	1,36E+05	8,74E+05	3,42E+04	7,61E+04	1,38E+05	2,48E+05	1,12E+06
Mise en décharge - Déchets radioactifs (kg waste)	6,96E+01	4,87E+01	3,34E+01	1,52E+02	7,51E+02	2,39E+01	1,06E+02	8,81E+02	1,03E+03
FAETP infinite (kg 1,4-DCB-Eq)	9,64E+05	9,73E+04	6,78E+04	1,13E+06	1,02E+05	6,35E+04	4,08E+05	5,73E+05	1,70E+06
FSETP infinite (kg 1,4-DCB-Eq)	2,29E+06	2,15E+05	1,53E+05	2,66E+06	2,23E+05	1,45E+05	9,21E+05	1,29E+06	3,95E+06
MAETP infinite (kg 1,4-DCB-Eq)	1,40E+09	2,74E+08	3,20E+08	2,00E+09	5,08E+08	3,64E+08	1,63E+09	2,50E+09	4,50E+09
MSETP infinite (kg 1,4-DCB-Eq)	9,89E+08	1,53E+08	2,15E+08	1,36E+09	2,37E+08	2,57E+08	1,02E+09	1,51E+09	2,87E+09
TAETP infinite (kg 1,4-DCB-Eq)	4,50E+04	6,95E+03	3,55E+03	5,55E+04	8,17E+03	3,32E+03	2,25E+04	3,40E+04	8,95E+04
HTP infinite (kg 1,4-DCB-Eq)	2,55E+06	5,69E+05	4,33E+05	3,55E+06	5,94E+05	4,57E+05	2,68E+06	3,73E+06	7,29E+06
acidification (kg SO_2-Eq)	1,12E+04	7,55E+03	5,06E+03	2,38E+04	2,55E+03	5,59E+03	7,61E+04	8,42E+04	1,08E+05
Changement climatique (kg CO_2-Eq)	4,00E+06	3,82E+06	1,14E+06	8,97E+06	4,49E+05	8,13E+05	1,26E+07	1,38E+07	2,28E+07
Eutrophisation (kg PO_4-Eq)	2,15E+03	1,23E+03	7,15E+02	4,10E+03	2,56E+02	7,01E+02	1,75E+04	1,84E+04	2,25E+04
Occupation du sol (m^2a)	9,98E+04	8,92E+04	2,90E+04	2,18E+05	1,20E+04	1,49E+04	3,78E+04	6,47E+04	2,83E+05
Formation d'Ozone photochimique-high NOx POCP (kg ethylene-Eq)	5,84E+02	2,96E+02	2,63E+02	1,14E+03	9,70E+01	3,15E+02	2,61E+03	3,03E+03	4,17E+03
Consommation des ressources abiotiques (kg antimony-Eq)	1,72E+04	1,00E+04	1,70E+04	4,42E+04	2,98E+03	2,23E+04	8,07E+04	1,06E+05	1,50E+05
Destruction de la couche d'ozone - ODP steady state (kg CFC-11-Eq)	2,10E-01	1,36E-01	3,22E-01	6,69E-01	2,28E-02	4,27E-01	2,05E+00	2,50E+00	3,17E+00

Tableau 15 : Résultats obtenus pour le scénario souterrain - OpenLCA

Indicateur	Scénario souterrain (Tunnel modes doux)								TOTAL SC2
	Phase de construction			Total Const.	Phase d'exploitation			Total Exploit.	
	Creusement +	Voûte	Chaussées		Eclairage +	Entretien	Usage		
Energie renouvelable - Biomasse (MJ-Eq)	4,12E+05	2,35E+05	1,99E+04	6,68E+05	1,05E+05	2,25E+04	7,16E+04	1,99E+05	8,67E+05
Energie renouvelable - Géothermie (MJ-Eq)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Energie renouvelable - Eolienne (MJ-Eq)	1,07E+05	2,83E+04	5,65E+03	1,41E+05	1,31E+04	6,53E+03	2,64E+04	4,61E+04	1,87E+05
Energie renouvelable - Solaire (MJ-Eq)	1,85E+03	8,03E+02	1,20E+02	2,77E+03	3,89E+01	1,23E+02	5,14E+02	6,76E+02	3,45E+03
Energie renouvelable - Hydrolique (MJ-Eq)	2,40E+06	1,97E+06	1,70E+05	4,54E+06	8,63E+05	1,59E+05	7,56E+05	1,78E+06	6,32E+06
Total énergie renouvlable	**2,92E+06**	**2,23E+06**	**1,96E+05**	**5,35E+06**	**9,81E+05**	**1,88E+05**	**8,55E+05**	**2,02E+06**	7,37E+06
Energie non-renouvelable - Fossile (MJ-Eq)	7,15E+07	3,72E+07	1,53E+07	1,24E+08	2,05E+06	2,15E+07	7,84E+07	1,02E+08	2,26E+08
Energie non-renouvelable - Forêt primaire (MJ-Eq)	1,24E+02	8,88E+01	2,91E+01	2,42E+02	1,42E+00	3,50E+01	9,84E+01	1,35E+02	3,77E+02
Energie non-renouvelable - Nucléaire (MJ-Eq)	1,04E+07	8,26E+06	8,27E+05	1,95E+07	2,06E+07	7,57E+05	3,37E+06	2,47E+07	4,43E+07
Total énergie non-renouvlable	**8,20E+07**	**4,54E+07**	**1,61E+07**	**1,44E+08**	**2,27E+07**	**2,22E+07**	**8,18E+07**	**1,27E+08**	2,70E+08
Mise en décharge - Déchets en vrac (kg waste)	8,91E+05	5,52E+05	3,90E+04	1,48E+06	1,38E+04	3,33E+04	6,00E+04	1,07E+05	1,59E+06
Mise en décharge - Déchets radioactifs (kg waste)	1,40E+02	9,34E+01	1,14E+01	2,45E+02	3,04E+02	1,05E+01	4,64E+01	3,61E+02	6,06E+02
FAETP infinite (kg 1,4-DCB-Eq)	1,87E+06	1,85E+05	2,44E+04	2,08E+06	4,14E+04	2,77E+04	1,78E+05	2,47E+05	2,33E+06
FSETP infinite (kg 1,4-DCB-Eq)	4,46E+06	4,10E+05	5,55E+04	4,92E+06	9,03E+04	6,33E+04	4,02E+05	5,55E+05	5,48E+06
MAETP infinite (kg 1,4-DCB-Eq)	2,79E+09	5,24E+08	1,24E+08	3,44E+09	2,06E+08	1,58E+08	7,12E+08	1,08E+09	4,51E+09
MSETP infinite (kg 1,4-DCB-Eq)	1,96E+09	2,92E+08	8,50E+07	2,33E+09	9,62E+07	1,11E+08	4,45E+08	6,53E+08	2,99E+09
TAETP infinite (kg 1,4-DCB-Eq)	8,75E+04	1,33E+04	1,18E+03	1,02E+05	3,31E+03	1,44E+03	9,82E+03	1,46E+04	1,17E+05
HTP infinite (kg 1,4-DCB-Eq)	5,08E+06	1,08E+06	1,63E+05	6,32E+06	2,41E+05	2,00E+05	1,17E+06	1,61E+06	7,93E+06
acidification (kg SO_2-Eq)	2,49E+04	1,44E+04	1,84E+03	4,11E+04	1,03E+03	2,44E+03	3,32E+04	3,67E+04	7,78E+04
Changement climatique (kg CO_2-Eq)	8,26E+06	7,32E+06	2,82E+05	1,59E+07	1,82E+05	3,57E+05	5,48E+06	6,02E+06	2,19E+07
Eutrophisation (kg PO_4-Eq)	4,85E+03	2,35E+03	2,46E+02	7,45E+03	1,04E+02	3,08E+02	7,63E+03	8,04E+03	1,55E+04
Occupation du sol (m^2a)	2,09E+05	1,71E+05	5,99E+03	3,86E+05	4,86E+03	6,51E+03	1,65E+04	2,78E+04	4,14E+05
Formation d'Ozone photochimiqu - high NOx POCP (kg ethylene-Eq)	1,21E+03	5,64E+02	1,01E+02	1,87E+03	3,93E+01	1,37E+02	1,14E+03	1,32E+03	3,19E+03
Consommation des ressources abiotiques (kg antimony-Eq)	3,67E+04	1,91E+04	6,91E+03	6,28E+04	1,21E+03	9,67E+03	3,52E+04	4,61E+04	1,09E+05
Destruction de la couche d'ozone - ODP steady state (kg CFC-11-Eq)	4,78E-01	2,62E-01	1,32E-01	8,72E-01	9,25E-03	1,85E-01	8,95E-01	1,09E+00	1,96E+00

4.3.2. Discussion des résultats obtenus

Discussion sur la phase de construction

L'écart entre les impacts liés à la phase de construction des deux scénarios est quasiment le même (Figure 46), il est entre 62% et 85% pour tous les indicateurs sauf trois pour lesquels l'écart diminue : la consommation de ressources énergétiques non renouvelables 42% ; la consommation des ressources abiotiques 43% et destruction de la couche d'ozone 25%.

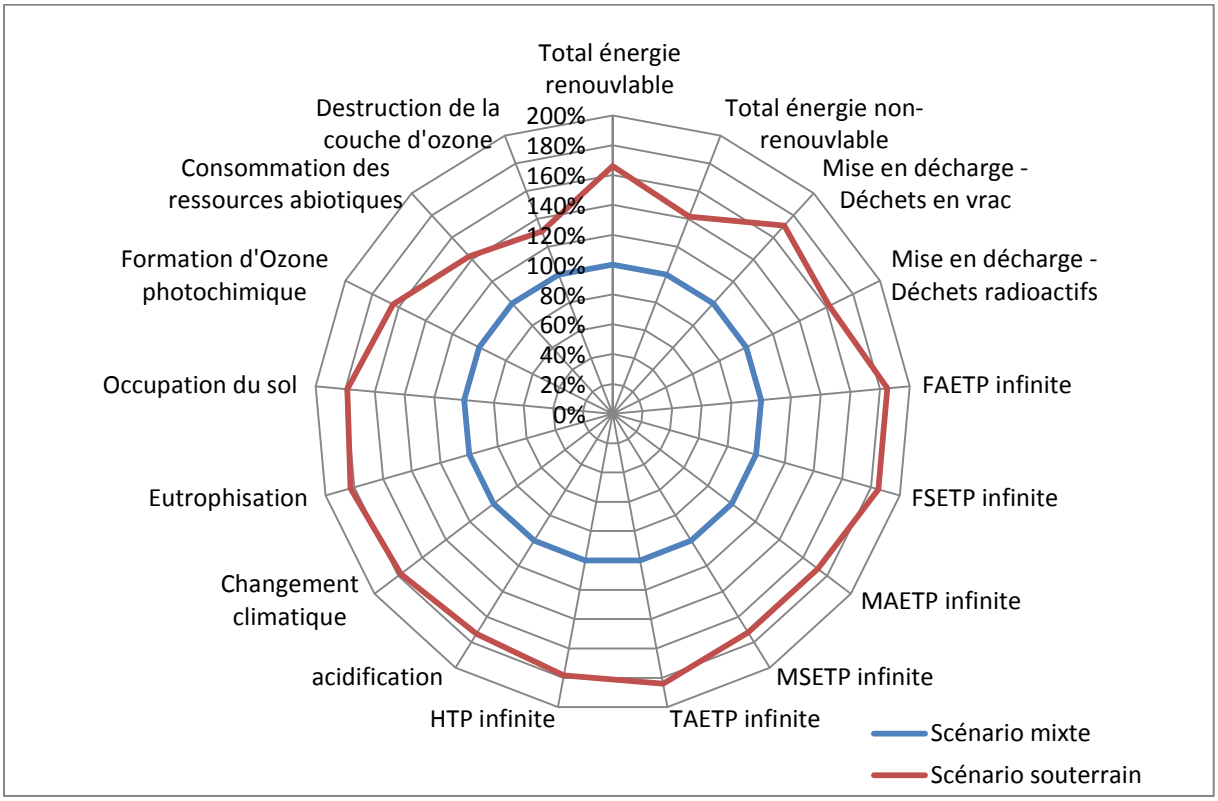


Figure 46 : indicateurs environnementaux à la phase de construction du tunnel - OpenLCA

Cette diminution est liée au fait que, ces mêmes impacts sont plus importants dans le scénario mixte. Le procédé impactant le plus pour ces trois indicateurs est le bitume or dans le scénario mixte on en utilise plus puisque l'itinéraire est plus long[48].

Le quasi proportion entre les deux scénarios est dû aux hypothèses posées pour les dimensionnements du scénario mixte (scénario fictif), cela indique que les résultats sont fortement affectés par la qualité des données techniques également.

[48] Le trajet aérien dans le Scénario mixte (4000m) et plus court dans le Scénario souterrain (1750m).

Discussion sur la phase d'exploitation

Concernant la phase d'exploitation (Figure 47), l'écart entre les impacts liés aux deux scénarios est quasiment identique pour tous les indicateurs. Les tendances par rapport à la phase de construction et au classement des scénarios s'inversent. Le scénario mixte impacte ainsi pendant cette phase 60% plus que le scénario souterrain pour tous les indicateurs, cette phase est considérée dans ce travail pour une période d'observation de 100 ans.

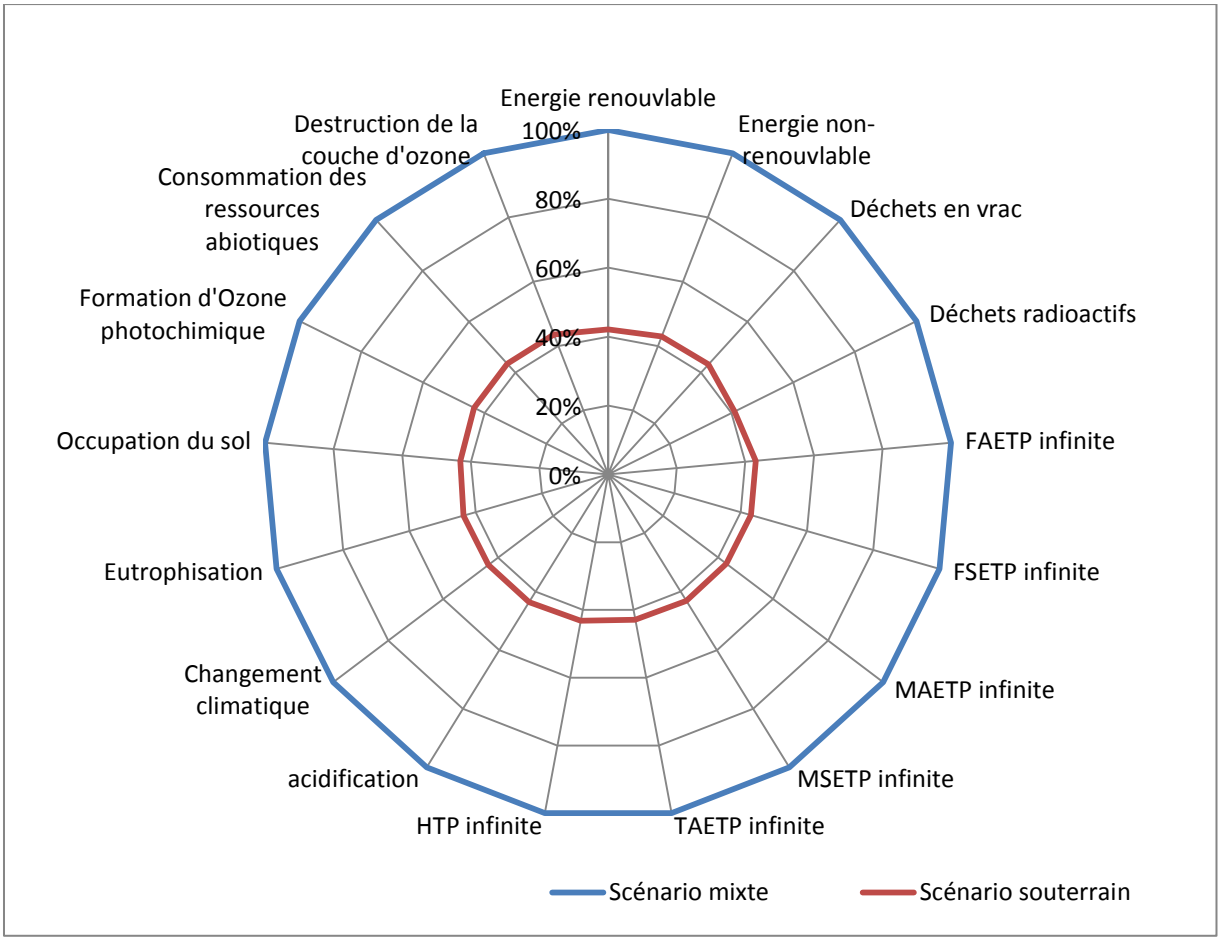


Figure 47 : Ecart entre les deux scénarios concernant la phase d'exploitation – OpenLCA

La répartition des différentes opérations prises en compte (éclairage et ventilation, usage, maintenance), est donnée dans la Figure 48 pour les deux scénarios.

On constate que ce sont les impacts liés à l'usage du bus qui sont les plus importants pour les deux scénarios. Pour la plupart des indicateurs c'est lié à la consommation du carburant. Pour les indicateurs : déchets en vrac, FAETP infinite, FSETP infinite, et HTP infinite à la construction du bus.

Cependant, pour l'indicateur « déchets radioactifs » la répartition est différente. C'est cette fois ci l'éclairage et la ventilation qui impactent le plus en raison de la consommation électrique des équipements qui contribue à **85%** pour le scénario mixte (ventilation et éclairage occasionnés de la galerie de sécurité + éclairage du chemin en surface) et à **84%** pour le scénario souterrain (ventilation et éclairage du tunnel modes doux).

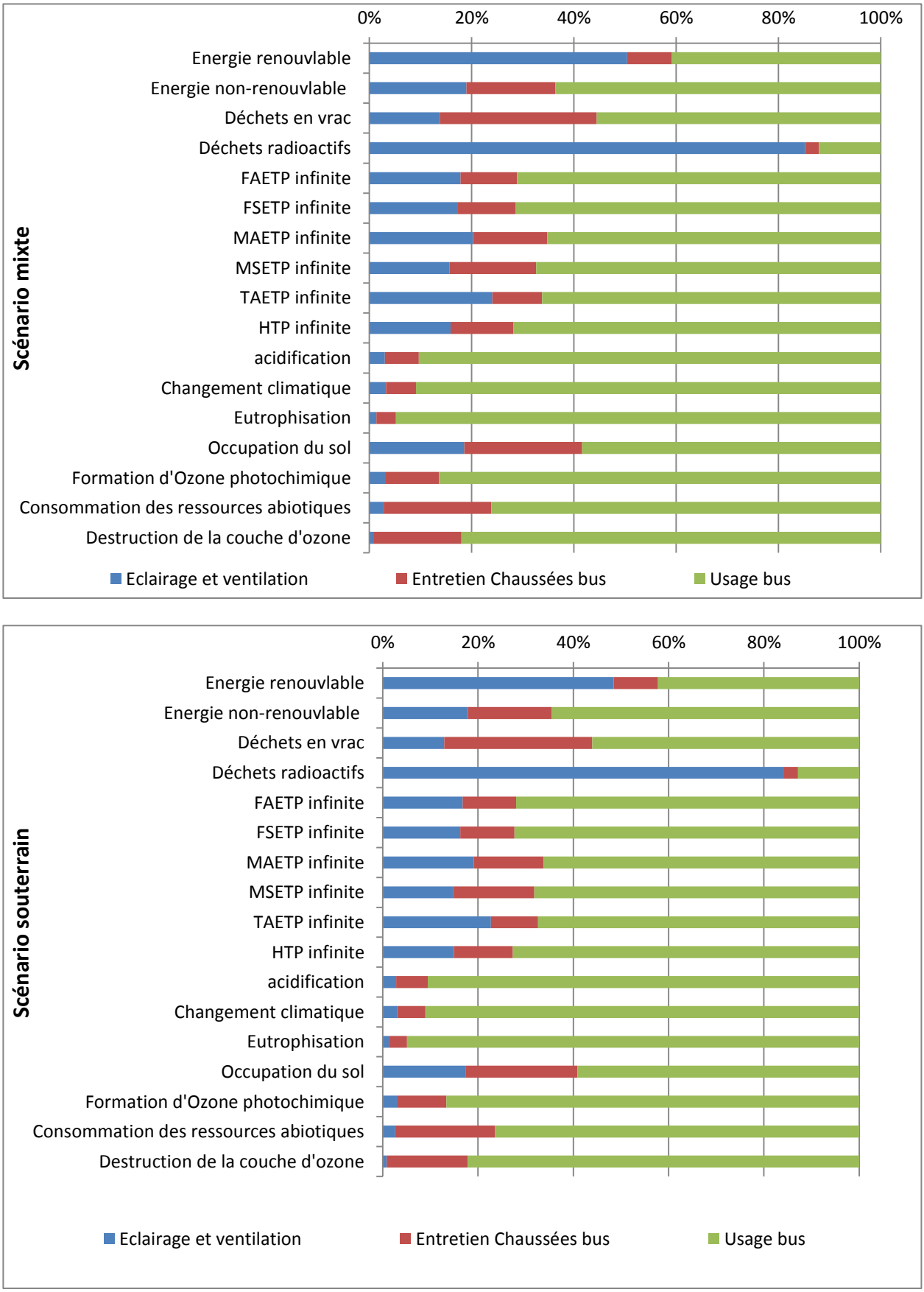


Figure 48 : Contribution de différentes opérations d'exploitation pour les deux scénarios

Discussion du poids des phases du cycle de vie pour chaque scénario

En regardant les impacts liés à chaque phase du cycle de vie (Figure 49), on constate la contribution importante de la phase d'exploitation dans le scénario mixte et de la phase de construction dans le scénario souterrain. Cela indique que la solution souterraine pourrait être rentable d'un point de vue environnemental pour des durées d'observation plus grandes. Sachant que le tunnel a une durée de vie supérieure à 100 ans sans pour autant avoir une nécessité de maintenance très importante.

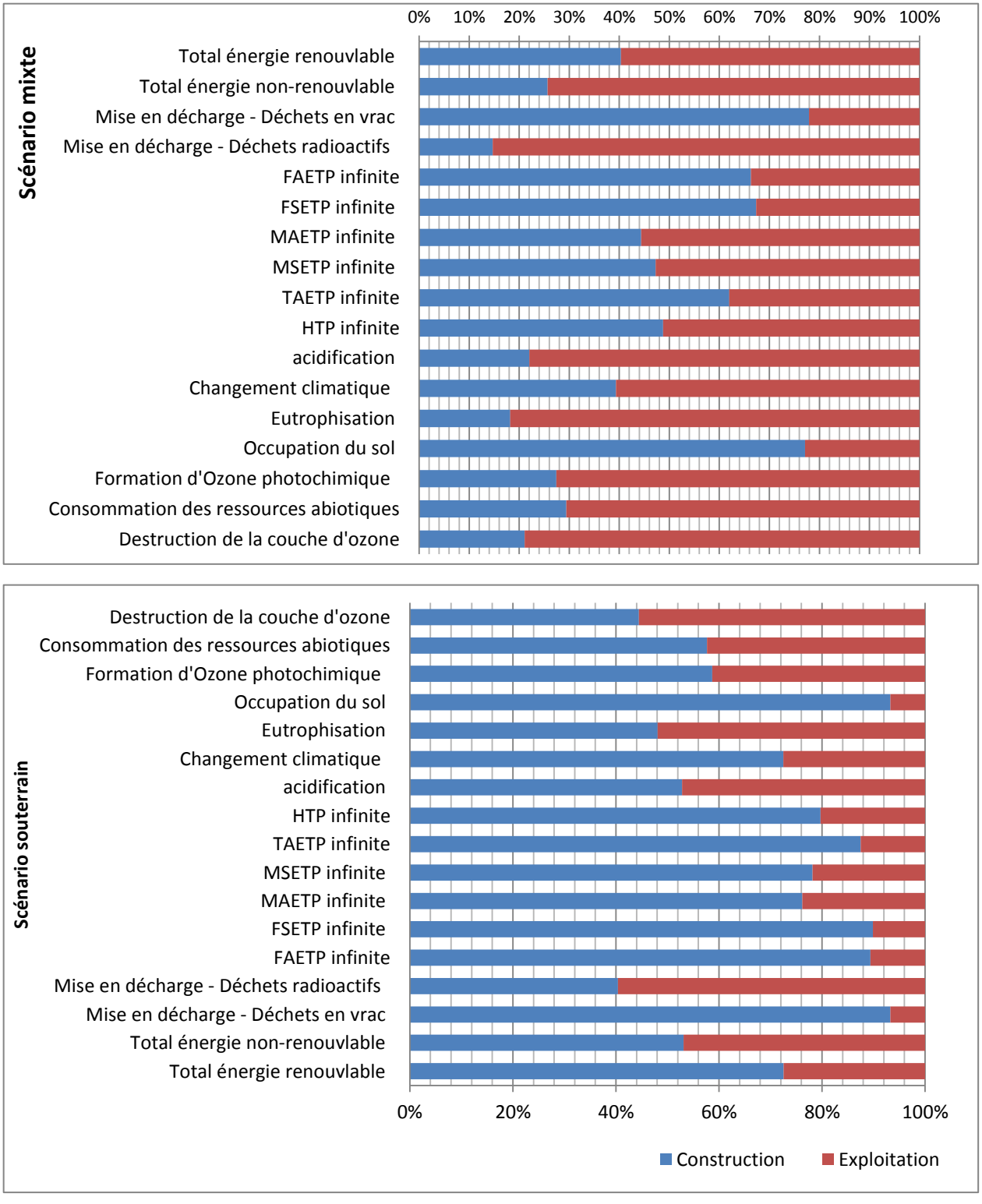


Figure 49 : Contribution des phases du cycle de vie aux impacts

Discussion pour l'ensemble du cycle de vie

Les résultats obtenus pour l'ensemble du cycle de vie (Figure 50) montrent que parmi les 17 indicateurs évalués : 7 indicateurs rendent significativement le scénario souterrain plus approprié, 5 indicateurs le rendent moins approprié, et 5 indicateurs sont sensiblement équivalents pour les deux scénarios (moins de 10% d'écart) (Tableau 48). Les résultats de cette ACV sont très contrastés, en conséquence, 12 indicateurs parmi 17 sont sélectionnables pour pouvoir comparer les deux scénarios dans ce cas d'étude. Nous pouvons réutiliser la démarche ACV et les indicateurs pour les inscrire dans la méthode d'évaluation DD plus globale développée au cours de la thèse.

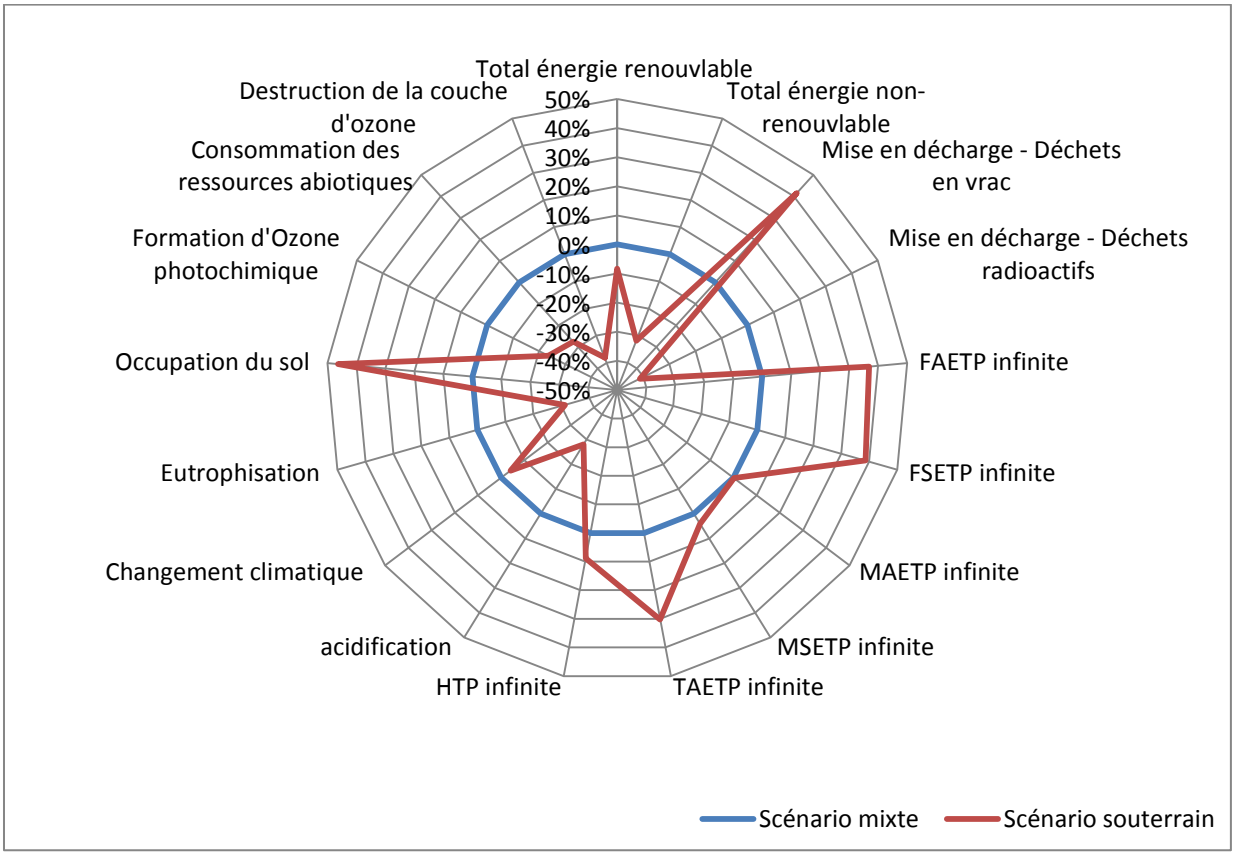


Figure 50 : Ecart des impacts du scénario souterrain par rapport au scénario mixte – (scénario mixte est la référence 0%)

4.3.3. Optimisation de l'usage avec le modèle ACV développé, étude d'un futur usage par bus électrique

Les résultats précédents obtenus montrent l'importance de la phase d'exploitation relativement aux impacts environnementaux calculés (Figure 49). Cette phase a également son importance du fait qu'elle dure plus longtemps que la phase de construction. L'usage du bus représente la partie la plus importante des impacts.

En France, la loi n° 2015-992 du 17 août 2015, relative à la transition énergétique a précisé que « tous les nouveaux bus et autocars qui seront acquis à partir de 2025 pour les services publics de transport, devront être à faible émissions ». Elle a également précisé que l'état et ses établissements doivent respecter une part minimale de 50% de véhicules à faibles émissions de CO_2 et de polluants de l'air, tel que des véhicules électriques.

On fait alors l'hypothèse de changer le type du bus utilisé, et donc de remplacer le bus diesel par une bus électrique. Le procédé choisi dans *ECOINVENT* est alors « transport, trolleybus – CH »[49]. Avec le nouveau bus, on ne prend pas en compte un éventuel changement de ventilation dans le tunnel modes doux, parce que l'il nous manque la répartition de la donnée obtenue pour l'ensemble de la consommation électrique à la ventilation, l'éclairage et la sécurité (50 kWh/m/an).

En regardant la Figure 48 et Figure 51 et en comparant les impacts liés à la phase d'exploitation des deux scénarios, on constate que les indicateurs se comportent de la même façon dans les deux hypothèses d'un bus diesel ou électrique. Pour quelques indicateurs, les impacts liés à l'usage du bus diminuent en utilisant un bus électrique, c'est le cas pour : Destruction de la couche d'ozone ODP ; consommation des ressources abiotiques ; Formation d'ozone photochimique POCP ; eutrophisation ; changement climatique ; Acidification. Pour d'autres indicateurs, les impacts augmentent en utilisant un bus électrique, c'est le cas pour : Occupation du sol ; les cinq indicateurs d'écotoxicité ; les deux indicateurs des déchets ; et les deux indicateurs de l'énergie.

[49] Des changements ont été effectués sur ce procédé : 1) Le mix électrique français a été utilisé « *electricity, medium voltage, at grid – FR* » au lieu du mix suisse que représente le procédé « *operation, teolleybus – CH* ». 2) les procédés concernant la construction et la maintenance de la route « *road – CH* », « *operation, maintenance, road – CH* » et « *disposal, road – RER* » ont été supprimés car ils ont été déjà pris en compte avec les chaussées. 3) un changement sur la valeur de le procédé « Operation, tolleybus –CH » (0.071429 v.km) pour qu'il convienne au nombre donné des bus par jour (62 bus selon : http://www.tcl.fr/, regarder les notes en bas 45 et 46, Pages 93).

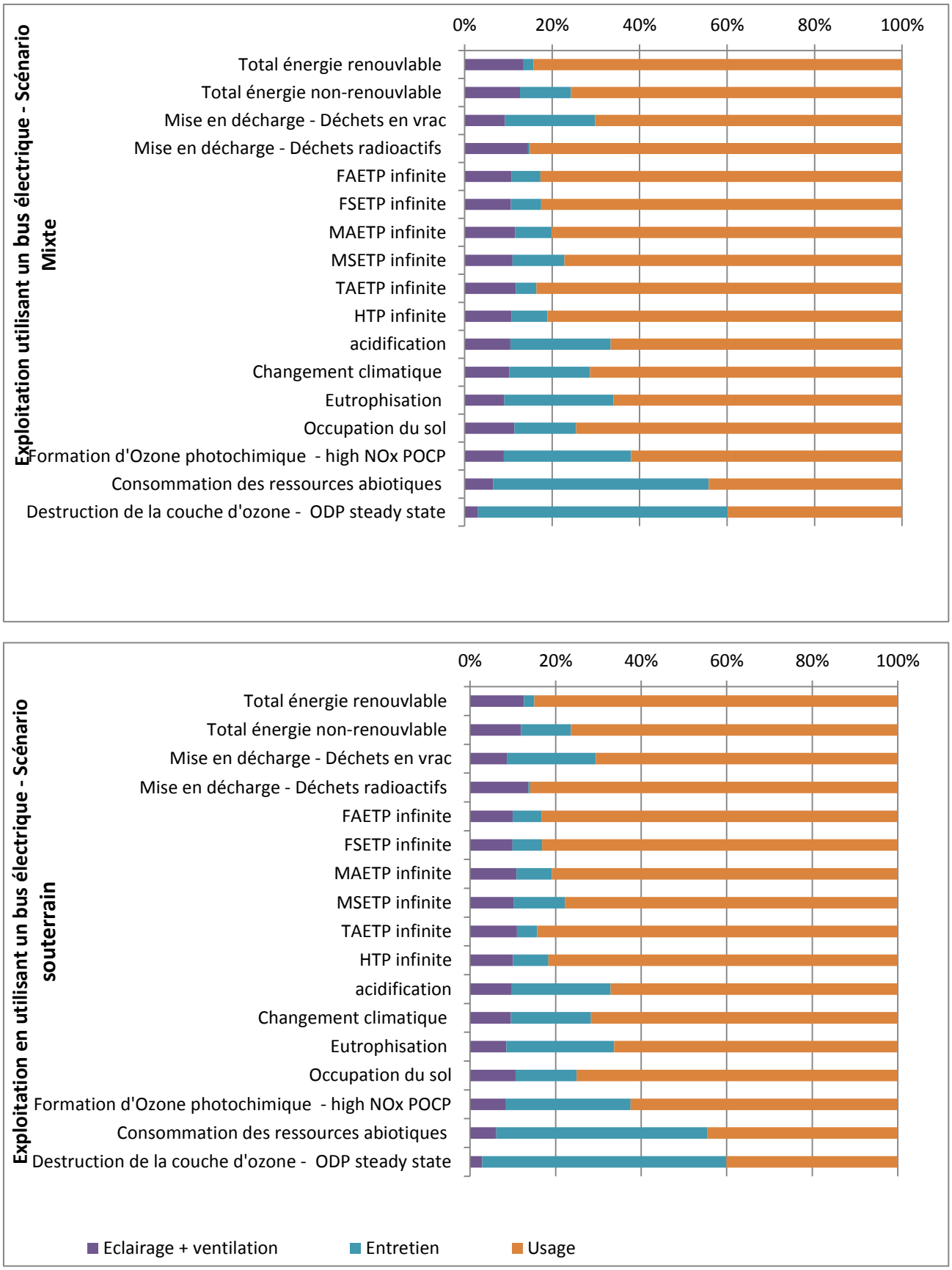


Figure 51 : Contribution des différentes opérations de la phase d'exploitation (Utilisation du bus électrique)

Les détails des calculs indiquent que la construction d'un bus électrique contribue significativement aux impacts pendant la phase d'exploitation (50%) pour l'indicateur de la destruction de la couche d'ozone (ODP). Alors que c'est la consommation électrique qui impacte le plus pour les autres indicateurs (entre 75% et 98%).

Par contre, en comparant à l'utilisation d'un bus diesel, on trouve que les impacts liés à l'usage du bus viennent essentiellement de :

- la construction du bus pour les indicateurs déchets en vrac, FAETP infinte, FSETP infinte et HTP infinte ;
- la maintenance du bus pour les déchets radioactifs et la consommation d'énergie non-renouvelable (nucléaire) et renouvelable (hydraulique) ;
- la consommation du carburant liée à l'usage du bus pour la consommation des ressources énergétiques renouvelables (biomasse, solaire, éolienne) et non-renouvelables (fossile, Forêt primaire), MSETP infinite, MAETP infinite, TAETP infinite, et l'occupation du sol.

En comparant les impacts liés à l'ensemble du cycle de vie des deux scénarios pour les deux hypothèses posées (Figure 52). On considère que le scénario mixte est le scénario de référence (0%), afin de pouvoir comparer le changement de tendances.

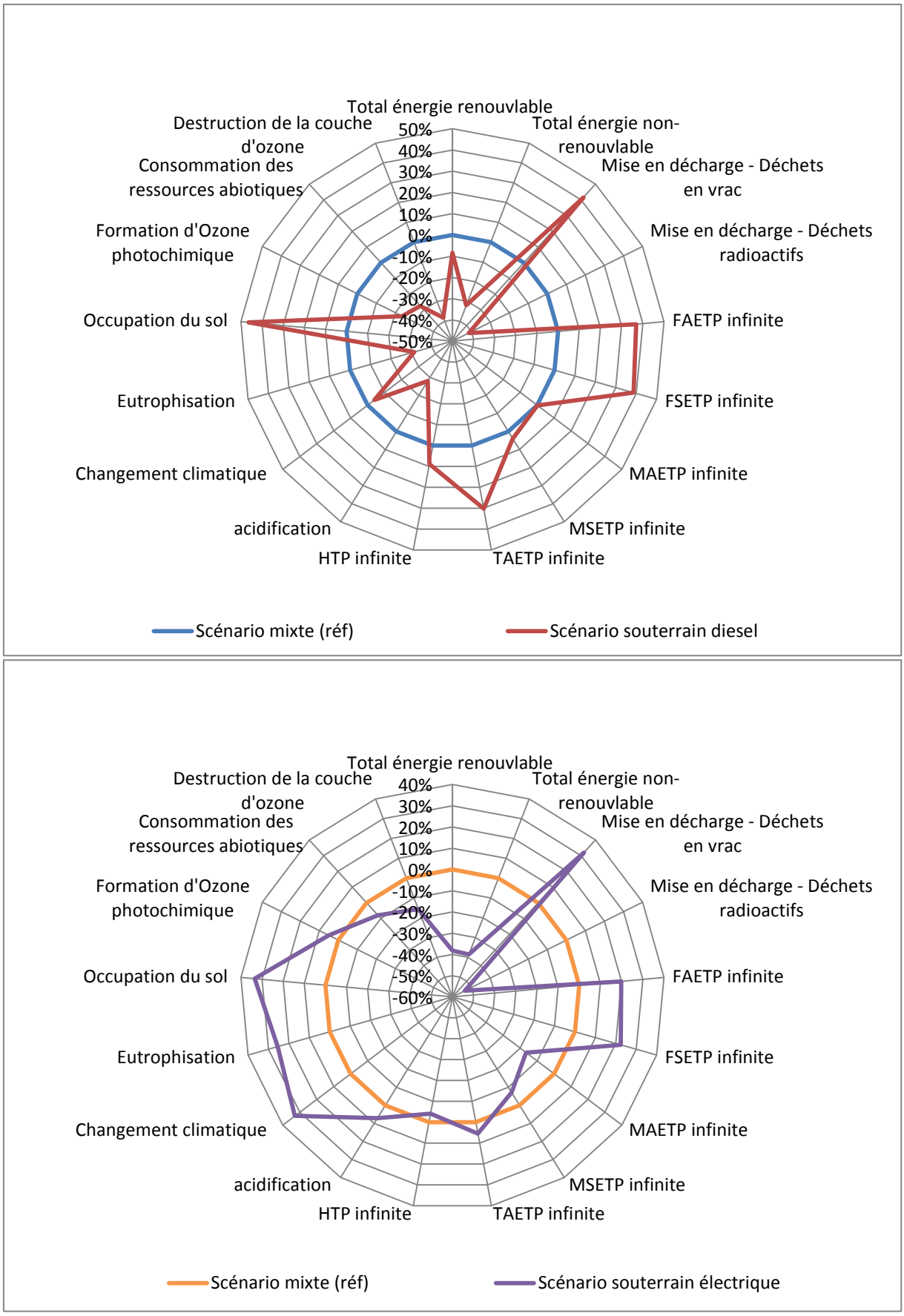


Figure 52 : Comparaison entre les impacts liés au scénario souterrain par rapport au scénario de référence (scénario mixte = 0%) pour les deux hypothèses d'un bus électrique et diesel.

Suite à cette comparaison, trois groupes d'indicateurs peuvent être distinguées (Tableau 16) :

- **Groupe 1** : les indicateurs « neutres » qui gardent sensiblement le même écart (moins de 10%) entre les deux scénarios quel que soit l'énergie du bus utilisée.
- **Groupe 2** : les indicateurs qui rendent le scénario souterrain plus approprié par rapport au scénario mixte selon l'énergie du bus utilisée.
- **Groupe 3** : les autres indicateurs qui rendent le scénario souterrain moins approprié par rapport au scénario mixte selon l'énergie du bus utilisée.

Dans tous les cas, ces résultats montrent que l'utilisation des indicateurs de l'ACV pour différencier des variantes d'aménagement surface/souterrain et y compris modes de transport est pertinente mais qu'il faut trouver une méthode de sélection des indicateurs utile au choix de la solution.

Tableau 16 : Groupes d'indicateurs selon le changement du comportement selon l'hypothèse posée

Groupe	Indicateur	Ecart des impacts liés au scénario souterrain par rapport au scénario mixte (0%)	
		En utilisant un bus diesel	En utilisant un bus électrique
1	Total énergie non-renouvelable	-32%	-38%
	Mise en décharge - Déchets en vrac	+42%	+32%
	MSETP infinite	+4%	-7%
	HTP infinite	+9%	-5%
2	Occupation du sol	+46%	+33%
	FAETP infinite	+37%	+20%
	FSETP infinite	+39%	+22%
	TAETP infinite	+30%	+5%
	Total énergie renouvelable	-8%	-38%
	Mise en décharge - Déchets radioactifs	-41%	-53%
	MAETP infinite	0%	-16%
3	Consommation des ressources abiotiques	-28%	-8%
	Destruction de la couche d'ozone	-38%	-16%
	acidification	-28%	+7%
	Changement climatique	-4%	+33%
	Eutrophisation	-31%	+25%
	Formation d'Ozone photochimique	-24%	+5%

Par la suite, un indicateur de chaque groupe, qui a un comportement différent, est détaillé pour comprendre les raisons.

4.3.4. Indicateur « Toxicité humaine »

Cet indicateur se comporte sensiblement de la même manière entre les deux scénarios, quelle que soit l'énergie utilisée pour le bus, électricité ou diesel (Tableau 17).

Tableau 17 : Sensibilité de l'indicateur "Toxicité humaine"

Indicateur	Hypothèse bus diesel		Hypothèse bus électrique		Changement des impacts en utilisant un bus électrique (%)	
	Scénario mixte	Scénario souterrain	Scénario mixte	Scénario souterrain	Scénario mixte	Scénario souterrain
Toxicité humaine (kg 1,4-DCB-Eq)	7,29E+06	7,93E+06	9,10E+06	8,73E+06	**+25%**	**+10%**

La Figure 53 indique que les impacts de la toxicité humaine augmentent légèrement en utilisant un bus électrique, cela est lié à la consommation électrique du bus. D'ailleurs, l'usage du bus contribue le plus dans le scénario mixte en utilisant un bus électrique, par contre il rapproche des impacts liés au creusement et au soutènement du tunnel en utilisant un bus diesel.

Les impacts liés à l'usage du bus diminuent significativement dans le scénario souterrain, cela est dû au chemin plus court utilisé dans ce scénario. En conséquence, cet indicateur rend le scénario souterrain légèrement plus favorable que le scénario mixte.

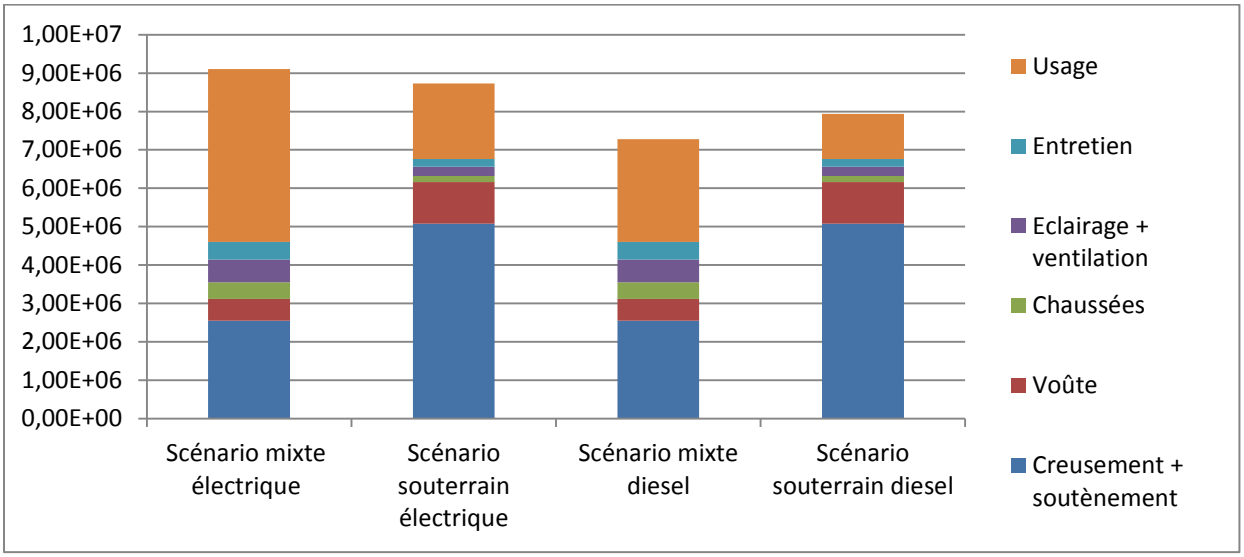


Figure 53 : Contribution des différentes opérations à l'indicateur "Toxicité humaine"

4.3.5. Indicateur « Total énergie renouvelable »

Pour les deux scénarios, l'utilisation d'un bus électrique consomme significativement plus d'énergie renouvelable que l'utilisation d'un bus diesel (Tableau 18).

Tableau 18: Sensibilité de l'indicateur "Totale énergie renouvelable"

Indicateur	Hypothèse bus diesel		Hypothèse bus électrique		Changement des impacts en utilisant un bus électrique (%)	
	Scénario mixte	Scénario souterrain	Scénario mixte	Scénario souterrain	Scénario mixte	Scénario souterrain
Total énergie renouvelable (Mj eq)	8,05E+06	7,37E+06	2,12E+07	1,31E+07	**163%**	**78%**

Pour le scénario mixte, en utilisant un bus diesel c'est la ventilation et l'éclairage qui consomment le plus d'énergie renouvelable (Figure 54), alors que c'est l'usage du bus qui écrase tout pour le bus électrique. Pour le scénario souterrain utilisant un bus diesel, une contribution importante du creusement du tunnel apparait cela est dû aux engins utilisés et au transport des matériaux excavés. Par contre, en utilisant un bus électrique, c'est l'usage du bus qui consomme le plus.

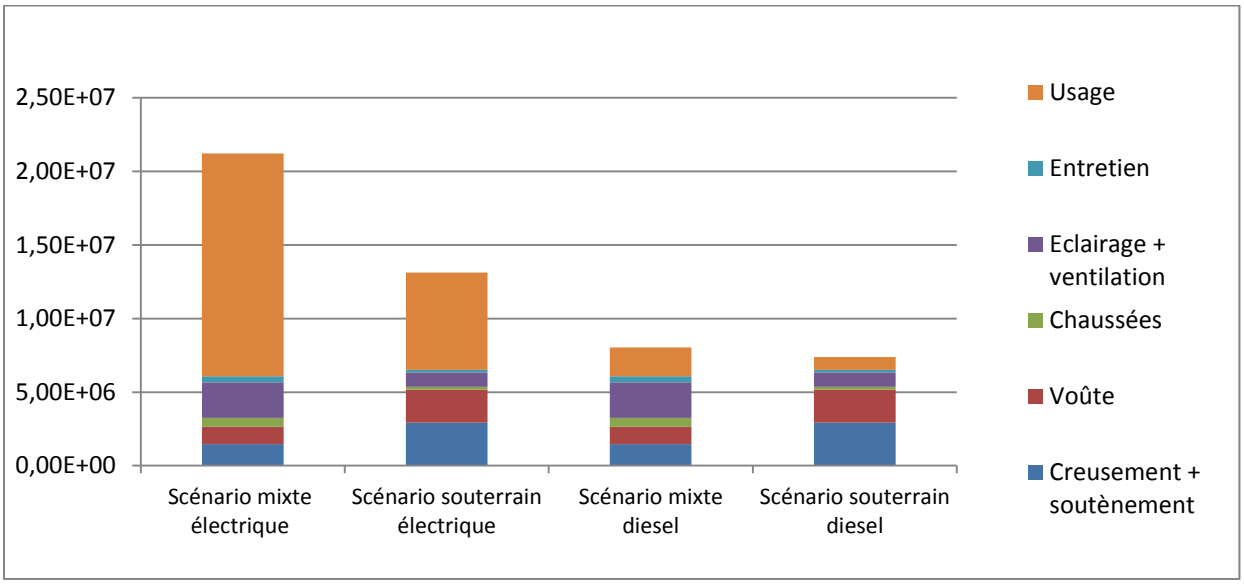


Figure 54 : Contribution des différentes opérations à la consommation de l'énergie renouvelable.

4.3.6. Indicateur « Changement climatique »

L'indicateur du changement climatique montre une diminution importante des impacts pour les deux scénarios en utilisant le bus électrique (Tableau 19). Cet indicateur montre que le scénario mixte devient plus approprié que le scénario souterrain en utilisant le bus électrique, alors que les deux scénarios était sensiblement équivalents (Figure 32).

Tableau 19 : Sensibilité de l'indicateur "changement climatique"

Indicateur	Hypothèse bus diesel		Hypothèse bus électrique		Changement des impacts en utilisant un bus électrique (%)	
	Scénario mixte	Scénario souterrai	Scénario mixte	Scénario souterrain	Scénario mixte	Scénario souterrain
Changement climatique ($kgCO_2$ eq)	2,28E+07	2,19E+07	1,34E+07	1,78E+07	**-41%**	**-19%**

La Figure 55 montre la plus part des impacts ont été liés à l'usage du bus diesel. Cette contribution diminue en utilisant le bus électrique, significativement pour le scénario mixte parce qu'il utilise un itinéraire plus long que le scénario souterrain.

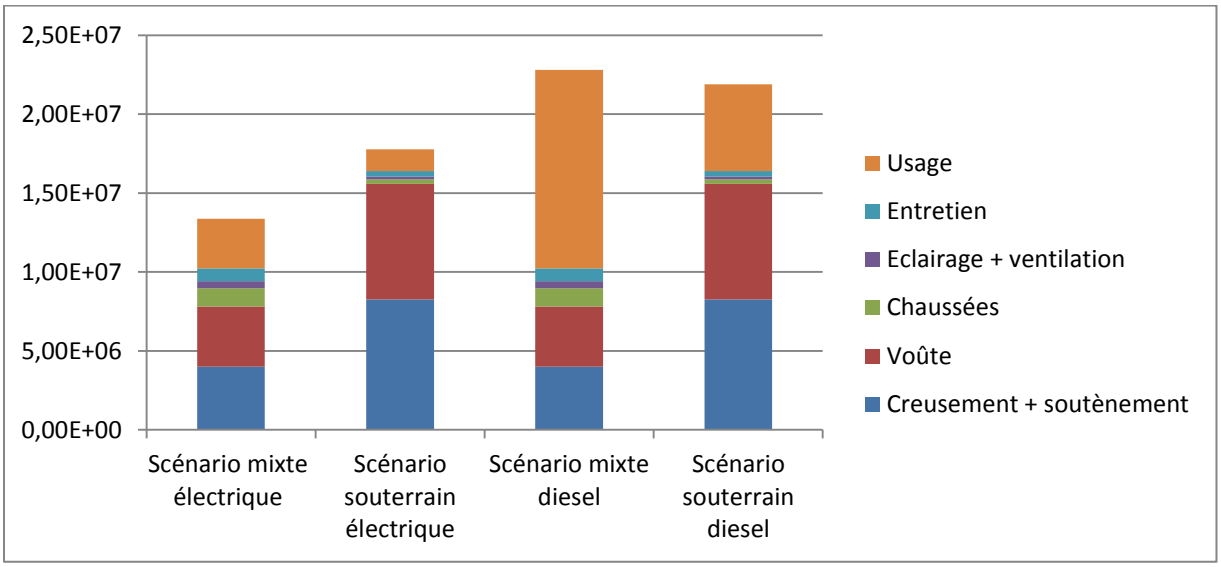


Figure 55 : Contribution des différentes opérations à l'indicateur "changement climatique"

En utilisant un bus électrique, la partie importante des impacts dans ce cas reste liée à la phase de construction (creusement, soutènement et construction de la voûte), ce qui peut être compensé pendant leur cycle de vie.

4.3.7. Conclusion intermédiaire

En capitalisant les résultats obtenus, on trouve que :

- Le scénario souterrain reste moins impactant par rapport à l'autre scénario pour trois indicateurs : total énergie non-renouvelable ; mise en décharge déchets radioactifs ; et destruction de la couche d'ozone DOP.
- Le scénario souterrain devient moins impactant que l'autre scénario pour deux indicateurs : totale énergie renouvelable ; et MAETP infinite.
- Le scénario souterrain devient sensiblement équivalent au scénario mixte pour six indicateurs : MSETP infinite ; HTP infinite ; TAETP infinite ; Consommation des ressources abiotiques ; acidification ; et Formation d'Ozone photochimique.
- Le scénario souterrain reste plus impactant par rapport à l'autre scénario pour quatre indicateurs : Mise en décharge - Déchets en vrac ; Occupation du sol ; FAETP infinite ; et FSETP infinite.
- Le scénario souterrain devient plus impactant que l'autre scénario pour deux indicateurs : Changement climatique et Eutrophisation.

5. Discussion sur l'ensemble des résultats obtenus

Pour positionner les résultats obtenus dans le cadre de ce travail avec la littérature, plusieurs références sont sollicitées [Stripple et al, 2010 ; Boulenger, 2011 ; Miliutenko et al, 2012]. Ces références ont toutes évalué les impacts environnementaux liés à la construction, à l'entretien et à l'exploitation d'un tunnel, cependant elles ont des unités fonctionnelles différentes, des indicateurs variés ainsi qu'une durée de vie différente (Tableau 20).

Tableau 20 : tableau récapitulatif de plusieurs références effectuant ACV Tunnel

Réf.	Objet de l'ACV	UF	Indicateurs calculés
Présent travail [Audi, 2016]	**Tunnel modes doux**	**Assurer la continuité d'un itinéraire entre deux points pour les modes doux sur 100 ans**	**23 indicateurs (Tableau 10 : Indicateurs environnementaux retenus pour l'évaluation par OpenLCA)**
[Stripple et al, 2010]	Tunnel ferroviaire	Réaliser 586 m de tunnel avec la maintenance et l'exploitation pour 60 ans.	Consommation d'énergie ; Réchauffement climatique ; Acidification ; eutrophisation ; occupation du sol ; Appauvrissement de la couche d'ozone ; Formation d'ozone photochimique.
[Boulenger, 2011]	Tunnel routier	construire une structure de 1km de longueur et trois voies de circulation dans chaque sens, permettant de passer un trafic annuel de1600 véhicules par jour	Consommation d'énergie ; Réchauffement climatique ; Formation d'ozone photochimique
[Miliutenko et al, 2012]	Tunnel routier	Construction 10 km de tunnels routiers considérant la maintenance et l'exploitation pendant 100 ans.	Consommation d'énergie ; Réchauffement climatique.

On cherche donc à comparer les indicateurs communs en les ramenant sur une unité fonctionnelle identique « construire 1 km de tunnel en prenant en compte l'entretien et l'exploitation pendant 100 ans » (Tableau 21), sous réserve que les tunnels évalués n'ont pas les mêmes dimensionnements ni le même système.

Tableau 21 : comparaison des résultats obtenus dans ce travail avec la bibliographie (résultats ramenés pour 1 km tunnel sur 100 ans).

Réf.	Consommation d'énergie (MJ éq.)	Réchauffement climatique (Kg CO_2 éq.)	Acidification (kg SO_2-Eq)	Eutrophisation (kg PO_4-Eq)	Occupation du sol M^2a	Consommation des ressources abiotiques (kg antimony-Eq)	Appauvrissement de la couche d'ozone (kg CFC-11-Eq)	Formation d'ozone photochimique (kg ethylene-Eq)
Présent travail [Audi, 2016]	**1.60E+08**	**1.27E+07**	**4.48E+04**	**8.96E+03**	**2.39E+05**	**6.30E+04**	**1.31E+00**	**1.84E+03**
[Stripple et al, 2010]	1.22E+08	0.65E+07	2.18E+04	5.54E+03	1.61E+05		4.33E -03	2.75E+03
[Boulenger, 2011]	2.01E+08	1.36E+07						Unité en kg NMVOC
[Miliutenko et al, 2012]	1.38E+08	0.66E+07						

Les résultats obtenus de ce travail sont plus significatifs, pour les indicateurs comparables, que les résultats dans les références bibliographiques sollicitées. Cela est dû à la prise en compte de l'usage du bus, qui a pratiquement la plupart des impacts, ainsi qu'aux hypothèses posées et parfois surestimées.

Cependant, les résultats de l'ACV réalisée par Boulenger étaient supérieurs à ceux obtenus de ce travail car son système est plus large. En effet son étude a pris en compte l'extraction des matières premières et leur transport à l'usine et puis la fabrication et les équipements et les matériels des usines.

Discussion et Conclusion du chapitre

Difficultés rencontrées et limites de l'ACV

Les difficultés rencontrées pendant ce travail étaient à plusieurs niveaux. La première était la formulation de l'unité fonctionnelle pour répondre de manière assez complète au besoin souhaité de l'ouvrage, et pour prendre en considération les différents modes du transport.

Une autre difficulté était au niveau de collecte des données. En effet, l'aménagement étudié étant un objet très complexe et ayant plusieurs partenaires participant à sa réalisation, la disponibilité des données du tunnel actuel était limitée : la plupart provient de documents publics. Des hypothèses ont été donc posées pour les données manquantes. Quant au scénario fictif (scénario mixte), les données sont entièrement hypothétiques et proportionnelles par rapport au scénario souterrain. Ainsi, les hypothèses posées pour les deux scénarios avaient été vérifiées par des experts, mais ne sont pas forcément les plus adaptées. Une étude de sensibilité a donc été réalisée et elle donne une perspective favorable à ce travail de modélisation d'impacts environnementaux pour le souterrain.

On note aussi que la consommation électrique liée à l'ensemble de la ventilation, l'éclairage et la sécurité du tunnel modes doux a été prise par pourcentage des retours d'expériences des tunnels routiers, ce n'était donc pas possible de savoir la répartition de cette valeur surtout que le trafic dans le tunnel modes doux n'est pas comparable à un tunnel routier, donc pas la même ventilation ni éclairage ; ceci et une limitation de notre étude.

Les résultats obtenus dans ce travail mettent en avant certains indicateurs environnementaux discriminants en comparant le scénario souterrain par rapport à d'autres variantes proposées. D'autres indicateurs n'étaient pas calculés, cela est dû principalement au manque de données ou de moyen du calcul. Par exemple, l'indicateur de l'usage du sol (Land-Use competition) : Du point de vue de l'ACV, on peut distinguer dans l'indicateur usage de sol : la transformation du sol (*land transformation*) ; l'occupation de sol (*land occupation*) et la restauration de sol (*land restoration*) pendant une période donnée [Koellner et al, 2008]. Alors que cet indicateur, dans la méthode de calculs adoptée (CML2001), ne prend en compte que l'occupation du sol qui est caractérisée par la surface et la durée d'occupation pour le même terrain du même usage. Pour une solution souterraine, il y a une surface aérienne évitée et pourrait être utilisable pour d'autre services, elle n'a pas été prise en compte. De plus, l'exploitation de l'énergie géothermique dans la solution souterraine est moins difficile, et moins coûteux, que dans d'autres scénarios, ayant un creusement prévu de toute manière.

Tentons ici d'examiner comment mettre en avant ce gain de sol dans le cas d'une solution souterraine. En effet, les chaussées modes doux aériennes dans le scénario mixte occupent (**8.8m X4000m= 35200 m^2**), cette surface est évitée dans le scénario souterrain, on rajoute alors un flux d'occupation du sol égale à cette valeur pour le scénario mixte. Le flux ajouté est « *Occupation, traffic area, road network* » qui est exprimé en m²/an. Les résultats changent au niveau de l'indicateur occupation du sol, la valeur sera **3.18E+05 au lieu de 2.83E+05** alors que la valeur reste **4,14E+05** pour le scénario souterrain. Cela induit une diminution de l'écart entre les deux scénarios de 16% pour cet indicateur. Même si ça ne change pas totalement les résultats, il semble important

de l'indiquer (c'est le même résultat en utilisant un bus électrique, l'écart entre les deux scénarios diminue 12%, il devient 21% au lieu de 33%.). Ce changement peut conduire à d'autres réflexions aussi importantes que l'ACV ne peut pas mettre en avant, par exemple le gain sur la valeur du terrain sur les aspects économiques (doublement de l'utilisation de terrain) et sur l'aspect social (gain en fournissant d'autres usages ou des espaces verts sur les terrains évités à occuper par l'ouvrage). Les réflexions ci-dessus aboutissent finalement à énoncer une problématique davantage liée au souterrain :

Problématique IV : comment mettre en application une approche avantage / inconvénients du souterrain pour un ouvrage complexe comme celui-ci, ce qui revient à inscrire les résultats d'ACV dans l'évaluation plus globale DD réalisée dans ce travail. Ce point est traité dans le chapitre suivant.

Conclusion

L'Analyse du Cycle de Vie peut s'avérer être un outil puissant d'évaluation environnementale pour une étude comparative de différents scénarios d'aménagement urbain dont la solution souterraine fait partie en permettant la quantification des impacts environnementaux de chacune des alternatives étudiées. Cet outil est de plus en plus utilisé dans des processus décisionnels et a gagné son acceptation comme outil d'évaluation environnementale dans un contexte de planification et de soutien à l'innovation.

Les résultats obtenus pour l'ensemble du cycle de vie des deux scénarios ont montré que le scénario souterrain peut être rentable à terme d'un point de vue environnemental étant donné que la phase d'exploitation impacte moins que celle de la construction pour la plupart des indicateurs évalués. Ces résultats ont également permis de montrer que douze indicateurs, parmi dix-sept évalués, sont capables de comparer un ouvrage de construction souterrain avec d'autre alternative. Ensuite, ils ont indiqué l'importance de la phase d'exploitation et plus particulièrement de l'usage du bus par rapport aux autres procédés. Ainsi, le remplacement d'un bus diesel par un « bus propre » a donné un exemple de la sensibilité des résultats pour un futur usage. En conséquence, huit indicateurs parmi les douze sélectionnés restent toujours capables de comparer plusieurs alternatives avec la nouvelle hypothèse.

L'étude de sensibilité des résultats, en remplaçant le bus diesel par un bus électrique, a montré la rentabilité de ce changement en point du vue des impacts environnementaux en prenant en compte l'ensemble du cycle de vie, parce que cela permet de diminuer significativement les impacts liés à la phase d'exploitation, et donc de compenser plus vite les impacts liés à la phase de construction.

Ce travail est d'ordre méthodologique, il vise ainsi à développer une méthodologie d'évaluation, par indicateurs du développement durable, appropriée aux ouvrages de construction souterrains. Les autres aspects importants pour développer cette méthodologie ne peuvent pas être pris en compte au sein de l'ACV, comme l'évaluation des effets socioéconomiques et l'évaluation de la qualité du service rendu. De plus, les dimensions spatiales liées à l'usage et à une traversée de territoire, ne sont en général pas différenciées dans l'ACV. En conclusion, l'ACV apporte une contribution importante dans le volet environnemental de la méthodologie à développer. Bien que n'étant pas capable « toute seule » de prendre en compte tous les aspects envisagés. Le volet socioéconomique de notre approche est abordé au chapitre suivant.

Chapitre 3 : Approche méthodologique fondée sur la HQE

Introduction du chapitre

La Qualité Environnementale (QE) d'un ouvrage de construction est évaluée à partir du référentiel HQE de "Définition Explicite de la Qualité Environnementale"(DEQE) [HQE, 2001]. Ce référentiel présente pour chaque cible les exigences et indicateurs nécessaires à leur prise en compte. Ces indicateurs peuvent être quantitatifs ou qualitatifs, orientés résultats ou moyens, selon les cas et selon les phases du projet auxquels ils s'appliquent.

La force de la démarche HQE est représentée par la concertation en amont de tous les acteurs du projet qui vont s'exprimer qualitativement et quantitativement sur des propositions de cibles au maître d'ouvrage. L'application de la démarche HQE est fondée sur une logique de hiérarchisation des exigences : le maître d'ouvrage choisit trois ou quatre cibles pour lesquelles la performance maximale sera recherchée. Quatre ou cinq autres cibles sont retenues pour un traitement particulier (bonne performance) et pour les autres cibles, le maître d'ouvrage se contente du respect de la réglementation.

La démarche HQE ne s'arrête pas au mangement de la qualité environnementale des projets de construction, mais elle représente aussi un atout important pour couvrir les différents volets du DD. Elle prend en compte les aspects socioéconomiques du projet et considère les différentes parties prenantes concernées par le projet. Elle a commencé par le bâtiment (HQE Bâtiment) mais s'est étendue aux routes (Route Durable) et enfin aux ensembles urbains (HQE Aménagement et l'application au projet HQE²R). Selon « l'association HQE »[50], cette méthode est déclinée en certification ou méthode d'évaluation.

Le travail présenté dans ce chapitre considère ainsi la méthodologie HQE en l'appliquant au projet de complexe souterrain du tunnel de la Croix-Rousse en développant plus particulièrement le volet socioéconomique des critères puisque l'approche environnementale a déjà été mise en œuvre avec l'ACV au chapitre 2 de cette thèse. Le but n'est pas de certifier le projet, mais d'évaluer séparément chaque variante d'aménagement proposée ainsi qu'une variante d'aménagement en surface. L'atout majeur est de déployer une façon de choisir des objectifs et des indicateurs pour l'évaluation en prenant en compte les différents volets du DD en lien avec le type d'aménagement tel que proposé au chapitre 1 et d'illustrer comment un tel outil peut apporter une évaluation comparative quantitative des projets au cours de leur cycle de vie.

[50] L'Association pour la haute qualité environnementale "dite "Association HQE", régie par la loi du 1er Juillet 1901, a été fondée à Paris le 17 octobre 1996. (http://www.hqegbc.org/accueil/)

Partie I : Bibliographie - Approche d'évaluation par « HQE® »

1. Introduction

Dans cette partie du chapitre, une étude bibliographique pour les démarches Haute qualité environnementale (HQE™) est abordée. Il s'agit d'une présentation des trois méthodes de certification : HQE Bâtiment, HQE Route Durable et HQE Aménagement. Ces méthodes évaluent et puis certifient au sens du développement durable (DD).

2. Méthodes de certification et d'évaluation HQE®

HQE™ est une démarche de certification qui a été initiée par l'association HQE[51] en 1996 et délivrée par Certivéa[52]. Elle a été reconnue d'utilité publique en 2004 ce qui a permis à l'AFNOR[53] de créer la certification « Démarche HQE », dont le but était à la base d'améliorer la qualité environnementale (QE) des bâtiments et de promouvoir le management environnemental des opérations de construction ou d'adaptation des bâtiments.

Par la suite, une présentation de trois méthodes de certification HQE est abordée, il s'agit de : HQE bâtiment, la démarche « Route Durable » et « HQE Aménagement ». L'idée est de partir d'un ouvrage simple puis de passer à l'échelle de l'infrastructure et enfin de l'aménagement (ensemble d'ouvrages). Ensuite, une présentation de la méthode HQE²R est poursuivie, il s'agit d'une application de la méthode HQE afin d'évaluer plusieurs variantes de renouvellement ou réhabilitation urbaine. Elle représente un des résultats du projet européen HQE²R « Haute Qualité Environnementale pour le Renouvellement et la Réhabilitation des quartiers ».

2.1. Méthode pour un ouvrage simple « HQE™ bâtiment »

Au début de l'année 2000, un groupe de travail bénéficiant d'un financement de l'ADEME est mis en place au sein de l'association HQE pour travailler sur la définition explicite de la qualité environnementale des bâtiments (DEQE) [HQE, 2001]. La démarche « HQE Bâtiment » a donc été le premier fruit de ce travail.

2.1.1. Présentation

La démarche « HQE bâtiment » a pour mission de préciser, sur la base du premier référentiel des 14 cibles de l'association HQE, ce qui est attendu dans un projet à haute qualité environnementale (HQE). Ce référentiel doit s'appliquer à toutes les catégories d'opérations de

[51] Plateforme de la construction et de l'aménagement durables créée en 1996 : http://www.assohqe.org/accueil/

[52] Certivéa est filiale du CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) mondialement reconnu dans la recherche sur le bâtiment. http://www.certivea.fr/

[53] Groupe international d'origine française, il est organisé autour de 4 grands domaines de compétences : la normalisation, la certification, l'édition de solutions et services d'information technique et professionnelle et la formation.

construction (bâtiments tertiaires, logements collectifs ou maisons individuelles) et s'articuler avec un système de management environnemental (SME) des opérations de construction [HQE, 2001].

La démarche « HQE Bâtiment » vise à améliorer la qualité environnementale des bâtiments neufs et existants, c'est-à-dire à offrir des ouvrages sains et confortables dont les impacts sur l'environnement, évalués sur l'ensemble du cycle de vie, sont les plus maîtrisés possible [Bidou, 2006]. C'est une démarche qui s'appuie sur une donnée fondamentale : un bâtiment doit avant tout répondre à un usage et assurer un cadre de vie adéquat à ses utilisateurs. La démarche « HQE Bâtiment » comprend trois volets indissociables (Figure 56) :

- un système de management environnemental de l'opération où le maître d'ouvrage fixe ses objectifs pour l'opération et précise le rôle des différents acteurs ;
- 14 cibles qui permettent de structurer la réponse technique, architecturale et économique aux objectifs du maître d'ouvrage ;
- les indicateurs de performance donnant un niveau de performance de projet pour chaque cible par rapport à un seuil de référence.

Ces trois volets constituent le référentiel générique de la démarche « HQE Bâtiment » formalisé dans trois documents normatifs : les normes NF P01-020-1 et XP P01-020-3 (annulées en juin 2012 et remplacées par la norme NF EN 15978 [AFNOR, 2012a]) relatives à l'évaluation de la performance environnementale des bâtiments ; et la GA P01-030 [AFNOR, 2003].

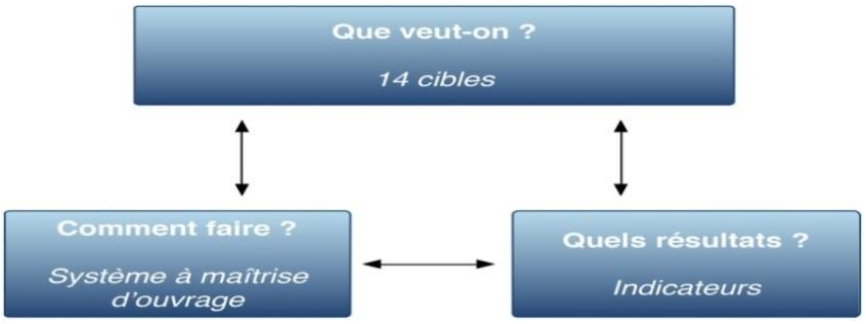


Figure 56 : Les trois volets de la démarche HQE™ Bâtiment [Durand-Pasquier, 2011]

2.1.2. Principes et objectifs

Les objectifs de cette démarche sont fixés par le maître d'ouvrage dans le cadre de son programme. Le système de management permet de mobiliser l'ensemble des acteurs pour atteindre les objectifs. Par contre, aucune solution architecturale et technique n'est imposée : le choix est justifié et adapté au contexte. La création d'un environnement intérieur sain et confortable tout en limitant les impacts environnementaux est recherchée ; ensuite les performances sont évaluées.

Dans une démarche « HQE Bâtiment », l'ensemble des 14 cibles (objectifs d'évaluation) doit être pris en compte [HQE, 2001]. Leur niveau de performance dépend du contexte, des ambitions du maître d'ouvrage et de l'économie globale du projet. Chaque cible (objectif) comprend plusieurs cibles élémentaires (sous-objectifs), représentant les aspects envisagés [Olive, 1997]. HQE est un outil de certification, il propose une approche qualitative pour certifier une opération de construction. La certification HQE se donne si au moins 3 cibles traitées à un niveau « très performant », 4 cibles à un niveau « performant » et 7 cibles au maximum répondant aux exigences de base. La cible « énergie » devant toujours être traitée à un niveau performant ou très performant.

La première dimension (Tableau 22), comprend les trois premières cibles qui concernent l'écoconstruction du bâtiment, la relation avec son environnement urbain, les choix de produits de construction et la phase de chantier (phase de construction).

Tableau 22: La dimension « écoconstruction » de la démarche HQE™ Bâtiment.

Dimension I	Cible	Cible élémentaire
Écoconstruction	1 - Relation des bâtiments avec leur environnement immédiat	- Utilisation des opportunités offertes par le voisinage et le site - Gestion des avantages et désavantages de la parcelle - Organisation de la parcelle pour créer un cadre de vie agréable, - Réduction des risques de nuisances entre le bâtiment, son voisinage et son site.
	2- Choix intégré des procédés et produits de construction	- Adaptabilité et durabilité des bâtiments, - Choix des procédés de construction, - Choix des produits de construction.
	3- Chantier à faibles nuisances	- Gestion différenciée des déchets de chantier, - Réduction du bruit de chantier, - Réduction des pollutions de la parcelle et du voisinage, - Maîtrise des autres nuisances de chantier.

La seconde dimension (Tableau 23), comprend quatre cibles qui concernent l'éco-gestion de l'énergie, de l'eau, des déchets et la gestion pendant la maintenance (phase d'entretien).

Tableau 23: La dimension « éco-gestion » de la démarche HQE™ Bâtiment.

Dimension II	Cible	Cible élémentaire
Éco-gestion	4- Gestion de l'énergie	- Renforcement de la réduction de la demande et des besoins énergétiques, - Renforcement du recours aux énergies satisfaisantes en matière d'environnement, - Renforcement de l'efficacité des équipements énergétiques, - Utilisation de générateurs propres lorsqu'on a recours à des générateurs à combustion
	5- Gestion de l'eau	- Gestion de l'eau potable, - Recours à des eaux non potables, - Assurance de l'assainissement des eaux usées, - Aide à la gestion des eaux pluviales.
	6- Gestion des déchets d'activité	- Conception des dépôts de déchets d'activités adaptée aux modes de collecte actuelle et future probable - Gestion différenciée des déchets d'activités, adaptée au mode de collecte actuel.
	7- Gestion de l'entretien et de la maintenance	- Optimisation des besoins de maintenance, - Mise en place de procédés efficaces de gestion technique et de maintenance, - Maîtrise des effets environnementaux des procédés de maintenance.

La troisième dimension (Tableau 24), comprend également quatre cibles, concernant le confort des utilisateurs. Le confort ciblé est le thermique, l'acoustique, le visuel et l'olfactif.

Tableau 24 : La dimension « Confort » de la démarche HQE™ Bâtiment.

Dimension III	Cible	Cible élémentaire
Confort	8- Confort hygrothermique	- Permanence des conditions de confort hygrothermique, - Homogénéité des ambiances hygrothermiques, - Zonage hygrothermique.
	9- Confort acoustique	- Correction acoustique, - Isolation acoustique, - Affaiblissement des bruits d'impact et d'équipements, - Zonage acoustique.
	10- Confort visuel	- Relation visuelle satisfaisante avec l'extérieur, - Eclairage naturel optimal en termes de confort et de dépenses énergétiques, - Eclairage artificiel satisfaisant et en appoint de l'éclairage naturel.
	11- Confort olfactif	- Réduction des sources d'odeurs désagréables, - Ventilation permettant l'évacuation des odeurs désagréables.

La quatrième dimension (Tableau 25), comprend trois cibles qui concernent la santé humaine. Elle vise la qualité sanitaire des espèces, de l'air et de l'eau.

Tableau 25 : La dimension « Santé » de la démarche HQE™ Bâtiment.

Dimension IV	Cible	Cible élémentaire
Santé	12- Qualité sanitaire des espèces	- Création de caractéristiques non aériennes des ambiances intérieures satisfaisantes, - Création des conditions d'hygiène, - Facilitation du nettoyage et de l'évacuation des déchets d'activités, - Facilitation des soins de santé, - Création de commodités pour les personnes à capacités réduites.
	13- Qualité sanitaire de l'air	- Gestion des risques de pollution par les produits de construction, - Gestion des risques de pollution par les équipements, - Gestion des risques de pollution par l'entretien ou l'amélioration, - Gestion des risques de pollution par le radon, - Gestion des risques d'air neuf pollué, - Ventilation pour la qualité de l'air.
	14- Qualité sanitaire de l'eau	- Protection du réseau de distribution collective d'eau potable, - Maintien de la qualité de l'eau potable dans les bâtiments, - Amélioration éventuelle de la qualité de l'eau potable, - Traitement éventuel des eaux non potables utilisées, - Gestion des risques liés aux réseaux d'eaux non potables.

2.1.3. Synthèse et utilité

HQE est un outil d'aide à la décision pour le maître d'ouvrage, il permet de définir des objectifs environnementaux propres à l'opération, par une hiérarchisation en amont des cibles de la qualité environnementale des bâtiments (QEB), cohérente avec son contexte. Il permet ensuite d'évaluer ces cibles à plusieurs étapes de l'opération : à 3 moments-clés (fin du programme, fin de conception, fin des travaux). Le profil de la QEB établit le niveau d'exigences en fonction du niveau de performance souhaité par le maître d'ouvrage.

Il est important d'indiquer que la biodiversité est une composante importante de la démarche « HQE Bâtiment » et est notamment traitée dans la cible 1 (Tableau 22: La dimension « écoconstruction » de la démarche HQE^{TM} Bâtiment.) : relation des bâtiments avec leur environnement immédiat. Aussi, la performance énergétique est un enjeu couvert par la cible 4 (gestion de l'énergie), qui est calée sur les labels réglementaires de performance énergétique. Pour cela les bâtiments appliquant la démarche « HQE Bâtiment » doivent être au niveau du label BBC (bâtiment basse consommation) et certains projets revendiquent même d'être des bâtiments à énergie positive.

La démarche HQE bâtiment est une démarche de certification. Elle propose une évaluation qualitative des cibles proposées en donnant un niveau de performance à chacune. Les cibles de la méthode HQE ne s'arrêtent pas à l'environnement mais s'étend à l'aspect social. Cependant, l'ACV présentée et mise en œuvre au chapitre 2, est une démarche d'évaluation qui prend seulement en compte l'aspect environnemental, elle propose une quantification des impacts environnementaux puis l'interprétation des résultats dépend du champ et des objectifs des études.

La méthodologie proposée doit prendre en compte les différents types d'ouvrages souterrains, y compris les ouvrages ponctuels qui représentent des bâtiments mais en sous-sol. Comme indiqué dans le chapitre 1, elle doit également prendre en compte d'autres aspects que l'environnement. La démarche « HQE Bâtiment » nous parait donc intéressante par ses cibles d'évaluation applicables aux bâtiments. Cependant, ses objectifs ne prennent pas en compte les aspects spécifiques au souterrain. De plus, ils ne sont pas adaptés à l'échelle du quartier ou du territoire, ils sont concentrés sur un périmètre spatial limité par le bâtiment lui-même et son environnement immédiat.

2.2. Méthode pour l'infrastructure « Route durable ™ »

2.2.1. Présentation

La démarche « Route durable ™ » se définit comme : « une démarche de management de projet visant à obtenir une performance de DD d'une opération de construction ou de réhabilitation d'une infrastructure routière » [Certivéa et al, 2010] 54. Elle se veut en effet une approche globale et transversale qui considère le projet dans ses dimensions humaines, environnementales et économiques.

2.2.2. Principes et objectifs

Une infrastructure routière agit sur l'environnement, sur la vie sociale et sur la vie économique à toutes les phases de son cycle (programmation, conception, réalisation puis démantèlement). Cette infrastructure relève de la décision et de la responsabilité d'un maître d'ouvrage, il doit ainsi faire en sorte de minimiser son impact environnemental, de garantir sa contribution positive à la vie sociale et économique comme à l'aménagement de l'espace et à la qualité de vie.

La première dimension (Tableau 26) concerne la vie sociale et économique du territoire impliquant la route. Une route durable doit être en synergie avec le territoire qu'elle dessert et s'inscrire dans une action positive bénéfique aux habitants, à leurs activités et à leur cadre de vie.

Tableau 26 : Dimension « vie sociale et économique » de la démarche "Route Durable ™"

Dimension I	Objectif	Sous-objectif
Vie sociale et économique	1- Vie des territoires	-Synergie et cohérence avec les projets du territoire et ses infrastructures - Écoute des besoins et attentes - Cohésion sociale
	2- Approche économique et sociale	-Coût économique - Coût à long terme - Coût local
	3- Identité culturelle	-Paysage - Patrimoine - Modes de vie et pratiques locales

La seconde dimension (Tableau 27), concerne l'aménagement de l'espace et la qualité de vie des riverains. Elle vise à faire l'inventaire des enjeux et des projets de territoires afin de donner un sens au projet en termes d'aménagement du territoire et rendre chaque participant acteur du projet (collectivités locales, acteurs économiques, agriculteurs, riverains).

[54] Elle a été initiée par le Conseil général du Nord, dans le cadre d'une convention de partenariat qui réunissait le département du Nord, le Centre technique de l'équipement Nord-Picardie (ex-CETE Nord-Picardie), le CSTB, le Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC) et Certivéa.

Tableau 27 : Dimension « Aménagement de l'espace et qualité de vie » de la démarche "Route Durable ™"

Dimension II	Objectif	Sous-objectif
Aménagement de l'espace et qualité de vie	4- Accessibilité et mobilité	-Structuration de l'espace -Desserte -Pluri-modalité
	5- Santé - Sécurité des personnes et des biens	-Santé -Sécurité -Gestion des risques et des crises
	6- Qualité d'usage	-Diversité et particularité des utilisateurs - Information du public - Services

La troisième dimension (Tableau 28) concerne la relation entre l'homme et la terre. Elle exige de concevoir le projet pour obtenir une véritable performance environnementale, et d'apporter des solutions aux principales interrogations et limiter les nuisances générées par le projet en phase de chantier comme d'exploitation.

Tableau 28 : Dimension « Homme et terre » de la démarche "Route Durable ™"

Dimension III	Objectif	Sous-objectif
Homme et terre	7- Qualité des ambiances	-Confort acoustique -Confort visuel -Confort climatique
	8- Environnement	-Milieux naturels et écosystèmes -Qualité de l'air et changement climatique -Qualité des sols et pollution
	9- Ressources	-Matériaux, coproduits et gestion des déchets -Gestion de l'eau -Énergie -Gestion des emprises

2.2.3. Synthèse et utilité

Comme pour le bâtiment, le principe repose sur le choix d'objectifs. Dans le cadre de certification des routes, cette démarche propose trois niveaux de certification : « Niveau Base » qui représente la performance minimum acceptable pour une opération route durable, un « Niveau Performant » correspondant à de bonnes pratiques et un « Niveau Très Performant » qui est calibré par rapport aux performances maximales constatées ou innovantes dans des opérations, tout en veillant à ce qu'il reste atteignable.

L'évaluation s'effectue par un questionnaire, qui doit être posé pour chaque objectif visé en trois moments [Certivéa et al, 2010] : en fin de phase programmation (ex. : La préoccupation est-elle prise en compte dans le programme et pourra-ton atteindre le niveau visé ?), en fin de conception (ex. La préoccupation est-elle prise en compte dans la conception et pourra-ton atteindre le niveau visé ?) En fin de réalisation (ex. La préoccupation a-t-elle été mise en œuvre et atteint-elle le niveau visé ?).

Cette démarche représente la première réflexion relative à la démarche HQE pour les infrastructures routières. Elle ne sera pas concrètement appliquée dans le travail de la thèse mais il nous a semblé important de l'illustrer, et de prendre en compte ses objectifs envisagés pour les jeux d'indicateurs d'évaluation proposée ultérieurement.

2.3. Méthode pour un ensemble d'ouvrages « HQE Aménagement ™»

2.3.1. Présentation

La démarche « HQE Aménagement ™ » a commencé ses premières opérations pilotes en 2007. Elle vise la réalisation d'opération intégrées à leurs territoires, dont les impacts sur l'environnement évalués sur l'ensemble du cycle de vie, sont les plus maîtrisés possibles et favorisent le développement économique, social et la qualité de vie. Elle peut être portée par une collectivité ou un aménageur [Certivéa, 2014].

2.3.2. Principes et objectifs

La démarche « HQE Aménagement ™ » a été établie selon un principe d'articulation entre le territoire, en déclinant de façon opérationnelle les politiques territoriales et les bâtiments en lien avec la démarche HQE. Cette démarche propose une approche thématique qui aide la structure de portage dans l'élaboration de son projet, depuis l'analyse initiale jusqu'à la définition du programme d'actions d'aménagement durable. Neuf objectifs, déclinés selon trois dimensions, sont ainsi considérés [Carfantan et al, 2005]. Les objectifs sont liés à l'aménagement contrairement au bâtiment et à la route et les sous-objectifs sont adaptés aux enjeux très précisément.

La première dimension (Tableau 29), concerne l'aménagement du territoire et comprend quatre objectifs. Cette première dimension prend en compte les formes urbaines, le déplacement et l'accessibilité, le paysage et la biodiversité ainsi que les conditions climatiques et géographiques.

Tableau 29 : Dimension « aménagement du territoire » de la démarche HQE Aménagement™

Dimension	Objectif	Sous-objectif
Aménagement du territoire	1- Formes urbaines et utilisation rationnelle de l'espace	- typologie du bâti et des formes urbaines du contexte - éléments de patrimoine - reprise des objectifs de Loi SRU (densité) - requalification des espaces urbains - flexibilité des espaces et des bâtiments - localisation des espaces publics
	2- Déplacements / Accessibilité	- Liaisons avec la ville, avec le territoire - Développement des liaisons douces et des transports collectifs (TC) - Gestion du stationnement - Accessibilité aux équipements et aux commerces, accessibilité au site, accessibilité aux personnes en mobilité réduite (PMR) et aux TC - Qualité de l'air: émission de gaz à effet de serre (GES), chantier - Sécurité des flux, traitement de la vitesse
	3- Paysage et Biodiversité	- préserver le paysage existant - maîtrise des vues - intégration paysagère, trame verte - gestion différenciée, choix des essences - secteurs d'intérêt écologiques, continuités biologiques - aménagement des interfaces
	4- Climat / Géographie	- orientation solaire - orientation des pentes - protection de la pluie - sens du vent

La seconde dimension (Tableau 30) concerne la gestion des ressources et comprend les aspects liés à l'énergie, à l'eau, au sol, aux matériaux utilisés pour la construction et aux déchets produits par l'aménagement.

Tableau 30 : Dimension « Gestion des ressources » de la démarche HQE Aménagement ™

Dimension	Objectif	Sous-objectif
Gestion des ressources	5- Energie	- Desserte du secteur - Potentialités du site et des filières locales - Récupération de chaleur - Eclairage public - Qualité du bâti (chauffage, ventilation, électricité) - Choix de matériel économe
	6- Eau	- Régulation - Récupération (arrosage, eaux grises) - Infiltration - Irrigation - Choix d'essences rustiques et de matériel économe -Valorisation en tant qu'élément de paysage
	7- Sol	- Relief et analyse des pentes - Qualité du sol (stabilité, capacité d'infiltration) - Pollutions des sols - Imperméabilisation - Gestion des déblais et remblais
	8- Matériaux (espaces publics, bâtiments)	- matériaux locaux - choix en fonction du cycle de vie des matériaux - utilisation de matériaux recyclés - santé
	9- Déchets et rejets	- compostage - tri sélectif - récupération - gestion des déchets de chantier - traitement des eaux de chantier - jardins filtrants et dépollution par les plantes - intégration des contraintes de collecte

La troisième dimension (Tableau 31), relative à la vie sociale, comprend les aspects sociaux affectés par l'aménagement. Ils sont liés à la mixité des usagers et aux nuisances produits par l'aménagement.

Tableau 31 : Dimension « Vie sociale » de la démarche HQE Aménagement ™

Dimension	Objectif	Sous-objectif
Vie sociale	10- Contexte social : Usages / Mixité	- prise en compte des usages et des attentes - mixité sociale: offres de logements diversifiées - mixité fonctionnelle: service/ activités - mixité intergénérationnelle - approche sociodémographique - optimisation des équipements
	11 - Bruit et Nuisances	Bruit : - lié aux infrastructures de Transports et au trafic (vitesse, revêtement) - lié au voisinage (activités - lié au chantier Nuisances: - pollution

2.3.3. Synthèse et utilité

Cette démarche a transposé sept cibles de la démarche « HQE bâtiment » : Paysage (Cible 1) ; Chantier (Cible 3) ; énergie (Cible 4) ; Eau (Cible 5) ; Déchets (Cible 6) ; Bruit (Cible 9) et Air (Cible 13). De nouvelles cibles y ont été aussi ajoutées pour que cette démarche soit adaptée à l'évaluation large d'un ensemble urbain : Mobilité, biodiversité, sol, formes urbaines, patrimoine, économie d'espace, mixité et services aux usagers et climat.

L'évaluation des objectifs envisagés s'effectue au travers de plusieurs analyses : une analyse urbaine pour les objectifs 1 et 2, une analyse paysagère pour l'objectif 3, une analyse environnementale pour les objectifs 4 ; 5 ; 6 ; 9 et 11, une analyse technique pour les objectifs 7 et 8 et enfin une analyse Sociologique pour l'objectif 10.

Un point intéressant dans la méthode HQE aménagement est qu'elle prend en compte l'articulation avec le territoire (Cibles 1 ; 2 et 4). HQE aménagement a ainsi proposé un zonage géographique pour les objectifs envisagés, cinq parmi les onze objectifs (objectifs 1 ; 2 ; 5 ; 6 et 10) apparaissent à une échelle globale, dans la mesure où leur bonne prise en compte représente un enjeu national. Les six autres (objectifs 3 ; 4 ; 7 ; 8 ; 9 et 11) relèvent d'une approche plus locale.

Cette démarche a pour objectif de certifier un projet donné sur la base de l'outil « système de management de l'opération (SMO) ». Elle propose à ce stade une approche participative par l'implication de l'ensemble des parties prenantes du projet. Elle prend en compte l'intégration de l'ouvrage dans leur territoire, et les impacts liés sur l'ensemble du cycle de vie, elle favorise également le développement économique et social ainsi que la qualité de vie. Elle situe géographiquement les impacts engendrés (échelle locale et nationale).

L'analyse par zone territoriale nous semble être un point fort que l'on retient pour développer la méthodologie appliquée au souterrain.

2.4. Pratique d'application, projet « HQE²R »

2.4.1. Description et Objectifs

HQE²R est un projet européen de recherche [55] coordonné par le CSTB, visant à élaborer une démarche ainsi que des méthodes et des outils à destination des collectivités locales et de leurs partenaires afin de les aider dans leurs projets de renouvellement urbain et de réhabilitation de quartiers [Charlot-Valdieu and Outrequin, 2001]. Débuté en 2001 et terminé en 2004. Ce projet représente la première avancée pour intégrer le DD dans les projets de renouvellement urbain et de réhabilitation de quartiers. Le projet HQE²R établit sa réflexion à l'échelle du quartier, tant au niveau de l'aménagement que des bâtiments. Sa démarche s'interroge sur les besoins d'un quartier et de sa population et cherche à identifier les problèmes économiques, sociaux et environnementaux.

La méthode HQE²R a pour but de mettre en place une évaluation précise et quantifiable pour aider à la prise de décision. Elle a conduit les acteurs du projet HQE²R à la définition d'indicateurs plus centrés sur les habitants que sur les masses bâties (diversité de la population, niveau d'éducation et qualification professionnelle, cohésion sociale…).

Partant du constat qu'un projet urbain (d'aménagement ou de renouvellement) se décompose en quatre étapes principales (Figure 57), la méthode HQE²R détermine pour chacune les passages obligés pour développer une approche de projet globale d'un point de vue du DD ; elle y insère systématiquement la gouvernance. Ces étapes sont la décision, l'analyse, l'évaluation et l'action.

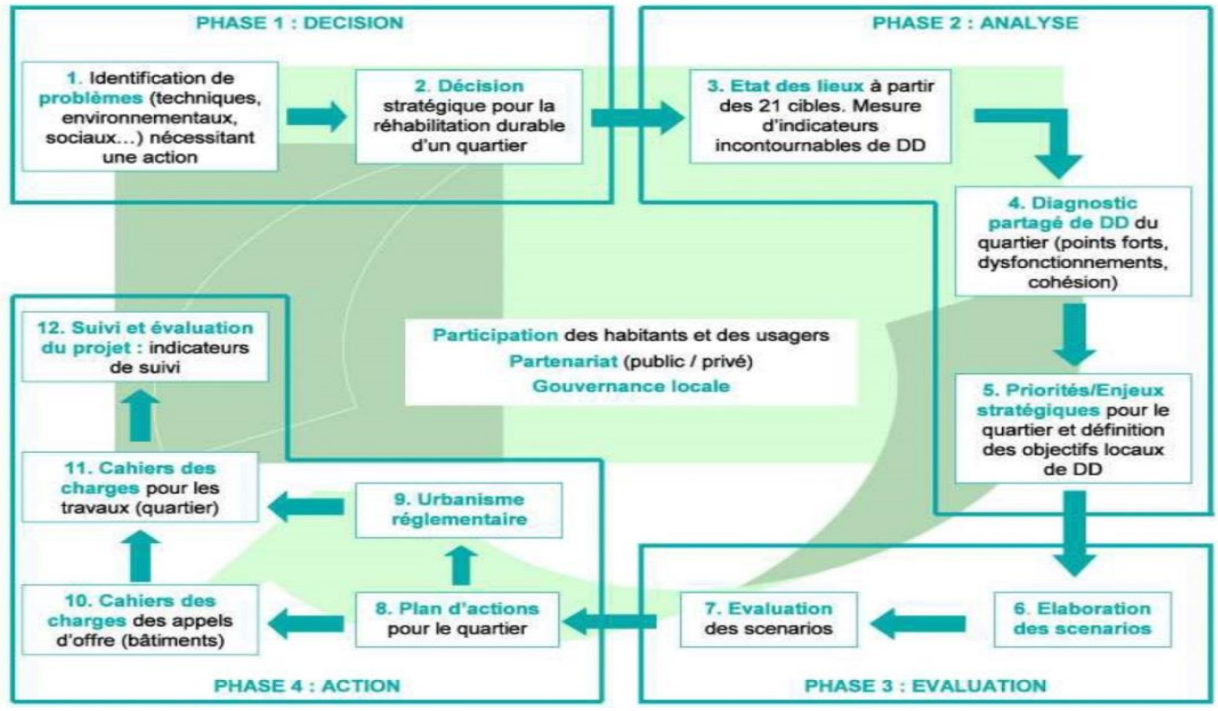


Figure 57 : Quatre phases d'un projet urbain définies pour la démarche HQE²R. (Source : http://www.suden.org/fr/projets-europeens/hqe2r)

[55] Réseaux européens du développement urbain durable : http://www.suden.org/fr/projets-europeens/hqe2r/ (consulté le 8 aout 2016).

2.4.2. Modèles d'application

Trois modèles permettent l'évaluation d'un quartier : INDI (*Indicateur impact*) de développement durable pour l'évaluation et le choix des projets, le modèle ENVI (*Environment impact*) sur l'impact environnemental de projets et le modèle ASCOT (*Assessment of Sustainable Construction and Technology cost)* permet de comparer le coût global avec une référence [Charlot-Valdieu et al, 2004].

Ces trois modèles sont complétés par des grilles d'analyse, pour prendre en compte l'impact croisé des projets et pour choisir entre démolition, renouvellement ou réhabilitation. .

Modèle « INDI »

C'est un modèle d'aide à la décision pour les conducteurs de projets urbains afin de les aider à intégrer le concept de DD dans le plan d'action pour le quartier ou le territoire. Ce modèle propose un système d'indicateurs ISDIS (*Issues Or Integrated Sustainable Development Indicators System*) [Charlot-Valdieu and Outrequin, 2003], qui repose sur cinq objectifs composés de 21 cibles et 61 indicateurs.

Par exemple, le premier objectif est de « Préserver et valoriser l'héritage et conserver les ressources », il comprend cinq cibles. La cible 1 vise à « Réduire la consommation d'énergie et améliorer la gestion de l'énergie ». Cette cible comprend quatre sous-cibles correspondant à quatre indicateurs [Charlot-Valdieu and Outrequin, 2003] :

- 1A : % des bâtiments avec un système de chauffage – ventilation – isolation meilleur que la réglementation nationale (ou à la moyenne) ;
- 1B : consommation électrique par habitant dans le secteur résidentiel ;
- 1C : % des logements et des bâtiments publics du quartier utilisant des énergies renouvelables ;
- 1D : mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour le chauffage des bâtiments résidentiels. Il est évalué selon quatre niveaux (pas d'actions sur l'entourage, conscience des autorités locales, quelques actions spécifiques et concrètes, haut niveau d'action estimé par un engagement officiel et plan d'actions).

Modèle « ENVI »

C'est un modèle d'impact environnemental des différentes actions au niveau du quartier ou d'un micro-territoire (petite ville, territoire d'un grand projet de ville -GPV-,…) [Outrequin, 2004], c'est un outil d'aide et d'évaluation pour la maitrise d'ouvrage, les aménageurs et les collectivités locales.

Le modèle comprend deux parties : la première est une description environnementale du quartier à partir de la saisie de quelques données d'entrée caractérisant le quartier et d'un modèle de simulation. La seconde partie est une analyse des impacts environnementaux d'une série d'action pouvant se dérouler dans le quartier : démolition, construction, changement d'usage des bâtiments, économie d'énergie ou d'eau, mise en place de transport en commun, de collecte sélective…

L'analyse des impacts environnementaux d'une série d'actions peut être menée dans le quartier comme indiqué dans le Tableau 32.

Tableau 32: Analyse des impacts environnementaux par le modèle ENVI [Outrequin, 2004].

Domaine	Variables de sortie environnementale
Énergie	Consommation d'énergie Production locale d'énergie
Eau	Consommation d'eau potable Evaluation des rejets au réseau d'assainissement
CO_2	Émission Absorption
Déchets	Evaluation de la quantité de déchets générés Evaluation de la quantité de déchets valorisés
Espace	Evaluation de la consommation de l'espace (espace urbanisé)

Modèle « ASCOT »

Développé pour le Danemark, ce modèle permet de comparer le coût global d'un projet avec une référence, cet outil prend en compte les phases d'usage et de conception et peut être employé pour la construction neuve et la rénovation.

2.4.3. Synthèse et utilité

Le projet HQE²R a pour but de mettre en place une évaluation précise et quantifiable pour aider à la prise de décision. Ceci a conduit les acteurs du projet HQE²R à la définition d'indicateurs plus centrés sur les habitants que sur les masses bâties (diversité de la population, niveau d'éducation et qualification professionnelle, cohésion sociale...).

Les deux modèles proposés par le projet HQE²R (INDI et ENVI) permettent d'évaluer un quartier et ses bâtiments de façon synthétique. Le modèle INDI représente un profil de DD du quartier. Il propose un grand nombre d'indicateurs qui couvrent une grande partie des aspects environnementaux et sociaux, alors que le modèle ENVI représente seulement le profil environnemental. Le modèle ENVI permet de répondre aux exigences de la Directive Européenne 2001/42/CE sur l'évaluation de l'impact environnemental des projets urbains (présentée dans le chapitre 2 – Cadre réglementaire) [Charlot-Valdieu et al, 2004]. Le modèle INDI est donc plus global car il permet d'élaborer tout d'abord le profil du quartier au regard du DD puis évalue l'évolution du quartier au regard du DD. Il permet enfin de choisir, parmi plusieurs variantes de scénario, le meilleur plan d'actions possible au regard du DD du quartier.

Cependant, ces modèles ne prennent pas en compte la notion du cycle de vie, par exemple le modèle ENVI ne différencie pas les impacts liés à chaque phase du cycle de vie. D'où l'avantage d'adopter l'ACV qui a montré une certaine force pour calculer les impacts environnementaux et a illustré l'importance de la prise en compte de la phase d'exploitation ainsi que l'usage de l'ouvrage. De plus, ces modèles ont à la base pour objectif d'évaluer des variantes d'aménagement et puis faire le choix entre démolition, renouvellement ou réhabilitation du quartier, ils estiment tous l'évolution par rapport à un état essentiel (état du quartier avant l'opération du renouvellement ou réhabilitation).

3. Besoins de la méthodologie MEDDAS et conclusion de la partie I

Par la suite, l'analyse de l'apport de la bibliographie conduit à déterminer les besoins du développement d'une méthodologie d'évaluation au sens du DD des aménagements souterrains (MEDDAS), Tableau 33.

En effet, le projet européen HQE²R a élaboré des méthodes et des outils pour l'évaluation d'un ensemble urbain : la méthode de diagnostic partagé du DD (comparaison à un état essentiel), un système d'indicateurs du DD lors du diagnostic, des indicateurs d'évaluation et de suivi, des recommandations pour l'amélioration de la participation des habitants et usagers, des cahiers des charges et recommandations en amont des projets d'aménagement (stade de la programmation). Il a également montré une certaine flexibilité par la mise en place des modèles d'évaluation des projets à travers de nombreux indicateurs (ENVI, INDI, ASCOT).

Tableau 33 : Originalité et besoin de la méthodologie développée

Méthode	Originalité et Champs d'application
HQE Bâtiment.	Evaluation et Certification des bâtiments
Route durable	Certification des routes
HQE Aménagement	Gestion et démarche de diagnostic territorial
HQE²R	Evaluation des quartiers pour renouvellement ou réhabilitation
Méthodologie proposée	**Evaluation de variantes d'aménagements, souterraines et aériennes, dans une vision d'Avantages/Inconvénients d'une variante par rapport à une autre** **Prise en compte de la notion du cycle de vie**

La méthode présentée par le projet HQE²R est sensiblement proche du travail effectué dans le cadre de la thèse, notamment parce qu'il présente les volets environnemental et socioéconomique. Cependant le champ d'étude est différent et les cibles proposées par la démarche HQE²R ne prennent pas en compte les spécificités du souterrain urbain. Par exemple, les aspects avantageux ou désavantageux du souterrain comme le gain d'espace, le gain du temps, etc.

Partie II: Développement de la méthodologie pour un complexe souterrain - Tunnel de la Croix-Rousse

1. Introduction

Dans le cadre de ce travail, afin de compléter l'approche méthodologique environnementale, un jeu d'indicateurs sociaux adaptés aux ouvrages souterrains (Tableau 68 ; Tableau 69 ; et Tableau 70 en ANNEXE 5 ; 6 et 7) a été construit, puis deux autres jeux d'indicateurs économiques et environnementaux également en s'inspirant de plusieurs normes et références bibliographiques concernant les bâtiments et les ouvrages du génie civil.

L'idée est de récapituler les objectifs de l'évaluation par volet du DD, ces objectifs se composent des sous-objectifs et ensuite d'un grand nombre d'« exemples d'indicateurs ». Ces exemples d'indicateurs sont adaptés aux ouvrages souterrains. Ils sont sélectionnables en fonction du projet évalué, ils doivent donc être en lien avec les fonctions évaluées ou avec leurs structures correspondantes (ou avec les deux à la fois). Ils sont donc liés à l'ensemble « fonction - structure ». Ces jeux d'indicateurs sont donc illustratifs, ils doivent idéalement être mis en place par un groupe d'experts de chaque domaine. L'évolution des méthodes techniques peut aussi ajouter d'autres futurs indicateurs. Par exemple : méthodes de construction, d'exploitation, etc.

Par la suite, une présentation des trois jeux d'indicateurs proposés est abordée (sociaux, économiques, environnementaux). Cette présentation est accompagnée d'une application au tunnel de la Croix-Rousse en évaluant au moins un indicateur par objectif. Cela permet d'avoir une vision assez complète des trois sphères du DD sur un cas concret.

2. Volet social

2.1. Proposition d'un jeu d'indicateurs sociaux adaptés au souterrain

Le jeu d'indicateurs sociaux proposé comprend 9 grands objectifs et 32 sous-objectifs, ainsi que 124 exemples d'indicateurs pouvant être adaptés aux ouvrages souterrains et leur utilisation. Par la suite, un tableau récapitulatif des objectifs d'évaluation proposés (Tableau 34), il permet d'organiser les résultats d'évaluation des indicateurs pour un nombre (n) de variantes.

Tableau 34 : Jeu d'indicateurs sociaux pour l'évaluation

Objectif	Sous-objectif
I - Faisabilité au sens d'aménagement	1- Gestion de l'espace
	2- Héritage culturel
	3- Possibilité de construction
II - Efficacité	4- Service fourni par l'ouvrage
III - Accessibilité	5- Accès des PMR
	6- Entrée et circulation à l'intérieur
	7- Accès aux équipements techniques
IV - Adaptabilité	8- Adaptabilité de l'ouvrage
	9- Mutabilité de l'ouvrage
V - Santé et confort à l'intérieur de l'ouvrage	10- Gêne
	11- Caractéristiques thermiques
	12- caractéristiques de la qualité de l'air
	13- caractéristiques acoustiques
	14- caractéristiques de confort visuel
VI - Impacts sur le voisinage	15- Image de la ville (aspect esthétique)
	16- Bruit et vibrations sur l'environnement extérieur
	17- Emissions dans l'air, le sol et les eaux extérieures
	18- Eblouissement et Occultation de l'ouvrage
VII - Maintenance maintenabilité	19- Fréquence
	20- confort lié à la maintenance
	21- Maintenabilité
VIII - Sécurité et sûreté	22- Résistance aux conditions métrologiques
	23- Résistance au rayonnement solaire
	24- Résistance à l'inondation
	25- Résistance aux tremblements de terre
	26- Résistance aux incendies
	27- Résistance aux impacts du trafic routier
	28- Sureté et sécurité contre le vandalisme
	29- Disposition en cas de coupures d'alimentation
IX- Aspect humain	30- Participation des acteurs
	31- Création d'emplois
	32- Système de population

Par la suite, l'application au cas de la Croix-Rousse est abordée pour le volet social, permettant de proposer une méthode de sélection des indicateurs pour l'évaluation en deux parties : les indicateurs liés à la fonction et ceux liés à la structure.

2.2. Sélection des indicateurs sociaux

Dans le cas de la Croix-Rousse, les indicateurs sélectionnables sont liés à l'ensemble « fonction – structure ». La première étape est donc de déterminer ce que représente cet ensemble. Pour mémoire : les deux scénarios proposés à ce stade sont : scénario mixte avec une petite galerie et chaussées modes doux aériennes ; et scénario souterrain avec une galerie plus grande qui comprend les chaussées modes doux souterraines.

L'analyse des fonctions permet de classer les fonctions répondant aux besoins (Tableau 35) selon leurs importances (principales, annexes, secondaires)[56]. Le projet Croix-Rousse permet de définir les fonctions du Tableau 35.

Tableau 35 : Les besoins exprimés au départ du projet et les fonctions y répondant

Expression de la fonction	Classement de la fonction	Besoin envisagé (Cf. Chapitre 1. P.53)
FP1 : Assurer la sécurité du tube routier	Fonction principale	(B1)
FP2 : Assurer le passage des modes doux	Fonction principale	(B2)
FA1 : Assurer l'accès aux ouvrages principaux	Fonction annexe	(B1) et (B2)
FA2 : Assurer les conditions optimales pour l'exploitation	Fonction annexe	(B1) et (B2)
FS1 : Fournir des stationnements aux têtes du tunnel	Fonction secondaire	Besoin secondaire
FS2 : Organiser des événements	Fonction secondaire	Besoin secondaire

L'ensemble de plusieurs fonctions (principales et annexes) permet de répondre à un besoin principal pour lequel l'ouvrage a été construit. Alors que le Grand Lyon a aussi profité du chantier pour aménager d'autres ouvrages répondant à d'autres besoins secondaires (ils n'étaient pas prévus au départ, et ce n'est pas essentiellement pour eux que le projet s'est lancé). Les fonctions secondaires, présentée dans le tableau précédent, ont pour objectif de répondre aux besoins secondaires.

Pour les fonctions, il s'agit seulement des fonctions principales (FP1 et FP2), et des fonctions annexes (FA1 et FA2), car ce sont celles qui répondent aux besoins principaux du projet. Par contre, pour les deux variantes posées, la fonction (FP1) est toujours assurée par une galerie de sécurité souterraine. Cela ne change pas entre les deux variantes proposées. Elle est donc éliminée[57]. On garde ainsi la fonction FP2 pour l'évaluation.

Quant aux structures, Il s'agit des structures principales et annexes construites pour assurer aussi bien les fonctions principales qu'annexes. Pour mémoire : la structure principale correspondante à la FP1 est toujours une galerie de sécurité souterraine. Pour les structures qui correspondent à la FP2, ce sont les chaussées aériennes des modes doux dans le scénario mixte et les chaussées souterraines des modes doux dans le scénario souterrain. Les structures annexes sont, dans les deux scénarios, les équipements annexes (usines de ventilation, équipements d'éclairage, etc.).

Le tableau suivant (Tableau 36) présente les fonctions et leurs structures correspondantes, ainsi que le périmètre spatial les comprenant. Les structures correspondantes aux fonctions principales et

[56] Cf. Catégories des fonctions P. 37.

[57] Cette fonction aurait été prise en compte au cas où une troisième variante avait été proposée, en répondant d'autre manière au besoin d'évacuation des usagers du tunnel routier (ex. puits d'évacuation, zone hors sinistre, etc.).

annexes sont dans le périmètre structurel. Ainsi, les structures principales (SP) et annexes (SA) sont concernées. Dans le scénario mixte, elles comprennentla galerie de sécurité simple, ses tubes de liaison et sa chaussée piétonnière ; les chaussées aériennes des modes doux et les équipements techniques (ventilation, éclairages, sécurité, etc.). Alors que dans le scénario souterrain, elles comprennent le tunnel modes doux et ses tubes de liaison ; ses chaussées (bus, cyclable, piétonnière) ; et les équipements techniques.

Tableau 36 : Les fonctions et leurs structures correspondantes

Fonction assurée	Structurs assurant la fonction (Cf. Chapitre 2 ; P. 89)	
	Variante 1 (scénario mixte)	**Variante 2 (scénario souterrain)**
FP1	**SP1-1 :** Galerie de sécurité simple **SP1-2 :** Une chaussée piétonnière simple	**SP1-1 :** Tunnel de sécurité + modes doux **SP1-2 :** Chaussées modes doux
FP2	**SP2 :** Chaussées aériennes des modes doux en site propre	**SP2-1 :** Tunnel modes doux **SP2-2 :** Chaussées souterraines dédiées aux modes doux
FP3	**SP3 :** bus	**SP3 :** bus
FA1	**SA1-1 :** 14 tunnels de liaison **SA1-2 :** Têtes de la galerie de sécurité	**SA1-1 :** 14 tunnels de liaison **SA1-2 :** Têtes du tunnel modes doux
FA2	**SA2-1 :** Usines de ventilation **SA2-2 :** Equipements d'éclairage **SA2-3 :** Equipement de sécurité	**SA2-1 :** Usines de ventilation **SA2-2 :** Equipements d'éclairage **SA2-3 :** Equipement de sécurité
FS1	-	**SS1 :** Parkings extérieurs
FS2	-	Assurée par les SP1 et SP2

Avertissement : Dans la présente application à la Croix-Rousse, l'évaluation était limitée par le manque des données, l'évaluation des indicateurs sociaux et économiques était qualitative, elle se base sur des études bibliographiques et sur un questionnaire qui a été réalisé au début de la thèse (ANNEXE 11). Ce questionnaire a été réalisé à destination des chercheurs et des maitres d'ouvrages afin de collecter les informations concernant les différents aspects d'évaluation. L'application ci-après se veut donc illustrative, elle produit des résultats quantitatifs et qualitatifs.

2.2.1. Objectifs sociaux liés à la fonction de l'ouvrage

La sélection d'indicateurs concerne seulement la fonction (FP2) et les fonctions annexes (FA1 et FA2). Ainsi, deux objectifs d'évaluation sont liés à la fonction de l'ouvrage : l'objectif II « efficacité » et l'objectif V « Santé et confort ».

Objectif II : « Efficacité »

L'efficacité visée dans cet objectif est celle offerte par l'ouvrage pour assurer le service du passage des modes doux entre deux points donnés. L'objectif est ainsi d'évaluer la qualité de ce service rendu par chaque scénario. Trois indicateurs ont donc été sélectionnés à ce stade (Tableau 37) : Le premier est la « distance parcourue » entre les deux points donnés (quai du Rhône et quai de Saône - Figure 32), le second est le « temps du trajet » pour chaque mode de transport et le troisième est la « disponibilité du service » par jour.

Tableau 37 : Indicateurs retenus pour évaluer l'efficacité du service fourni par l'ouvrage

Objectif	Sous-objectif	Indicateur	Variante 1 (scénario mixte)	Variante 2 (scénario souterrain)
II - Efficacité	4 - Service fourni par l'ouvrage	Distance parcourue (km)	4	1.7
		Temps du trajet – mode piéton (minutes)	44	26
		Temps du trajet – mode vélo (minutes)	16	6
		Temps du trajet – mode bus (minutes)	10	3
		Disponibilité du service (heures par jour)	24	19

Pour le scénario souterrain, la « distance parcourue » représente la longueur du tunnel modes doux actuellement existant. Par contre dans le scénario mixte (scénario fictif), le chemin aérien considéré a été choisi parmi plusieurs possibilités données par l'outil logiciel Google-Earth. Il s'agit du chemin le plus court, passant autour de la colline Croix-Rousse et reliant les mêmes points.

Le « temps du trajet » représente le temps moyen de chaque trajet, il a été estimé en prenant en compte le trafic tant pendant les jours de la semaine que pendant les weekends, selon les données du site (V-trafic[58]). Un gain de temps important a donc été estimé en passant par le chemin souterrain. Cela confirme ce qui est dans la littérature, où Godard, Sterling et Berenguier avaient considéré qu'un tel gain de temps (liaisons raccourcies ou facilitées en traversant des obstacles naturels) est un avantage pour la solution souterraine [Godard and Sterling, 1995 ; Godard and Berenguier, 2002]. De plus, l'indicateur « temps de trajet » avait été choisi comme un indicateur social dans le cadre du travail mené par le thème 1 du projet national Ville10D [Gautier et al, 2014b]. Il est donc bien à même de caractériser une des spécificités du souterrain.

La « disponibilité du service » est également discriminante dans le cas d'un ouvrage souterrain, car la plupart des ouvrages de ce type sont fermés quelques heures par jour pour des raisons de sécurité. Le service rendu est alors interrompu. Concernant le tunnel de la Croix-Rousse, le service du passage des modes doux est disponible 19h par jour. La fermeture du tunnel est fixée de minuit jusqu'à 5h [Grand-Lyon, 2013]. Alors que dans le cas d'un chemin en surface, le service resterait disponible sans interruption. Cet aspect représente un inconvénient pour les cyclistes et les piétons, car le bus ne circule déjà pas pendant cette période d'interruption de service. Cet indicateur est ainsi à retenir, car il représente un aspect spécifique au souterrain.

Objectif V « Santé et confort à l'intérieur de l'ouvrage »

Concernant les aspects sociaux liés à la santé et au confort, quatre indicateurs ont été sélectionnés (Tableau 38). Ils sont liés à la gêne pour les usagers de l'ouvrage, ainsi qu'aux caractéristiques de confort visuel, acoustique et thermique.

[58] Site aidant au calcul du temps-réel du trajet en prenant en compte le trafic journalier http://www.v-traffic.com/

Tableau 38 : Indicateurs retenus liés à la santé et au confort à l'intérieur de l'ouvrage

Objectif	Sous-objectif	Indicateur	Variante 1 (scénario mixte)	Variante 2 (scénario souterrain)
V- Santé et confort à l'intérieur de l'ouvrage	10 - Gêne	Influences psychologiques	Non connues	Il y en a
	11 - Caractéristiques de confort thermiques	Stabilité de la température interne par rapport à une référence (Isolation thermique)	Pas d'isolation	Isolation naturelle
	13 - Caractéristiques de confort acoustiques	Pression acoustique	Pas de pression	Pression occasionnée
	14 - caractéristiques de confort visuel	influence négatives de l'éclairage	Basses	Hautes

En ce qui concerne les « influences psychologiques », Dobinson, Browen et Bobylev les ont mentionnées. Ils indiquent qu'un sentiment de claustrophobie peut être produit suite à une longue période passée dans le souterrain, à cause d'une ventilation ou d'un éclairage faible, d'un manque d'orientation, de la froideur, de l'humidité, d'un sentiment de manque de sécurité, etc. [Dobinson and Bowen, 1997 ; Bobylev, 2009]. Ces aspects ont également fait l'objet de plusieurs rapports rendus par le thème 3 du projet Ville 10D (aspects sociétaux). Concernant le tunnel de la Croix-Rousse, le cheminement piétonnier a fait l'objet d'études. Différents professionnels se sont ainsi penchés sur ce tunnel, notamment un psychiatre et chercheur en neuroscience. Ce dernier a préconisé que le tube modes doux ne soit pas tout droit, empêchant ainsi les piétons qui l'empruntent d'en voir le bout. L'impression de distance et de lenteur que pourrait ressentir le piéton est alors limitée [Grand Lyon, 2011]. On constate donc qu'il y a des influences psychologiques reconnues dans un ouvrage souterrain, alors que pour un scénario aérien cet aspect est largement moins présent.

L'isolation thermique peut être estimée par l'évaluation de la stabilité de la température à l'intérieur de l'ouvrage par rapport à une température de référence, afin d'atteindre un niveau de confort thermique acceptable qui est synonyme de bien-être [Djongyang et al, 2010]. Le confort thermique a été défini par Hensen [Hensen, 1991] comme un état dans lequel il n'y a pas besoin de corriger l'environnement par le comportement. Pour ce faire, deux indices peuvent être déterminés : PMV (*Predicted Mean Vote*) et PPD (*Predicted Percentage Dissatisfied*) tels que la norme ISO 7730 :2005 les définit à partir du modèle de confort thermique de Fanger [Fanger, 1970]. Dans le cas de la Croix-Rousse, du fait d'un manque de données, l'« isolation thermique » a été estimée, d'après plusieurs études bibliographiques, par le rôle d'isolant thermique naturel offert par le sol dans le scénario souterrain, par rapport à un chemin aérien complétement ouvert [Carmody and Sterling, 1993; Godard and Sterling, 1995; Dobinson and Bowen, 1997; Godard and Berenguier, 2002; Bobylev, 2009; Li and Parriaux, 2012]. Ainsi, on conclut que dans le cas d'un ouvrage souterrain, il y a un niveau de protection naturelle offerte par le sol, contre les conditions métrologiques (froid, chaud, etc.). Le souterrain ayant une ouverture limitée, il a une possibilité de « contrôlabilité » si besoin.

Concernant les caractéristiques acoustiques à l'intérieur de l'ouvrage, on s'est intéressé à la pression acoustique en provenance de différentes sources intérieures (équipements de ventilation, etc.).

Cette pression a été caractérisée dans la littérature par de nombreux indicateurs existants [CIDB[59], site officiel], parmi lesquels :

- Indicateurs usuels, de type logarithmique, basés sur l'intensité du bruit : par exemple l'indicateur Lden qui caractérise le niveau d'exposition au bruit jour/soirée/nuit et s'exprime en décibels. Il est imposé par la directive européenne 2002/49/CE pour toute évaluation et gestion du bruit dans l'environnement ;
- Indicateur Harmonica : indicateur adimensionnel informant d'une part sur le bruit de fond ambiant, d'autre part sur les événements sonores qui émergent de ce bruit de fond;
- Indicateur géolocalisé implémenté dans le logiciel « OrbisGIS » sous forme d'un module intitulé «NoiseMap » (cf. Picaud, « Eval-PDU », Programme ANR Villes durables).

Par manque de données, l'évaluation de cet indicateur dans le cas de la Croix-Rousse n'était pas possible dans le cadre de ce travail. Cependant, on peut estimer que le chemin souterrain, étant un espace relativement fermé, il garde probablement la pression acoustique plus qu'un chemin aérien. Surtout avec l'existence de plusieurs sources de bruit à l'intérieur du tunnel (ventilation, passage du bus, etc.). Ceci peut engendrer une gêne pour les usagers du tunnel.

Concernant le confort visuel, la luminance est définie comme une grandeur physique (exprimée en cd/m2 : candela par mètre carré). Dans le cas de la Croix-Rousse, le chemin souterrain demande un éclairage pour une surface de (15400 m²) pendant (19h/24), alors que le chemin aérien demande un éclairage pour une surface de (35200m²) pendant (10h/24). Le chemin souterrain doit donc être éclairé doublement pour une moitié de surface. La probabilité de gêne est donc plus grande en cas de disfonctionnement. Le thème 3 du PN Ville 10D [Dumortier et al, 2014] a également étudié les caractéristiques de confort visuel offertes par un ouvrage souterrain, du point de vue de l'influence de l'éclairage. En effet, grâce à un questionnaire, les environnements souterrains ont été classés suivant le confort visuel que ressentent les usagers, et des cartes de luminances ont été associées à ces espaces. On constate donc qu'un ouvrage souterrain est toujours influencé par son niveau d'éclairage, qui est considéré comme essentiel pour le fonctionnement de l'ouvrage, alors que ce n'est pas le cas pour un ouvrage aérien. Cela représente donc une dépendance qui peut être un inconvénient des ouvrages souterrains.

2.2.2. Objectifs sociaux liés aux structures

A ce stade, cinq grands objectifs sont évalués par quatorze indicateurs : Objectif I « Faisabilité au sens d'aménagement » ; Objectif IV « Adaptabilité » ; Objectif VI : « Impacts sur le voisinage » ; Objectif VIII « Sécurité et sûreté » et Objectif IX « Aspect humain ».

Objectif I « Faisabilité au sens d'aménagement »

La faisabilité au sens d'aménagement d'un ouvrage de construction, qu'il soit souterrain ou aérien, est liée à plusieurs aspects : disponibilité de l'espace, besoin et bénéfices obtenus, etc. Quatre indicateurs sont retenus pour évaluer cet objectif (Tableau 39) : la disponibilité de terrains pour la construction, la consommation ou la production de l'espace et la libération de l'espace.

[59] CIDB : Centre d'information et de documentation sur le bruit (http://www.bruit.fr/)

Tableau 39 : Indicateurs retenus pour évaluer la faisabilité au sens d'aménagement

Objectif	Sous-objectif	Indicateur	Variante 1 (scénario mixte)	Variante 2 (scénario souterrain)
I - Faisabilité d'aménagement	1 - Gestion de l'espace	Espace créé (m²)	8750	15400
		Espace urbain consommé (m²)	35200	0
		Espace urbain non occupé (m²)	0	35200
	3 - Possibilité de construire l'ouvrage	Disponibilité du site pour la construction	Pas sûr	Oui

L'espace[60] étant considéré comme une ressource renouvelable offerte par le souterrain à la ville [Li and Parriaux, 2012], le scénario souterrain offre donc un espace supplémentaire à la ville, égal à la surface des chaussées souterraines dans le tunnel modes doux (15400 m²). Alors que le scénario mixte offre un espace identique à la surface de la chaussée piétonnière dans la galerie de sécurité simple (8750 m²). Cet aspect est exprimé par l'indicateur « Espace créé ». Cependant, le scénario mixte consomme également de l'espace urbain, égal à la surface des chaussées aériennes des modes doux (35200 m²), cet aspect est exprimé par l'indicateur « Espace consommé ».

Une autre des spécificités du souterrain est le fait d'éviter de consommer l'espace en surface et ainsi de le libérer pour d'autres utilisations. Cet aspect est exprimé par l'indicateur « Espace urbain non occupé ». En effet, en construisant un tunnel modes doux, une zone urbaine égale à la surface des chaussées aériennes des modes doux (35200 m²) ne serait pas occupée.

L'indicateur « disponibilité du site pour la construction » montre la possibilité de construire l'ouvrage dans chaque scénario. La disponibilité des terrains pour réaliser un chemin modes doux en surface n'est pas sûre du fait de l'existence de plusieurs contraintes : Une zone urbaine résidentielle, dense et spatialement limitée sur une presqu'île entre deux rivières (le Rhône et la Saône), existence d'une colline naturelle (colline de la Croix-Rousse). Alors que dans le scénario souterrain l'espace au sous-sol est disponible étant donné les conditions géologiques de la colline de la Croix-Rousse adaptées à la construction souterraine.

Objectif IV « Adaptabilité »

Cet aspect estime la capacité d'adapter les structures évaluées à un éventuel futur changement de fonction. Deux indicateurs sont donc choisis (Tableau 40) : la « possibilité de rajouter des fonctions d'usage » (imprévues lors de la conception de l'ouvrage) ; et la « facilité pour l'installation d'éventuels futurs équipements ».

[60] En effet, le terme « espace » correspond à une « surface » dans le cas d'ouvrage aérien, et d'une « volume » dans le cas d'un ouvrage souterrain. Pour normaliser la comparaison dans cette étude de cas, on considère qu'un espace représente toujours une surface.

Tableau 40 : Indicateurs retenus pour évaluer l'adaptabilité de l'ouvrage

Objectif	Sous-objectif	Indicateur	Variante 1 (scénario mixte)	Variante 2 (scénario souterrain)
IV- Adaptabilité	8 - Adaptabilité de l'ouvrage	Possibilité de rajouter des fonctions secondaires d'usage	Pas sûr	Fonction d'usage rajoutée « évènementiel »
	9 - Mutabilité de l'ouvrage	Facilité pour l'installation de possibles futurs équipements	basse	moyenne

Dans le tunnel de la Croix-Rousse, une fonction d'usage a été ultérieurement rajoutée, il s'agit de l'utilisation de l'espace dans le tunnel pour les événements éventuels (expositions, marchés, etc.). Cette fonction n'a pas été prévue lors de la conception de l'ouvrage, alors que le tunnel, espace et protégé avec une faible trafic, a pu offrir cette possibilité. Cette fonction permet aussi de favoriser le passage des modes doux dans le tunnel [Grand-Lyon, 2013]. Par contre pour l'autre scénario cela ne serait pas sûr.

Pour la mutabilité, le tunnel mode doux est conçu avec des espaces supplémentaires destinés aux câbles et aux réseaux d'un futur éventuel tramway [Grand-Lyon, 2013]. Dans le même esprit, un tunnel peut offrir une facilité de fixer les réseaux électriques nécessaires pour le tramway sur la voûte, alors qu'un chemin aérien a besoin de porteurs des réseaux.

Objectif VI : « Impacts sur le voisinage »

Pour évaluer cet objectif, trois aspects ont été sélectionnés (Tableau 41). Le bruit et la vibration, en provenance de l'ouvrage vers le voisinage, peuvent être produits tant pendant la phase de construction (engins de chantier, équipements provisoires, etc.), que pendant la phase d'exploitation (usage, équipements définitifs, etc.). Les émissions dans l'environnement proche représentent le second indicateur. Enfin, l'aspect esthétique, qui affecte l'image de la ville, est aussi un aspect important de ce que donne l'ouvrage comme impacts visuels sur son environnement proche.

Tableau 41 : Indicateurs retenus pour évaluer les impacts sur le voisinage

Objectif	Sous-objectif	Indicateur	Variante 1 (scénario mixte)	Variante 2 (scénario souterrain)
VI - impacts sur le voisinage	15 - Image de la ville (aspect esthétique)	Infrastructures dissimulées	Galerie simple	Galerie + chaussées modes doux
	16 - Bruit et vibrations sur l'environnement extérieur	Bruit et vibration pendant le chantier	Polluant étant un espace ouvert	Moins polluant ayant une isolation naturelle
		Façades exposées au bruit de l'usage	Plus de façade exposé.	Isolation naturelle de l'usage
	17 - Emissions dans l'air, le sol et les eaux extérieures	Particules, poussière, fumée, etc.	Plus polluant globalement	Moins polluant globalement

L'aspect « esthétique » semble important dans le cas d'un ouvrage souterrain. En effet, il offre la possibilité de dissimuler les infrastructures. Cela peut améliorer l'image de la ville en remplaçant ces coupures importantes entre les services urbains par des espaces verts ou d'autres services capables de donner une ambiance plus agréable [Godard and Berenguier, 2002 ; Bobylev, 2009 ; Li and Parriaux, 2012].

Regardons maintenant l'aspect bruit en provenance de l'ouvrage. Celui-ci se compose de trois indicateurs correspondant à trois sources identifiées de nuisances sonores : les engins de chantier pendant la phase de la construction (y compris la vibration due à l'explosion pour le creusement du tunnel), l'usage habituel (bruit du trafic) pendant la phase d'exploitation et le bruit prévenant des équipements qui assurent l'exploitation (ex. usine de ventilation).

Pendant la phase de construction, on considère que le scénario souterrain est moins polluant concernant le bruit[61], grâce à l'isolation naturelle offerte par le souterrain et qui protège le voisinage des effets sonores [Carmody and Sterling, 1993 ; Godard and Sterling, 1995 ; Dobinson and Bowen, 1997 ; Chow et al, 2002 ; Godard and Berenguier, 2002 ; ITA, 2004 ; Bobylev, 2009 ; Li and Parriaux, 2012] ; Quant à la vibration de l'explosion, les deux scénarios comprennent un creusement d'une galerie souterraine à l'explosif, tenant compte à l'importance de ces effets de vibrations pendant la phase du chantier [Bobylev, 2009].

Pendant l'usage, le niveau du bruit peut être exprimé par plusieurs indicateurs, par exemple la longueur de façades exposées aux sources de nuisances sonores [LE, 2011]. Le chemin aérien dans le scénario mixte est un espace ouvert dans une zone résidentielle, exposé à 4 km de façades. Alors que le scénario souterrain ayant une isolation naturelle, les effets du bruit provenant de l'usage restent limités sur le voisinage.

Cependant, dans l'absolu le bruit en provenance des équipements assurant le fonctionnement du tunnel et surtout des usines de ventilations, induit les sources de bruit les plus importantes [Dobinson and Bowen, 1997 ; Bobylev, 2009]. Les usines de ventilation dans le cas de la Croix-Rousse sont communes avec le tube routier (5 usines de ventilation [Grand-Lyon, 2013]), elles fonctionnent pratiquement tous les jours dans les deux scénarios mais avec une puissance plus importante dans le scénario souterrain ayant un bus diesel et usagers passant par le tunnel.

Le dernier indicateur évalué concerne les émissions dans l'air extérieur (particules, poussières, fumée, etc.), En effet, Dobinson, Bowen, Godard et Berenguier ont indiqué dans leurs études que ces effets sont limités dans le cas d'un ouvrage souterrain offrant une possibilité de filtration (par des équipements complémentaires aux usines de ventilation) [Dobinson and Bowen, 1997; Godard and Berenguier, 2002]. Dans le cas du tunnel de la Croix-Rousse, des mesures ont été prises dans la phase de construction pour limiter les émissions dans l'air (arrosage du marin, circulations des engins, aspiration des émissions, etc.) [GrandLyon et Egis, 2012]. Dans la phase d'exploitation, la fréquence du passage des bus est faible (62 bus par jours), ainsi que le chemin souterrain est plus court, le scénario souterrain a donc à priori moins de pollution « globale ».

[61] Il faudrait mentionner une source du brui considérable : le concasseur des matériaux excavés. Ce concasseur existe dans les deux scénarios alors que les matériaux excavés sont plus importants dans le scénario souterrain que dans le scénario mixte. Cette source du bruit a des effets sur le voisinage, alors que par un manque de données, on le cite seulement, sans le calculer.

Objectif VIII « Sécurité et sûreté »

Deux aspects sont retenus pour évaluer la sécurité et la sûreté d'un ouvrage (Tableau 42), le premier est la protection contre les conditions climatiques, le second est le nombre de carrefours avec les réseaux existants.

Tableau 42 : indicateurs retenus pour évaluer la sécurité et la sûreté d'un ouvrage

Objectif	Sous-objectif	Indicateur	Variante 1 (scénario mixte)	Variante 2 (scénario souterrain)
VIII - sécurité et sûreté	22 – Résistance vis-à-vis des conditions météorologiques	Capacité de protection	basse	performant
	27 - Résistance aux impacts du trafic routier	Nombre de carrefours	8	0

Dobinson, Bowen, Godard et Berenguier ont constaté qu'un chemin souterrain est souvent protégé vis-à-vis des conditions externes, et des effets climatiques, plus qu'un chemin aérien, grâce à l'isolation naturelle offerte par le sol [Dobinson and Bowen, 1997; Godard and Berenguier, 2002]. Cela représente un avantage pour l'ouvrage souterrain et le rend plus utilisable dans des conditions climatiques extrêmes (pluie, neige, chaleurs etc.). A contrario la protection d'un chemin en surface demande des mesures spéciales supplémentaires.

Quant à la résistance contre les impacts du trafic, un indicateur est retenu : le « nombre de carrefours ». En effet, l'insertion d'une nouvelle variante de tracé dans le territoire peut faire apparaître des points de non sécurité (Figure 58). Il convient donc d'évaluer par exemple le nombre d'intersections (carrefours) construites dans chaque scénario. Ce nombre peut augmenter la congestion du trafic et la probabilité d'accidents. L'aménagement des carrefours supplémentaires augmente également le temps de livraison du projet, cela demande des mesures supplémentaires pour assurer la sécurité pendant les travaux du chantier

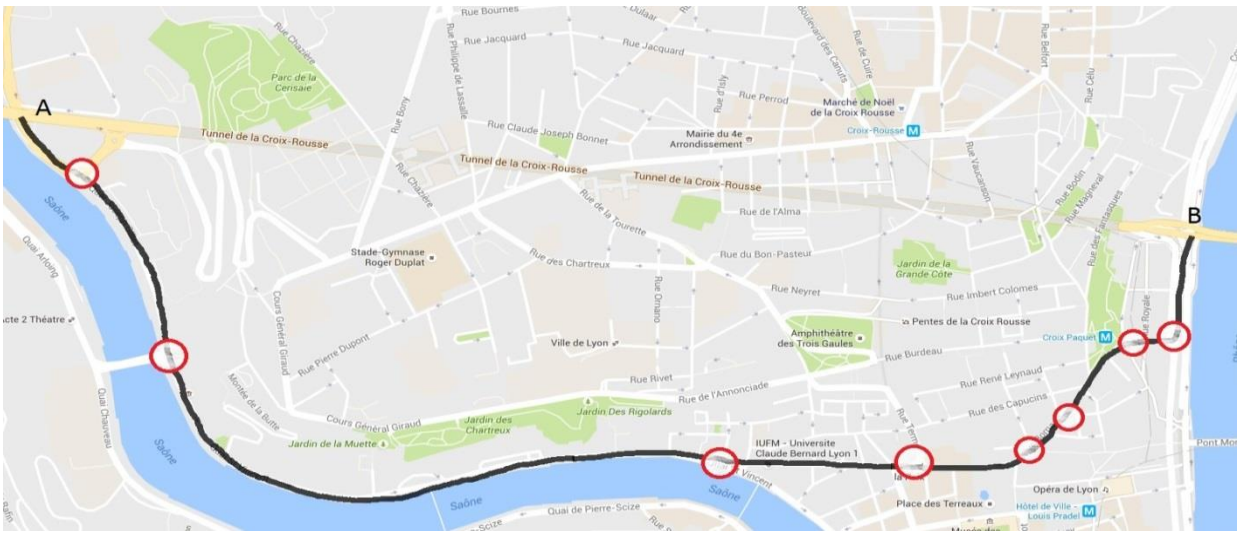


Figure 58 : carrefours possibles avec les réseaux routiers existants dans le cas d'un chemin en surface

Huit carrefours ont donc été identifiés dans le cas d'un chemin en surface qui relie le point A au point B. Ce nombre de carrefour donne une sécurité moins moindre dans un scénario mixte que dans un scénario souterrain (où il n'y a aucun carrefour). La probabilité d'accident augment jusqu'à dix fois plus sur un carrefour [Subirats et al, 2010].

En rassemblant les résultats obtenus pour le volet social, on trouve dans le tableau suivant (Tableau 43).

Tableau 43 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus pour le volet social

N°	Indicateur social	Variante 1 (scénario mixte)	Variante 2 (scénario souterrain)
1	Distance parcourue (km)	4	1.7
2	Temps du trajet – mode piéton (minutes)	44	26
3	Temps du trajet – mode vélo (minutes)	16	6
4	Temps du trajet – mode bus (minutes)	10	3
5	Disponibilité du service (h/jour)	24	19
6	Espace créée (m²)	8750	15400
7	Espace urbain consommé (m²)	35200	0
8	Espace urbain évitée à occuper (m²)	0	35200
9	Nombre de carrefours	8	0
10	Influences psychologiques	Pas connues	Il y en a
11	Isolation thermique	Pas d'isolation	Isolation naturelle
12	Pression acoustique	Pas de pression	Pression occasionnée
13	Influence de l'éclairage	Basses	Hautes
14	Disponibilité terrains de construction	Pas sûr	Oui
15	Possibilité de rajouter des fonctions secondaires d'usage	Pas sûr	Une fonction rajoutée
16	Facilité pour l'installation de futurs équipements	basse	moyenne
17	Infrastructures dissimulées	1 seule	2 infrastructures
18	Bruit et vibration pendant le chantier	Polluant (espace ouvert)	Moins polluant (isolation naturelle)
19	Façades exposées au bruit de l'usage	Plus de façade	Isolation naturelle
20	Particules, poussière, fumée, etc.	Plus polluant globalement	Moins polluant globalement
21	Capacité de protection	basse	performant

3. Volet économique

La partie du travail relative l'évaluation économique est limitée par le manque de données et d'expertise dans ce domaine. Cependant, ce travail propose un jeu d'indicateurs économiques adaptés aux ouvrages souterrains, il en évalue certains, et laisse l'évaluation du reste comme perspective à ce travail. Ainsi, l'objectif n'est pas d'avoir des résultats très fins mais plutôt de compléter une vision globale d'évaluation DD.

3.1. Proposition d'un jeu d'indicateur pour l'évaluation économique

Le jeu d'indicateurs proposé pour l'évaluation économique (Tableau 69 en ANNEXE 6) comprend quatre objectifs et treize sous-objectifs résumés dans le Tableau 44. Soixante-quatre indicateurs sont proposés pour évaluer ces objectifs, ils sont liés aux frais d'investissement, à la réalisation de l'ouvrage (pendant les phases de conception, de construction et d'exploitation), aux coûts de l'ouvrage lui-même, et aux recettes financières obtenues pour réaliser le projet ou pendant son exploitation. Ces objectifs couvèrent la plupart des aspects économiques identifiés dans plusieurs normes concernant les bâtiments et les ouvrages du génie civil.

Tableau 44 : Jeu d'indicateurs économiques proposé pour l'évaluation d'un ouvrage souterrain

Objectif	Sous-objectif
I - Frais d'investissement	1. Terrain
	2. Prévisions, renchérissement
	3. Taxes
II - Coûts liés à la réalisation de l'ouvrage	4. Etudes du projet
	5. Travaux préparatoire du GC
III - Coûts liés à l'ouvrage même	6. Préparation du site, travaux souterrains
	7. Enveloppes, aménagements
	8. Conduites
	9. Chaussées, voies ferrées
	10. Equipement
	11. Frais secondaires
	12. Coûts liés à l'exploitation
IV - Recettes financières	13. Recettes et subventions

Pour effectuer l'évaluation économique, il convient de sélectionner et évaluer le maximum d'indicateurs de chaque objectif. Par la suite, une sélection de quatre indicateurs a été faite.

3.2. Sélections et évaluation d'indicateurs économiques

Deux aspects économiques ont été choisis pour l'évaluation (Tableau 45) : Objectif III « coûts liés à l'ouvrage », et les coûts évités qui est dans l'objectif IV « recettes financières ».

Tableau 45 : Indicateurs pour l'évaluation économique

Objectif	Sous-objectif	Indicateur	Scénario mixte (chemin aérien)	Scénario souterrain (chemin souterrain)
II - Coûts pour la préparation	4 – Etudes d'avant-projet	Coût essentiel de la construction (M €)	105	140
V – Recettes et subventions	13 – Recettes et subventions - Coûts évités	Coûts des accidents évités (€ *accident)	Probabilité élevée	Probabilité basse
		Coût des terrains évités (€ *m²)	0	35200*prix de terrain
		Aménagements évités - construction des carrefours (x €)	0	8

Les coûts essentiels liés à la construction des différents scénarios ont été publiés par le Grand-Lyon en 2007 lors des études préparatoires du projet [Grand-Lyon, 2007]. Cela comprend la construction de la galerie de sécurité simple dans le scénario mixte (105M€), alors qu'il ne comprend pas les coûts de la construction des chaussées en surface. Alors que pour le scénario souterrain, ces coûts comprennent : construction du tunnel des modes doux (140M€).

L'aspect précédemment analysé « nombre de carrefours » correspond au calcul de 3 indicateurs différents dont deux sociaux : un indicateur sécurité (estimé dans le volet social), un indicateur temps perdu (estimé dans l'aspect social), et un indicateur coût. Le scénario mixte pourrait avoir jusqu'à huit carrefours, alors que le scénario souterrain n'en a aucun. Le coût de construction des carrefours comprend le système des feux rouges, la surveillance, les passages piétons, etc.

Les coûts liés aux accidents évités en passant par un chemin souterrain sont importants selon l'estimation de Bobylev, Godard et Sterling [Bobylev, 2009 ; Godard and Sterling, 1995]. Le nombre de carrefours représente donc un paramètre important dans le calcul du coût évité.

Les coûts évités de l'achat des terrains représente un aspect économiquement important. Partant de l'hypothèse que le site dans le scénario mixte est propre et que les terrains sont disponibles. Un achat de terrain serait donc nécessaire, ces terrains sont égaux à 35200 m² (Objectif social I « faisabilité au sens de l'aménagement – gestion de l'espace »). Le prix du terrain est aussi affecté du

fait que le projet est dans la ville, proche du centre et dans une zone résidentielle. Le coût doit être élevé.

4. Volet environnemental

L'évaluation environnementale a été abordée dans le chapitre précédent. L'ACV a pu évaluer certaines catégories d'impacts environnementaux par ses indicateurs. Ces catégories d'impacts ainsi que d'autres catégories que l'ACV ne permet pas d'évaluer, sont repérées et catégorisées par la suite dans un jeu d'indicateurs proposé (Tableau 70 en ANNEXE 7).

4.1. Proposition d'un jeu d'indicateurs environnementaux

Le jeu d'indicateurs environnementaux proposé comprend les catégories d'impacts liées à l'écosystème et à la gestion et la pollution des ressources. Quarante indicateurs environnementaux, correspondant à neuf sous objectifs, sont repérés dans ce jeu d'indicateurs. Le Tableau 46 résume les objectifs visés par l'évaluation environnementale.

Tableau 46 : Jeu d'indicateurs pour l'évaluation environnementale

Objectif	Sous-objectif
I - Ecosystème	1- Vie du territoire
	2- Biodiversité
	3- Prise en compte des impacts globaux
II - Gestion des ressources / pollution	4- Ressources d'énergie
	5- Ressources naturelles
	6- Ressources d'eau
	7- Pollution du sol
	8- Pollution de l'air
	9- Gestion des déchets et des rejets

Ces catégories d'indicateurs sont issues de plusieurs normes concernant l'évaluation environnementale. Elles comprennent la plupart des indicateurs environnementaux que l'on peut trouver dans la littérature.

4.2. Sélection et évaluation d'indicateurs environnementaux

L'ACV a permis d'évaluer 17 indicateurs dans le chapitre précédent. Ces indicateurs couvrent huit sous-objectifs parmi les neuf proposés par le jeu d'indicateurs. La biodiversité est la seule qui n'était pas évaluée par l'ACV. Le Tableau 47 rappelle les résultats ACV obtenus pour les deux scénarios, classés selon l'objectif et les sous-objectifs dans le jeu d'indicateurs proposé.

Tableau 47 : Indicateurs environnementaux calculés par l'ACV

Objectif	Sous-objectif	Indicateurs environnementaux calculés par l'ACV	Variante 1 (Scénario mixte)	Variante 1 (Scénario souterrain)
I - Ecosystème	1. Vie du territoire	Occupation du sol – Land use (m^2a)	2,83E+05	4,14E+05
	2. Biodiversité	**Non calculé**		
	3. Prise en compte des impacts globaux	Toxicité humaine - HTP infinite (kg 1,4-DCB-Eq)	7,29E+06	7,93E+06
		Changement climatique (kg CO_2-Eq)	2,28E+07	2,19E+07
		Eutrophisation (kg PO_4-Eq)	2,25E+04	1,55E+04
		Destruction de la couche d'ozone ODP (kg CFC-11-Eq)	3,17E+00	1,96E+00
		Formation d'Ozone photochimique (kg ethylene-Eq)	4,17E+03	3,19E+03
II - Gestion des ressources / pollution	4. Ressources d'énergie	Total énergie renouvelable (MJ-Eq)	8,05E+06	7,37E+06
		Total énergie non-renouvelable (MJ-Eq)	3,96E+08	2,70E+08
	5. Ressources naturelles	Consommation des ressources abiotiques (kg antimony-Eq)	1,50E+05	1,09E+05
	6. Ressources d'eau	écotoxicité aquatique d'eau douce - FAETP infinite (kg 1,4-DCB-Eq)	1,70E+06	2,33E+06
		Sédiments d'eau douce écotoxicité - FSETP infinite (kg 1,4-DCB-Eq)	3,95E+06	5,48E+06
		écotoxicité maritime - MAETP infinite (kg 1,4-DCB-Eq)	4,50E+09	4,51E+09
		Sédiments d'écotoxicité maritime - MSETP infinite (kg 1,4-DCB-Eq)	2,87E+09	2,99E+09
		Acidification (kg SO_2-Eq)	1,08E+05	7,78E+04
	7. Pollution du sol	Ecotoxicité des terrains - TAETP infinite (kg 1,4-DCB-Eq)	8,95E+04	1,17E+05
		Acidification (kg SO_2-Eq)	1,08E+05	7,78E+04
	8. Pollution de l'air	Acidification (kg SO_2-Eq)	1,08E+05	7,78E+04
	9. Gestion des déchets et des rejets	Mise en décharge - Déchets en vrac (kg)	1,12E+06	1,59E+06
		Mise en décharge - Déchets radioactifs (kg)	1,03E+03	6,06E+02

En regardant l'écart sur les résultats issus de l'ACV (Tableau 48), il existe des indicateurs discriminants (12 indicateurs parmi les 17) qui sont capables de différencier les deux scénarios par rapport à la catégorie d'impact évaluée. D'autres indicateurs (5 parmi les 17) ne sont pas discriminants, si on considère qu'un écart de 10% entre les deux scénarios est un seuil pour pourvoir

les comparer. Il est important de dire que cela est vrai seulement pour ce cas particulier. Il faudrait ainsi le tester sur une autre étude de cas et donc reprendre l'ensemble de ces indicateurs pour une future application.

Tableau 48 : Ecart des impacts du scénario souterrain par rapport au scénario mixte

N°	Indicateur	Pourcentage de ses impacts par rapport à ceux du scénario mixte	Indicateur discriminant / équivalent
1	Total énergie renouvelable	-8%	Sensiblement équivalent
2	Total énergie non-renouvelable	-32%	Discriminant
3	Mise en décharge - Déchets en vrac	+42%	Discriminant
4	Mise en décharge - Déchets radioactifs	-41%	Discriminant
5	Ecotoxicité (FAETP infinite)	+37%	Discriminant
6	Ecotoxicité (FSETP infinite)	+39%	Discriminant
7	Ecotoxicité (MAETP infinite)	0%	Equivalent
8	Ecotoxicité (MSETP infinite)	+4%	Sensiblement équivalent
9	Ecotoxicité (TAETP infinite)	+30%	Discriminant
10	Toxicité humaine (HTP infinite)	+9%	Sensiblement équivalent
11	acidification	-28%	Discriminant
12	Changement climatique	-4%	Sensiblement équivalent
13	Eutrophisation	-31%	Discriminant
14	Occupation du sol	+46%	Discriminant
15	Formation d'Ozone photochimique	-24%	Discriminant
16	Consommation des ressources abiotiques	-28%	Discriminant
17	Destruction de la couche d'ozone ODP	-38%	Discriminant

En résultat, malgré l'élimination des cinq indicateurs non discriminants, les neuf sous-objectifs environnementaux restent tous représentés au moins par un indicateur voire plus. Il est important de dire que ces résultats sont liés seulement au cas de la Croix-Rousse, l'ensemble des indicateurs est donc nécessaire pour la méthodologie proposée, il est aussi préférable de calculer un indicateur, ou plus, liés à la biodiversité. A ce stade, il est important d'indiquer que dans l'ACV il existe des tentatives d'indicateurs de la biodiversité mais le ILCD handbook considère que ce n'est pas satisfaisant [Wolf et al, 2010]. La question est donc comment calculer un indicateur de biodiversité puisqu'aucune méthode ne semble satisfaisante

L'application au cas d'étude concret (tunnel de la Croix-Rousse) a permis de sélectionner douze indicateurs parmi les dix-sept évalués, ils ont été discriminants dans ce cas d'application au complexe souterrain multimodal. De plus, en modifiant le type de bus (passage en bus électrique), huit indicateurs parmi les douze restent discriminants. Cela ne veut pas dire forcément qu'il faut définitivement retenir ces huit indicateurs pour la méthodologie proposée. Pour valider ce résultat, il faudrait le tester sur un autre cas d'étude, voire plus. Cela n'était pas possible à l'échelle de la thèse.

Discussion et conclusion du chapitre

Ce chapitre avait pour objectif d'appliquer une évaluation DD à plusieurs variantes d'aménagement, y compris une variante souterraine. Pour ce faire, une étude bibliographique a été faite concernant les méthodes HQE pour les bâtiments, les aménagements et les routes, ainsi qu'un projet européen HQE²R qui représente une application importante de la démarche HQE à l'évaluation des quartiers.

L'objectif souhaité est : la définition d'indicateurs adaptés aux ouvrages souterrains sous l'angle du DD. L'étape suivante est une proposition de jeux d'indicateurs : environnementaux, sociaux et économiques. Une sélection d'un nombre maximal d'indicateurs (Figure 59) est nécessaire pour évaluer les objectifs visés dans chacun des volets du DD. Par contre, ayant des résultats différents pour les trois sphères du DD, le développement d'un moyen de notation se fait ressentir afin de pouvoir rassembler ces différents résultats sur une seule échelle. La présentation dans la figure suivante est inspirée des cercles HQE²R de la durabilité ; le centre est constitué par les trois volets du DD, le cercle concentrique suivant est composé des objectifs, le cercle suivant des sous-objectifs, le suivant des indicateurs et enfin on peut lire les résultats pour les deux variantes.

Figure 59 : Graphe récapitulatif pour l'ensemble des résultats

Cependant, ces listes complexes, peuvent éventuellement conduire à l'omission de certains points spécifiques du projet dépendant du contexte ou du type de projet. Pour rester exploitables, elles ne doivent pas comporter une multitude de points différents et en conséquence se limiter aux impacts de première importance. L'évaluation par ces jeux d'indicateurs aboutit généralement à une estimation subjective et qualitative ; les conclusions risquent donc de dépendre de l'évaluateur.

Dans le chapitre suivant, cet inconvénient sera minimisé avec l'utilisation de listes comportant des seuils ou des échelles et des priorités. Cette méthode part des points qui sont distinctifs du souterrain, autrement dit, les aspects qui peuvent mettre en avant les spécificités du souterrain (avantages ou inconvénients). Pour ce faire, une analyse de ces avantages et inconvénients du souterrain sera donc présentée. A partir de cette analyse certains objectifs d'évaluation dans les jeux d'indicateurs proposés pourraient s'avérer prépondérants. Ainsi, le besoin d'une méthode d'aide à la sélection se présente, elle est nécessaire pour définir comment choisir des indicateurs représentatifs.

Chapitre 4 : Synthèse sur la MEDDAS

Introduction du chapitre

La méthodologie d'évaluation du développement durable pour les aménagements souterrains (MEDDAS) a pour objectif de choisir parmi plusieurs variantes, celle qui répond le plus avantageusement au besoin principal du projet. La démarche doit débuter par déterminer le besoin, puis définir des variantes qui y répondent différemment. L'objet de l'évaluation sera à la fois la fonction et la structure de chaque variante. Cet ensemble est en contact physique avec les différentes populations concernées[62]. Autrement dit : la MEDDAS s'intéresse à la réponse à un **besoin précis** par un **système physique** qui **fonctionne** de manière satisfaisante pour des **parties prenantes**. Le terme « Partie prenante » apparait dans la norme NF EN 1325 [AFNOR, 2014c] relatif au management de la valeur. Il désigne une personne ou un organisme ayant un intérêt, et une incidence sur le produit à tout moment pendant son cycle de vie. L'utilisateur de l'ouvrage fait partie des « parties prenantes », en effet l'utilisateur est une personne ou un organisme pour lequel le produit est conçu et qui exploite au moins l'une de ses fonctions à un moment quelconque de son cycle de vie [AFNOR, 2014c].

La MEDDAS est le fruit d'une réflexion de fusion entre deux approches d'évaluation différentes : l'approche par ACV (Chapitre 2) et l'approche par HQE (Chapitre 3) et apporte quelques développements méthodologiques. Concernant l'évaluation environnementale, un jeu d'indicateurs environnementaux a été proposé (Tableau 70 en ANNEXE 7). L'ACV a montré dans le chapitre 2 une capacité à calculer les impacts environnementaux pertinents. Elle peut évaluer une grande partie des catégories d'impacts proposées dans le jeu d'indicateurs environnementaux, mais pas toutes, des indicateurs complémentaires sont donc proposés dans le jeu d'indicateurs (ex. Biodiversité).

Pour compléter cette évaluation, d'autres jeux d'indicateurs sociaux et économiques ont été proposés (Tableau 68 et Tableau 69 en ANNEXE 5 et 6). Ils ont aussi été construits d'après des normes et références bibliographiques concernant les bâtiments et les ouvrages du génie civil. Ils répondent aux objectifs d'évaluation proposés par les méthodes HQE (présentées dans le chapitre 3), mais ces jeux représentent une base plus complète que celle de l'HQE, et surtout adaptée aux ouvrages souterrains. Les indicateurs sociaux et économiques peuvent être quantitatifs ou qualitatifs, comme vu au chapitre précédent. Ces indicateurs doivent avoir une unité et une formule (ou moyen) de calcul s'ils sont quantitatifs ; alors qu'ils doivent être capables de donner une réelle estimation (enquêtes, avis d'experts, etc.) s'ils sont qualitatifs. L'objectif est enfin de pouvoir comparer plusieurs variantes et non pas de donner un résultat fin par indicateur.

Ce chapitre précise les grandes étapes de la méthodologie MEDDAS de manière générique, puis pour effectuer le classement de variantes pour le cas de la Croix-Rousse (présentées dans la page 89).

[62] Les populations concernées sont définies dans le chapitre 1 – Paragraphe 5.1.2. (P45).

1. Principes de la MEDDAS

L'illustration au cas concret et réel (Tunnel de la Croix-Rousse) a permis de poser les problématiques et les réponses recherchées, Tableau 49.

Tableau 49: Problématiques et besoins pour appliquer la méthodologie

<table>
<tr><th>Etape</th><th>Problématique</th><th colspan="4">Réponse</th><th>Pourquoi ?</th></tr>
<tr><td rowspan="2">1</td><td>Que veut-on ?</td><td colspan="4">Evaluer plusieurs variantes d'aménagement
(Identifier le besoin)</td><td>Pour déterminer la variante y répondant le plus avantageusement</td></tr>
<tr><td>Quel objet d'évaluation ?</td><td colspan="2">Fonctions</td><td colspan="2">Structures</td><td>Pour inclure l'ensemble du système</td></tr>
<tr><td rowspan="3">2</td><td rowspan="2">Par quels outils ?</td><td colspan="4">Des jeux d'indicateurs DD</td><td rowspan="2">Pour évaluer de façon globale les différents aspects DD</td></tr>
<tr><td>Env.</td><td>Soc.</td><td colspan="2">Eco.</td></tr>
<tr><td>Comment ?</td><td colspan="4">Sélectionner des indicateurs discriminants et les évaluer</td><td>Pour pouvoir comparer les différentes variantes</td></tr>
<tr><td rowspan="2">3</td><td rowspan="2">Quels besoins pour la MEDDAS ?</td><td colspan="4">Méthode d'aide à la sélection des indicateurs</td><td rowspan="2">Pour évaluer les variantes, sur la même échelle, sous l'angle avantages / inconvénients</td></tr>
<tr><td colspan="4">Système de notation pour rassembler les résultats</td></tr>
</table>

Pour l'évaluation, deux difficultés se présentent : la sélection des indicateurs et l'homogénéisation des résultats en vue de faire un choix de variante.

La MEDDAS est constituée de trois étapes (Figure 60) : Définir l'ensemble « fonction – structure » ; sélectionner des indicateurs DD et calcul pour chaque variante ; enfin noter et rassembler les résultats obtenus.

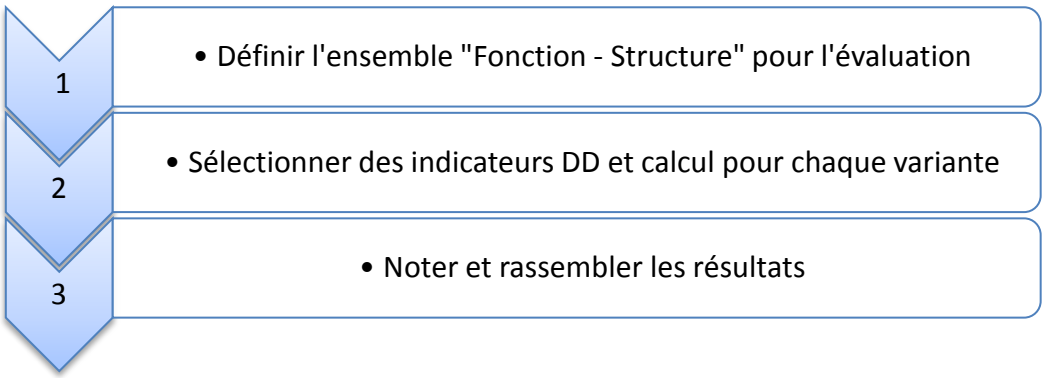


Figure 60 : Différentes étapes constituant la MEDDAS

Définir l'ensemble « fonction – structure » : Cette étape consiste en tout premier lieu à identifier les besoins principaux pour lesquels le projet urbain a été envisagé. Il faut ensuite définir l'ensemble « fonction - structure » qui réponde à ces besoins. Le premier chapitre de la thèse a montré que l'articulation de l'ouvrage souterrain avec son environnement urbain en surface est une spécificité importante et donc qu'il est nécessaire de le prendre en compte lors de l'évaluation. Pour cela, cette étape méthodologique propose une définition des périmètres qui contournent spatialement le projet souterrain évalué et les différentes zones urbaines affectées par sa réalisation.

Sélectionner des indicateurs DD et calcul pour chaque variante : L'objectif de cette étape est de chercher parmi les jeux d'indicateurs DD proposés (Tableau 68, Tableau 69 et Tableau 70 en ANNEXE 5, 6 et 7), les indicateurs les plus adaptés au contexte du projet. Ils doivent être liés à l'ensemble « fonction - structure » de chaque variante. Cette évaluation vise la fonctionnalité de l'ouvrage (qualité du service rendu par l'ouvrage), d'autre part, elle évalue les impacts environnementaux et socioéconomiques liés à la construction de la structure, à son exploitation (y compris la maintenance) et à son utilisation.

L'avantage de l'utilisation des jeux d'indicateurs est la simplicité et la rapidité de l'évaluation. Ces jeux d'indicateurs constituent également un aide-mémoire des points essentiels et sont aisément adaptables à différents aménagements. Cependant, la sélection parmi ces jeux d'indicateurs risque d'être subjective, d'où l'importance de développer une méthode d'aide à la sélection des indicateurs qui peuvent être discriminants pour l'évaluation des variantes.

Dans un premier temps, Il est donc recommandé dans le cadre de la MEDDAS de regarder la colonne « sous-objectifs » (Tableau 68, Tableau 69 et Tableau 70 en ANNEXE 5, 6 et 7) et puis d'éliminer les sous-objectifs qui ne sont pas en lien avec l'ensemble « fonction-structure » ; dans un deuxième temps, il s'agit de sélectionner les sous-objectifs qui sont les plus robustes. Cette robustesse se mesure par le nombre d'aspects spécifiques (Tableau 71 et Tableau 72 en ANNEXE 8 et 9) au souterrain liés à chaque sous-objectif. L'évaluation des indicateurs sélectionnés peut commencer.

Noter et rassembler les résultats sous l'angle Avantages / inconvénients : Après avoir sélectionné et évalué les indicateurs, nous aurons un grand nombre d'indicateurs avec des résultats différents pour les différentes variantes. Une méthode de notation est donc proposée dans cette étape afin d'organiser les résultats obtenus sur une même échelle et de faciliter le choix d'une variante. Il s'agit d'une méthode de notation par coefficients. Elle permet de hiérarchiser les différentes variantes sous l'angle avantages / inconvénients sans nécessiter le choix d'une référence.

2. Etape 1 : Définir l'ensemble « fonction – structure »

Selon la norme FD X50-101 [AFNOR, 1995], relative à l'analyse fonctionnelle, une fonction représente un lien entre des besoins et les réponses à ces besoins. Elle permet ainsi différents types de mise en relation entre besoin et produit. Dans le cas d'un aménagement urbain, le produit est représenté par la structure de l'ouvrage lui-même. La détermination du besoin dans ce cas permet de définir une architecture composée de structures et de fonctions (Figure 61).

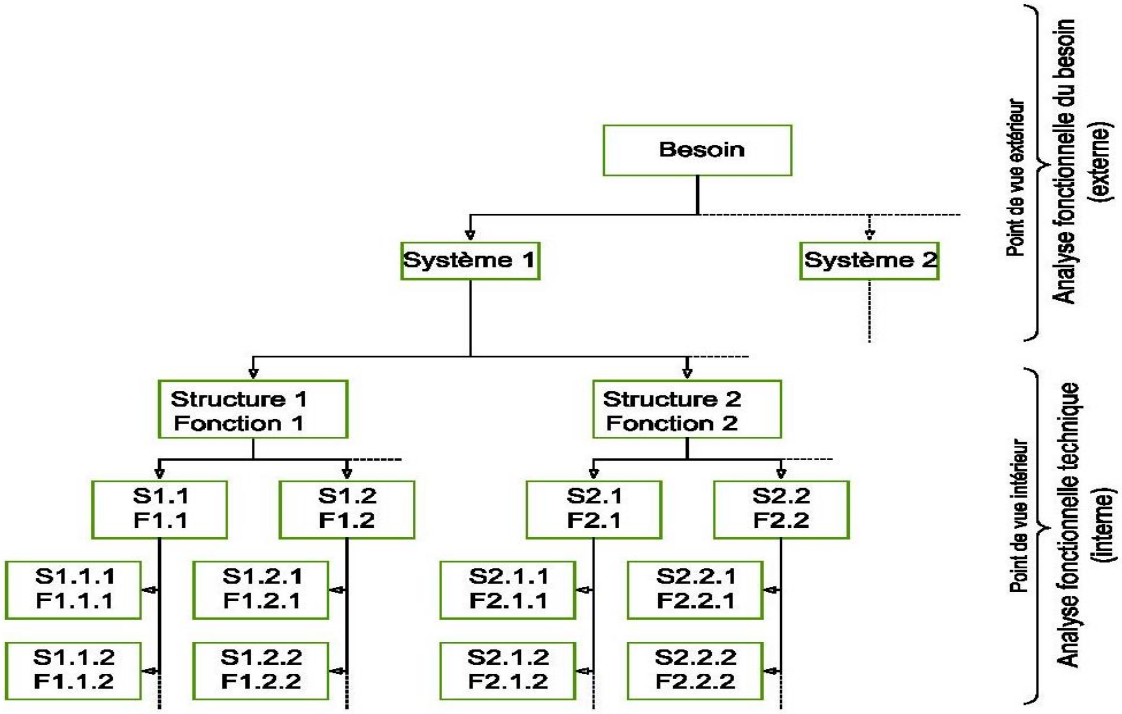


Figure 61 : Architecture "Fonction - Structure" de systèmes répondant à un besoin (S = Structure ; F = Fonction)

Cette méthode de classification systémique « fonction – structure » permet d'identifier et de hiérarchiser les fonctions à prendre en compte pour les évaluations. Elle permet à terme d'évaluer la réponse au besoin qui explicite les attentes des utilisateurs.

2.1. Hiérarchisation des fonctions

L'ensemble du système « Fonction – Structure » rend un service permettant de répondre au besoin. On peut distinguer deux niveaux dans ce système :

- le premier dont les fonctions représentent des interactions de l'ouvrage avec son environnement, ces fonctions s'appellent « Fonctions de service ». Les fonctions de service correspondent à la notion de fonctions principales identifiées dans le chapitre 1 (P. 39).
- Le second niveau est composé des fonctions représentant des actions d'un constituant ou actions intervenant entre les constituants de l'ouvrage afin d'assurer une fonction de service. Les fonctions à ce niveau s'appellent « fonctions techniques » [AFNOR, 2014c]. Les fonctions techniques correspondent à la notion des fonctions annexes identifiées dans le chapitre 1 (P. 39).

Il est important d'indiquer qu'il faut plusieurs fonctions de service pour répondre à un besoin. Dans une étude donnée, leur énumération et leur formulation qualitative et quantitative résultent de l'analyse du besoin à satisfaire et le décrivent d'une manière nécessaire et suffisante [AFNOR, 1995]. Autres exemples de fonction de service : « assurer un service de commerce pour un quartier de N personnes » ou « fournir des stationnements nécessaires pour δ commerces ou β voitures ». L'ensemble de ces fonctions identifiées traduit le fonctionnement global d'un ouvrage.

Un exemple de fonction technique est « Assurer l'alimentation des équipement par l'électricité ». Ainsi, la création de l'espace dédié aux réseaux électriques et leur installation représentent la partie structurelle répondant à ces fonctions techniques. L'ensemble de ces équipements en état fonctionnel est nécessaire pour assurer une fonction de service (pour un commerce par exemple). Cette hiérarchisation a permis de formuler l'unité fonctionnelle pour l'ACV dans le chapitre 2 (P. 89).

2.2. Analyse Fonctionnelle - Structurelle

En regardant la Figure 61, les systèmes du premier niveau peuvent être évalués par « **l'Analyse fonctionnelle du besoin (AFB)** », selon la norme NF X50-100 [AFNOR, 2011b] relative au management de la valeur. Il s'agit d'une démarche qui décrit complètement les fonctions de service et leurs relations afin de répondre à un besoin exprimé.

Les systèmes du second niveau peuvent être évalués par « **l'analyse fonctionnelle technique (AFT)** » [AFNOR, 2014c]. Cette analyse contribue à l'étude et à la formalisation de l'architecture de l'ouvrage en identifiant les fonctions techniques des sous-ensembles ou composants. Elle identifie le rôle des éléments composants l'objet pour l'accomplissement des fonctions identifiées et la mise en lumière les relations structurelles entre ceux-ci [Peyras, 2002 ; Béraud, 2013 ; Fund, 2016]. Le niveau de détails de l'analyse fonctionnelle technique s'appelle « **niveau de granularité** ». Une illustration de cette notion est donnée ci-après :

- **Granularité 1** : l'aménagement dans son ensemble, c'est-à-dire l'ouvrage de construction souterrain et tout autre ouvrage qui contribue à garantir les fonctions de service. Par exemple, un centre commercial dont la fonction de service est le commerce.
- **Granularité 2** : les différents ouvrages constituant l'aménagement évalué. Par exemple, un parking et un espace de dépôt annexe au centre commercial, dont les fonctions sont respectivement le stationnement et le stockage des commerces.
- **Granularité 3** : les composants de ces ouvrages. Par exemple : la structure en béton délimitant l'ouvrage, les réseaux, etc. Leurs fonctions techniques sont respectivement : délimiter l'espace et reprendre les efforts exercés par le sol, assurer l'alimentation d'eau et d'électricité et l'évacuation des eaux usées.

Le niveau de granularité correspond ainsi au niveau de détail envisagé pour l'analyse fonctionnelle technique. Il s'agit donc d'une analyse structurelle de l'ouvrage, d'un point de vue purement génie civil. Il s'agit de comprendre quels sont les composants de l'ouvrage et comment ces derniers interagissent entre eux.

Cette analyse fonctionnelle – structurelle et la décomposition de l'ouvrage en plusieurs granularités, permettent d'élaborer des diagnostics pour des répartitions ou des comparaisons (notamment de coûts) et de construire l'arbre de procédés pour l'ACV. Il est important de d'indiquer que les

méthodes de construction et la géométrie de l'ouvrage contribuent de façon importante dans cette analyse.

2.3. Articulation souterrain – surface

Il s'agit également de montrer tout l'intérêt d'une meilleure articulation entre surface et souterrain. Cette réflexion doit nécessairement être appréhendée à plusieurs échelles spatiale et fonctionnelle. Ainsi, pour lier géographiquement l'ouvrage souterrain à son environnement, il est important d'analyser son articulation avec l'environnement urbain. Il s'agit d'étudier l'intégration urbaine d'un ouvrage souterrain en déterminant les différents périmètres spatiaux affectés par sa réalisation. Ces périmètres représentent les contours géographiques des milieux extérieurs en interactions avec l'ouvrage. Quatre périmètres sont ainsi retenus (Figure 62) :

- **Périmètre structurel :** Il comprend les structures répondant aux fonctions principales ainsi que leurs structures annexes associées. Par exemple, le tunnel de la Croix-Rousse et ses chaussées modes doux sont dans le périmètre structurel, ainsi que les usines de ventilations et les rameaux entre tubes (14 tunnels de liaisons).
- **Périmètre opérationnel :** Il représente la zone géographique où se situent toutes les opérations d'aménagement accompagnant la réalisation du projet évalué. Par exemple, en construisant le tunnel de la Croix-Rousse, des parkings extérieurs ont été construits et des opérations pour aménager les têtes du tunnel ont été réalisées. Tout cela est considéré comme faisant partie du périmètre opérationnel.
- **Périmètre territorial local :** Il représente la zone urbaine proche affectée positivement ou négativement par la réalisation de l'ouvrage souterrain. Les impacts qui affectent cette zone sont des impacts locaux. Le bruit, la vibration, l'acidification, etc. sont des exemples d'impacts locaux.
- **Périmètre territorial global :** il représente la zone géographique affectée par les impacts globaux dus à l'ouvrage. La création d'emplois, le réchauffement climatique, etc. sont des exemples d'indicateurs globaux.

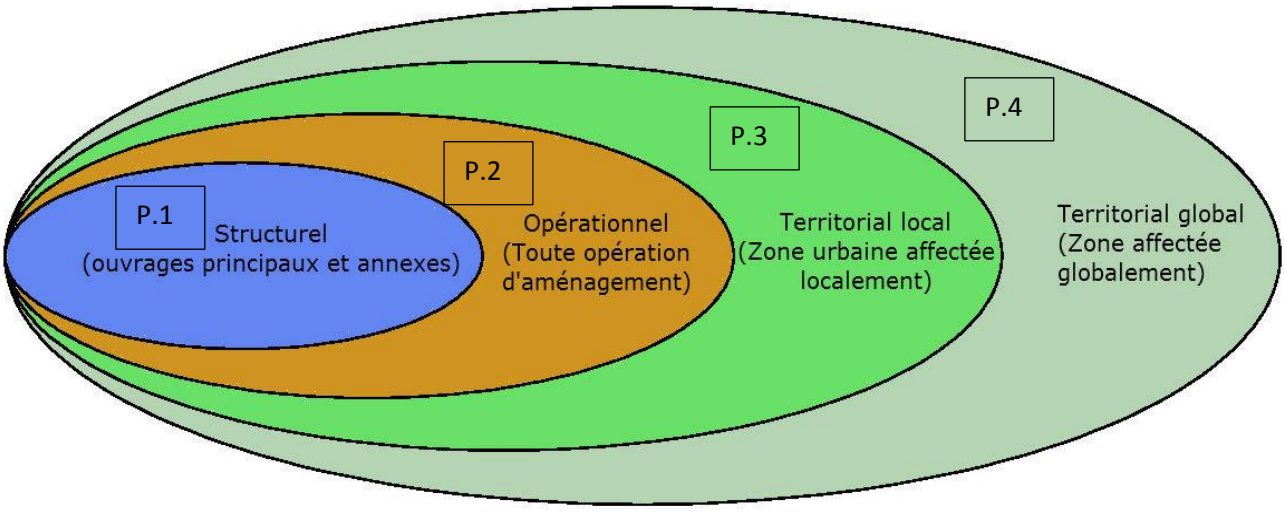


Figure 62 : Représentation schématique des périmètres spatiaux

Ce découpage spatial permet d'étudier l'articulation de l'ouvrage avec son environnement extérieur. Les périmètres spatiaux sont affectés par deux critères : le mode d'accès à l'ouvrage et la méthode de construction adoptée (ouvrage creusé ou construit en tranchées couvertes). Les typologies des ouvrages de construction souterraines, présentées dans le chapitre 1, servent à poser les différents cas de figures présentés dans la Figure 63. Six possibilités ont été identifiées, elles sont classées par méthode de construction : L'ouvrage est soit creusé (A1, B1, et C1), soit construit en tranchées couvertes (A2, B2 et C2).

Ces cas de figure sont également classés selon leur accès. L'accès se fait depuis la parcelle dans les cas A1 et A2. Dans les cas B1 et B2 l'accès à l'ouvrage souterrain se fait dehors de la parcelle. Dans les cas C1 et C2, l'accès à l'ouvrage souterrain se fait uniquement depuis un autre ouvrage souterrain.

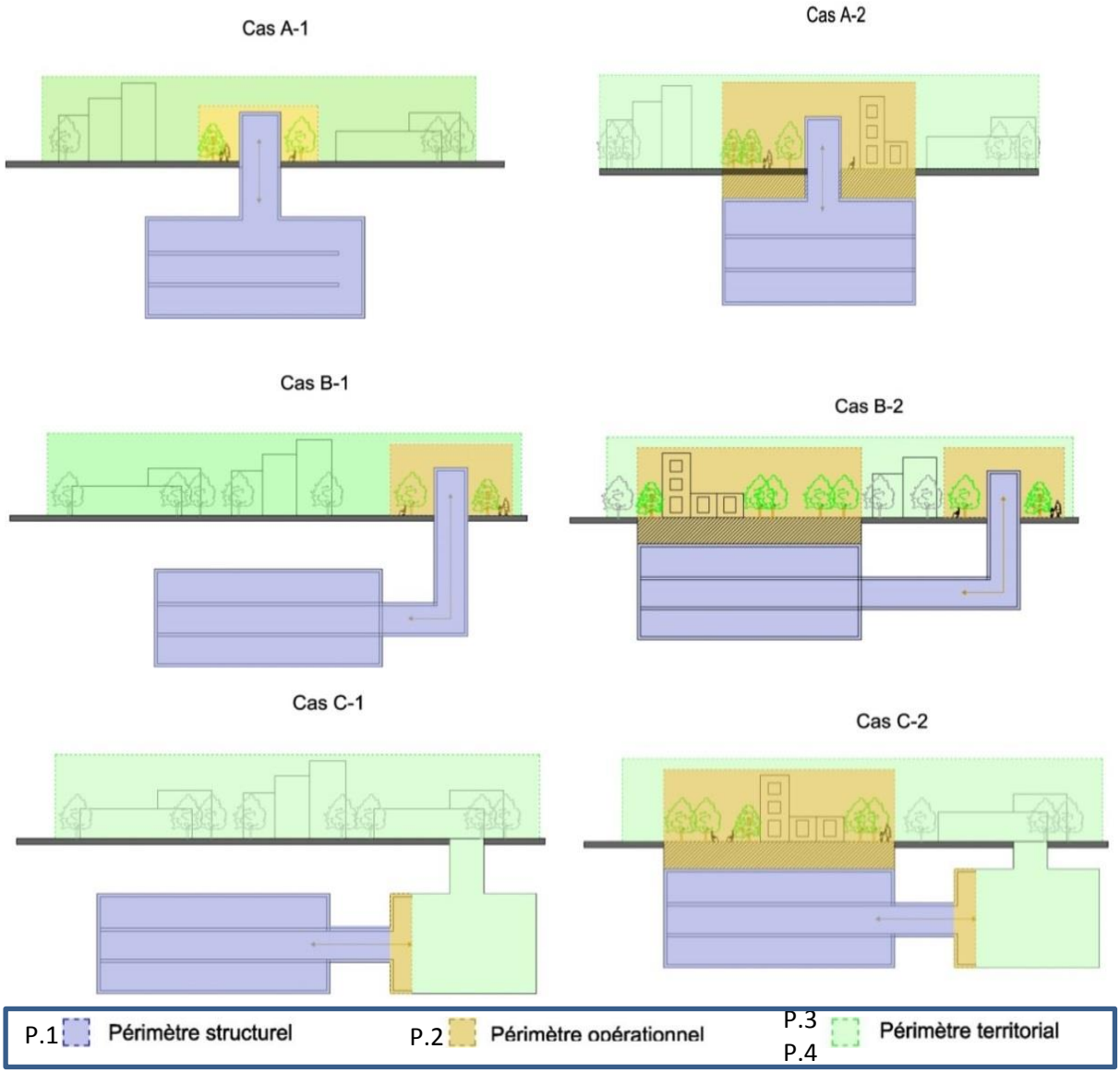


Figure 63 : exemples de périmètres spatiaux pour un ouvrage souterrain suivant l'accès et la méthode de construction

2.4. Résultat de l'étape : grille de lecture de projets souterrains

Comme résultat de cette première étape, il convient de proposer des grilles de lecture des projets souterrains en ANNEXE 10. Elles constituent une grille de lecture des projets qui représente une base de renseignements sur le projet et permet de mettre en place l'étape d'évaluation. Ces grilles comprennent les renseignements suivants : des informations générales, le type de projet, les besoins du projet, l'ensemble « fonctions – structures » du projet et enfin les périmètres spatiaux liant l'ouvrage à son environnement.

3. Etape 2 : Sélectionner et calculer les indicateurs DD

Cette étape nécessite des jeux d'indicateurs pour chaque volet du DD (environnemental, social, économique en ANNEXE 5,6 et 7) comprenant un grand nombre d'indicateurs adaptés au souterrain. Ils sont issus des références bibliographiques, des normes et d'autres sources relatives aux bâtiments et au génie civil. Ce type de liste nécessite d'être défini par un ensemble d'experts et sa mise à jour en fonction de l'avancée des connaissances est importante.

3.1. Méthodes d'aide à la sélection d'indicateurs pour un projet donné

Les indicateurs évalués doivent nécessairement être liés aux fonctions ou aux structures associées, ou bien aux deux à la fois. Par la suite, on propose deux méthodes de sélection des indicateurs : la première (3.1.1.) se base sur la méthode « Check-Lists » ; la seconde (3.1.2.) est développée au sein de ce travail, elle porte sur une analyse des avantages et inconvénients du souterrain issus de la bibliographie, afin de pondérer certains aspects plus que d'autres, selon le projet et le contexte de l'évaluation.

3.1.1. Méthode de sélection par élimination

La « check-lists » est une méthode simple permettant d'évaluer les impacts d'un projet : l'utilisateur dispose d'une énumération de points de contrôle [Bussemey-Buhe 1997]. Elle permet à la base de trier les variantes, en excluant celles qui ne répondent pas à la liste des exigences demandées, et de prendre conscience de l'importance de certains aspects. Le tri des variantes selon la méthode « check-lists » s'effectue par un questionnaire mais avec comme seules réponses possibles "oui", "non" ou "ne sait pas".

Concernant la MEDDAS, le tri ne s'effectue pas sur les variantes mais s'applique aux indicateurs pour choisir ceux qui sont évaluables. Les questions proposées sont comme par exemple : « est-ce que cet indicateur exprime un impact lié à l'ensemble fonction- structure ? ». On aura deux réponses possibles dans ce cas : « oui » l'indicateur est donc à évaluer ; « Non » l'indicateur est à éliminer de l'évaluation. Par exemple : l'indicateur de la réflectivité de l'ouvrage, il exprime un impact sur le voisinage mais on ne l'évalue pas dans le cas où l'ouvrage n'a pas de toit ouvert ou de partie aérienne. On pourrait ainsi avoir des indicateurs qui sont évaluables pour une variante et pas pour les autres, cela pourrait donc représenter un « avantage » ou un « inconvénient » pour cette variante par rapport aux autres.

L'avantage de cette méthode est la simplicité. Elle constitue également un aide-mémoire des points essentiels qui sont aisément adaptables. Cependant, un inconvénient se présente quand chaque point est étudié individuellement sans corrélation avec les autres, sans rendre compte de la complexité des phénomènes. De plus cette méthode aboutit généralement à une estimation

subjective et qualitative ; les conclusions risquent donc de dépendre de l'évaluateur. Ces inconvénients peuvent être minimisés en utilisant d'autres méthodes pondérées.

3.1.2. Méthode de priorités par « aspects spécifiques » au souterrain

Si l'ouvrage souterrain peut offrir plusieurs avantages pour la ville, il a également des inconvénients. Ces points-ci sont les aspects visés par la suite car ils représentent les spécificités pour le souterrain. Les avantages liés au souterrain sont nombreux, par exemple : l'espace souterrain est un espace disponible partout ou presque et peut accueillir des activités ou des infrastructures. Le déplacement des infrastructures en sous-sol permet de produire plus d'espace en surface pour les autres activités urbaines (habitat, commerce, etc.). Le passage en souterrain ou la réalisation en sous-sol constitue parfois la seule possibilité d'aménagement dans des sites urbains denses et fortement contraints. Il offre davantage de ressources qui peuvent être aussi rajoutées à celles en surface (l'espace souterrain lui-même, les matériaux excavés, l'énergie géothermique, etc.). Inversement, un projet souterrain se révèle souvent pénalisant en termes d'impacts sur l'environnement en comparant à un projet équivalent en surface (importance du dimensionnement, des quantités de matériaux utilisés, des moyens et solutions techniques à mettre en œuvre pour la construction, importance des équipements et de la consommation énergétique de ces derniers en phase d'exploitation). Par ailleurs, les coûts de construction des ouvrages souterrains sont généralement bien supérieurs à ceux des ouvrages en surface.

Par la suite, un bilan de ces aspects, dits « spécifiques » au souterrain, est présenté. Le but n'est pas d'identifier précisément quel aspect est avantageux ou désavantageux pour le souterrain. Ces caractéristiques étant retenus des cas particuliers, ils ne sont donc pas différenciés entre avantages ou inconvénients. Ainsi, l'objectif de cette analyse est plutôt de les illustrer et de les mettre en avant en tant que caractéristiques spécifiques au souterrain.

Ensuite, l'idée est de relier ces caractéristiques spécifiques au souterrains dans les Tableau 71 et Tableau 72 en ANNEXES 8 et 9 avec les objectifs d'évaluation proposés dans les jeux d'indicateurs dans les Tableau 68, Tableau 69 et Tableau 70 en ANNEXES 5, 6 et 7. Cette méthode permet de donner à certains objectifs une plus grande importance que d'autres. Un classement est donc proposé pour les sous-objectifs de chaque volet. On propose donc de donner l'ordre priorité comme suit :

- **Rang 1** : Sous-objectifs avec 4 aspects spécifiques et plus ;
- **Rang 2** : Sous-objectifs avec 2 ou 3 aspects spécifiques.
- **Rang 3** : Sous-objectifs avec moins de 2 aspects spécifiques.

Par la suite une illustration sur chaque volet est présentée.

Volet environnemental

Les aspects environnementaux, qui représentent des spécificités pour le souterrain, sont présentés dans le Tableau 71 en ANNEXE 8 avec les références bibliographiques qui les ont considérés comme avantages ou inconvénients. Ils sont classés par phase de cycle de vie.

Chaque aspect spécifique au souterrain correspond à un sous-objectif d'évaluation dans les jeux d'indicateurs proposés dans le cadre de cette méthodologie (Tableau 50).

Tableau 50 : Priorité donnée aux objectifs d'évaluation proposés dans le jeu d'indicateurs environnementaux

Objectif	Sous-objectif (SO)	Aspects spécifiques au souterrain (Tableau 71 en ANNEXE 8)	Rang
I - Ecosystème	1. Vie du territoire	E6 ; E7 ; E9	2
	2. Biodiversité	E1 ; E6 ; E7	2
	3. Prise en compte des impacts globaux	E2 ; E6 ; E7 ; E8 ; E9	1
II - Gestion des ressources / pollution	4. Ressources d'énergie	E2 ; E6 ; E8 ; E9	1
	5. Ressources naturelles	E3 ; E5 ; E6	2
	6. Ressources d'eau	E1 ; E5	2
	7. Pollution du sol	E1 ; E9	2
	8. Pollution de l'air	E2 ; E10	2
	9. Gestion des déchets et des rejets	E3 ; E10	2

Volet social

Les aspects sociaux spécifiques au souterrain sont présentés dans le Tableau 72 en ANNEXE 9 avec les références bibliographiques qui les ont considérés comme avantages ou inconvénients. Ils sont liés aux sous-objectifs correspondants dans les jeux d'indicateurs sociaux dans le Tableau 51.

Tableau 51 : Priorité donnée aux objectifs d'évaluation proposés dans le jeu d'indicateurs sociaux

Objectif	Sous-objectif (SO)	Aspects spécifiques au souterrain (Tableau 72 en ANNEXE 9)	Rang
I - Faisabilité au sens d'aménagement	1- Gestion de l'espace	SE1 ; SE12	2
	2- Héritage culturel	SE10	3
	3- Possibilité de construction	SE1 ; SE5 ; SE10	2
II - Efficacité	4- Service rendu par l'ouvrage	SE1, SE6, SE18	2
III - Accessibilité	5- Accès des PMR		3
	6- Entrée et circulation à l'intérieur	SE14	3
	7- Accès aux équipements techniques		3
IV - Adaptabilité	8- Adaptabilité de l'ouvrage	SE5	3
	9- Mutabilité de l'ouvrage	SE5	3
V - Santé et confort à l'intérieur de l'ouvrage	10- Gêne	SE14	3
	11- Caractéristiques thermiques	SE18	3
	12- caractéristiques de la qualité de l'air	SE18	3
	13- caractéristiques acoustiques	SE18	3
	14- caractéristiques de confort visuel	SE18	3
VI - Impacts sur le voisinage	15- Image de la ville (aspect esthétique)	SE1 ; SE4 ; SE11 ; SE18	1
	16- Bruit et vibrations sur l'environnement extérieur	SE1 ; SE4 ; SE18 ; SE19	1
	17- Emissions dans l'air, le sol et les eaux extérieures	SE1 ; SE4 ; SE18 ; SE19	1
	18- Eblouissement et Occultation de l'ouvrage	SE18	3
VII - Maintenance maintenabilité	19- Fréquence	SE17	3
	20- confort lié à la maintenance	SE16 ; SE17	2
	21- Maintenabilité	SE16 ; SE17	2
VIII - Sécurité et sûreté	22- Résistance aux conditions métrologiques	SE18	3
	23- Résistance au rayonnement solaire	SE18	3
	24- Résistance à l'inondation	SE15 ; SE18	2
	25- Résistance aux tremblements de terre	SE7 ; SE18	2
	26- Résistance aux incendies	SE18	3
	27- Résistance aux impacts du trafic routier	SE4 ; SE6 ; SE8 ; SE16 ;	1
	28- Sureté et sécurité contre le vandalisme	SE18	3
	29- Disposition en cas de coupures d'alimentation		3
IX- Aspect humain	30- Participation des acteurs		3
	31- Création d'emplois	SE13	3
	32- Système de population	SE6 ; SE10	2

Volet économique

Les aspects économiques spécifiques sont présentés dans le même tableau que les aspects sociaux (Tableau 72 en ANNEXE 9), car la plupart des aspects sociaux peuvent être monétarisés ou ont des effets sur le bilan économique de l'ouvrage, c'était donc difficile de les séparer en deux bilans différents.

Dans le Tableau 52 : Priorité donnée aux objectifs d'évaluation proposés dans le jeu d'indicateurs économiques les sous-objectifs présentés dans le jeu d'indicateurs économiques sont liés aux aspects spécifiques correspondants.

Tableau 52 : Priorité donnée aux objectifs d'évaluation proposés dans le jeu d'indicateurs économiques

Objectif	Sous-objectif (SO)	Aspects spécifiques liés (Tableau 72 en ANNEXE 9)	Rang
I - Frais d'investissement	1. Terrain	SE1 ; SE12	2
	2. Prévisions, renchérissement	SE3 ; SE15	2
	3. Taxes		3
II - Coûts liés à la réalisation de l'ouvrage	4. Etudes du projet	SE1 ; SE3	2
	5. Travaux préparatoire du GC	SE1 ; SE2 ; SE3 ; SE4 ; SE7	1
III - Coûts liés à l'ouvrage même	6. Préparation du site, travaux souterrains	SE1 ; SE2 ; SE3 ; SE4	1
	7. Enveloppes, aménagements	SE2 ; SE7 ; SE18	2
	8. Conduites	SE1	3
	9. Chaussées, voies ferrées	SE1 ; SE17	2
	10. Equipement	SE1 ; SE3 ; SE17	2
	11. Frais secondaires	SE3 ; SE4 ; SE8 ; SE9	1
	12. Coûts liés à l'exploitation	SE3 ; SE6 ; SE8 ; SE9 ; SE13 ; SE15 ; SE16 ; SE17 ; SE18	1
IV - Recettes financières	13. Recettes et subventions	SE5 ; SE6 ; SE8 ; SE12 ; SE13 ; SE18	1

En conclusion, tous les indicateurs sont évalués dans la MEDDAS, mais une priorité est explicitée. Dans les calculs de la Croix-Rousse des chapitres 2 et 3, cette question de priorité n'a pas été prise en compte, elle est toutefois discutée avec les Tableau 54, Tableau 55 et Tableau 56 qui étudient plus finement les volets environnemental, social et économique de la Croix-Rousse.

4. Etape 3 : Noter et rassembler les résultats sous l'angle «Avantage/Inconvénient»

Dans la MEDDAS, nous recherchons la possibilité de faire « cohabiter » des résultats qualitatifs et quantitatifs.

4.1. Pourquoi noter ?

Il a semblé important de donner une note afin de pouvoir distinguer les avantages relativement à une partie prenante donnée. La prise en compte des besoins des parties prenantes dans une telle analyse est indispensable. Selon Godard et Sterling, les avantages / inconvénients du souterrain urbain doivent être pris de plusieurs points de vue [Godard and sterling, 1995] : le maitre d'ouvrage (représenté par la société exploitante dans la phase d'exploitation), les usagers, les employés, les riverains et la communauté qui représente la partie de la population de la ville à l'environnement le plus éloigné physiquement de l'ouvrage. Le Tableau 53 illustre les besoins de chaque acteur.

Tableau 53 : Souhaits exprimés par les parties prenantes

Partie prenante	Périmètre spatial	Souhaits
Usagers	Structurel	Ils souhaitent bénéficier d'une bonne qualité de service et payer le prix le moins cher possible pour l'utilisation des services. Ils veulent avoir les conditions de séjour saines, confortables et agréables et être en sécurité
Employés	Structurel	Ils cherchent l'adaptation de l'ouvrage à leurs métiers, les conditions de séjour dans l'ouvrage, la sécurité dans leur lieu de travail
Maître d'ouvrage	Opérationnel	Il souhaite obtenir facilement et rapidement les autorisations nécessaires à l'établissement de l'ouvrage. Il cherche à réduire les coûts de la réalisation et de maintenance et accroître la rentabilité de ses investissements. Il cherche à protéger son ouvrage vis-à-vis des éventuels éléments hostiles de son environnement.
Société exploitante	Opérationnel	Il souhaite réduire ses coûts d'exploitation et d'augmenter corrélativement ses recettes, tout en offrant une bonne image à ses « clients » (utilisateurs). Il cherche également les bonnes conditions de travail pour ses employés
Riverains	Territorial local	Ils habitent à la proximité de l'ouvrage souterrain. Ils profitent du service rendu par l'ouvrage. Ils souhaitent améliorer leur qualité de vie avec davantage d'espaces verts ou moins de pollution et de nuisances
Communauté	Territorial global	Elle profite indirectement du fait de la mise en sous terre de certaines activités ou équipements publics. Elle souhaite dynamiser l'économie locale, créer davantage d'emplois, avoir des services urbains disponibles et à proximité des habitants de la ville.

Cette étape est importante pour sélectionner les aspects spécifiques liés au projet (ANNEXE 8 et 9). Cela peut également rendre les résultats obtenus de plusieurs évaluations environnementale et socioéconomique exploitables, et pour donner ensuite une estimation par le biais d'une note à la partie prenante souhaitant se renseigner sur un aspect précis. Plus les notes augmentent, plus une partie prenante sera satisfaite.

4.2. Quoi noter ?

Ayant un besoin d'évaluer différentes alternatives selon un ensemble d'indicateurs pour répondre aux attentes des différentes parties prenantes, il est nécessaire d'évaluer les indicateurs quantitatifs, comme par exemple une consommation d'eau en (m^3/an) ou une consommation énergétique en (MJ Eq.), et qualitatifs dans le meilleur des cas.

Concernant le domaine de la construction, de nombreuses démarches aboutissent à une évaluation qualitative, bien qu'elles soient basées sur des critères quantitatifs. Citons par exemple :

- Les démarches de certification HQE, bâtiment et infrastructure [HQE, 2001 ; Certivéa et al, 2010] avec leurs niveaux de performance : niveau très performant, niveau performant, niveau règlementaire et niveau initial.
- La certification NF Logement [CERQUAL, 2005c] avec trois niveaux de profils [A ; B ; C], ou bien la certification Habitat et Environnement [CERQUAL, 2005a] et ses cinq profils.
- D'autres démarches ont adopté une évaluation quantitative par points, comme par exemple la certification Qualitel [CERQUAL, 2005b] et ses cinq niveaux de performances allant de 1 à 5. La HQE²R [Charlot-Valdieu and Outrequin, 2004] a adopté un système de notation dans l'intervalle [-3 ; +3].
- LE, pour sa part a adopté dans son travail d'évaluation multicritère de plusieurs variantes routières [Le, 2011], un système de notation dans l'intervalle [0 ; 1].

La MEDDAS a pour objectif de comparer plusieurs variantes. Une évaluation qualitative est donc bien adaptée, il reste à en définir l'échelle.

4.3. Comment noter ?

Deux systèmes de notations sont proposés dans le cadre de la MEDDAS. Le premier est basé sur le travail de LE [Le, 2011], il donne une note dans l'intervalle [0 ; 1], le second est défini sous l'angle Avantage/Inconvénient et a été développé dans le cadre de ce travail dans l'intervalle [-1 ; +1].

4.3.1. Méthode de notation [0 ; 1]

Cette méthode est capable de classer les différentes variantes (V_δ, V_β, …, V_n), Figure 64. Plus la variante évaluée est avantageuse, plus le résultat est proche de [1]. Les différents indicateurs quantitatifs peuvent donner des valeurs chiffrées pour chaque variante (V_i).

Figure 64 : Système de notation entre [0 ; 1] d'après [Le, 2011]

A ce stade, deux cas de figures peuvent être distingués : Le premier cas pour les critères où la valeur la plus petite est la meilleure, c'est le cas d'un aspect impactant. Les notes sont données dans l'intervalle [0 ; 1] selon la formule suivante :

Équation 1 : méthode de notation pour les aspects où la petite valeur est la meilleure

$$N_i = \frac{V_{max} - V_i}{V_{max} - V_{min}} \quad [1]$$

Où :

N_i : Notation donnée pour la variante (i)

V_{max} : Valeur maximale parmi les différentes variantes.

V_i : Valeur de la variante (i)

V_{min} : Valeur minimale parmi les différentes variantes.

L'autre cas de figure qui peut être distingué est quand l'aspect évalué est inversé, il est utilisé pour les critères où la valeur la plus grande est la meilleure, le cas d'un aspect valorisant. Une méthode de calcul peut être donc définie comme suit :

Équation 2 : notation pour les aspects inversés – la grande valeur est la meilleure

$$N_i = \frac{V_{min} - V_i}{V_{min} - V_{max}} \quad [2]$$

Où :

N_i : Notation donnée pour la variante (i)

V_{max} : Valeur maximale parmi les différentes variantes.

V_i : Valeur de la variante (i)

V_{min} : Valeur minimale parmi les différentes variantes.

L'avantage de ce système est qu'il donne des valeurs précises, il est capable de noter plusieurs variantes à la fois en les classant sur une échelle entre : la plus impactante et la moins impactante. Cependant il n'est pas capable de donner une note pour un résultat qualitatif. Le résultat sera toujours [0] ou [1]. Cette méthode n'est donc pas discriminante dans le cas où « on ne sait pas » ou bien si l'indicateur donne une réponse moyenne comme par exemple : les deux résultats « pression acoustique occasionnée » et « pression acoustique forte » ont la même note [0], alors qu'ils ne sont pas au même niveau d'effet négatif. Ainsi une autre méthode de notation est proposée.

4.3.2. Méthode de notation [-1 ; +1]

La MEDDAS vise à noter les différents résultats sous l'angle avantages / inconvénients d'une variante par rapport à d'autres. Cette méthode de notation (Figure 65) permet de classer les différentes variantes (V_δ, V_β, …, V_n) entre [-1] et [+1]. Elle est aussi capable de noter les résultats qualitatifs en les différenciant selon cinq niveaux : [-1] et [-0,5] deux niveaux d'inconvénient ; [0] non discriminant ; [+0,5] et [+1] deux niveaux d'avantage.

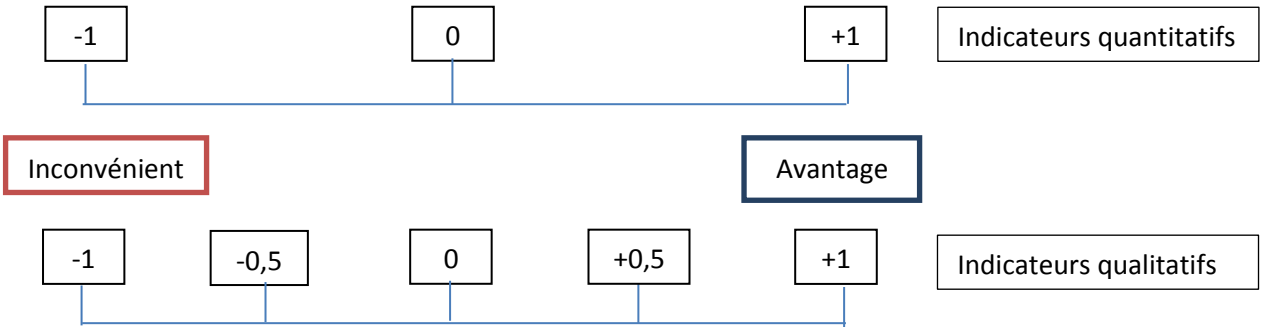


Figure 65 : échelle proposée pour une notation dans l'angle Avantage/Inconvénient

Dans le cas des résultats quantitatifs, deux cas de figure peuvent donc être distingués : résultats des aspects avantageux (la grande valeur est la meilleure) donc la note est toujours comprise dans l'intervalle [0 ; +1], ou bien résultats des aspects désavantageux (la petite valeur en valeur absolue est la meilleure), dans ce cas la note est comprise dans l'intervalle [-1 ; 0]. Dans tous les cas le [0] représente une valeur nulle.

Notation des résultats relatifs aux aspects avantageux

La formule suivante donne la possibilité d'avoir une notation dans l'intervalle [0 ; +1], où [+1] est la variante la plus avantageuse :

Équation 3 : méthode de notation pour les aspects avantageux

$$N_i = \frac{V_i}{V_{max}} \quad [3]$$

Où :

N_i : Note donnée pour la variante (i)

V_{max} : Valeur maximale parmi les différentes variantes.

V_i : Valeur de la variante (i)

Notation des résultats relatifs aux aspects désavantageux

La formule suivante donne la possibilité d'avoir une notation dans l'intervalle [0 ; -1], où [-1] est la variante la plus impactante :

Équation 4 : méthode de notation pour les aspects désavantageux

$$N_i = - \frac{V_i}{V_{max}} \quad [4]$$

Où :

N_i : Notate donnée pour la variante (i)

V_{max} : Valeur maximale parmi les différentes variantes.

V_i : Valeur de la variante (i)

Ensuite, les notes doivent être additionnées pour chaque variante (i) en prenant en compte un nombre d'indicateurs (K). Cela se calcule par la formule suivante :

Équation 5 : Somme des notes par variante

$$N_{total\ (i)} = \sum_1^k N_i \quad [5]$$

Où :

$N_{total\ (i)}$: Total des notations données pour la variante (i)

K : Nombre d'indicateurs évalués.

N_i : Valeur de la variante (i) pour chaque indicateur [0 ; 1].

Pour choisir la variante avantageuse, il suffit de comparer les notes données pour les différentes variantes (V_δ, V_β, …, V_n) et puis de les classer (Équation 6).

Équation 6 : Classement des variantes par leurs notations

$$N_\delta > N_\beta > \ldots > N_n \quad [6]$$

La variante V_δ est la variante la plus avantageuse en termes de DD puis V_β et puis V_n.

4.4. Quels résultats pour le cas de la Croix-Rousse ?

4.4.1. Volet environnemental

Concernant ce volet, 17 indicateurs ont été évalués par l'ACV. Ces indicateurs répondent au classement des sous-objectifs environnementaux auxquels les aspects spécifiques sont liés, on peut ainsi distinguer 7 indicateurs en rang 1 et 10 indicateurs en rang 2.

Pour noter ces résultats suivant la MEDDAS, il faut appliquer la méthode de calcul définie dans l'Équation 4 : méthode de notation pour les aspects désavantageux, pour les deux variantes proposées. On trouve les résultats suivants (Tableau 54). Il semble pertinent de considérer d'abord les indicateurs de rang 1 puis ceux de rang 2 pour appliquer la MEDDAS à d'autres cas.

Tableau 54 : Notations des indicateurs environnementaux

N°	Rang	Indicateur environnemental	Variante 1 (scénario mixte)	Variante 2 (scénario souterrain)	Note de variante 1	Note de variante 2
1	1	Total énergie renouvelable	8,05E+06	7,37E+06	-1,00	-0,92
2	1	Total énergie non-renouvelable	3,96E+08	2,70E+08	-1,00	-0,68
3	2	Mise en décharge - Déchets en vrac	1,12E+06	1,59E+06	-0,70	-1,00
4	2	Mise en décharge - Déchets radioactifs	1,03E+03	6,06E+02	-1,00	-0,59
5	2	FAETP infinite	1,70E+06	2,33E+06	-0,73	-1,00
6	2	FSETP infinite	3,95E+06	5,48E+06	-0,72	-1,00
7	2	MAETP infinite	4,50E+09	4,51E+09	-1,00	-1,00
8	2	MSETP infinite	2,87E+09	2,99E+09	-0,96	-1,00
9	2	TAETP infinite	8,95E+04	1,17E+05	-0,76	-1,00
10	1	HTP infinite	7,29E+06	7,93E+06	-0,92	-1,00
11	2	acidification	1,08E+05	7,78E+04	-1,00	-0,72
12	1	Changement climatique	2,28E+07	2,19E+07	-1,00	-0,96
13	1	Eutrophisation	2,25E+04	1,55E+04	-1,00	-0,69
14	2	Occupation du sol	2,83E+05	4,14E+05	-0,68	-1,00
15	1	Formation d'Ozone photochimique	4,17E+03	3,19E+03	-1,00	-0,76
16	2	Consommation des ressources abiotiques	1,50E+05	1,09E+05	-1,00	-0,73
17	1	Destruction de la couche d'ozone ODP	3,17E+00	1,96E+00	-1,00	-0,62
	Total volet environnemental				-15,48	-14,67

La somme des notes de la variante 2 (scénario souterrain) pour le volet environnemental est plus grande en valeur absolue, cette variante est moins impactante que l'autre et plus favorable en matière environnementale. Les résultats obtenus dans le chapitre 2 ont donné la même conclusion, car les indicateurs discriminants ont majoritairement indiqué que le scénario souterrain est plus favorable que l'autre. Ce système de notation permet cependant d'avoir une vision sur le volet environnemental à travers une note globale.

4.4.2. Volet social

Concernant ce volet, 21 indicateurs ont été sélectionnés par la méthode d'élimination selon leur lien avec l'ensemble « fonction – structure ». Ils répondent également au classement des sous-objectifs auxquels les aspects spécifiques sont liés. 5 indicateurs parmi eux sont en rang 1 ; 9 en rang 2 et 7 en rang 3. Ces indicateurs ne sont pas tous quantifiables. On peut distinguer 9 indicateurs quantitatifs et 12 indicateurs qualitatifs (Tableau 55).

Pour les indicateurs quantitatifs, la méthode de calculs dépend de l'aspect évalué, pour les indicateurs (1,2, 3, 4, 7, 9) les aspects sont désavantageux (Équation 4), donc la valeur la plus basse correspond à la variante la plus avantageuse. Pour les autres indicateurs (5, 6, 8) ce sont des aspects avantageux (Équation 3), la valeur la plus grande correspond donc à la variante la plus avantageuse.

La notation des résultats qualitatifs est variée :

Quand la réponse à l'indicateur n'est pas sûre ou nulle, on considère [0]

Pour une variante avantageuse, on a deux niveaux : soit [+0,5] ou [+1],

Pour une variante désavantageuse, de la même façon on a deux valeurs [-0,5] ou [-1].

Tableau 55 : Notation des indicateurs sociaux

N°	Rang	Indicateur social	Variante 1 (scénario mixte)	Variante 2 (scénario souterrain)	Note de variante 1	Note de variante 2
1	2	Distance parcourue (km)	4	1,7	-1	-0,43
2	2	Temps du trajet – mode piéton	44	26	-1	-0,59
3	2	Temps du trajet – mode vélo	16	6	-1	-0,38
4	2	Temps du trajet – mode bus	10	3	-1	-0,30
5	2	Disponibilité du service (h/jour)	24	19	+1	+0,79
6	2	Espace créée (m²)	8750	15400	+0,57	+1
7	2	Espace urbain consommé (m²)	35200	0	-1	0
8	2	Espace urbain évitée à occuper	0	35200	0	+1
9	1	Nombre de carrefours	8	0	-1	0
10	3	Influences psychologiques	Non connues	Il y en a	0	- 0,5
11	3	Isolation thermique	Pas d'isolation	Isolation naturelle	0	+1
12	3	Pression acoustique	Pas de pression	Pression	0	-1
13	3	Influence de l'éclairage	Basses	Hautes	0	-1
14	2	Disponibilité terrains de construction	Pas sûr	Oui	0	+1
15	3	Possibilité de rajouter des fonctions secondaires d'usage	Pas sûr	Une fonction rajoutée	0	+1
16	3	Facilité pour l'installation de futurs équipements	basse	moyenne	+0,5	+1
17	1	Infrastructures dissimulées	1 seule	2 infrastructures	+0,5	+1
18	1	Bruit et vibration pendant le chantier	Polluant (espace ouvert)	Moins polluant (isolation naturelle)	-1	0
19	1	Façades exposées au bruit de l'usage	Plus de façade	Isolation naturelle	-1	0
20	1	Particules, poussière, fumée, etc.	Plus polluant globalement	Moins polluant globalement	-1	-0,5
21	3	Capacité de protection	basse	performant	0	+1
Total volet social					-6,43	4,10

La somme des notes de la variante 2 (scénario souterrain) pour le volet social est plus grande en valeur absolue (positive). Cette variante a des impacts sociaux plus favorables que l'autre.

4.4.3. Volet économique

Dans le volet économique (Tableau 56), 4 indicateurs ont été évalués. La sélection de ces indicateurs était limitée par la manque des données et d'expertises dans ce domaine mais ils répondent aussi au classement des sous-objectifs économiques auxquels les aspects spécifiques sont liés, on peut ainsi distinguer 3 indicateurs en rang 1 et un indicateur en rang 2. L'indicateur des coûts essentiels représente un aspect désavantageux (Équation 4). Les indicateurs des coûts et des accidents évités représentent des aspects avantageux : coûts évités (Équation 3).

Tableau 56 : Notation des indicateurs économiques

N°	Rang	Indicateur économique	Variante 1 (scénario mixte)	Variante 2 (scénario souterrain)	Note de variante 1	Note de variante 2
1	2	Coût essentiel de la construction (M €)	105	140	-0,75	-1
2	1	Aménagements évités - construction des carrefours (x €)	0	8	0	+1
3	1	Coût des terrains évités (€ *m²)	0	35200	0	+1
4	1	Coûts des accidents évités (€ *accident)	Probabilité élevée	Probabilité basse	0	+1
Total volet économique					-0,75	+4

La variante 2 (scénario souterrain) est plus favorable économiquement selon les notes obtenus.

Discussion et conclusion du chapitre

La méthodologie proposée (MEDDAS) se base sur les méthodes ACV et HQE. L'ACV ne permet pas de mettre en avant les aspects avantageux qu'apporte une solution souterraine, l'HQE ne permet pas non plus de mettre en évidence les aspects spécifiques au souterrain. Cette combinaison permet d'évaluer les différents volets du DD, l'évaluation se fait par les jeux d'indicateurs proposés dans les chapitres précédents.

La MEDDAS hiérarchise les différentes variantes d'aménagements proposées selon leurs réponses avantageuses ou désavantageuses aux différents objectifs du DD. Un bilan Avantages/inconvénients du souterrain selon l'ITA[63] doit tenir compte de plusieurs facteurs [ITA, 2004], présentés dans le Tableau 57. La méthode proposée dans le cadre de ce travail, MEDDAS, permet de répondre aux exigences de l'ITA. Elle est capable de classer les différentes variantes sous cet angle Avantage/Inconvénient (Cf. Tableau 57).

Tableau 57 : la prise en compte des différents facteurs demandés par l'ITA [ITA, 2004] concernant un bilan Avantages/Inconvénients.

Facteur demandé par l'ITA	Réponse dans la méthodologie proposée
la nature et les fonctions de l'ouvrage	nécessité de lier les indicateurs à l'ensemble « fonction – structure »
la localisation et le contexte urbain en surface	l'articulation proposée avec la surface (périmètres spatiaux)
les impacts spécifiques de l'ouvrage sur l'environnement	les jeux d'indicateurs proposés (ANNEXE 5, 6, 7)
le service rendu par l'ouvrage et la masse de population en profitant	La prise en compte des différentes parties prenantes (définies dans le chapitre 4).
le niveau de protection offert par l'ouvrage vis-à-vis des différents risques	La prise en compte des aspects règlementaires relatifs à la sécurité de l'ouvrage (Chapitre 1).

La MEDDAS propose une comparaison des variantes entre elles et puis une hiérarchisation par le système de notation proposé. Un autre problème se pose à ce stade, c'est la façon de sommer les notes obtenus pour classer les variantes. En effet, dans le cadre de ce travail les notes étaient sommées par volet du DD, on a donc trouvé trois notes une pour chaque volet. L'objectif était seulement l'illustration méthodologique de la façon de noter et de choisir la variante. Alors que dans certains cas, cela dépend de la partie prenante concernée par cette évaluation. Elles ne sont pas toutes concernées par tous les objectifs. Pour cela une autre proposition pourrait être abordée dans la MEDDAS, la notation de chaque objectif à part. Par exemple, l'objectif « impact sur le voisinage » concerne le maitre d'ouvrage, qui souhaite réduire les impacts de son ouvrage, et les riverains qui ne souhaitent pas avoir des effets négatifs. Cet objectif ne concerne pas, par exemple, les usagers ou les employés. Il faudrait donc repérer les objectifs qui intéressent chaque partie prenante et faire la somme des notes à part, cela permettrait de donner une indication à chaque partie prenante des aspects qui la concernent.

[63] ITA : International Tunneling Association, https://www.ita-aites.org/en/

L’applicabilité à d’autres cas d’étude est possible et même recommandé pour une validation de cette méthodologie, en suivant les étapes proposée dans ce chapitre. Les aménagements souterrains de type bâtiment sont également évaluables par cette méthodologie. Il suffit de déterminer les fonctions et les structures concernées puis de lancer l’évaluation. Les jeux d’indicateurs proposés prennent en compte les aspects liés aux bâtiments de tous les types (ERP, gare, etc.), elles sont donc capables de fournir la base d’indicateurs nécessaires pour l’évaluation, en tenant compte des mises à jour apportées au fil de temps par d’autres aspects ou d’autres futures fonctions souterraines comme celles présentées dans les pratiques internationales au chapitre 1.

Conclusion générale

Dans un contexte vise à repenser la verticalité de la ville, à profiter des ressources naturelles renouvelables et non renouvelables, et à répondre aux besoins attendus dans un optique d'intensifier la ville et de lutter contre l'étalement urbain, le souterrain représente une opportunité et une solution incontournable dans les zones urbaines contraintes. Au-delà même de faire la démonstration de l'intérêt de la solution souterraine, il s'agit également de montrer tout l'intérêt d'une meilleure articulation entre surface et souterrain. Cette réflexion doit nécessairement être appréhendée à plusieurs échelles spatiale, sociale, fonctionnelle, et temporelle.

Ce travail de thèse illustre le rôle important du souterrain urbain dans la ville durable. Il propose une méthodologie d'évaluation au sens du développement durable pour les aménagements souterrains (MEDDAS). Une méthodologie est proposée. Cette méthodologie se caractérise par la prise en compte d'indicateurs du DD adaptés à ce type d'ouvrages. Elle est capable d'évaluer différentes variantes d'aménagement, puis elle propose un système d'hiérarchisation des variantes, selon les avantages et inconvénients qu'elles offrent en matière du DD. Elle prend nécessairement en compte la totalité du cycle de vie du projet.

L'application sur un cas concret (Tunnel de la Croix-Rousse) accompagne chaque étape de la thèse. Ce cas a été choisi car il représente un complexe souterrain multimodal. Cette application présentée au sein de ce travail se veut purement illustrative dans la mesure où les données sont basées sur des hypothèses fortes. Néanmoins, l'apport de ce travail est d'ordre méthodologique. Il réside dans le développement d'une méthodologie d'évaluation d'un projet urbain souterrain. Il est attaché à son entourage par plusieurs périmètres spatiaux qui représentent cette articulation.

La thèse débute par une illustration des différents aspects du domaine du souterrain, constituée de trois mots clés : définitions, fonctionnalité, et réglementations. Une première partie comprend les définitions des différentes notions utilisées dans ce domaine particulier. La deuxième partie recense les fonctions urbaines pouvant être mises en souterrain aujourd'hui ainsi que celles possibles dans le futur grâce aux nouvelles innovations. Cette partie explique également la notion du zonage vertical des fonctions urbaines en prenant en compte leur profondeur, la multifonctionnalité souterraine. Elle constitue également une analyse des différents textes réglementaires français, cela a pour objectifs : de présenter les différents textes réglementaires définissant les ouvrages souterrains selon leurs fonctions, d'identifier les limites de la mise en sous-sol des différentes fonctions urbaines et de la conception des ouvrages souterrains (raisons de sécurité et d'accessibilité). En seconde partie, une présentation des quelques pratiques et projets souterrains nationaux et internationaux est abordée. Cela peut aider à éclairer la notion du souterrain, méconnue et peu considérée dans les pratiques urbanistiques françaises, ceci qui représente également un objectif du projet national Ville10D – Ville d'idées, dont cette thèse fait partie.

La démarche d'évaluation commence au chapitre 2 par l'aspect environnemental. Une quantification des impacts environnementaux liés au cycle de vie de l'ouvrage est donc faite par l'analyse du cycle de vie (ACV). Parmi plusieurs méthodes présentées dans la première partie de ce chapitre, ce travail adopte l'ACV pour répondre aux problématiques envisagées. C'est une méthode analytique et

multicritères destinée à évaluer la performance environnementale d'un système de produits sur la base d'une même fonction. Pour cela, le concept d'unité fonctionnelle est introduit notamment pour comparer différents produits d'un point de vue environnemental. Dans ce contexte, l'approche ACV est actuellement considérée comme une approche holistique intéressante pour dresser le bilan d'un grand nombre de catégories d'impacts environnementaux liés au projet évalué.

L'application de la méthodologie ACV sur le tunnel de la Croix-Rousse traite une problématique qui comprend à la fois : une ACV d'un objet complexe (tunnels + route) attaché à une zone urbaine donnée ; une comparaison entre deux variantes d'aménagement, rendant le même service, pour savoir laquelle est la moins impactante de point de vue environnemental ; une sélection des indicateurs environnementaux capables de montrer la spécificité d'une solution urbaine souterraine ; et enfin une sensibilité des indicateurs à un futur changement d'usage pendant la phase d'exploitation.

La comparaison avec la bibliographie sur les tunnels routiers a montré que les résultats obtenus sont proches des résultats de plusieurs références consultées, en prenant en compte la différence des frontières du système considérées et l'unité fonctionnelle adoptée. L'évaluation environnementale a montré également que L'ACV, malgré sa contribution importante au volet environnemental, n'est pas capable toute seule, pour ce type d'objets étudié, de mettre en évident les aspects avantageux qu'apporte une solution souterraine : libération d'espaces en surface qui peuvent être dédiés à d'autres usages, gain du temps, mobilité facilitée, etc. D'où l'importance de chercher d'autres méthodes qui considèrent les aspects socioéconomiques.

Partant de l'hypothèse là-dessus, une méthode d'évaluation DD a été donc proposée au chapitre 3, elle est basée sur la méthode HQE. Il s'agit, à la base, d'une méthode de certification et d'évaluation développée pour les bâtiments, les infrastructures et les aménagements. Ce, qui nous a intéressés, était la méthodologie développée au sein du projet européen HQE²R. Cette dernière représente une application de la méthodologie HQE au renouvellement et à la réhabilitation des quartiers, alors que la méthodologie développée au sein de ce travail doit prendre en compte en plus les points spécifiques du souterrain. L'objet est : la définition des indicateurs adaptés aux ouvrages souterrains sous l'angle du DD. Cela a conduit à une proposition d'un ensemble d'objectifs, sous-objectifs et de jeux d'indicateurs : environnementaux, sociaux et économiques. Ces jeux d'indicateurs, correspondant aux trois volets du DD, regroupent les indicateurs par volet et par objectif d'évaluation.

La méthode HQE est une méthode de certification, évalue qualitativement une seule variante du projet, en lui donnant un niveau de performance, afin de la certifier. La seule démarche qui étudie plusieurs variantes à la fois avec une possibilité de les comparer, c'est la HQE²R, mais il s'agit d'un diagnostic d'une évolution d'un quartier. D'où l'originalité de la méthodologie MEDDAS proposée, qui est en effet capable d'évaluer la performance DD et de comparer plusieurs variantes à partir de la fonction et la structure, prenant en compte la construction et l'exploitation.

L'évaluation dans le cadre de la MEDDAS prend en compte l'ensemble « Fonction – Structure ». Cette évaluation est fondée sur une analyse fonctionnelle du besoin et une analyse spatiale. Ces deux analyses permettent de hiérarchiser les fonctions du projet et les différentes structures le constituant. Pour faciliter l'analyse « Fonction – Structure », une grille de projets souterrains donnant

des renseignements nécessaires aux évaluateurs pour commencer les évaluations environnementale et socioéconomique.

L'évaluation commence par la sélection d'indicateurs. Pour ce faire, des méthodes d'aides à la sélection ont été proposées. Elles sont deux : la première par élimination selon le lien avec l'ensemble « Fonction – Structure » ; la seconde est par la priorité donnée à certains objectifs d'évaluation, ce classement était le fruit d'une analyse bibliographiques des avantages et inconvénients du souterrain, ce qui représente les points spécifiques au souterrain. L'objectif est de mettre en avant ces aspects et leur donner la priorité à l'évaluation.

La limite principale de la MEDDAS se présente dans sa première étape « détermination de l'ensemble fonction-structure », car cette étape conditionne les étapes suivantes de la méthodologie, une difficulté se présente également à ce stade dans le cas de combinaisons d'ouvrages souterrains, comme le cas de la Défense – Paris par exemple. La détermination des limites de la fonction évaluée et sa structure concernée devient difficile. Une autre limite se représente par la collection des données, la variation des acteurs impliqués dans le projet rend cette étape plus compliquée.

Une perspective envisageable de ce travail d'élargir l'évaluation environnementale pour qu'elle comprenne d'autres objectifs environnementaux qui ne sont pas compris dans l'ACV, comme par exemple la biodiversité. Les jeux d'indicateurs proposées prennent également en compte les aspects liés aux bâtiments de tous les types (ERP, gare, etc.), ils sont donc capables de fournir la bases d'indicateurs nécessaires pour l'évaluation, en tenant compte à la mise à jour importante au fil de temps d'autres aspects ou d'autres futures fonctions souterraines. Une perspective peut se présenter à ce niveau est de développer les méthodes de sélection et de priorisation des indicateurs pour qu'elles soient moins subjectives : par un groupe d'experts par exemple.

Une autre perspective pourrait être liée à une étude de sensibilité des indicateurs socioéconomiques, dans le même sens de l'étude qui a été faite au sens de ce travail pour la sensibilité des indicateurs environnementaux, par exemple étudier la sensibilité des indicateurs socioéconomiques au changement du bus en électrique.

La MEDDAS est, selon nos réflexions actuelles, applicable à tout type d'aménagement souterrain, car le chapitre 4 en a proposé une formulation générique, bien qu'elle était construite à partir d'un cas d'étude qu'on a pensé suffisamment complexe pour permettre de montrer ce résultat de la démarche. En perspective de ce travail : l'applicabilité de la MEDDAS est à tester à d'autres cas d'études. Il est préférable qu'un futur cas d'étude soit un aménagement souterrain ponctuel type « bâtiment ». Théoriquement, il suffit de déterminer et puis hiérarchiser les fonctions et les structures correspondantes, choisir les indicateurs et lancer l'évaluation. Les analyses fonctionnelle et spatiale sont aussi adaptés à tout type d'aménagement, y compris ceux de types bâtiment.

Références bibliographiques

1. [Ademe, 2007]
Ademe., (2007), « AEU, L'approche environnementale de l'urbanisme pour concilier urbanisme et environnement ». Référence en ligne, disponible sur le lien: http://www.centre.ademe.fr/sites/default/files/files/Encarts/En%20savoir%20plus/aeu_plaquette_nationale.pdf (dernière consultation 09 juin 2016).
2. [Admiraal, 2006]
Admiraal JBM., (2006), « A bottom-up approach to the planning of underground space ». Tunnelling and Underground Space Technology, 21(3-4) : pp. 464–465.
3. [Admiraal, 2007]
Admiraal, H., (2007), « Address by the chair of ITA committee on underground space », UN workshop, 14 décembre 2007.
4. [AFNOR, 1995]
Norme FD X50-101, (1995-12), « Analyse fonctionnelle - L'analyse fonctionnelle outil interdisciplinaire de compétitivité », 29 p.
5. [AFNOR, 2003]
Guide d'application P01-030, (2003), « Système de management environnemental - Qualité environnementale des bâtiments - Système de management environnemental pour le maître d'ouvrage : opérations de construction, adaptation ou gestion des bâtiments - Cadre de conception et de mise en œuvre pour la démarche HQE », 22 p.
6. [AFNOR, 2004]
Norme NF P01-010, (2004), « Qualité environnementale des produits de construction », 48 p.
7. [AFNOR, 2006a]
Norme NF EN ISO 14040, (2006-10), « Management environnemental - Analyse du cycle de vie – Principes et cadre (Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework) » 23 p.
8. [AFNOR, 2006b]
Norme NF EN ISO 14044, (2006-10), « Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices » (Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines) 49 p.
9. [AFNOR, 2010]
Norme NF EN 15643-1, (2010-12), « Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la contribution au développement durable des bâtiments - Partie 1 : Cadre méthodologique général » (Sustainability of construction works - Sustainability assessment of buildings - Part 1 : general framework) 23 p.
10. [AFNOR, 2011]
Norme NF EN 15643-2, (2011-05), « Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation des bâtiments - Partie 2: Cadre pour l'évaluation des performances environnementales » (Sustainability of construction works - Assessment of buildings - Part 2 : framework for the assessment of environmental performance) 31 p.
11. [AFNOR, 2011b]
Norme NF X50-100, (2011-11), « Management par la valeur - Analyse fonctionnelle, caractéristiques fondamentales - Analyse fonctionnelle : analyse fonctionnelle du besoin (ou externe) et analyse fonctionnelle technique/produit (ou interne) - Exigences sur les livrables et démarches de mise en œuvre », 39 p.

12. [AFNOR, 2012a]
Norme NF EN 15978, (2012-05), « Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Évaluation de la performance environnementale des bâtiments - Méthode de calcul » (Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method) 57 p.
13. [AFNOR, 2012b]
Norme NF EN ISO 14064-1, (2012-05), « Gaz à effet de serre - Partie 1 : spécifications et lignes directrices, au niveau des organismes, pour la quantification et la déclaration des émissions et des suppressions des gaz à effet de serre », 33 p.
14. [AFNOR, 2013a]
Norme NF EN 16271, (2013-02), « Management par la valeur – expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel- exigences pour l'expression et la validation du besoin à satisfaire dans le processus d'acquisition ou d'obtention d'un produit », 32p.
15. [AFNOR, 2013b]
Norme NF EN ISO 14031, (2013-09), « Management environnemental - Évaluation de la performance environnementale - Lignes directrices », indice de classement : X30-241, 51 p.
16. [AFNOR, 2014a]
Norme NF EN 15804+A1 (2014-04), « Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction », 62 p.
17. [AFNOR, 2014b]
Norme XP P 01-064/CN, (2014-04), « Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction - Complément national à la NF EN 15804+A1 », 80p.
18. [AFNOR, 2014c]
Norme NF EN 1325 (2014-04), « Management de la valeur - Vocabulaire - Termes et définitions », 21 p.
19. [AFNOR, 2016]
Projet Norme prNF EN 15643-5, (2016), « Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Evaluation de la contribution des bâtiments et des ouvrages de génie civil au développement durable - Partie 5 : Cadre pour l'évaluation de la performance de la contribution des ouvrages de génie civil au développement durable », 77 p.
20. [AFTES, 2010]
Association française des tunnels et des espaces souterrains, (2010), « L'espace souterrain, une chance pour l'Ile-de-France » Compte rendu du colloque CESR-AFTES, 9 juin 2010, hémicycle régionale du conseil économique et social régional de l'Ils-de-France, 68p.
21. [Aissani et al, 2012]
Aissani L., Vaxelaire S., Papinot P-E., Védrine H., Mollaret M-E. et Villeneuve J., (2012), « Evaluation des technologies propres et durable de gestions des déchets » projet ANR-08-ECOT-004 CleanWasT, tache 2 méthodes d'évaluation des impacts environnementaux des opérations de prétraitement des déchets, 143p.

22. [Anderson et al, 2003]
Anderson, C. S., Cady, A. B., & Meikle, D. B. (2003). « Effects of vegetation structure and edge habitat on the density and distribution of white-footed mice (Peromyscus leucopus) in small and large forest patches ». Canadian Journal of Zoology, 81(5), pp. 897-904.
23. [André et al, 2003]
André P., Delisle C. E., Revéret J.-P. et Séne A. (2003). « L'évaluation des impacts sur l'environnement. Processus, acteurs et pratique, Montreal, Presses internationales Polytechnique », ISBN 2553011326, 520 p.
24. [Angel S et al, 2005]
25. Angel, S., Sheppard, S., Civco, D. L., Buckley, R., Chabaeva, A., Gitlin, L., ... & Perlin, M. (2005). « The dynamics of global urban expansion » Washington, DC: World Bank, Transport and Urban Development Department, 205p.
26. [Anthonissen et al, 2015]
Anthonissen, J., Van Troyen, D., & Braet, J. (2015). « Using carbon dioxide emissions as a criterion to award road construction projects: a pilot case in Flanders ». Journal of Cleaner Production, 102, pp. 96-102.
27. [Argonna, 2010]
Argonna (2010). « Biomass energy data book - lower and higher heating values of gaz, liquid and solid fuels ». Référence en ligne http://greet.es.anl.gov/ [Dernière consultation : 09 juin 2016], GREET : Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use In Transportation Model.
28. [ATILF, 2000]
Dictionnaire de l'Académie française, référence en ligne : http://atilf.atilf.fr/academie9.htm.
29. [Audi et al, 2015]
Audi, Y., Jullien, A., D'aloia-Schwartzentruber, L., Feraille, A., and Lorino, T. (2015), « Building underground : Which benefits from a sustainable point of view? » In International conference ITAWTC 2015, Durbovnik - Croatia. 22 - 28 mars, 8. p.
30. [AzariJafari et al, 2016]
AzariJafari, H., Yahia, A., & Amor, M. B. (2016), « Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities ». Journal of Cleaner Production, 112, pp. 2187-2197.
31. [Bailly et Gluzicki, 2012]
Bailly C et Gluzicki F (2012), « Tunnel de la Croix-Rousse, Fibré synthétique », Béton[S] n°38, janvier/février 2012, p.40
32. [Bana e Costa et al, 2003]
Bana e Costa C. A., De Corte J.-M. et Vansnick J.-C. (2003). « MACBETH. Multiple Criteria Decision Analysis: The State of the Art Surveys ». M. Ehrgott. 76, pp. 409-442.
33. [Bare, 2002]
Bare, J. C. (2002). « Developing a consistent decision-making framework by using the US EPA's TRACI ». In American Institute of Chemical Engineers Symposium., 8p.
34. [Barles and Jardel, 2005]
Barles S and Jardel S. (2005), « L'urbanisme souterrain : étude comparée exploratoire ». Technical report, Laboratoire Théorie des mutations urbaines, UMR 7136 Architecture, urbanisme, sociétés, CNRS et université de Paris 8.

35. [Barroca and D'aloia, 2014]
Barroca, B. and D'Aloia Schwartzentruber, L. (2014). « L'enjeu environnemental, comment évaluer et optimiser l'efficience environnementale de l'urbanisme souterrain ? » Cofhaut, N 35, p. 9.
36. [Beckmann, 2007]
Beckmann, H. (2007). « CargoCap: a new way to transport freight ». In: Proceedings of Schiller Institute Conference, The Eurasian Land-Bridge Becomes A Reality! Schiller Institute Conference, Kendrich, Germany.
37. [Benoît et al, 2010]
Benoît, C., Norris, G. A., Valdivia, S., Ciroth, A., Moberg, A., Bos, U., ... & Beck, T. (2010). « The guidelines for social life cycle assessment of products: just in time! ». The international journal of life cycle assessment, 15(2), pp. 156-163.
38. [Béraud, 2013]
Béraud, H. (2013). « Initier la résilience de service de gestion des déchets aux catastrophes naturelles ». Thèse de doctorat, Université Paris-Est-Marne-la-Vallée. 449p.
39. [Bidou, 2006]
Bidou, D. (2006). « The HQE approach: Realities and perspectives of building environmental quality ». Management of Environmental Quality: An International Journal, 17(5), pp. 587-592.
40. [Blankendaal et al, 2014]
Blankendaal, T., Schuur, P., & Voordijk, H. (2014). « Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach ». Journal of cleaner production, 66, 27-36.
41. [Bobylev, 2009]
Bobylev N (2009) « Mainstreaming sustainable development into a city's master plan: A case of urban underground space use ». In Land Use Policy. Elsevier Science.
42. [Boivin, 1989]
Boivin, D. (1989). « De l'occupation du sous-sol urbain à l'urbanisme souterrain ». Cahiers de géographie du Québec, 33 N 88, pp. 37-49.
43. [Bouhaya et al, 2009]
Bouhaya, L, Le Roy R, & Feraille A. (2009), « Simplified Environmental Study on Innovative Bridge Structure ». Environmental Science & Technology, 43(6), pp. 2066– 2071.
44. [Boujnah et al, 2013]
Boujnah H, Coulombel N, Kotelnikova-Weiler N, Leurent F, Millan-Lopez S, and Poulhès A. (2013), « Activités, accessibilités et mobilités à l'échelle du quartier ». Collection de l'Écoconception des ensembles bâtis et des infrastructures, Bruno Peuportier - Ecole des mines ParisTech. PP. 341-367
45. [Boulenger, 2011]
Boulenger, M. (2011). « Life Cycle Assessment of concrete structures using public databases: comparison of a fictitious bridge and tunnel ». Thèse de master the Royal Institute of Technology (KTH) in Stockholm. 151p.
46. [Bussemey-Buhe, 1997]
Bussemey-Buhe C. (1997), Développement d'une méthode de conception environnementale des bâtiments prenant en compte l'environnement de proximité. Thèse, Université de Savoie, Savoie, 163 p.
47. [Candon, 1996]
Candon N., (1996), « La composition urbaine ». Centre de documentation de l'urbanisme, Direction de l'architecture et de l'urbanisme, 79p.

48. [Capony et al, 2011]
Capony A., Dauvergne M., Lorino T., Muresan B., and Jullien A., (2011) « A earthworks and environmental monitoring- A case study for environmental impacts Modelling » in Proc. Of the World Road Association-PIARC International Seminar, New-Delhi, India, p. 9.
49. [Capony, 2013]
Capony, A. (2013). « Evaluation environnementale d'un chantier de terrassement, mise au point d'un outil paramétrable de mesure d'émissions relative aux engins de terrassement ». Thèse de doctorat, Ecole centrale Nantes.
50. [Carfantan, et al, 2005]
Carfantan, G., Vignes-Rubio, C., & Bonnet, K. (2005). « Méthodologie pour une démarche de qualité environnementale sur les opérations d'aménagement dans une perspective de développement durable ». SETUR, Rapport Définitif.
51. [Carmody ans Sterling, 1993]
Carmody, J., Sterling, R. L., & Sterling, R. (1993). « Underground space design: Part 1: Overview of subsurface space utilization Part 2: Design for people in underground facilities ». University of Texas Press, 328p.
52. [Cauchard, 2010]
Cauchard, L. (2010). « Les collèges d'experts et la fabrique de la normalisation technique. Hybridation Normative et Performation de la Haute Qualité Environnementale (HQE) des Bâtiments en France » Thèse de doctorat, Université Paris-Est.
53. [Certivéa et al, 2010]
Certivéa, LCPC, CSTB, CETE Nord-Picardie, et Département du nord (2010). « Référentiel technique de certification route durable ». Technical report, Certivéa, CSTB, LCPC et CG 59.
54. [Certivéa, 2014]
Certivéa (2014), « Référentiel du système de management d'une opération d'aménagement durable (HQE Aménagement) ». Rapport technique, 24 p.
55. [CERQUAL, 2005a]
CERQUAL (2005). « Habitat & Environnement - Référentiel Millésime 2005 », référentiel. Paris, Qualitel, 1 janvier 2005, 307 p.
56. [CERQUAL, 2005b]
CERQUAL (2005). « Qualitel - Référentiel Millésime 2005 », référentiel. Paris, Qualitel, 1 janvier 2005, 248 p.
57. [CERQUAL, 2005c]
CERQUAL (2005). « Règles de certification de la marque NF Logement », référentiel. Paris, Qualitel, 16 décembre 2004, 43 p.
58. [CETU, 1990]
CETU (1990). « Dossier pilote des tunnels (2 géométrie) ». Technical report, Ministère de l'équipement, du logement, du transport et de la mer, CETU : centre d'études des tunnels. 61. p.
59. [Charlot-Valdieu and Outrequin, 2001]
Charlot-Valdieu C and Outrequin P, (2001). « Démolir et/ou réhabiliter pour le développement durable des quartiers ? » Élaboration d'une grille d'analyse multicritère comme outil d'aide à la décision. Direction régionale de l'équipement Pays de la Loire, La Calade et CSTB.
60. [Charlot-Valdieu and Outrequin, 2003]
Charlot-Valdieu C. et Outrequin P. (2003). « The ISDIS system : integrated sustainable development indicators system & the INDI model » Delevrable 17-1 INDI Paris. 34 p.
61. [Charlot-Valdieu et al, 2004]
Charlot-Valdieu C, Outrequin P, Robbins C (2004) « Outils et recommandations HQE²R pour intégrer le développement durable dans les projets d'aménagement et/ou de renouvellement urbain » Volume 2de la démarche HQE²R, 81p.

62. [Charneau and Trebbi, 1981]
Charneau, N., & Trebbi, J. C. (1981). « Maisons creusées, maisons enterrées ». Paris ; Editions Alternatives.
63. [Cherqui, 2005]
Cherqui F. (2005), « Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier –Méthode ADEQUA ». Thèse de doctorat, Université de la Rochelle, Pôle sciences et technologie.
64. [Chow et al, 2002]
Chow, F., T. P., Vähäaho, I., Selberg, B., and Lemos, L. (2002). « Hidden aspects of urban planning : utilisation of underground space ». In 2nd International conference on Soil Structure Interaction in Urban Civil Engineering.
65. [CIMbéton et al, 2010]
CIMbéton, egis structures, HSTRRES, & du Béton Pret à l'Emploi, Syndicat National. (2010). « Analyse du Cycle de Vie d'un pont en béton ». Exemple d'application pour un pont courant.
66. [Collings, 2006]
Collings, D. (2006). « An environmental comparison of bridge forms ». Pages 163–168 de : Proceedings of the Institution of Civil Engineers, vol. 159p.
67. [Cotana, 2008]
Cotana, F., Rossi, F., Marri, A., Amantini, M. (2008). « Pipe§net : innovation in transport through high rate small volume payloads ». In: Proceedings from the 5th International Symposium on Underground Freight Transportation by Capsule Pipelines and Other Tube/Tunnel Systems, The University of Texas, Arlington.
68. [Crémona, 2003]
Crémona C. (2003) « Application des notions de fiabilité à la gestion des ouvrages existants ». Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
69. [Crepon, 2008]
Crepon E. (2008) « Concevoir un éco-quartier ». Premier plan dossier, journal d'information du PUCA (Plan Urbanisme, Construction, Architecture), N° 16, 16p.
70. [Cocquière, 2014]
Cocquière A, 2014. « Aspects juridiques de l'aménagement souterrain », rapport de synthèse portant sur la réglementation nationale, Institute d'aménagement et de l'urbanisme de la région Ile-de-France, dans le cadre de thème 5.1 – Projet national Ville 10D. 54p.
71. [Corbusier et al, 1957]
Corbusier, L., Giraudoux, J., and de Villeneuve, J. (1957). « La charte d'Athènes ». Editions de Minuit. 190 p.
72. [D'Aloia et al, 2010]
D'Aloia Schwartzentruber L., Rival F., Kote H. (2010) « LCA for evaluating underground infrastructures like tunnels: potential environmental impacts of Materials ». Proceeding of the Second International Symposium on Service Life design for Infrastructure, 46th October 2010, Delft, The Netherlands, Vol. 1, p. 453 - 460.
73. [D'Aloia et al, 2012]
D'aloia Schwartzentruber (L.), Rabier (M.), (2012), « Life Cycle Assessment (LCA) applied to tunnels : Potential environmental impacts of construction materials », International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction, Nantes, 10 au 12 juillet, 8 p.

74. [D'Aloia et al, 2015]
D'Aloia Schwartzentruber L., Humbert, E., Bonnet, R., & Dumoulin, C. (2015). « Évaluation des impacts sur l'environnement des tunnels creusés au tunnelier par une méthode de type analyse du cycle de vie (acv)/evaluation of environmental impacts of tunnels (in case of mechanized tunnelling) by a life cycle assessment method (LCA) ». In Annales du Bâtiment et des Travaux Publics (Vol. 67, No. 3, p. 36). Editions ESKA.
75. [Dauvergne et al, 2013]
Dauvergne M, Jullien A, Proust C, Tamagny P and Ventura A. (2013). « Manuel utilisateur ECORCE 2.0. Eco-comparateur Routes Construction Entretien ». Rapport technique - IFSTTAR.
76. [Djongyang et al, 2010]
Djongyang, N., Tchinda, R., & Njomo, D. (2010). « Thermal comfort: A review paper ». Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(9), pp. 2626-2640.
77. [Dobinson and Bowen, 1997]
Dobinson, K. and Bowen, R. (1997). « Underground space in the urban environment development and use, towards a 4 dimensional city ». Technical report, The warren Center, Undergound Space Project. 325 p.
78. [Dondel et al, 2011]
Dondel, M., Gonzva, M., Mouillé-Richard, C., Mesnard, T et al… (2011). « L'espace souterrain, une opportunité pour la ville durable ». Master's thesis, EIVP : Ecole d'Ingénieurs de la Ville de Paris, Paris -France. 111 p.
79. [Duffaut, 2007]
Duffaut, P. (2007). « Urbanisme Souterrain : Demandes, offres, contraintes et avantages ». Ed. Techniques Ingénieur, 17p.
80. [Duffaut, 2010]
Duffaut, P. (2010). « L'espace souterrain au service du développement durable ». In Colloque Franco-Suisse sur la gestion de l'espace sous la ville : des géosciences à l'urbanisme. EPFL, Lausanne, 8p.
81. [Dunkel, 1985]
Dunkel, F., (1985). « Underground and earth sheltered food storage: historical, geographic and economic considerations ». Underground Space 9 (5–6), pp. 310–315.
82. [Durand-Pasquier, 2011]
Durand-Pasquier, G. (2011). « Bâtiments et performance énergétique: données techniques, contrats, responsabilité ». Wolters Kluwer France.
83. [Edelenbos et al, 1998]
Edelenbos, J., Monnikhof, R., Haasnoot, J., Van der Hoeven, F., Horvat, E., and Van der Krogt, R. (1998). « Strategic study on the utilisation of underground space in the Netherlands ». Tunnelling and underground space technology, 13 N 2 :pp. 159–165.
84. [Fanger, 1970]
Fanger, P. O. (1970). « Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering ». Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.
85. [Frischknecht et al, 2007]
Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H-J., Doka G., Dones R., Heck T., Hellweg S., Hischier R., Nemecek T., Rebtizer G., Spielmann M., et Wernet G. (2007), « Overview and methodolgy: ECOINVENT » report No.1, www.ecoinvent.ch, Dübendorf : Swiss Centre for Life Cycle Inventories;

86. [Fund, 2016]
Fund, M. (2016). « Méthode pour l'évaluation des couvertures d'infrastructures routières et ferroviaires. Approche par la modélisation fonctionnelle d'un objet technique urbain. ». Thèse de doctorat – université Paris-Est Marne La Vallée, 250p.
87. [Gautier et al, 2014a]
Gautier, P., Jehanno, A., Subitte, A., Bossin, P., Labbé, M., and Belmekki, M. (2014). « État de l'art des outils d'évaluation socio-économique et de la monétarisation des externalités environnementales ». Technical report, Systra - Interface transport - Les ateliers Monique Labbé, Projet National ville 10D- ville d'idées. 77 p.
88. [Gautier et al, 2014b]
Gautier, P., Jehanno, A., Subitte, A., Bossin, P., Debyser C., Labbé, M., and Belmekki, M. (2014). « Boîte à outils d'évaluation de projets souterrains ». Technical report, Systra - Interface transport - Les ateliers Monique Labbé, Projet National ville 10D- ville d'idées. 114p.
89. [Geodkoop et Spriensma. 2001]
Geodkoop M, Spriensma R. (2001), « The Eco-indicator 99, a damage oriented method for life cycle impact assessment, methodology » report. Pre consultants BV; p 132.
90. [Geodkoop et al, 2009]
Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & van Zelm, R. (2009). « ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, 1 », 132p.
91. [Godard and Berenguier, 2002]
Godard, J. and Berenguier, C. (2002). « Why go underground ?, contribution of the use of underground space to sustainable development ». International Tunneling Association ITA - AITES. 24p.
92. [Godard and Sterling, 1995]
Godard, J. P., & Sterling, R. L. (1995). « General considerations in assessing the advantages of using underground space ». Tunnelling and Underground Space Technology, 10(3), 287-297.
93. [Grand-Lyon, 2007]
Grand-Lyon (2007) « La rénovation du tunnel de la Croix-Rousse », présentation dans la Commission déplacements, 34p.
94. [Grand-Lyon and Egis Tunnels, 2012]
Grand-Lyon (2013). « Conception Et Réalisation De Travaux Pour La Rénovation Lourde Du Tunnel De La Croix Rousse »,. Rapport technique + plans, 30 p.
95. [Grand-Lyon, 2013]
Grand-Lyon (2013). « Les journaux du tunnel de la Croix-Rousse ». N 1 – 13.
96. [Grand-Paris, 2015]
Société du Grand Paris, (2015). « Consultation de Génie Civil, Ligne 15 sud », Réunion d'information des entreprises du BTP, FNTP, FRTP, AFTES. 31 mars 2015. Disponible sur : https://www.societedugrandparis.fr/wp-content/uploads/2014/04/2015-03-31-runion-fntp-frtp-aftes.pdf dernière consultation : 15 avril 2016.
97. [Guinée et al, 2001]
Guinée J.B., (final editor), Gorrée M., Heijungs R., …. & Weidema B. P. (2001), « Life Cycle assessment ; An operational guide to the ISO standards » ; Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Sience (CML), Den Haag and Leiden, The Netherlands;
98. [Hammervold et al, 2009]
Hammervold, J, Reenaas, M, & Bratteba¸, H. (2009). « ETSI Stage 2 - Sub-project 2 : Environmental Effects - Life Cycle Assessment of Bridges ». Tech. Report. NTNU, Norwegian University of Science and technology. 62p,

99. [Hanamura, 1998]
Hanamura T (1998) « Underground space creation and utilization for a high quality city ». Proceedings of 3rd International Congress on Construction, Singapore, vol. 21, pp. 13–19.
100. [Hanamura, 2002]
Hanamura T (2002) « Underground space development for subway and sewage as a key solution to the urban congestion problems ». Proceedings of International Conference on Innovation and Sustainable Development of Civil Engineering in the 21st Century, Beijing 1 : pp. 124–130.
101. [He et al, 2012]
He, L., Song, Y., Dai, S., and Durbak, K. (2012). « Quantitative research on the capacity of urban underground space - the case of Shanghai, China ». Tunnelling and underground space technology, N 32 : pp. 168–179.
102. [Heijugn et al, 1992]
Heijungs, R., Guinée, J. B., Huppes, G., Lankreijer, R. M., Udo de Haes, ... & De Goede, H. P. (1992). « Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds (part 1) ».
103. [Heijungs et Suh, 2002]
Heijungs R, et Suh S (2002) « The Computational Structure of Life Cycle Assessment ». Kluwer Academic Publishers. Pays Bas, 256 p.
104. [Hensen, 1991]
Hensen JLM (1991). « On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system ». PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven.
105. [Herfray et Peuportier, 2010]
Herfray G, Peuportier B, (2010), « Life Cycle Assessment applied to urban settlements », sustainable building conference, Madrid avril 2010.
106. [Herfray, 2011]
Herfray G., (2011)., « Contribution à l'évaluation des impacts environnementaux des quartiers ». Thèse de doctorat, Ecole des mines Paris-Tech, p. 68 – 72 ;
107. [Hoang, 2005]
Hoang, T., Jullien, A., Ventura, A., & Crozet, Y. (2005). « A global methodology for sustainable road-Application to the environmental assessment of French highway ». In 10DBMC International Conference On Durability of Building Materials and Components, Lyon (France), pp. 17-20.
108. [Horvath et al, 1998]
Horvath, A, & Hendrickson, C. (1998). « Steel versus Steel-Reinforced Concrete Bridges : Environ- mental Assessment ». Journal of infrastructure systems, 111–117. Pp. 62, 63
109. [HQE, 2001]
HQE. (2001) « Environnementale, H. H. Q. Définition explicite de la qualité environnementale, EDQE et SME ». Référentiels des caractéristiques HQE. Paris, Association HQE, document, 44 pages.
110. [Huang et al, 2015]
Huang, L., Bohne, R. A., Bruland, A., Jakobsen, P. D., & Lohne, J. (2015). « Environmental impact of drill and blast tunnelling: life cycle assessment ». Journal of Cleaner Production, 86, 110-117.
111. [IAU, 2011]
IAU (2011). « Imaginer les espaces souterrains de la ville de demain », N 579. Note rapide, N 579, octobre : 4p.

112. [IDF, 2012]
Ile de France, 2012. « Démarche Gares, Montages économiques et financiers des gares, identité des gares et lisibilité de l'offre de transport, accessibilité, sécurité et sureté des gars », Rapport des groupes de travail sur les gares du Grand Paris – Direction régionale et interdépartementale de l'équipement et de l'aménagement de l'Ile-de-France, 76p.
113. [IEA, 2004]
International Energy Association. (2004). « Annex 31: Energy-related Environmental Impact of Buildings », ECBCS Bookshop, Birmingham,
114. [IFIJ, 2015]
Institute français d'information juridique « code de l'urbanisme ». Référence disponible enligne sur : http://codes.droit.org/cod/urbanisme.pdf (consulté le 5 aout 2016), 545p.
115. [IFIJ, 2016]
Institute français d'information juridique « code de la construction et de l'habitation ». Référence enligne disponible sur : http://codes.droit.org/cod/construction_habitation.pdf (consulté le 5 aout 2016), 1000p.
116. [IFPEB, 2010]
IFPEB (2010) « Les choix constructifs à la lumière de l'Analyse de Cycle de Vie - Un point pratique sur les déclarations environnementales des matériaux: quelles méthodes pour quelles décisions? » Institut Français pour la Performance Energétique du Bâtiment, 55 p.
117. [INSEE, 2013]
Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE). 2013 « Définition Insee : unité urbaine ». Référence en ligne disponible sur le lien : http://www.insee.fr/fr/methodes/default.asp?page=definitions/unite-urbaine.htm (dernière consultaiton : 18 avril 2016).
118. [ITA, 2000]
ITA - WG4 (2000). « Planning and mapping of underground space, an overview ». Tunnelling and underground space technology, N 15(3) :pp. 271–286.
119. [ITA, 2004]
ITA (2004). « Underground or aboveground? Making the choice for urban mass transit systems: A report by the International Tunnelling Association (ITA) ». Prepared by Working Group Number 13 (WG13). 'Direct and indirect advantages of underground structures'. Tunnelling and Underground Space Technology, 19(1), pp. 3-28.
120. [Inserguet, 2012]
Inserguet, J-F (2012). « L'écriture du PLU, articles 1 et 2 des règlements de zone ». Référence en ligne, disponible sur : http://www.gridauh.fr/comptes-rendus-de-travaux/ecriture-des-plu/ (Dernière consultation : 18 avril 2016). Groupement de recherche sur les institutions et le droit de l'aménagement, de l'urbanisme et de l'habitat (GRIDAUH).
121. [ISO, 2014]
Norme ISO 6707-1, (2014), « Bâtiment et ouvrages de génie civil – vocabulaire » Partie -1 : termes généraux, 59 p.
122. [ISO, 2015]
Norme ISO/TS 21929-2, (2015), « Développement durable dans la construction – indicateurs du développement durable », Partie 2 : cadre pour le développement d'indicateurs pour les ouvrages de génie civil.
123. [Itoh et al, 2003]
Itoh, Y., & Kitagawa, T. (2003). « Using CO 2 emission quantities in bridge lifecycle analysis. » Engineering structures, 25(5), pp. 565-577.
124. [Itsubo and Inaba, 2003]
Itsubo, N., & Inaba, A. (2003). « A new LCIA method: LIME has been completed ». The International Journal of Life Cycle Assessment, 8(5), pp. 305-305.

125. [Jégou, 2011]
Jégou A., (2011), « Territoires, acteurs et enjeux des dynamiques de durabilité urbaine : le cas de la métropole parisienne ». Thèse de doctorat, géographie, université Paris 1. Référence en ligne disponible sur : http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00681586 (dernière consultation 18 avril 2016). 721 p
126. [Jesinghaus, 1999]
Jesinghaus J. (1999). « Indicators for Decision-Making. Ispra, Italie », European Commission, 12 décembre 1999, 26 p
127. [Jolliet et al, 2003]
Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., & Rosenbaum, R. (2003). « IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology ». The International Journal of Life Cycle Assessment, 8(6), pp. 324-330.
128. [Jolliet et al, 2010]
Jolliet O, Saadé M, Crettaz P and Shaked S. 2010. « Analyse du cycle de vie. Comprendre et réaliser un écobilan ». 2e Edition mise à jour et augmentée. Science & ingénierie de l'environnement edn. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. 24, 72
129. [Jullien et al, 2014]
Jullien, A., Dauvergne, M., & Cerezo, V. (2014). « Environmental assessment of road construction and maintenance policies using LCA ». Transportation research part D: transport and environment, 29, p. 56-65.
130. [Jullien et al, 2015]
Jullien, A., Dauvergne, M., & Proust, C. (2015). « Road LCA: the dedicated ECORCE tool and database. The International Journal of Life Cycle Assessment », Disponible en ligne : http://link.springer.com/article/10.1007/s11367-015-0858-y (dernière consultation 11 aout 2016). Vol 20(5), pp. 655-670.
131. [Kendall, 2004]
Kendall, A. (2004). « A Dynamic Life Cycle Assessment Tool for Comparing Bridge Deck Designs ». Rapport technique. CSS04-12. Center for Sustainable Systems, University of Michigan. Pp. 62, 63
132. [Keoleian et al, 2005]
Keoleian, G.A, Kendall, A, Dettling, J.E, Smith, V.M, Chandler, R.F, Lepech, M.D, & Li, V.C. (2005). « Life Cycle Modeling of Concrete Bridge Design : Comparison of Engineered Cementitious Composite Link Slabs and Conventional Steel Expansion Joints ». Journal of infrastructure systems, pp. 51–59. 62, 63
133. [Kohler, 1986]
Kohler N, (1986) « Analyse énergétique de la construction, de l'utilisation et de la démolition de bâtiments », thèse de doctorat, école polytechnique fédérale de Lausanne.
134. [Kohler, 2003]
Kohler N, (2003), « Intergrated life cycle analysis in sustainable assessment of historical areas» rapport dans le cadre du projet européen SUIT (sustainable development of urban historical areas through an active integration within Towns, Task 3.3c.
135. [Koellner et al, 2008]
Koellner, T., & Scholz, R. W. (2008). « Assessment of land use impacts on the natural environment. » The International Journal of Life Cycle Assessment, 13(1), 32-48.
136. [Labbé, 2009]
Labbé M, (2009). « L'espace souterrain, élément d'équilibre de la densification urbaine ». Géosciences, 10, PP : 24-31.
137. [Labbé, 2016]
Labbé, M. (2016). « Architecture of underground spaces: From isolated innovations to connected urbanism ». Tunnelling and Underground Space Technology. 23p
138. [Labs, 1976]
Labs, K., (1976). « The architectural underground ». Underground Space 1, pp. 1–8.

139. [Larive et Chamoley, 2011]
Larive C et Chamoley D, (2011), « Qualité d'un béton projété fibré, mesure de la teneur en fibres sur chantier», présentation expérimentation CETU, In colloque ASQUAPRO 06 octobre 2011.
140. [Lasvaux, 2010]
Lasvaux S., (2010), « Etude d'un modèle simplifié pour l'analyse de cycle de vie des bâtiments» Génie des procédés. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris. 435 p
141. [Lautier, 2010]
Lautier A. (2010). « Mettre en contexte les résultats d'une analyse de cycle de vie : développe- ment de facteur de normalisation canadiens et problématique de la définition des frontières ». Ph.D. thesis, Université de Montréal, Ecole Polytechnique de Montréal. xi, xvii, pp. 23, 24
142. [Lavagno and Schranz, 2012]
Lavagno, E. and Schranz, L. (2012). « Underground urbanism : Master plans and other tools for a rationale utilization of the urban underground space ». In 13 world conference of ACCUS, 233p.
143. [LE, 2011]
Le, T. T. (2011). « Une méthode d'évaluation géolocalisée de l'insertion des projets routiers dans les territoires et de choix de variantes ». Thèse de doctorat, Ecole Centrale De Nantes.
144. [Le Borgne, 1998]
Le Borgne. R., (1998), « De l'usage des analyses de cycle de vie dans l'industrie automobile ». Thèse de doctorat : Génie Industriel : Paris, ENSAM, 205p.
145. [Le Feon, 2014]
Le Feon S., (2014), « Évaluation environnementale des besoins de mobilité des grandes aires urbaines en France : Approche par analyse de cycle de vie ». Tèse de doctorat, École nationale supérieure des mines Saint-Étienne.
146. [Leroy, 2009]
Leroy Y. (2009). « Développement d'une méthodologie de fiabilisation des prises de décisions environnementales dans le cadre d'analyses de cycle de vie basée sur l'analyse et la gestion des incertitudes sur les données d'inventaires ». Thèse de Doctorat, Ecole nationale supérieure des arts et métiers - PariTech, 194 p.
147. [Leveson, 1975]
Leveson, D. (1975). « Preliminary Design Information for Underground Space ». University of Minnesota, Department of Civil and Mineral Engineering. Vol 2, 93 p.
148. [Li et al, 2009]
Li X, Wang YW, Chen Y and Bao WQ (2009) « Some thoughts concerning development and utilization of urban underground space in China ». Proceedings of 12th International Conference of Associated Research Centers for Urban Underground Space (ACUUS), Shenzhen, China, 343–352. China Translation & Publishing, Beijing.
149. [Li and Parriaux, 2012]
Li, H. and Parriaux, A. (2012). « Urban sustainable underground ressources management : the Deep City concept ». In Tunnels et Espace souterrain - Congrès de l'AFTES, Lyon – France., p. 542 – 551.
150. [Lounis et al, 2007]
Lounis, Z, & Daigle, L. (2007). « Environmental benefits of life cycle design of concrete bridges ». Rapport Technique. NRCC-49675. Institute for Research in Construction. Pp. 62, 63

151. [Matsumoto, 2005]
Matsumoto R (2005) « Deep underground utilization law and its benefits ». Proceedings of World Tunnel Congress 2005, Underground Space Use—Analysis of the Past and Lessons for the Future, Istanbul,
152. [MEF, 2013]
MEF (2013). « Standard d'échange des objets du plan candastral informatisé fondé sur la norme EDIGéO ». Rapport technique, DIrection générale des finances publiques, ministère de l'économie et des finances. 191 p.
153. [Mroueh et al, 2001]
Mroueh, U-M, Eskola, P, & Laine-Ylijoki, J. (2001). « Life-Cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction ». Waste Management, 21p.
154. [Miliutenko et al, 2012]
Miliutenko, S., Åkerman, J., & Björklund, A. (2012). « Energy Use and Greenhouse Gas Emissions during the Life Cycle Stages of a Road Tunnel: the Swedish Case Norra Länken ». European Journal of Transport and Infrastructure Research, 12(1), pp. 39-62.
155. [Millet et al, 2003]
Millet. D., Bistagnino. L., Lanzavecchia. C., Camous. R. Poldma. T. (2007) « Does the potential of the use of LCA match the design team needs? », Journal of Cleaner Production 15, pp. 335-346.
156. [Nibel et al, 2001]
Nibel S., Nagy L. et de Valicourt D. (2001). « Définition explicite de la qualité environnementale - référentiel des caractéristiques HQE », 15 novembre 2001, 26 p.
157. [Noland and Hanson, 2015]
Noland, R. B., & Hanson, C. S. (2015). « Life-cycle greenhouse gas emissions associated with a highway reconstruction: a New Jersey case study ». Journal of Cleaner Production, 107, pp. 731-740.
158. [Olive, 1997]
Olive G, (1997) « Définition des cibles de la qualité environnementale des bâtiments », Association HQE, version n°1 du novembre 1997, pp. 9-10
159. [Ollivier-Dehaye, 2008]
Ollivier-Dehaye C. (2008) « Analyse du Cycle de vie – Comment choisir un logiciel ». Techniques de l'Ingénieur, Traité Environnement. G6350, 16 p.
160. [Outrequin, 2004]
Outrequin P. (2004). « The ENVI system : ENVironnement Imapct : Assessment of neibourhood regenration scenario from an environmental point of view » Delevrable 17-2 Paris. 27 p.
161. [Parriaux et al, 2010]
Parriaux, A., Blunier, P., Maire, P., Dekkil, G., and Tache, L. (2010). « Projet Deep-City, ressources du sous-sol et développement durable des espaces urbains ». Rapport de recherche (PNR) 54 Fonds National Suisse. 106 p.
162. [Parker, 2004]
Parker, H. (2004). « Underground space : good for sustainable development, and vice versa ». In International tunnelling association ITA Open session world tunnel congress, Singapore. 17p.
163. [Parker, 2008]
Parker H (2008), « Security of tunnels and underground space: challenges and opportunities, keynote lecture ». Proceedings of 3rd International Tunnelling Symposium on Tunnel Safety and Security, Stockholm (Lonnermark A and Ingason H (eds)), Stockholm, pp. 51–61.

164. [Peuportier, 1997]
Peuportier, B., Kohler, N., & Boonstra, C. (1997). « European project REGENER life cycle analysis of buildings ». In Buildings and the environment. International conference pp. 33-40.
165. [Peuportier, 2001]
Peuportier, B. L. P. (2001). « Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context ». Energy and buildings, 33(5), pp. 443-450
166. [Peuportier, 2003]
Peuportier, B. (2003). « Eco-conception des bâtiments: bâtir en préservant l'environnement ». Presses des MINES, 280p.
167. [Peuportier, 2012]
Peuportier, B. (2012), « L'analyse de cycle de vie dans la construction ». XXXe Rencontres AUGCIBPSA Chambéry, Savoie, 6, 10p.
168. [Peuportier, 2013]
Peuportier B. (2013), « Eco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures, collection Développement Durable », Ecole des Mines Paris-Tech.
169. [Peyras, 2002]
Peyras, L. (2002). « Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages ». Développement de méthodes d'aide à l'expertise. 213p. PhD thesis, Université Aix-Marseille II.
170. [PNUE-SETAC, 2009]
PNUE-SETAC (2009) « Lignes directrices pour l'analyse sociale du cycle de vie (ASCV) des produits ». Programme des Nations Unies pour l'environnement – Life Cycle Initiative. 104 p.
171. [Polster et al, 1996]
Polster, B., Peuportier, B., Sommereux, I. B., … & Durand, E. (1996). « Evaluation of the environmental quality of buildings towards a more environmentally conscious design ». Solar Energy, 57(3), pp. 219-230.
172. [Popovic, 2006]
Popovic E, (2006), « contribution to the Life Cycle Assessment of settlements », thèse de doctorat, Mines ParisTech.
173. [Potting et al, 2005]
Potting, J., & Hauschild, M. (2005). « Background for spatial differentiation in LCA impact assessment–The EDIP 2003 methodology ». Environmental Project no. 996 2005. Miljøprojekt. Danish Ministry of the Environment. Environmental Protection Agency
174. [Reap et al, 2008a]
Reap. J., Roman. F., Duncan. S., Bras. B., (2008), « A survey of unresolved problems in life cycle assessment. Part 1: goal and scope and inventory analysis ». Int J LCA 13 (4)
175. [Reap et al, 2008b]
Reap. J., Roman. F., Duncan. S., Bras. B. A, (2008), « survey of unresolved problems in life cycle assessment ». Part 2: impact assessment and interpretation. Int J LCA 13 (5)
176. [Rees, 1992]
Rees, W. E. (1992). « Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out ». Environment and urbanization, 4(2), 121-130.
177. [Rijsenbrij et al, 2006]
Rijsenbrij, J. C., Pielage, B. A., & Visser, J. G. S. N. (2006). « State-of-the-art on automated (underground) freight transport systems for the EU-TREND project ». Delft University of Technology, Delft, 36p.
178. [Roger, 2008]
Rogers, R. (2008). « Cities for a small planet ». Basic Books, première édition 1997, PP. 167-168.

179. [Saaty, 1977]
Saaty T. L. (1977). « A scaling method for priorities in hierarchical structures ». Journal of mathematical psychology 15(3), p. 234-281.
180. [Santero et al, 2011]
Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011). « Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review ». Resources, Conservation and Recycling, 55(9), pp. 801-809.

181. [Sie, 2014]
Sie, M. (2014). « Travaux préparatoires à la réalisation d'une analyse du cycle de vie de la valorisation des matériaux d'excavation ». Rapport technique, Cycleco - projet national Ville 10D – Ville d'idées, thème 2 - Axe 2. 24 p.

182. [Sterling et al, 2012]
Sterling, R., Admiraal, H., Bobylev, N., Parker, H., Godard, J. P., Vähäaho, I., ... & Hanamura, T. (2012). « Sustainability issues for underground space in urban areas ». Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Urban Design and Planning, 165(4), pp. 241-254.

183. [Stripple, 2001]

Stripple H. (2001). « Life Cycle Assessment of Road. A Pilot Study for Inventory Analysis ». Rapport technique. B 1210 E. IVL Swedish Environmental Research Institute, Sweden. Pp. 64, 66, 83.

184. [Stripple et al, 2004]
Stripple, Hakan, & Erlandsson Martin. (2004). « Methods and possibilities for application of life cycle assessment in Strategic environmental assessment of transport infrastructures » Swedish environmental research institute, tech rep, 30p.
185. [Stripple et al, 2010]
Stripple, Hakan, & Uppenberg, Stefan. (2010). « Life cycle assessment of railways and rail transports - Application in environmental product declarations (EPDs) for the Bothnia Line - IVL Svenska Miljainstitutet ». 190p.
186. [Subirats, 2010]
Subirats P, Violette E, Doucet D, Dupre G, Conche F (2010) « Analyse du risque en carrefour », in PRAC2010 : prévention des risques et aides à la conduite, Paris, 4-5 mai, 23 p.
187. [Thewes et al, 2012]
Thewes, M., Godard, J. P., Kocsonya, F. P., Nisji, J., Arends, G., Broere, W., ... & Sterling, R. (2012). « Report on Underground Solutions for Urban Problems ». ITA, rapport N°11.
188. [Thiebault, 2010]
Thiebault, V. (2010). « Design of railway bridges considering LCA ». Master of Science Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Departement of Civil and Architectural Engineering, Division of Structural Design and Bridges. 23, 62p.
189. [Toffeletto et al, 2007]
Toffoletto, L., Bulle, C., Godin, J., Reid, C., & Deschênes, L. (2007). « LUCAS-A new LCIA method used for a Canadian-specific context ». The International Journal of Life Cycle Assessment, 12(2), pp. 93-102.
190. [UN, 2002]
Social Development. Population Division. (2002). « World Urbanization Prospects : The 2001 Revision » Vol. 216. United Nations Publications.

191. [UN, 2007]
United Nations (2007) « World Urbanization Prospects ». The 2007 Revision. United Nations, Department of Economic and Social Affairs (DESA). Référence en ligne disponible sur : http://www.un.org/esa/population/publications/wup2007/2007wup.htm (dernière consultation 18 avril 2016).

192. [Vähäaho, 2014]
Vähäaho, I. (2014). « Underground space planning in Helsinki. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering », 6(5), pp. 387-398.

193. [Van der Heijden et al, 2002]
Van der Heijden, M.C., van Harten, A., Ebben, M.J.R., Saanen, Y.A., Valentin, E.C., Verbraeck, A. (2002). « Using simulation to design an automated underground system for transporting freight around Schiphol Airport ». Interfaces, 32, pp. 1-19.

194. [Vorger, 2011]
Vorger, E. (2011). « Application de l'analyse de cycle de vie à la comparaison de morphologies urbaines ». Thèse de master, Mines ParisTech.

195. [Wackernagel and Rees, 1998]
Wackernagel, M., & Rees, W. (1998). « Our ecological footprint: reducing human impact on the earth » (No. 9). New Society Publishers.

196. [Wernert, 2006]
Wernert F. (2006) « Le concept d'empreinte écologique. » In : Jollia-Ferrier L., Villy T. L'empreinte écologique. SAP. Lyon. Pp. 11-24

197. [Wang et al, 2014]
Wang, X., Duan, Z., Wu, L., & Yang, D. (2015). « Estimation of carbon dioxide emission in highway construction : a case study in southwest region of China ». Journal of Cleaner Production, 103, 705-714.

198. [Wolf et al, 2010]
Wolf, M. A., Pant, R., Chomkhamsri, K., Sala, S., & Pennington, D. (2012). « The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook-JRC » Reference Reports.

199. [Wurts et al, 2003]
Wurtz E., Achard G., Dufrasnes E., Cherqui F., Peuportier B., Musy M., Bornarel A. et Gobin C. (2003). « Projet ADEQUA : élaboration d'une méthodologie d'aide à la décision lors de la réalisation ou de la réhabilitation d'un quartier résidentiel, présentation du projet », 44 p.

200. [Zare, 2007]
Zare, S., (2007). « Prediction Model and Simulation Tool for Time and Cost of Drill and Blast Tunnelling ». Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.

201. [Zare et al, 2013]
Zare, S., Bruland, A., (2013). « Applications of NTNU/SINTEF drillability indices in hard rock tunneling ». Rock Mech. Rock Eng. 46, 179e187.

Lexique de thèse

Analyse u cycle de vie (ACV) : C'est une analyse qui effectue un bilan quantifié sur tout le cycle de vie, couvrant un grand nombre d'impacts différents. Elle est la seule méthode qui lie l'impact environnemental et la fonction du produit, service ou système [Jolliet et al, 2010].

Base de données ACV générique : Base de données au format ACV fournissant des données multisectorielles à la fois pour des procédés (d'énergie, de transport de traitement de déchets) mais également pour le secteur des matériaux et des services (Exemple : Ecoinvent, ELCD, etc.) [Lasvaux, 2010].

Base de données ACV spécifique : Base de données de déclarations environnementales de produits (EPD, FDES) calculées à partir de règles de catégories de produits (PCR). (Exemple : *ECORCE,* base de données spécifiques aux structures routières).

Catégorie d'impact : Classe représentant les points environnementaux étudiés à laquelle les résultats de l'inventaire du cycle de vie peuvent être affectés [AFNOR, 2006b].

Document d'orientations et d'objectifs (DOO) : détermine les orientations générales de l'organisation de l'espace. Il définit les grands équilibres entre les espaces urbains et à urbaniser et les espaces ruraux, naturels, agricoles et forestiers. Il établit les conditions d'un développement urbain maîtrisé.

Données moyennées : Les données moyennées sont des données génériques pour tous les types de produits et pas que ceux de la construction, ces données sont fournies par des bases de données génériques, comme Ecoinvent [Peuportier, 2013].

Eco-techniques : Ceux sont les techniques et les solutions innovatives pour atteindre un bâtiment écologique, elles peuvent concerner l'efficacité énergétique, l'utilisation des énergies renouvelables, la gestion et la qualité de l'eau, le traitement des déchets, les produits de construction, le confort et la santé des usagers.

Energie primaire : Représente la somme de toutes les sources d'énergie qui sont directement puisées dans les réserves naturelles telles que le gaz naturel, le pétrole, le charbon, le minerai d'uranium, la biomasse, l'énergie hydraulique, le soleil, le vent, la géothermie. Par extension, les flux d'énergies récupérées (en MJ d'énergie primaire procédé) et les énergies matières des matières récupérées (en PCI, énergie matière) sont également comptabilisées dans l'énergie primaire totale [AFNOR, 2004].

Etude d'impacts environnementale (EIE) : c'est un outil d'analyse de l'environnement naturel intégrant parfois la dimension sociale alors nommé Etude d'Impact Environnemental et Social (EIES). Il s'agit d'un outil de communication et d'aide à la décision qui permet à travers une analyse par problématiques données (enjeux), de mesurer les impacts potentiels (effets) des actions d'un projet sur l'environnement physique, biologique et humain. L'étude propose alors des actions correctrices pour éviter, minimiser ou compenser les effets néfastes sur l'environnement [code de l'environnement, article L122-1].

Facteur de caractérisation : Facteur établi à partir d'un modèle de caractérisation qui est utilisé pour convertir les résultats de l'inventaire du cycle de vie en unité commune d'indicateur de catégorie [AFNOR, 2006b].

Frontière du système : Ensemble de critères qui spécifient quels processus élémentaires font partie d'un système de produits [AFNOR, 2006b].

Inventaire de cycle de vie (ICV) : Phase de l'analyse du cycle de vie impliquant la compilation et la quantification des flux environnementaux entrants et sortants pour un système de produits [AFNOR, 2006b].

Projet d'aménagement et du développement durable (PADD) : Le PADD a deux fonctions essentielles : la première consiste à définir les orientations d'urbanisme et d'aménagement qui concerne l'organisation générale du territoire de la commune (seule cette partie du PADD est obligatoire), la seconde consiste à préciser à une échelle réduite (quartier par exemple) ce que seront ces orientations.

Ressource non renouvelable : Ressource qui existe en quantité fixe en différents points de la croûte terrestre et qui ne peut pas être renouvelée sur une échelle de temps humaine. Les ressources non renouvelables ne peuvent potentiellement se renouveler que par des procédés géologiques, physiques et chimiques, qui se déroulent sur plusieurs milliers d'années [AFNOR, 2004].

Ressource renouvelable : Ressource qui est soit cultivée soit naturellement renouvelée ou régénérée, à une vitesse qui excède la vitesse d'épuisement de cette ressource et cela moyennant une gestion correcte de la ressource [AFNOR, 2004].

Schémas de cohérence territoriale (SCOT) :

Système : Dans le cadre de ce travail, l'ouvrage de construction dans son ensemble est assimilé à un système en interaction avec son environnement. Les frontières du système sont étendues tant spatialement que temporellement.

Système de produits : Ensemble de processus élémentaires liés du point de vue matériel et énergétique et qui remplissent une ou plusieurs fonctions [AFNOR, 2006b].

Unité fonctionnelle : Performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie [AFNOR, 2006b].

Annexes de la thèse

ANNEXE 1 : Procédés utilisés dans le logiciel *OpenLCA*

1. Procédés modifiés dans *OpenLCA* pour les deux scénarios

Tableau 58: Procédés OpenLCA modifiés et adabtés

Procédé d'origine	Modification
concrete, normal, at plant –CH (béton projeté)	Pour créer le procédé, des modifications ont été effectuées sur le procédé « *concrete, normal, at plant* » **:** • Ajouter un flux « *polypropylene, granulate, at plant* » pour les fibres. • Laisser un seul transport amont « *transport, lorry 20-28t, fleet average* » et supprimer les flux « transport, lorry 3.5-20t, fleet average » « transport, barge » et « transport, freight, rail » Adapter le dosage comme suit : ciment **380kg/m³** ; granulat **1750kg/m³** ; eau **160 kg/m³.**
steel, low-alloyed, at plant - RER	Adaptation du procédé d'origine « *steel, low-alloyed, at plant-RER* » était au niveau du dosage, comme suit : • **0,80 kg** de « steel, electric, un- and low-alloyed , at plant » ; • **0,20 kg** de « steel, converter, low-alloyed, at plant » ; • **1 kg** de « hot rolling, steel ».
Asphalt concrete, at plant – CH (couche BBSG)	Pour créer ce procéder, des modifications sont effectuées sur le procédé original « *concrete, normal, at plant* » parce que les installations utilisées pour une centrale d'enrobage et une centrale du béton sont quasiment pareilles, des modifications sont effectuées comme suit : • Remplacer le procédé de ciment « *portland cement, strength class Z 42.5, at plant* » par le bitume « bitumen, at refinery », en dosage **5.45%** • Remplacer le procédé « *gravel, round, at mine* » par le procédé « gravel, crushed, at mine » en dosage **90.15**% • Ajouter le procédé *« limestone, milled, loose, at plant* » pour les fines d'apport, en dosage **4.4**% • Ajouter le procédé « *heat, natural gas, at industrial furnace >100kW* » pour la centrale à chaud • Supprimer le procédé « *disposal, concrete, 5% water, to inert material landfill* » • Supprimer les procédés « *lubricating oil, at plant* » ; « *treatment, concrete production effluent, to wastewater treatment, class 3* » ; Supprimer les procédés du transport « *transport, lorry 3.5-20t, fleet average* » ; « *transport, freight, rail* » ; « *transport, barge* » et laisser un seul procédé du transport amont «*transport, lorry 20-28t, fleet average* »
concrete, normal, at plant – CH (béton de chaussée)	Pour ce faire, des modifications sont effectuées sur le procédé orignal « *concrete, normal, at plant* » : • Supprimer les procédés du transport « *transport, lorry 3.5-20t, fleet average* » ; « *transport, freight, rail* » ; « *transport*, *barge* » et laisser un seul procédé du transport amont «*transport, lorry 20-28t, fleet average* » parce qu'il y a des données des distances de la cimenterie et la carrière

	Dosage granulat **1890 kg/m³**, dosage eau **186 kg/m³,** pour qu'il soit adapté au béton utilisé pour tel type de chaussée.
transport, lorry 20-28t, fleet average – CH (transport amont)	transport amont pour les composants de l'enrobé à l'usine du mélange : 15km pour le bitume, 20 km pour fin d'apport et 20 km pour les granulats.
Asphalt concrete, at plant – CH (couches BBTM, BBME, EME)	Pour créer ce procéder, on est parti du procédé original « concrete, normal, at plant » parce que les installations utilisées pour une centrale d'enrobage et une centrale du béton sont quasiment pareilles, des modifications sont effectuées comme suit : • Remplacer le procédé de ciment « portland cement, strength class Z 42.5, at plant » par le bitume « bitumen, at refinery », en dosage **5.4%** • Remplacer le procédé « gravel, round, at mine » par le procédé « gravel, crushed, at mine » en dosage **92.5**% • Ajouter le procédé « limestone, milled, loose, at plant » pour les fines d'apport, en dosage **2.1**% • Ajouter le procédé « heat, natural gas, at industrial furnace >100kW » pour la centrale à chaud • Supprimer le procédé « disposal, concrete, 5% water, to inert material landfill » • Supprimer les procédés « lubricating oil, at plant » ; « treatment, concrete production effluent, to wastewater treatment, class 3 » ; Supprimer les procédés du transport « transport, lorry 3.5-20t, fleet average » ; « transport, freight, rail » ; « transport, barge » et laisser un seul procédé du transport amont «transport, lorry 20-28t, fleet average »
transport, regular bus – CH (usage du bus)	Selon le site de TCL (http://www.tcl.fr/) la ligne du bus C1, qui passe par le tunnel, comprend en moyen 62 bus par jour (un seul sens en comptant le trafic faible aux week-ends). Une hypothèse a été posée qu'un bus contient en moyen 14personnes. Les changements portés sur le procédé d'origine sont : Supprimer les procédés « disposal, road – RER » ; « operation, maintenance, road – CH » et « road – CH » parce qu'ils prennent en compte la construction de la route déjà calculée avec les chaussées.

2. Données d'ICV - Phase de construction

Remarque : Dans cette annexe, la présentation des données collectées commence par le scénario souterrain (tunnel modes doux) qui est le scénario actuellement existant, les données de scénario mixte (galerie de sécurité + chemin en surface) sont proportionnellement posées par apport au scénario souterrain, en considérant la même méthode de construction.

2.1. Scénario souterrain (Tunnel modes doux – scénario existant)

2.1.1. Creusement de la voûte

Tableau 59 : Système des procédés « creusement » utilisant OpenLCA pour le scénario souterrain.

Opération	flux 1	flux 2	procédé *ECOINVENT*	valeur	unité	commentaire
Attaques ponctuelles aux têtes	Engins d'attaque ponctuelle tête Saône		*excavation, hydraulic digger, RER*	4639,81	m³	L'attaque est réalisée par des engins de Fraise hydraulique - Board BF2000. Les données prises en compte dans le procédé choisi sont liées à la fabrication, à la consommation en carburant et à la maintenance de la machine pour l'excavation de **1 m³** de sol, ces données sont représentatives à l'échelle européenne.
	Engins d'attaque ponctuelle tête Rhône		*excavation, hydraulic digger, RER*	6581	m³	
Explosion	foraison (Engin Jumbo robotisé)		*diesel, burned in building machine, GLO*	1443750	MJ	Pour mettre en place de l'explosif, des trous doivent être réalisés par un engin (jumbo robotisé à 3 bras, Robofore de Robodrill ou Atlas COPCO). L'énergie consommée se déduit de la consommation horaire **(25 L/h)**, Le procédé choisi est représentatif de la fabrication, la consommation horaire en carburant et la maintenance de cet engin, ainsi que des émissions dans l'air produites. et de la durée de travail de **1 500 h**[64]. Cela va faire **37 500 L** de carburant65.
	Explosif	émulsion de	*explosives, tovex, at plant, CH*	330	kg	L'explosif est une émulsion de nitrate d'ammonium

[64] L'avancement du creusement du tunnel était en cycles de 3 ou 4 m chacun (soit 500 cycles pour l'ensemble de la partie creusée à l'explosion 1 500 m), le temps de foraison de chaque cycle est 3 h. [Sie, 2014]

[65] Considérant que l'énergie d'un litre de diesel est 38.5 MJ [Argonna, 2010].

		nitrate d'ammonium et d'acide acétique				et d'acide acétique, le procédé choisi prend en compte la fourniture de matières premières, des infrastructures de l'usine et de la fabrication du mélange avec tous les procédés internes (transport, etc.). Les données de ce procédé sont représentatives à l'échelle suisse. Par contre, ce procédé ne comprend pas de flux d'acide acétique, donc il faut le rajouter une fois sa quantité est connue.
		Chargement de l'explosif	*diesel, burned in building machine, GLO*	192500	MJ	Le chargement de l'explosif se fait à l'aide d'une plateforme élévatrice hydraulique (Normet HIMEC 9910B). L'énergie se déduit de la consommation horaire (**5 L/h**), et de la durée de travail de **1000 h**[66]. Cela va faire **5000 L** de carburant.
Marinage	Purge (engins)		*diesel, burned in building machine, GLO*	3348567	MJ	Les machines attaquent les roches instables, l'engin utilisé dans cette opération est une chargeuse pelleteuse hydraulique tunnel (Liebherr 934 ou 944B)[67]. L'énergie se déduit de la consommation horaire (**36 L/h** [Capony, 2013][68]), et de la durée de travail de **2416 h**[69].Cela va faire **86976 L** de carburant.
	Transport des matériaux excavés	Tombereau	*transport, lorry 16-32t, EURO5, RER*	173880	t.km	Le transport est pour les matériaux excavés aux zones de concassage et de stockage selon le système identifié, Consommation moyenne = **0,342 L/km** soit **0,297 kg/v.km** le transport sur le chantier est assuré par un tombereau de **20 t**, et pour évacuer les déblais.
		Camions	*transport, lorry 16-32t, EURO5, RER*	1108485	t.km	
		Camion semi-remorque	*transport, lorry 16-32t, EURO5, RER*	1521450	t.km	

[66] Le temps de chargement de l'explosif est 2 h pour chaque cycle [Sie, 2014].

[67] Changement de la tête de la machine à Marteau (BRV 45) et fraise (Board BF2000), cela ne change pas la consommation

[68] Selon la référence : la consommation dépend de la marque : 32 L/h pour la Liebherr 934 et 40 L/h pour la Liebherr 944B. Donc une consommation moyenne de 36 L/h a été retenue, étant donné que le nombre d'heures de travail de chacun séparément n'était pas connu.

[69] Le temps pour réaliser la purge de chaque cycle est 4 h 50 min [Sie, 2014].

						Des camions de capacités **15t** et **20t** ont été utilisés, ils servent à transporter **90 %** des MEX (soit **391230 t**) le long du quai Arloing (**2.5 km** de distance pour une capacité moyenne de **17,5t** chacun), et **12%** (soit **52164 t**) ont été rapportés au chantier pour y être réutilisés après avoir été concassés. Un camion semi-remorque pour les gros blocs rocheux, servent à transporter **7 %** des MEX (soit **30429t**) jusqu'au site de Bourgoin Jallieu à **50 km** du chantier. Le procédé utilisé prend en compte les données européennes de la fabrication, la consommation de carburant et la maintenance d'un engin. La norme choisie est **EURO5** car elle prend en compte la date de la mise en service des véhicules qui est le 1reoctobre 2009 (selon le texte de référence directive 1999/96) [MEEDDM, 2011], en considérant que les poids lourds utilisés sur le chantier (entre 2010 et 2013) ont tous été mis en service récemment. Pour le tombereau, il est utilisé seulement pour le chantier ; il parcourt en moyenne **400 m**[70] pour transporter la masse des matériaux excavés.
Soutènement	Bétons projeté fibré (procédé créé)		concrete, normal, at plant –CH	15000	m³	Pour ce béton, étant fabriqué sur place, il n'y a pas donc de transport aval.
		transport amont	*transport, lorry 20-28t, fleet average – CH*	47	t.km	le transport amont est le résultat des quantités des composants X la distance moyenne de chaque composant [Jullien et al, 2015], le **30 km** du ciment est la distance de la cimenterie la plus proche de Lyon, celle de Val d'Azergues, et 20 km la carrière

[70] Il y a une zone de stockage temporaire à chaque tête du tunnel pour les déblais, puisque les camions les ramènent au concassage.

						pour les granulats
		fibre	*Polypropylene, granulate, at plan t- RER*	6	kg/m³	fibres polymère (Meyco Fib SP650 de BASF CC) un dosage de **6kg/m³**
	Boulons d'ancrage		*steel, low-alloyed, at plant - RER*	61208,396	kg	
	Boulons pré-soutènement		*steel, low-alloyed, at plant - RER*	6500	kg	
	Cintres		steel, low-alloyed, at plant - RER	1300000	kg	
	Transport (aval)		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	41031,251	t.km	Transport de l'acier au chantier (distance à **30 km**)
	mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	1884750	MJ	mise en œuvre pour le béton et le boulonnage à la fois, consommation moyenne de l'engin **30 L/h**
Valorisation des MEX	Concassage (engin)		*diesel, burned in building machine, GLO*	200855	MJ	**90 %** des MEX (soit **391230t**) ont été concassés au quai Arloing par un concasseur (TEREC PEGSON XA400S) qui consomme **200L** de diesel pour **15000t**, soit **5217L** pour l'ensemble.
	Criblage (engin)		*diesel, burned in building machine, GLO*	120505	MJ	Une cribleuse qui consomme **120L** pour **15000t**, soit **3130L** pour l'ensemble.
	Engin pelle hydrolique		*diesel, burned in building machine, GLO*	1573110	MJ	L'énergie consommée se déduit de la consommation horaire (**36 L/h** [Capony, 2013]), et de la durée de travail de **1135 h**[71]. Cela mène à une consommation de **40860L**
	Transport barge		*transport, barge - RER*	9454725	t.km	le transport de **78%** des MEX (soit **378189t**) a été effectué par voie fluviale afin de les stocker au site de Ternay à **25 km**.

[71] Ce chiffre présente le temps total pour charger 78 % des MEX (soit 378 189), sachant que le temps pour charger la barge de 2 000 t est 6 h

2.1.2. *Construction de la voûte*

Tableau 60 : Système des procédés « Voûte » utilisant OpenLCA pour le scénario souterrain.

Opération	flux 1	flux 2	procédé *ECOINVENT*	valeur	unité	commentaire
Etanchéité	Géotextile					
	Membrane PVC		*polyvinylidenchloride, granulate, at plant - RER*	98327,25	kg	lé de **2 mm** d'épissure => **10,5 m³** pour le tunnel => masse volumique PVC **1350 kg/m³**
	mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*		MJ	Négligeable : la plupart de PVC se fait manuellement[72] (il n'y a pas de consommation du carburant considérable)
	transport		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	2949,817	t.km	Transport de PVC au chantier (distance à **30 km**)
Revêtement	béton coffrant (procédé créé)	béton	concrete, normal, at plant - CH	20000	m³	
		transport amont des composants du béton	*transport, lorry 20-28t, fleet average – CH*	47	t.km	le transport amont est le résultat des quantités des composants X la distance moyenne de chaque composant, le **30 km** du ciment est la distance de la cimenterie la plus proche de Lyon, celle de Val d'Azergues, et **20 km** la carrière pour les granulats
		mise en œuvre	*diesel, burned in building machine - GLO*	718000	MJ	consommation moyenne de l'engin **30 L/h**
		transport aval	*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	952000	t.km	Transport des blocs du béton au chantier (distance de **20 km**)

[72] Données issues d'une entreprise de mise en œuvre d'étanchéité des ouvrages génie civil (http://www.etandex.fr/travaux-speciaux/ouvrages-enterres-en-sous-pression)

2.1.3. *Construction des chaussées*

Tableau 61 : Système des procédés « Chaussées » utilisant OpenLCA pour le scénario souterrain.

Chaussée	flux 1	flux 2	flux 3	procédé *ECOINVENT*	valeur	unité	commentaire
vélo BBSG-GNT	Base GNT0/31,5	granulats		*Gravel, crushed, at mine – CH*	1790800	kg	
		mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	10856,16	MJ	consommation d'énergie dans l'engin (carburant X **35,9** MJ **/L**) [Jullien et al, 2015]
		transport		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	35816	t.km	Quantité des granulats X distance moyenne de la carrière (**20km** [Jullien et al, 2015]).
	Roulement BBSG	enrobé (créé)		Asphalt concrete, at plant - CH	593777	kg	
			bitume	*bitumen, at refinery - RER*	32361	kg	La raffinerie totale Feyzin au sud de Lyon à **15 km**
			fine d'apport	*limestone, milled, loose, at plant - CH*	26126	kg	
			granulats	*Gravel, crushed, at mine – CH*	535290	kg	volume de la couche X masse volumique [Jullien et al, 2015]
			transport amont	*transport, lorry 20-28t, fleet average – CH*	0,01973	t.km	transport d'un kg d'enrobé (transport amont) pour le procédé de la centrale d'enrobage
		mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	5212,68	MJ	consommation d'énergie dans l'engin (carburant x **35,9 MJ/L**) [Jullien et al, 2015]
		transport aval		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	8906,655	t.km	Transport du mélange de la centrale au chantier (**15km**)
piétonnière	Base GNT0/31,5	granulats		*Gravel, crushed, at mine – CH*	1367500	kg	volume de la couche X masse volumique [Jullien et al, 2015]
		mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	10856,16	MJ	consommation d'énergie dans l'engin (carburant X **35,9** MJ **/L**) [Jullien et al, 2015]
		transport		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	27350	t.km	
	Béton	béton (procédé créé)		concrete, normal, at plant - CH	402,5	m^3	
			transport	*transport, lorry 20-28t, fleet average -CH*	45	t.km	On suppose que le ciment vient de la

			amont				cimenterie du Val d'Azergues et parcourt donc **30 km** et que la carrière la plus proche est à **20 km**.
		mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	718	MJ	la consommation de carburant est de 20 litres ([Jullien et al, 2015], **0,005 L/m²** X la surface de la chaussée)
		transport aval		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	19159	t.km	Le volume du béton est issu de la surface et l'épaisseur de la couche (La masse volumique **2380** est une hypothèse de ce béton, mais elle varie en fonction des composants et de la teneur en air). On peut donc avoir sa masse en tonne et puis le transport en t.km.
Bus	Fondation GNT0/31,5	granulats		*Gravel, crushed, at mine – CH*	1392900	kg	
		mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	10856,16	MJ	volume de la couche X masse volumique [Jullien et al, 2015]
		transport		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	27858	t.km	distance moyenne de la carrière (**20k** [Jullien et al, 2015]).
	Base EME	enrobé (procédé créé)		Asphalt concrete, at plant - CH	2718916	kg	
			Bitume	*bitumen, at refinery - RER*	146820	kg	
			fines d'apport	*limestone, milled, loose, at plant - CH*	57096	kg	
			granulat	*Gravel, crushed, at mine – CH*	2515000	kg	
			transport amont	*transport, lorry 20-28t, fleet average - CH*	0,01973	t.km	transport amont pour les composants de l'enrobé à l'usine du mélange : **15km** pour le bitume, **20 km** pour fin d'apport et **20 km** pour les granulats.
		mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	5341,92	MJ	
		transport aval		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	40783,74	t.km	Distance de **15 km**

	Liaison BBME	enrobé (procédé créé)		Asphalt concrete, at plant - CH	846044	kg	
			Bitume	*bitumen, at refinery - RER*	47802	kg	
			fines d'apport	*limestone, milled, loose, at plant - CH*	24112	kg	
			granulat	*Gravel, crushed, at mine – CH*	774130	kg	
			transport amont	*transport, lorry 20-28t, fleet average - CH*	0,01972	t.km	transport amont pour les composants de l'enrobé à l'usine du mélange : 15km pour le bitume, 20 km pour fin d'apport et 20 km pour les granulats.
		mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	5341,92	MJ	
		transport aval		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	12690,66	t.km	
	Roulement BBTM	enrobé (procédé créé)		Asphalt concrete, at plant - CH	346367	kg	
			Bitume	*bitumen, at refinery - RER*	18877	kg	
			fines d'apport	*limestone, milled, loose, at plant - CH*	15240	kg	
			granulat	*Gravel, crushed, at mine – CH*	312250	kg	
			transport amont	*transport, lorry 20-28t, fleet average - CH*	0,01973	t.km	
		mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	1899,11	MJ	
		transport aval		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	5195,505	t.km	Distance de **15 km**

2.2. Scénario mixte (Galerie de sécurité simple + chemin en surface pour les modes doux)

Remarque : Tous les procédés ont été créés de la même manière que le scénario souterrain précédent. Le changement était juste au niveau de la valeur de donnée entrée.

2.2.1. Creusement de la galerie de sécurité

Tableau 62: Système des procédés « creusement » utilisant OpenLCA pour le scénario mixte.

Opération	**flux 1**	**flux 2**	**procédé *ECOINVENT***	**valeur**	**unité**	**commentaire**
Attaques ponctuelles aux têtes	Engins d'attaque ponctuelle tête Saône		*excavation, hydraulic digger, RER*	1585	m³	
	Engins d'attaque ponctuelle tête Rhône		*excavation, hydraulic digger, RER*	2236	m³	
Explosion	foraison (Engin Jumbo robotisé)		*diesel, burned in building machine, GLO*	439114	MJ	
	Explosif	émulsion de nitrate d'ammonium et d'acide acétique	*explosives, tovex, at plant, CH*	150	kg	
		Chargement de l'explosif (Engin plateforme élévatrice)	*diesel, burned in building machine, GLO*	65748	MJ	
Marinage	Purge (engins)		*diesel, burned in building machine, GLO*	1143710	MJ	
	Transport des MEX aux zones du stockage	Tombereau capacité 20 tonnes	*transport, lorry 16-32t, EURO5, RER*	49972	t.km	
		Camions (capacité 15t et 20t)	*transport, lorry 16-32t, EURO5, RER*	318573	t.km	
		Camion semi-remorque	*transport, lorry 16-32t, EURO5, RER*	401153	t.km	
Soutènement	Bétons projeté fibré	Béton (procédé créé)	concrete, normal, at plant - CH	7815	m³	
		transport amont	*transport, lorry 20-28t, fleet average – CH*	47	t.km	
		fibre	*polypropylene, granulate, at plant - RER*	6	kg/m³	
	Boulons d'encrage		*steel, low-alloyed, at plant - RER*	31889,574	kg	
	Boulons pré-soutènement		*steel, low-alloyed, at plant - RER*	3386,5	kg	
	Cintres		*steel, low-alloyed, at plant - RER*	677300	kg	

	transport		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	21377,282	t.km	
	mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	1413562,5	MJ	
Valorisation des MEX	Concassage (engin)		*diesel, burned in building machine, GLO*	57750	MJ	
	Criblage (engin)		*diesel, burned in building machine, GLO*	34650	MJ	
	Engin pelle hydraulique		*diesel, burned in building machine, GLO*	527087	MJ	
	Transport barge		*transport, barge - RER*	2426522	t.km	

2.2.2. Construction de la galerie de sécurité

Tableau 63 : Système des procédés « Voûte» utilisant OpenLCA pour le scénario mixte.

Opération	**flux 1**	**flux 2**	**procédé *ECOINVENT***	**valeur**	**unité**	**commentaire**
Etanchéité	Géotextile					
	Membrane PVC		*polyvinylidenchloride, granulate, at plant - RER*	52967,25	kg	
	mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*		MJ	
	transport		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	1589,017	t.km	
Revêtement	béton coffrant	Béton (procédé créé)	concrete, normal, at plant - CH	10420	m^3	
		transport amont	*transport, lorry 20-28t, fleet average – CH*	47	t.km	
		mise en œuvre	*diesel, burned in building machine - GLO*	374078	MJ	
		transport aval	*transport, lorry 16-32t, EURO05 – RER*	495992	t.km	

2.2.3. *Construction des chaussées (souterraine et aériennes)*

Tableau 64 : Système des procédés « Chaussées » utilisant OpenLCA pour le scénario mixte.

chaussée	flux 1	flux 2	flux 3	procédé *ECOINVENT*	valeur	unité	commentaire
vélo BBSG-GNT	Base GNT0/31,5	granulats		*Gravel, crushed, at mine – CH*	4077000	kg	
		mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	14474,88	MJ	
		transport		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	81540	t.km	
	Roulement BBSG	Enrobé (procédé créé)		Asphalt concrete, at plant - CH	1351752	kg	
			bitume	*bitumen, at refinery - RER*	73673	kg	
			fine d'apport	*limestone, milled, loose, at plant - CH*	59479	kg	
			granulats	*Gravel, crushed, at mine – CH*	1218600	kg	
			Transport amont	*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	0,01973	t.km	
		mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	1931,42	MJ	
		transport aval		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	20276,28	t.km	
piétonnière aérienne	Base GNT0/31,5	granulats		*Gravel, crushed, at mine – CH*	3125700	kg	
		mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	14474,88	MJ	
		transport		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	62514	t.km	
	Béton	béton (créé)		concrete, normal, at plant - CH	920	m³	
			transport amont	*transport, lorry 20-28t, fleet average - CH*	45	t.km	
		mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	718	MJ	
		transport aval		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	43792	t.km	
piétonnière souterraine	Base GNT0/31,5	granulats		*Gravel, crushed, at mine – CH*	3151200	kg	
		mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	14474,88	MJ	
		transport		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	63024	t.km	
	Béton	béton (créé)		concrete, normal, at plant - CH	927,5	m³	
			transport amont	*transport, lorry 20-28t, fleet average - CH*	45	t.km	
		mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	718	MJ	

		transport aval		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	44149	t.km	
Bus	Fondation GNT0/31,5	granulats		*Gravel, crushed, at mine – CH*	317100	kg	
		mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	10856,16	MJ	
		transport		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	6342	t.km	
	Base EME	enrobé (procédé créé)		Asphalt concrete, at plant - CH	6189840	kg	
			Bitume	*bitumen, at refinery - RER*	334250	kg	
			fines d'apport	*limestone, milled, loose, at plant - CH*	129990	kg	
			granulat	*Gravel, crushed, at mine – CH*	5725600	kg	
			transport amont	*transport, lorry 20-28t, fleet average- CH*	0,01973	t.km	
		mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	5341,92	MJ	
		transport aval		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	92847,6	t.km	
	Liaison BBME	enrobé (procédé créé)		Asphalt concrete, at plant - CH	1926124	kg	
			Bitume	*bitumen, at refinery - RER*	108830	kg	
			fines d'apport	*limestone, milled, loose, at plant- CH*	54894	kg	
			granulat	*Gravel, crushed, at mine – CH*	1762400	kg	
			transport amont	*transport, lorry 20-28t, fleet average*	0,01972	t.km	
		mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	5341,92	MJ	
		transport aval		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	28891,86	t.km	
	Roulement BBTM	enrobé (procédé créé)		Asphalt concrete, at plant - CH	788552	kg	
			Bitume	*bitumen, at refinery - RER*	42976	kg	
			fines d'apport	*limestone, milled, loose, at plant - CH*	34696	kg	
			granulat	*Gravel, crushed, at mine – CH*	710880	kg	
			transport amont	*transport, lorry 20-28t, fleet average - CH*	0,01973	t.km	
		mise en œuvre		*diesel, burned in building machine - GLO*	1899,11	MJ	
		transport aval		*transport, lorry 16-32t, EURO5 – RER*	11828,28	t.km	

3. Données d'ICV – Phase d'exploitation

3.1. Scénario mixte : (Galerie de sécurité simple + chemin en surface pour les modes doux)

Tableau 65 : Système des procédés « Exploitation » utilisant OpenLCA pour le scénario mixte.

Opération	flux 1	flux 2	procédé *ECOINVENT*	valeur	unité	commentaire
Exploitation - Galerie de sécurité	Ventilation et éclairage		*electricity, medium voltage, at grid - FR*	9,99E+02	kWh	Considérant la consommation électrique est 20% de l'ensemble de ventilation, éclairage et sécurité 250 kWh/m/an [D'aloia et al, 2011], soit **50 kWh/m/h** On fait l'hypothèse que cette galerie de sécurité est utilisée, dans le cas d'une évacuation, une fois tous les **10 ans**, et à chaque fois pour une durée de **10 h** pendant **100 ans**).
		Usine de ventilation				
		puits de ventilation				
		gaines				
		accélérateurs				
Exploitation - Chemin aérien	Eclairage		*electricity, medium voltage, at grid - FR*	4,75E+06	kWh	Considérant une utilisation de 100 ampoules pour éclairer le chemin de 4000m en surface, chaque ampoule est d'une capacité de 130Wh, la durée d'éclairage est pour 10h par jour.
Usage BUS (procédé créé)			transport, regular bus - CH	1,27E+08	p.km	
Maintenance chaussée – Bus	Reconstruction de la couche du roulement - BBTM					Utilisation du même procédé utilisé pour la construction de cette couche, en la multipliant par 9, considérant que la couche est remise à neuf une fois tous les 10 ans.
	Reconstruction de la couche de liaison - BBME					Utilisation du même procédé utilisé pour la construction de cette couche, en la multipliant par 4, considérant que la couche est remise à neuf une fois tous les 20 ans.

3.2. Scénario souterrain : (Tunnel des modes doux)

Tableau 66 : Système des procédés « Exploitation» utilisant OpenLCA pour le scénario souterrain.

Opération	flux 1	flux 2	procédé *ECOINVENT*	valeur	unité	commentaire
Exploitation – Tunnel modes doux	Ventilation et éclairage		*electricity, medium voltage, at grid - RER*	6,93E+06	kWh	Considérant la consommation électrique est 20% de l'ensemble de ventilation, éclairage et sécurité 250 kWh/m/an [D'aloia et al, 2011], soit **50 kWh/m/h**. La période d'exploitation est de **19h par jour** [Grand-Lyon, 2013], considérée pour 100 ans.
		Usine de ventilation				
		puits de ventilation				
		gaines				
		accélérateurs				
Usage BUS (procédé créé)			transport, regular bus - CH	5,54E+07	p.km	
Maintenance chaussée – Bus	Reconstruction de la couche du roulement - BBTM					Utilisation du même procédé utilisé pour la construction de cette couche, en la multipliant par 9, considérant que la couche est remise à neuf une fois tous les 10 ans.
	Reconstruction de la couche de liaison - BBME					Utilisation du même procédé utilisé pour la construction de cette couche, en la multipliant par 4, considérant que la couche est remise à neuf une fois tous les 20 ans.

ANNEXE 2 : Procédés utilisés dans le logiciel *ECORCE*

Tableau 67 : Base de données routières ACV pour ECORCE (légende: gris clair pour les matières premières ; gris foncé pour les matériaux élaborés ; Noir pour les mélanges des matériaux ; blanc pour les équipements) [Jullien et al, 2015]

Process name in *ECORCE* 2.0	Equivalence in english	Source
Road materials		
Acide	Hydrogen chloride production	ELCD
Acier	Steel of reinforcement production	Published LCI : Worldsteel
Agrégats *	RAP production at plant	UNPG
Béton démolition	RCA production at plant	UNPG
Bitume classique *	Bitumen production	Eurobitume
Bitume_modifié	Polymer modified bitumen production	Eurobitume
Centrale_béton	Concrete mixing plant	Stripple
Centrale_graves	Hydraulic mixed coarse aggregates plant	Stripple
Centrale_grave_emulsion	Cold mix plant	IFSTTAR
Centrale_enrobage_chaud_gaz	Hot mix plant – gas	IFSTTAR
Centrale_enrobage_chaud_fiou	Hot mix plant – fuel	IFSTTAR
Centrale_enrobage_froid	Cold mix plant	IFSTTAR
Centrale_enrobage_tiède_gaz	Warm mix production (gas HMA)	IFSTTAR
Centrale_enrobage_tiède_fioul	Warm mix production (fuel HMA)	IFSTTAR
Centrale_enrobage_semi_tiède	Half-warm mix production (gas HMA)	IFSTTAR
Chaux	Quick lime production	UPC
Ciment_CEM_I	Portland cement production	ATILH
Ciment	Portland cement production	ATILH
Ciment CEM II_AS_81%	Blast furnace cement production	ATILH
Ciment CEM II_BM_68%	Portland composite cement prodution	ATILH
Ciment CEM III_B_23%	Blast furnace cement production	ATILH
Ciment CEM V_53%	Portland blast furnace cement	Published LCI : ATILH
Liant routier S_10%	Hydraulic binder production with 10%	Published LCI : ATILH
Liant routier S_30%	Hydraulic binder production with 30%	Published LCI : ATILH
Liant routier S_50%	Hydraulic binder production with 50%	Published LCI : ATILH
Liant routier S_70%	Hydraulic binder production with 70%	Published LCI : ATILH
Liant routier S_90%	Hydraulic binder production with 90%	Published LCI : ATILH
Déblai_stockes_faible_conso	Excavation process	IFSTTAR
Déblai_stockes_forte_conso	Excavation process	IFSTTAR
Elastomères_SBS	SBS polymer production	Published LCI : Eurobitume
Emulsion	Emulsion plant	IFSTTAR
EnginC	Building machine (i.e. roller,finisher)	IFSTTAR
EnginD	Demolition machine (i.e. Milling..)	IFSTTAR
Fines_apport	Filler production	IFSTTAR
Fraisats	Milled asphalt aggregates	LCI = 0
Granulats *	Crushed aggregate production	IFSTTAR
Granulats_2	Crushed aggregate production	IFSTTAR
Laitiers_HF_cristallisés	Steel slag production	IFSTTAR
Métakaolin	Métakaolin production process	IFSTTAR
Sable	Sand production	IFSTTAR

Process name in *ECORCE* 2.0	Equivalence in english	Source
Transport means		
Transport_ route	Road transport	Published LCI : AFNOR
Transport_ fleuve	River transport	Published LCI : AFNOR
Transport_ rail	Rail transport	Published LCI : AFNOR
Transport_mer	Maritime transport	Published LCI : AFNOR
Transport_ tombereau	Dumper transport	IFSTTAR
Non road equipments		
Milling *		
Laying *		
Rolling *		

ANNEXE 3 : Sommaire des limites du système prises en compte pour l'évaluation

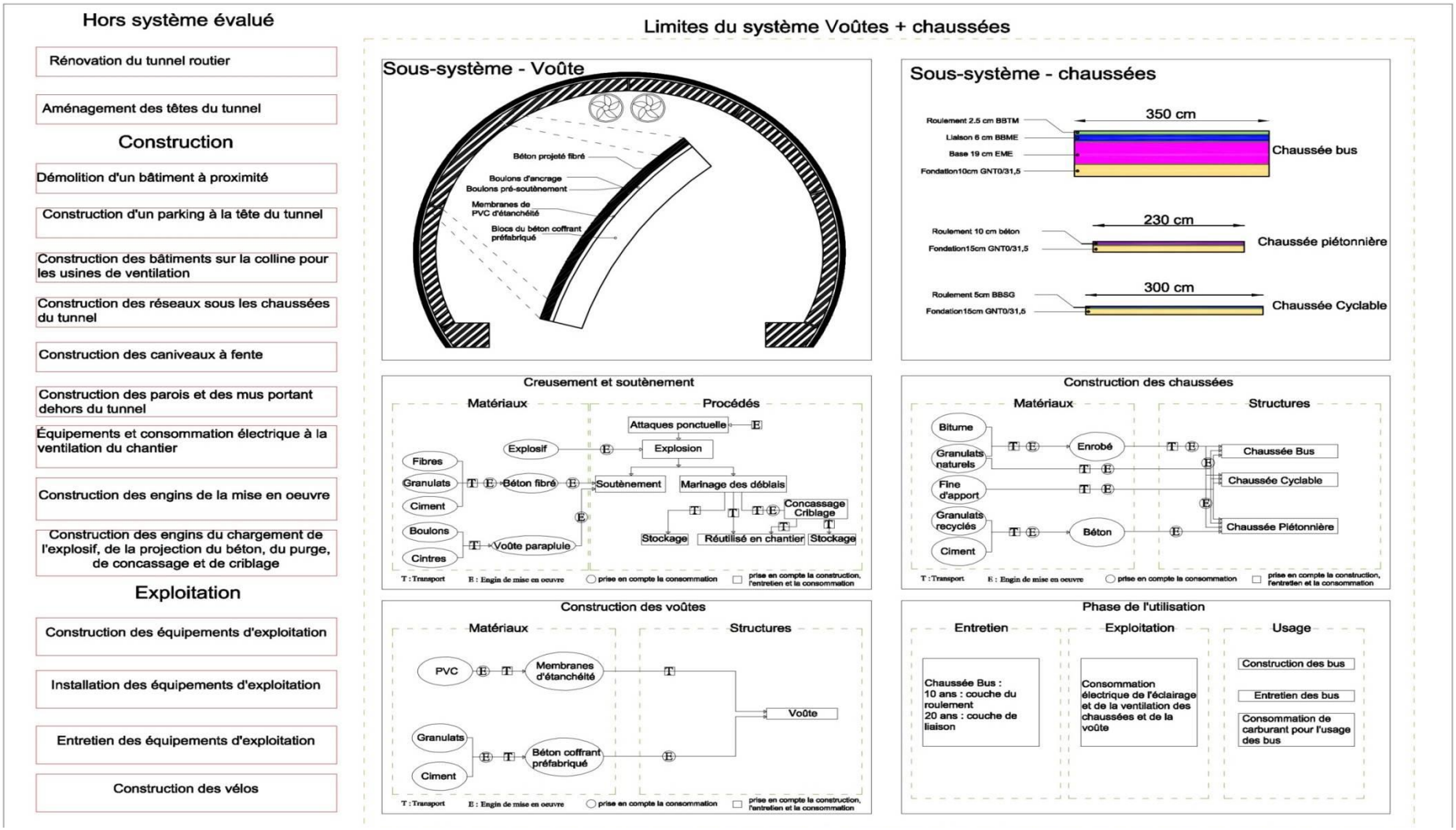


Figure 66 : Sommaire des limites du système prises en compte

ANNEXE 4 : Indicateurs d'ACV et méthodes de calculs

Dans le cadre de cette étude, trois méthodes d'évaluation ont été utilisées : CML2001, Cumulative Energy Demand (CED) et EDIP2003.

1. Cumulative Energy Demande (CED)

Cette méthode se focalise sur l'énergie et l'intègre la consommation en énergie primaire tout au long du cycle de vie que ce soit l'énergie directe ou indirecte. Cette énergie indirecte appelée également énergie grise correspond à l'énergie associée à l'utilisation de matières premières notamment [Frischknecht, 2007].

L'indicateur CED est construit comme suit :

$$Cumulative\ energy = \sum_i q_i * CED_i$$

Avec :

q_i : La quantité d'énergie i consommée en kg, m^3 ou MJ.

CED_i : La valeur énergétique de la source i en MJ/unité. L'unité correspondra à des kg, m^3 ou MJ. Ce paramètre CED_i correspond à un facteur de caractérisation.

Cette contribution des différents flux énergétiques est exprimée par l'intermédiaire de facteurs de caractérisation dans 6 catégories. Chacun de ces 6 catégories d'impacts sont exprimées en Méga Joules (MJ). Afin de réduire leur nombre, ces catégories d'impacts sont additionnées dans une nouvelle catégorie que l'on appellera « Energie renouvelable et non renouvelable » :

- **Les ressources non renouvelables fossiles** : on retrouve dans cette catégorie, les flux énergétiques liés au charbon, au pétrole, et au gaz. Le pouvoir calorifique supérieur de ces combustible est utilisé comme facteur de caractérisation ;
- **Les ressources non renouvelables nucléaires** : une approche similaire est réalisée pour le combustible nucléaire. L'estimation de l'énergie générée par un kg de minerai dans un centrale nucléaire moderne permet de calculer le facteur de caractérisation ;
- **Les ressources non renouvelables de la biomasse** : l'ensemble des flux énergétiques de la biomasse est groupé dans « *Energy, gross calorific value, in biomass, primary forest* » exprimée en MJ/MJ. On distingue deux essences d'arbre différentes : les bois tendres et les bois dures. Pour chacune de ces essences, le pouvoir calorifique supérieure est utilisé pour obtenir la quantité d'énergie contenue d'énergie contenue dans ces bois en MJ. La quantité d'énergie totale issue de la biomasse est compilée dans « *energy, gross calorific value, in biomass, primary forest* ».
- **Les ressources renouvelables de la biomasse** : la seule différence par rapport à la comptabilisation des ressources non renouvelables est le processus au sein duquel les flux renouvelables sont regroupés. Il s'agit du flux « *Energy, gross calorific value, in biomass ».*
- **Les ressources renouvelables éoliennes, solaires et géothermiques** : pour ces trois énergies renouvelables, l'énergie primaire considérée est égale à l'énergie récoltée ou convertie :

- **Solaire** : énergie convertie par les cellules photovoltaïques et transmise à l'onduleur ;
- **Eolien** : énergie délivrée par les turbines de l'éolienne ;
- **Géothermique** : énergie fournie à la pompe à chaleur.

- **Les ressources renouvelables hydrauliques** : on considère l'énergie de rotation transmise à la turbine hydro-électrique.

Pour l'ensemble des énergies renouvelables, les facteurs de caractérisation finaux sont égaux à 1 MJ/MJ.

L'aspect déchet est maintenant abordé par la présentation de la méthode EDIP. EDIP est une méthodologie danoise dont la première version date de 1997 plus qui a été updatée en 2003 [Potting et al, 2005]. EDIP propose 18 catégories d'impacts parmi lesquelles 2 vont nous intéresser.

2. Déchets en vrac

Cette catégorie comptabilise l'ensemble des déchets produit tout au long du cycle de vie et est exprimé en kg. Chaque kg de déchets est équivalent : le facteur de caractérisation ne vraie pas selon la nature du déchet. Les déchets dangereux ne sont pas explicitement pris en compte tout comme les déchets radioactifs qui ont leur propre catégorie.

3. Déchets radioactifs

Dans cette catégorie, la totalité des déchets radioactifs produits est comptabilisée.

4. Ecotoxicité

A l'instar de la toxicité humaine, un premier modèle avait été proposé en 1992 par Heijungs qui s'intéressait aux impacts des substances toxiques sur l'eau et la terre (les émissions dans l'eau n'affectant que les écosystèmes aquatiques et les émissions dans le sol n'affectant que les écosystèmes terrestres). De ces hypothèses, découlaient deux facteurs de caractérisations :

$$ECA_i = \frac{1}{MTC_{a,i}}$$

$$ECT_i = \frac{1}{MTC_{t,i}}$$

Le facteur MTC représente pour une substance i donné, la concentration maximale de cet élément dans le sol ou dans l'eau permettant d'assurer la suivre de 95% des espèces de cet écosystème.

Cependant, comme pour l'indicateur de toxicité, le devenir et la dégradation de la substance émise n'est pas prise en compte. Ainsi, d'autres méthodes permettant le transport des substances et leurs passages d'un compartiment à un autre et d'un écosystème à un autre ont été développées.

La méthode CML a opté pour le modèle de Huijbregts semblable à celui proposé pour l'indicateur de toxicité humaine. La formule suivante est utilisée pour calculer le facteur de caractérisation du potentiel d'impacts sur les écosystèmes d'eau douce :

$$FAETP_{i.ecomp} = \frac{PEC_{i.ecomp,freshwater} * E_{i,freshwater}}{PEC_{1,4-dichlorobenzen,ecomp,freshwater} * E_{1,4-dichlorobenzen,ecomp,freshwater}}$$

Avec :

$PEC_{i,ecomp,freshwater}$: Concentration théorique d'une substance i à une émission dans le compartiment ecomp impactant les eaux douces.

$E_{i,freshwater}$: « Facteur d'effet » d'une substance i sur les eaux douces.

$PEC_{1,4-dichlorobenzen,ecomp,freshwater}$: Concentration théorique de $1{,}4-dichlorobenzen$ sur les eaux douces.

De la même façon, sont calculés des facteurs de caractérisations pour l'écotoxicité sur les sédiments d'eaux douces, dans l'eau de mer, sur les sédiments marins et pour l'écotoxicité terrestre.

Ces facteurs de caractérisation sont ensuite multipliés par la masse de substance émise afin d'obtenir l'indicateur final.

5. Toxicité humaine (HTP)

Cet indicateur couvre les impacts des substances toxiques sur la santé humaine. La toxicité d'une substance sur un individu va dépendre de la quantité intégrée ou inhalée plutôt que de la quantité émise dans l'environnement.

Heijungs a défini pour estimer les impacts sur la santé humaine un indicateur prenant en compte trois compartiments environnementaux : l'air, l'eau et le sol. Chacun de ces compartiments possède un facteur de caractérisation.

$$HCA_i = \frac{VI_a * W}{V_i * \ ADI_i}$$

$$HCW_i = \frac{VI_w * W}{V_w * \ ADI_i}$$

$$HCS_i = \frac{M * W * N}{V_s * \ C\ value_i}$$

HCA_i, HCW_i et HCS_i sont respectivement les facteurs de caractérisation pour l'air, l'eau et le sol pour une substance i.

VI_a : La quantité d'air consommée par jour et par personne, dont la valeur est de 20 m^3 d'air/jour/personne.

VI_w : La quantité d'eau consommée par jour et par personne, dont la valeur est de 2 L d'eau/jour/personne.

W : la population mondiale égale à 5 milliards d'habitants à l'époque.

V_a : Le volume d'air pris en compte dans le modèle global soit $3*10^{18} m^3$ d'air

V_w : Le volume d'eau pris en compte dans le modèle global soit $3.5*10^{18}$L

V_s : Le volume de sol sec pris en compte dans le modèle global soit $2.7*10^{16}$kg

ADI_i : (Acceptable Daily Intake) : dose journalière limite acceptable reçue par un individu pour la substance i, en kg de substance i/jour/kg de masse corporelle

M : le poids moyen d'un individu soit 70 kg

N : facteur d'incertitude pour la dose journalière limite

$C_{valeu\ i}$: Facteur de normalisation hollandais pour les sols (en kg de substance i par kg de sol)

Ces facteurs de caractérisation sont ensuite additionnés dans la formule suivante pour construire l'indicateur de toxicité humaine :

$$Human\ toxicity = \sum_i (HCA_i * m_{ai}) + (HCW_i * m_{wi}) + (HCS_i * m_{si})$$

m_{ai} ,m_{wi}, m_{si} étant les quantités de substances i émises dans l'air, l'eau et les sols, en kg.

Cependant, cette première méthode ne prend pas en compte certains aspects de la toxicité. En effet, les substances toxiques ne sont pas forcément intégrées de manière directe par l'être humain. Il existe plusieurs vecteurs de transport et d'ingestion : les eaux de ruissellement, la consommation de nourriture (légumes, viandes,…) et il semble pertinent de modéliser le devenir des substances notamment son transport et sa dégradation. Ainsi, Huijbregts a proposé une modélisation incluant ces paramètres basée sur les modèles USES. Ce nouveau modèle repose 4 échelles spatiales différentes : continentale et globale (cette dernière se décomposant en trois zones de climat de l'hémisphère nord : arctique, tempérée et tropicale). De plus, chacune de ces échelles spatiales comprend des compartiments d'émissions : l'air, l'eau et la terre pour les échelles globales et l'air, l'eau douce, l'eau de mer, ma terre naturelle, la terre agricole et la terre industrielle pour l'échelle continentale. Enfin, on distingue six voies d'exposition : l'air, les poissons, l'eau potable, les cultures, la viande bovine et le lait.

Au final, le facteur de caractérisation sur la toxicité humaine d'exprime comme :

$$HTP_{i.ecomp} = \frac{\sum_r \sum_s PDI_{i.ecomp,r,s} * E_{i,r} * N_s}{\sum_r \sum_s PDI_{1,4-dichlorobenzen,ecomp,r,s} * E_{1,4-dichlorobenzene,r} * N_s}$$

$PDI_{i.ecomp,r,s}$: La dose journalière d'une substance i intégrée par un homme par la voie d'exposition r à l'échelle s émise dans le compartiment ecomp (en jour^{-1})

$E_{i,r}$: « Le facteur d'effet » qui représente l'impact sur l'homme de la substance i par la voie d'exposition r (en jour)

N_s : La densité de population à l'échelle s

$PDI_{1,4-dichlorobenzen,ecomp,r,s}$: la dose journalière de $1,4-dichlorobenzen$ (substance de référence) intégrée par un homme par la voie d'exposition r à l'échelle s émise dans le compartiment ecomp (en jour^{-1}).

$E_{1,4-dichlorobenzene,r}$: « Facteur d'effet » qui représente l'impact sur l'homme du $1,4-dichlorobenzene$ par la voie d'exposition r (en jour)

Ce facteur de caractérisation est alors utilisé dans la formule :

$$human\ toxicity = \sum_{i} \sum_{ecomp} m_{i.ecomp} * HTP_{i,ecomp,r}$$

$m_{i.ecomp}$: La masse de la substance i émise dans le compartiment ecomp.

6. Acidification

Les polluants acidifiants sont à l'origine de l'émission d'ions H^+. Ils peuvent engendrer des impacts sur les sols, les eaux, les micro-organismes biologiques, ou encore les bâtiments. Trois substances sont principalement responsables des impacts de l'acidification : les molécules SO_2, les NO_X, et les NH_X.

L'indicateur suivant a été proposé par [Heijungs et al, 1992] :

$$Acidification = \sum_{i} AP_i * m_i$$

AP_i : Le potentiel d'acidification de la substance i.

m_i : La masse de la substance i contribuant au procédé d'acidification (en kg).

L'AP_i de chaque substance est donné par la formule suivant :

$$AP_i = \frac{n_i}{\mathrm{n}_{so_2}}$$

Avec n_i : La quantité d'ions H^+ potentiellement produits par kilos de substance i .

n_{so_2} : La quantité d'ions H^+ produits par kilos de SO_2 (la substance référence).

Le phénomène d'acidification est une des catégories d'impacts où la spatialisation et la sensibilité de l'environnement local (c'est-à-dire proche de l'émission) jouent un rôle important.

7. Changement climatique

Le changement climatique est causé par les émissions humaines qui augmentent le forçage radiatif. Ainsi, le rayonnement solaire réfléchis ou réémis sous forme d'infrarouges est absorbé par certaines molécules de l'atmosphère qui participent à l'augmentation de la température sur la surface terrestre.

A partir des travaux menés par l'IPCC (International Panel on Climate Change), [Heijungs et al, 1992] a proposé l'indicateur suivant :

$$Climate\ change = \sum_{i} GWP_i * m_i$$

GWP_i : Potentiel de réchauffement climatique d'une substance i

m_i : Masse de la substance i

Le terme GWP_i correspond au rapport entre la hausse d'absorption infrarouge due à l'émission d'un kilogramme de la substance considérée et de celle due à l'émission d'une même quantité de CO_2, intégrées sur l'échelle de temps considérée :

$$GWP_{T,i} = \frac{\int_0^T a_i * c_i(t)dt}{\int_0^T a_{CO_2} * c_{CO_2}(t)dt}$$

a_i : Forçage radiatif par unité de hausse de la concentration dans l'atmosphère du gaz à effet de serre i, en w/ (m^2*kg).

c_i : Concentration dans l'atmosphère du gaz i à l'instant T, en kg/m^3.

T : Durée sur laquelle les grandeurs sont intégrées, en années.

a_{CO_2} : Forçage radiatif par unité de hausse de la concentration dans l'atmosphère du CO_2 en w/(m^2*kg).

c_{CO_2} : Concentration dans l'atmosphère en CO_2 à l'instant T, en kg/m^3.

8. Eutrophisation

Le phénomène de l'eutrophisation correspond à un apport excessif en macronutriments (notamment le phosphore et l'azote). Cet enrichissement entraîne divers déséquilibres dans le milieu touché : une augmentation de la croissance du plancton et des plantes aquatiques. Cela induit une surconsommation d'oxygène et une opacification des eaux. E terme, les eaux ne sont plus potables et les organismes aquatiques disparaissent.

L'indicateur proposé pour estimer les impacts de de l'eutrophisation est le suivant :

$$eutrophisation = \sum_i EP_i * m_i$$

EP_i : Le potentiel d'eutrophisation de la substance i, en kg de PO_4^{3-} équivalent /kg

m_i : La quantité de substance i relâchée dans l'air, l'eau et le sol.

Pour calculer le potentiel d'eutrophisation, la formule suivant est utilisée :

$$EP_i = \frac{v_i / M_i}{v_{PO_4^{3-}} / M_{PO_4^{3-}}}$$

Avec v_i : la contribution potentielle d'une substance i à la formation de la biomasse

$v_{PO_4^{3-}}$: La contribution potentielle de la substance référence PO_4^{3-} à la biomasse

M_i : La masse molaire (en kg/mol) de la substance i

$M_{PO_4^{3-}}$: La masse molaire (en kg/mol) de la substance référence PO_4^{3-}

9. Epuisement de l'ozone stratosphérique

Ce phénomène fait référence à l'amincissement de la couche d'ozone résultant des émissions de l'activité humaine. Les molécules d'ozone sont cassées par des réactions chimiques avec le méthane, le NO2 ou les composés bromés et halogénés. Cette couche d'ozone ne peut plus assurer sa fonction de barrière naturelle et les radiations UV-B issues du rayonnement solaire atteignent plus facilement la surface de la terre. Cela entraîne des dommages sur la santé humaine et les écosystèmes.

A partir de travaux de Wuebbles [Wuebbles, 1988], Heijungs a proposé l'indicateur « ozone deplention » [Heijungs et al, 1992] :

$$Ozone\ depletion = \sum_i ODP_i * m_i$$

ODP_i : Le potentiel d'épuisement de l'ozone pour la substance i.

m_i : La masse de la substance i relâchée (en kg)

Pour calculer le facteur de caractérisation, on dispose de la formule suivant :

$$ODP_i = \frac{\partial[O_3]_i}{\partial[O_3]_{CFC-11}}$$

$\partial[O_3]_i$: Variation de la concentration d'ozone dans la colonne d'atmosphère à l'équilibre due aux émissions annuelles en substance i (le cas du $CFC-11$ servant de référence), en kg/an.

$\partial[O_3]_{CFC-11}$: changement dans la colonne d'atmosphère suite aux émissions annuelles de $CFC-11$.

10. Formation de photo-oxydants

Les photo-oxydants se forment dans la troposphère sous l'action des rayons du soleil sur des molécules réactives telles que les composés organiques volatiles, le monoxyde de carbone ou les composés azotés.

L'indicateur de formation de photo-oxydants est :

$$photo-oxydant\ production = \sum_i POCP_i * m_i$$

Avec :

$POCP_i$: Potentiel de création d'ozone photochimique (en kg d'éthylène /kg)

m_i : Masse de la substance i considérée dans le processus étudié

Pour calculer le potentiel de création d'ozone photochimique, des simulations de production d'ozone pour deux quantités de gaz i différentes sont réalisées. Les résultats de ces expérimentations sont ensuite normalisés en appliquant cette méthode dans le cas de l'éthylène qui est choisi comme substance de référence.

$$POCP_i = \frac{\Delta F_i}{M_i} * \frac{M_{ethylène}}{\Delta F_{ethylène}}$$

ΔF_i : Différence entre les quantités d'ozone produites pour les deux quantités de gaz considérées, en moles.

M_i : Quantité totale de gaz i considérée, en moles

$M_{ethylène}$: Quantité totale d'éthylène considérée, en moles

$\Delta F_{ethylène}$: Différence entre les quantités d'ozone produites pour les deux quantités d'éthylène considérées, en moles.

Dans la méthodologie CML, aucune catégorie d'impact ne se focalise sur l'énergie contrairement à CDE.

ANNEXE 5 : Jeu d'indicateurs sociaux

Tableau 68 : Jeu d'indicateurs sociaux (Indicateurs quantifiables en bleu, qualitatifs en vert)

Objectif	Sous-objectif	Exemple d'indicateurs social	Réf de l'objectif
I - Faisabilité au sens d'engagement	1- Gestion de l'espace	Surface créée par l'ouvrage	[Carmody and Sterling, 1993; Godard and Sterling, 1995; Godard and Berenguier, 2002 ; Bobylev, 2009 ; Vähäaho, 2014] et pr EN 15643-5
		Surface évitée à occuper par l'ouvrage	
		Surface consommée par l'ouvrage	
	2- Héritage culturel	N° d'éléments d'héritage culturel conservés (patrimoniaux, naturels)	
	3- Possibilité de construction	Mesures prises pour adapter les conditions techniques (nature du sol, etc.)	
		Disponibilité du site pour la construction	
II - Efficacité	4- Service fourni par l'ouvrage	Longueur de distance parcourue	pr EN 15643-5 (GC)
		Temps du trajet	
		Disponibilité du service par jour	
		Gain du temps grâce à la proximité du service	
III - Accessibilité	5- Accès des PMR	Eloignement par rapport au transport public	NF EN 16309+A1 (Bâtiment)
		N° de points de dépose et de prise en charge dédiés à leur éloignement par rapport à l'entrée adaptée aux PMR	
		N° de parcs de stationnement affectés aux PMR et leur éloignement	
	6- Entrée et circulation à l'intérieur	Présence d'accès de plain-pied au niveau des seuils intérieurs et extérieurs	
		Présence de rampes et d'escaliers	
		Pente et largeur d'escaliers	
		Présence de systèmes appropriés d'orientation tactiles, visuels, et sonores.	
		Présence d'ascenseurs	
	7- Accès aux équipements techniques	Accès des PMR aux installations sanitaires	
		Utilisabilité des commutateurs et dispositifs de commande (ex. chauffage, éclairage, ventilation)	
		Présence de système de communication dans le bâtiment	
IV - Adaptabilité	8- Adaptabilité de l'ouvrage	N° des éléments porteurs internes	NF EN 16309+A1 (Bâtiment) ; pr EN 15643-5 (GC)
		Démontabilité des éléments internes	
		Adaptabilité de rajouter des fonctions d'usage	
	9- Mutabilité de l'ouvrage	Rajouts des tuyaux et câbles nécessaires à un changement d'usage	

		Facilité pour l'installation de possibles futurs équipements	
V - Santé et confort à l'intérieur de l'ouvrage	10- Gêne	Influences psychologiques sur les usagers en utilisant l'ouvrage	[Dobinson and Bowen, 1997 ; Bobylev, 2009]
	11- Caractéristiques thermiques	Température à l'intérieur de l'ouvrage (°C)	NF EN 16309+A1 (Bâtiment) ; CEN/TS 16516 ; EN 15251 ; EN ISO 13788 ; EN 12354-1 -2 -3 -5 et -6 ; EN ISO 10140-2 et -3 ; EN ISO 16283-1 ; EN ISO 3382-2; pr EN 15643-5 (GC) ; EN 12464-1
		contrôlabilité de la température à l'intérieur	
		Humidité à l'intérieur de l'ouvrage (% ou g/kg)	
		contrôlabilité de l'humidité à l'intérieur	
		Vitesse et distribution de l'air (m/s)	
		contrôlabilité de la vitesse et distribution de l'air à l'intérieur de l'ouvrage	
		Stabilité de la température interne par rapport à une référence (Isolation thermique)	
	12- caractéristiques de la qualité de l'air	Emissions déclarées de substances dans les matériaux de construction	
		Concentration de CO2 supérieure à la concentration ambiante de CO2 [µg/g (ppm)]	
		Risque de formation de moisissure	
		Concentration de CO [µg/g (ppm)]	
		Evaluation du rayonnement du radon [Bq/m³]	
		Présence d'un dispositif de mesure et d'affichage de la concentration de CO2 et CO	
		Présence d'un dispositif de mesure et d'affichage de l'humidité	
	13- caractéristiques acoustiques	Niveaux sonores à l'intérieur de l'ouvrage (pression acoustique)	
		Période de réverbération	
		Isolation acoustique de bruit aérien provenant de l'extérieur vers l'intérieur de l'ouvrage	
	14- caractéristiques de confort visuel	Eclairement à l'intérieur de l'ouvrage [lx])	
		Indice d'éblouissement unifié [UGR]	
		Indice de rendu des couleurs [R_A]	
		coefficient d'éclairage naturel [%]	
		Présence d'un dispositif de contrôle de lumière par l'utilisateur	
		Présence d'un dispositif de contrôle de l'éblouissement par l'utilisateur	
		hauteur du plafond (m)	
VI - Impacts sur le	15- Image de la ville (aspect esthétique)	Infrastructures dissimulée	proposé
		Surface d'espaces publics créés	
	16- Bruit et vibrations sur	niveau de pression acoustique émis par l'ouvrage [dB(A)]	NF EN 16309+A1

	l'environnement extérieur	Vibration émises par l'ouvrage	(Bâtiment) ; pr EN 15643-5 (GC) ; ISO 2631
	17- Emissions dans l'air, le sol et les eaux extérieures	Taux de particules émises par l'ouvrage ou ses équipements	
		Odeurs	
		Chaleur provenant des équipements : ventilation, etc.	
		Contrôlabilité des émissions provenant de l'ouvrage (filtres, etc.)	
	18- Eblouissement et Occultation de l'ouvrage	Eclairement (lux) émis par l'ouvrage pendant la nuit	
		Clignotements, flashs ou lumière colorée provoquant une irritation, une perte de concentration, etc.	
		Eblouissement diume émis par la surface d'un ouvrage	
		Réflectivité élevée des matériaux extérieurs	
VII - Maintenance maintenabilité	19- Fréquence	Fréquence et la durée des opérations de maintenance courantes (nettoyage, etc.)	NF EN 16309+A1 (Bâtiment) ; pr EN 15643-5 (GC)
		Fréquence et la durée des réparations	
		Fréquence et la durée des opérations de remplacement et/ou de réhabilitation	
	20- confort lié à la maintenance	Changement de la qualité de l'air pendant les travaux de maintenance	
		Bruit pendant les travaux de maintenance	
		Vibration pendant les travaux de maintenance	
	21- Maintenabilité	Utilisabilité de l'ouvrage pendant les travaux de maintenance (%)	
		Rapport Durée de maintenance/perturbations	
		Démontabilité des tuyaux ou des câbles	
		Sécurité des personnels pendant les travaux de maintenance	
VIII – Résilience, sécurité et sûreté	22- Résistance aux conditions métrologiques	Capacité d'évacuation de l'eau de pluie	NF EN 16309+A1 (Bâtiment) ; pr EN 15643-5 (GC) ; EN 13501 -2, -3 -4 et -5 ; EN 12865 ; EN 1027 ; EN 12208
		Etanchéité de l'ouvrage aux conditions métrologiques (%)	
		Capacité d'écoulement des eaux de ruissellement et d'orage	
		Présence des dispositifs automatisés de protection	
		Mesures pour empêcher la chute de neige depuis les toitures	
	23- Résistance au rayonnement solaire	Contrôlabilité de l'ensoleillement solaire	
		Orientation du bâtiment	
		zonage (ordonnancement des pièces, espaces-tampons)	
		Efficacité des systèmes de climatisation, de	

		ventilation	
		Masse thermique à l'intérieur	
	24- Résistance à l'inondation	N° de barrières de protection contre les inondations (permanentes ou temporaires)	
		Efficacité de l'évacuation des eaux de ruissellement et d'orage	
		Etanchéité à des sous-sols du bâtiment	
		existence de zones d'inondation sacrificielles	
		Rétablissement après l'inondation	
	25- Résistance aux tremblements de terre	Mesures prises pour augmenter la stabilité des structures	
		Existence d'amortisseurs assurent la souplesse	
		Résistance de la structure aux chocs	
		Résistantes des vitres aux chocs	
		Installation de vannes de sectionnement d'urgence pour le gaz et l'eau	
	26- Résilience aux incendies	Mesures comprises dans la conception pour l'évacuation	
		Accessibilité des sapeurs-pompiers	
		Meilleures infrastructures au service des pompiers	
		Meilleure conception d'évacuation des PMR	
		Installation de système d'alarme incendie	
		Installation de système d'extinction d'incendie	
		Installation de système d'étanchéité aux fumées	
		Conception des compartiments résistants au feu et à la fumée	
		% d'espaces sécurisés dans les compartiments par usager	
		Classement de réaction de matériaux au feu	
	27- Résistance aux impacts du trafic routier	Aménagements des carrefours contre la congestion du trafic	
		Performance des zones exposées à un risque d'accident	
		Probabilité d'accidents	
		Protection des activités par l'ouvrage	
		Nombre de carrefours avec les réseaux existants	
	28- Sureté et sécurité contre le vandalisme	Mesures et recommandations mises en œuvre pendant la phase de conception	
		Performance de verrouillage de haute sécurité	
		Eclairage des chemins offrant un bon niveau de visibilité	
		Sécurité du stockage des déchets	

		Surface résistantes aux graffitis	
		Existence d'un système d'alarme et de surveillance	
		Existence d'un système de communication à la police et aux agents de sécurité approuvés	
		Eclairage sensible aux mouvements	
	29- Disposition en cas de coupures d'alimentation	Présence d'un dispositif de secours pour les équipements de ventilation et d'éclairage	
		Mesures pour évacuer le bâtiment en cas de coupure d'électricité	
		Mesures pour l'utilisation manuelle des installations	
IX- Aspect humain	30- Participation des acteurs	Taux de participation des acteurs à la prise des décisions	pr EN 15643-5 (GC)
		Taux de riverains concertés	
	31- Création d'emplois	N° d'emplois créés par la réalisation de l'ouvrage	
	32- Système de population	Changement de l'utilisation du sol	
		Changement de la distribution des centres de populations	

ANNEXE 6 : Jeu d'indicateurs économiques

Tableau 69: Jeu d'indicateurs économiques (Indicateurs quantifiables en bleu, qualitatifs en vert)

Objectif	Sous-objectif	Exemple d'indicateur économique	Réf de l'objectif
I - Frais d'investissement	1. Terrain	Coûts de l'achat ou de la location de la parcelle	EN 15643-4 (Bâtiment) ; SN 506 512
	2. Prévisions, renchérissement	Coûts imprévus	
		Renchérissement	
	3. Taxes	Taxes liés au permis de construire	
		Taxes liés à l'utilisation	
		Taxes liés à l'exploitation	
		Taxes liés à la fin d'utilisation	
II - Coûts pour la préparation du projet	4. Avant-Projet	Sommes versés à l'équipe du projet	EN 15643-4 (Bâtiment) ; SN 506 512
		Coût des logistiques	
		Coûts globaux provisoires de la construction	
	5. Travaux préparatoire du GC	Coûts liés aux travaux temporaires et de préparation de chantier	
		Coûts des aménagements provisoires (Déconstruction, élimination) et le transport associé	
		Coûts des produits au départ de l'usine (prêts à l'emploi)	
		Coûts encourus entre l'usine et la parcelle	
		Mesures pour adapter ou réhabiliter un bien immobilier en cours d'utilisation	
III - Coûts liés à l'ouvrage	6. Préparation du site, travaux souterrains	Coûts du traitement de sites contaminés	EN 15643-4 (Bâtiment) ; SN 506 512
		Coût lié à un volume de terre déplacé	
		Mesures pour améliorer le sol de fondation	
		N° des éléments de stabilisations, consolidations (fondations, murs piliers, dalles, etc.)	
		Coûts liés à l'étanchéité de l'ouvrage	
		Matériels spéciaux pour la construction souterraine (y compris le transport)	
		N° d'ouvrages temporaires au service du chantier	
		Conduites construites en tranchées couvertes	
		Eléments spéciaux, et complémentaires	
		Aménagements paysagers, travaux d'intégration de l'ouvrage	
	7. Enveloppes, aménagements	Surface	
		N° d'aménagements extérieurs et intérieurs	
		N° d'ouvertures et d'équipements	
	8. Conduites	Longueur des canalisations d'excavation	
		Longueur des canalisations d'alimentation	
		N° de canaux à câbles	
	9. Chaussées, voies ferrées	N°, épaisseur et longueur des chaussées	
		N° de marquages et de signaux	

		N° (ou longueur) des voies ferrées	
		N° de carrefours avec les réseaux existants	
		N° de postes d'aiguillage	
	10. Equipement	N° d'installation de distribution d'eau, de gaz, etc.	
		N° d'installation de chauffage	
		N° d'installations nécessaires pour l'exploitation (ventilation, éclairage, sécurité)	
	11. Frais secondaires	Frais d'assurances	
		Frais de capitaux	
		Frais liés à la restauration, aux relations publiques, indemnisations	
		Frais de la mise en service	
		Coûts réglementaires périodiques	
	12. Coûts liés à l'exploitation	Coûts de gestion des installations	
		Coûts énergétiques d'exploitation	
		Coûts relatifs à l'exploitation d'eaux	
		Réparation et maintenance mineures	
		Remplacement ou réhabilitation de systèmes et composants majeurs	
		Nettoyage	
		Entretien paysagère	
		Coûts liés à l'élimination des déchets	
		Changement d'utilisation et décoration	
V - Recettes financières	13. Recettes et subventions	Coûts provenant de la réutilisation, du recyclage et de la valorisation énergétique en fin de vie	EN 15643-4
		Subventions et primes liés à la phase Avant Utilisation	
		Subventions et primes liés à l'utilisation	
		Recettes provenant de la vente d'un bien immobilier ou d'éléments	
		Revenus de tierces parties pendant l'exploitation	
		Subventions et primes liés à l'exploitation	
	14. Coûts évités	Coûts des accidents évités	Proposé
		Coûts (ou N°) d'aménagements évités à construire	
		Coûts d'exploitation évitée lors du stop service	
		Coûts des terrains en double utilisation	
		Coûts de terrains évités à acheter	

ANNEXE 7 : Jeu d'indicateurs environnementaux

Tableau 70 : Jeu d'indicateurs environnementaux (Indicateurs quantifiables en bleu, qualifiables en vert)

Objectif	Sous-objectif	Exemple d'indicateurs environnementaux	Réf de l'objectif.
I- Ecosystème	1- Vie du territoire	Changement de densité urbaine	Proposé
		% Espaces verts	
		Occupation du sol	
	2- Biodiversité	Perturbation de la biodiversité locale	NF EN 15643-2
		Modification du paysage	
		Modification d'utilisation du sol	
	3- Prise en compte des impacts globaux	Toxicité humaine	
		Eutrophisation	
		Destruction d'ozone stratosphérique	
		Réchauffement climatique	
		Formation d'ozone troposphérique	
II- Gestion des ressources / pollution	4- Ressources d'énergie	Energie renouvelable produite / consommée	ISO 13065 ; NF EN 15643-2 ; BS 8902
		Energie non-renouvelable produite / consommée	
		Combustibles écologiques gérés de manière durable	
		Energie exportée	
	5- Ressources naturelles	Matériaux excavés réutilisés	
		Ressources exploitées de manière durable	
		Substances toxiques exploités	
		Epuisement des ressources abiotiques	
	6- Ressources d'eau	Eaux douces exploitées	
		Eaux exploitées des nappes phréatiques	
		Ecotoxicité en eau	
		Emissions de solides en suspension dans l'eau	
		Emissions des substances toxiques dans l'eau	
		Acidification des ressources en eau	
	7- Pollution du sol	Ecotoxicité en sol	
		Terrains contaminés traités	
		Emissions des substances toxiques dans le sol	
		Acidification des terrains	
		Pollution de vibration	
	8- Pollution de l'air	Emissions de poussières dans l'air	
		Acidification dans l'air	
		Pollution lumineuse	
		Champs électromagnétiques, radiologie	
		Emissions des substances toxiques dans l'air	
		Pollution sonore (bruit et vibration)	
	9- Gestion des déchets et des rejets	Matériaux réutilisables ou recyclables	
		Matériaux à la récupération d'énergie	
		Déchets dangereux ou non-dangereux	
		Déchets en vrac	
		Déchets radioactifs	

ANNEXE 8 : Aspects environnementaux représentant des spécificités au souterrain

Tableau 71 : Aspects environnementaux représentant des spécificités pour le souterrain

Phase	code	Aspect spécifique au souterrain	Référence.
Construction	E1	Perturbation de l'environnement géologique ; Risque de polluer les eaux souterraines	[Dobinson and Bowen, 1997]
	E2	Impacts liés au transport et marinage des matériaux excavés	[Dobinson and Bowen, 1997]
	E3	Valorisation des matériaux excavés	[Bobylev, 2009 ; Li and Parriaux, 2012]
Exploitation	E4	Exploitation de l'énergie géothermique	[Godard and Berenguier, 2002 ; Bobylev, 2009 ; Li and Parriaux, 2012]
	E5	Exploitation des nappes phréatiques	[Godard and Berenguier, 2002 ; Bobylev, 2009 ; Li and Parriaux, 2012]
	E6	Minimisation de la consommation de terrains et des ressources naturelles liée à l'étalement urbain	[Godard and Berenguier, 2002 ; Chow et al, 2002 ; ITA, 2004]
	E7	Développement de la biodiversité urbaine grâce à la création davantage des espaces verts	[Carmody and Sterling, 1993; Godard and Sterling, 1995; Godard and Berenguier, 2002 ; Bobylev, 2009 ; Vähäaho, 2014]
	E8	Difficulté de chauffage et Augmentation de la dépense énergétique à l'exploitation (aération, éclairage, etc.)	[Dondel et al, 2011]
Ensemble du cycle de vie	E9	Occupation de l'espace	[Carmody and Sterling, 1993; Godard and Sterling, 1995; Godard and Berenguier, 2002 ; Bobylev, 2009 ; Vähäaho, 2014]
	E10	Limitation (voire contrôler par filtrage dans la phase d'exploitation) les impacts en provenance de l'ouvrage sur l'environnement	[Dobinson and Bowen, 1997 ; Godard and Berenguier, 2002]

ANNEXE9 : Aspects socioéconomiques représentant des spécificités au souterrain

Tableau 72 : Aspects socioéconomiques représentant des spécificités pour le souterrain

Phase	Code	Aspect spécifique au souterrain	Référence.
Construction	SE1	Opportunité d'un développement urbain en zone contrainte (Construire à la proximité d'un ouvrage existant + réduction des coûts liés à la construction des infrastructures communes déjà existantes)	[Carmody and Sterling, 1993 ; Godard and Sterling, 1995 ; Dobinson and Bowen, 1997 ; ITA, 2002 ; Bobylev, 2009]
	SE2	Pas besoin du revêtement extérieur, cela va réduire la consommation des matériaux et des coûts liés	[Chow et al, 2002]
	SE3	Solutions plus coûteuses que d'autres en surface	[Dobinson and Bowen, 1997 ; Bobylev, 2009 ; Godard and Berenguier, 2002]
	SE4	Difficultés de transport et de stockage des matériaux excavés dans les zones urbaines	[Dobinson and Bowen, 1997].
Exploitation	SE5	Mutabilité (possibilité de programmer d'autres usages des ouvrages dans le futur, possibilité de développer des relations futures entre des ouvrages souterrains, etc.)	[Godard and Berenguier, 2002]
	SE6	Gain de temps et Proximité des services aux riverains	[Carmody and Sterling, 1993 ; Godard and Sterling, 1995 ; Godard and Berenguier, 2002 ; ITA, 2004]
	SE7	Résilience accrue vis-à-vis des risques sismiques	[Godard and Berenguier, 2002 ; Parker, 2008 ; Bobylev, 2009]
	SE8	Réduction des coûts liés au transport externe en surface (pollution, congestion, accidents évités)	[Godard and Sterling, 1995 ; ITA, 2004 ; Bobylev, 2009]
	SE9	Coûts réduits de la maintenance grâce à la protection des effets externes	[Godard and Berenguier, 2002 ; Bobylev, 2009]
	SE10	Conserver des zones patrimoniales et naturelles	[Carmody and Sterling, 1993 ; Godard and Berenguier, 2002 ; ITA, 2004 ; Bobylev, 2009]
	SE11	Esthétique (dissimuler les infrastructures)	[Godard and Berenguier, 2002 ; Chow et al, 2002 ; ITA, 2004 ; Bobylev, 2009 ; Li and Parriaux, 2012]
	SE12	Libérer le sol pour d'autres usages et Économies du coût foncier (augmenter l'utilité en doublant l'utilisation des terrains)	[Carmody and Sterling, 1993 ; Godard and Sterling, 1995 ; Dobinson and Bowen, 1997 ; Godard and Berenguier, 2002 ; ITA, 2004 ; Bobylev, 2009 ; Li and Parriaux, 2012]
	SE13	Rentabilité économique à long terme	[Godard and Berenguier, 2002]
	SE14	Influences psychologiques (sentiments négatifs suite à une longue période passée dans le souterrain)	[Dobinson and Bowen, 1997 ; Bobylev, 2009]
	SE15	Vulnérabilité vis-à-vis aux risques d'inondations	[Dobinson and Bowen, 1997 ;

			Godard and Berenguier, 2002 ; Parker, 2008 ; Bobylev, 2009]
	SE16	Congestion du trafic en surface liée à la fermeture ou l'arrêt d'exploitation	[Dobinson and Bowen, 1997]
	SE17	Difficulté de maintenance, de réparation et du démantèlement des équipements de la climatisation ou la ventilation à grande profondeur	[Dobinson and Bowen, 1997]
Ensemble du cycle de vie	SE18	Isolation et protection naturelle des activités et des usagers	[Carmody and Sterling, 1993 ; Godard and Sterling, 1995 ; Dobinson and Bowen, 1997 ; Chow et al, 2002 ; Godard and Berenguier, 2002 ; ITA, 2004 ; Bobylev, 2009 ; Li and Parriaux, 2012]
	SE19	Gêne aux riveraines due à l'explosion et aux engins du chantier ou aux usine de ventilation	[Dobinson and Bowen, 1997 ; Bobylev, 2009]

ANNEXE 10 : Grille du projet à évaluer

1. Projet évalué

1.1. Informations générales

Projet	Début de travaux / mise en service	Localisation géographique				Maitrise d'œuvre	Maitrise d'ouvrage	Société Exploitante
		Pays	Département	Ville	Autres infos utiles			
Texte	*Années*	*Texte*	*Texte*	*Texte*	*Texte*	*Texte*	*Texte*	*Texte*

1.2. Type de l'ouvrage

Linéaire		Ponctuel		Mixte
Tunnel simple	Complexe de tunnels	Ouvrage d'aménagement souterrain	Complexe d'aménagements souterrains	Combinaison des ouvrages souterrains
☐	☐	☐	☐	☐

2. Analyse de l'ensemble « fonction – structure »

2.1. Analyse fonctionnelle du besoin

Besoin exprimé	Fonctions principales		Fonctions annexes correspondantes	
	FP	Expression de la fonction	FA	Expression de la fonction
B1	*FP1*	*Texte*	$FA_{1.1}$	*Texte*
			$FA_{1.n}$	*Texte*
	FPδ	*Texte*	$FA_{\delta.1}$	*Texte*
			$FA_{\delta.n}$	*Texte*
B2				

2.2. Analyses structurelle - spatiale

2.2.1. Analyse structurelle

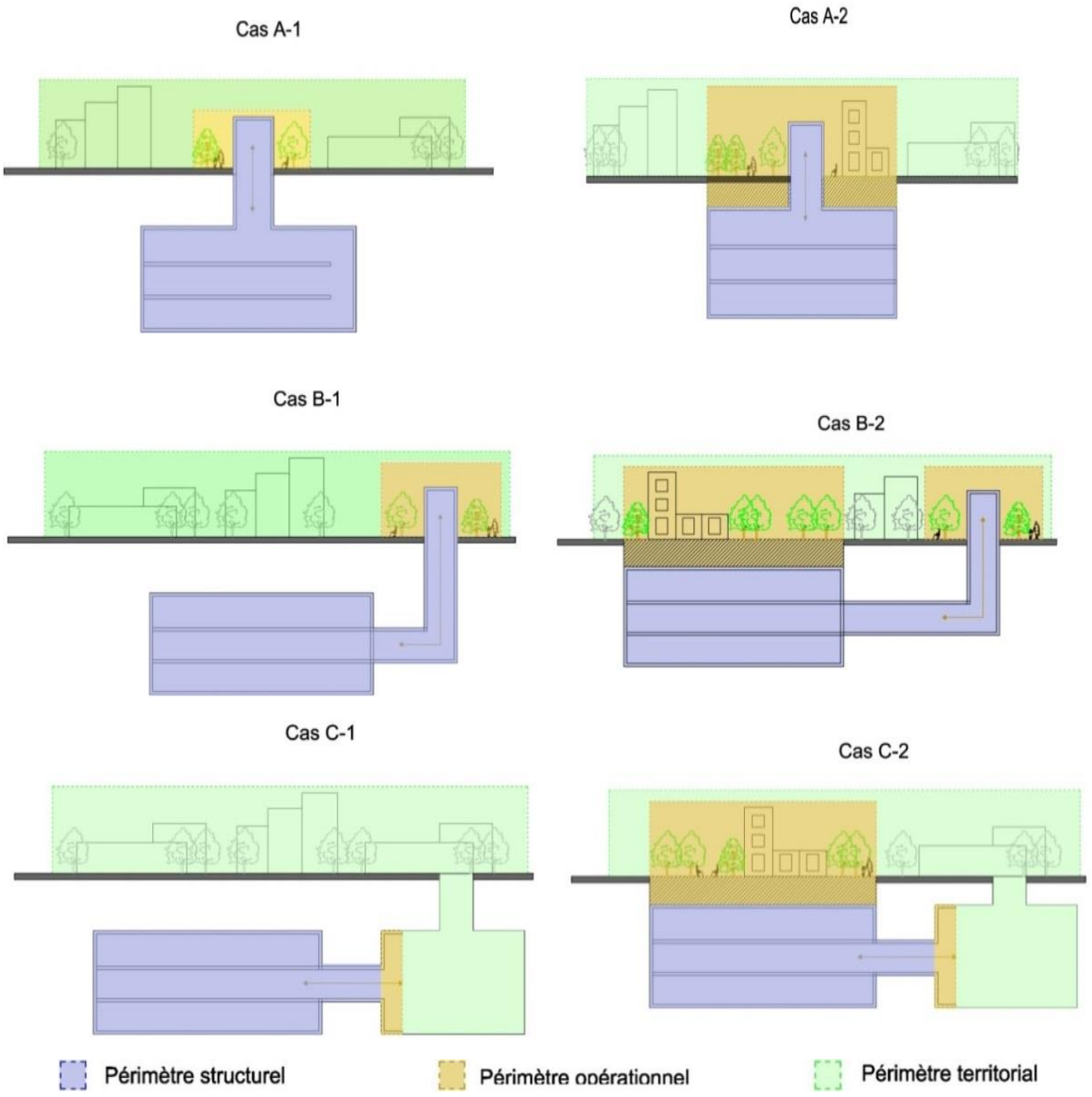
Fonction	Classement (FP ; FA)	Structure associée	Classement (SP ; SA)

2.2.2. Solution constructive adaptée

Solution constructive			
Creusé			Tranchées couvertes
Méthode conventionnelle		Méthode mécanisée	
A l'explosif	Attaque ponctuelle	Tunnelier	
☐	☐	☐	☐

2.2.3. Périmètres spatiaux selon l'accès et la solution constructive

		Périmètres spatiaux selon l'accès et la solution constructive					
		Accès Depuis sa parcelle		Accès dehors de sa parcelle		Accès depuis un autre ouvrage souterrain	
Solution constructive	**Creusé**	Type A-1	☐	Type B-1	☐	Type C-1	☐
	Tranchées couvertes	Type A-2	☐	Type B-2	☐	Type C-2	☐
Regarder les schémas du classement ci-après							



ANNEXE 11 : Questionnaire

Yaarob AUDI, doctorant (Ifsttar-CETU), dans le cadre de projet national Ville 10D-Ville d'idées : http://www.ville10d.fr
yaarob.audi@ifsttar.fr

Indicateurs du développement durable adaptés aux aménagements souterrains. Le résultat attendu sera une méthodologie pour dresser un bilan environnemental d'ouvrages souterrains

Nom :
Prénom :
Établissement / entreprise :

Fonction :

Objectifs du questionnaire

Collecter des informations et des références. Positionner les travaux de la thèse par rapport aux différentes disciplines. Identifier les apports de la thèse du point de vue professionnel. Trouver des pistes de développement.

Thème 1 : *Planification de la surface (quartier, ville…), l'emplacement du souterrain*

- Connaissez-vous des exemples de ville intégrant le sous-sol dans une stratégie de développement durable ?
- Connaissez-vous des indicateurs qualifiant ou quantifiant d'usage du sol ?
  Serait-il utilisable pour évaluer gain de l'emploi du sous-sol ?
- La préservation des ressources de surface serait-elle pour vous un thème à explorer ?
- Connaissez-vous des réseaux internationaux travaillant sur les ouvrages souterrains ?

Thème 2 : *Espaces souterrains, généralités et évaluation*

- Connaissez-vous des typologies d'ouvrages souterrains (par nature ? par fonction ?)
- Quels seraient les aspects principaux que vous prendriez en compte pour une étude concernant la gestion des risques en sous-sol ?
- Pensez-vous que les projets souterrains peuvent être plus rentables économiquement que les projets urbains sur le sol ?
  Si oui, à quelle échelle de temps ?
- La vie sociale est-elle pour vous imaginable en souterrain ?
  Si oui, quelles formes d'usages et sous quelles conditions ?
- Comment envisageriez-vous la mutabilité d'un ouvrage souterrain ? Avez-vous des références de mutabilité en souterrain ?

Thème 3 : *évaluation environnementale d'un ouvrage souterrain*

- Connaissez-vous des indicateurs spécifiques de l'évaluation environnementale d'un ouvrage souterrain ?
  Si oui, pouvez-vous préciser les indicateurs qui vous sembleraient pertinents.

- Connaissez-vous des études sur l'évaluation environnementale d'ouvrages souterrains ? Nationales ? Internationales ?
  Si oui, les quelles ?

- Les méthodes d'évaluation environnementale (empreinte écologique, ACV…), sont-elles selon vous applicable au souterrain ?
  Si oui, sous quelles conditions, limites ?

- L'usage du sol est-il un indicateur à développer pour les ouvrages souterrains ?

Commentaires

Sur quoi pensez-vous que la thèse devrait se concentrer et quelles utilisations des résultats envisagez-vous ?

Diffusion du travail de thèse

Articles :

• Y. AUDI., A JULLIEN, M.DAUVERGNE, A FERAILLE., L D'ALOIA-SCHWARTZENTRUBER., (2016) « Méthodologie d'évaluation au sens du développement durable pour les aménagements souterrains » Développement Durable Et Territoire, (Article soumis)

• Y. AUDI., A JULLIEN, M.DAUVERGNE, A FERAILLE., L D'ALOIA-SCHWARTZENTRUBER., (2016) « Analyse du cycle de vie appliqué aux aménagements souterrains – Cas d'un complexe souterrain multimodal », Transport Part-D (Article au cours de préparation pour septembre 2016)

Conférences avec acte :

• Y. AUDI., A JULLIEN., L D'ALOIA-SCHWARTZENTRUBER., T LORINO., A FERAILLE., « Construire En Souterrain : Quels Avantages Du Point De Vue Du Développement Durable ? ». IN : CONFERENCE NATIONALE GC'2015 « LA GENIE CIVIL EN TRANSITION … », 18 ET 19 MARS 2015, ESTP - CACHAN – France (Article + présentation).

• Y. AUDI., A JULLIEN, L D'ALOIA-SCHWARTZENTRUBER., T LORINO. A FERAILLE. « Building Underground: Which Benefits From A Sustainable Point Of View? ». IN : 41TH General Assembly And Congress Of International Tunnelling And Underground Space Association Ita-Aites, (ITAWTC 2015), 22-28 MAY 2015, DUBROVNIK – CROIATIA (Article + présentation).

• Y. AUDI., A JULLIEN, M.DAUVERGNE, L D'ALOIA-SCHWARTZENTRUBER., A FERAILLE. « Life-Cycle Assessment For Underground Construction –Tunnel Case Study ». IN : SETAC Europ 26th annual meeting, 22-26 MAY 2016, Nantes –France (Poster Spotlight).

Conférences sans acte :

• Y. AUDI., « Développement Urbain Durable, Application Sur Une Infrastructure Souterraine », Presentation Au Sein De Ifsttar, Lors D'une Visite D'une Delegation Tunisienne, Le 19/05/2015, Ifsttar - Nantes.

• Poster de presentation des travaux de la these : « Aménagements Souterrains, Evaluation Et Optimisation » ; presenté lors de la visite de la directrection generale de l'IFSTTAR le 18 juin 2014.

• Workshop Ville 10D « Tester Les Outils Développes (Notamment L'outil Economique Par Systra) En Evaluant Différentes Propositions En Prenant L'aménagement De La ZAC Marne Europe Comme Cas D'étude ». Atelier dans le cadre du Projet Nationale Ville 10D. Systra – Paris – 17 décembre 2015.

l'université nantes angers le mans
PÔLE DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

Centrale Nantes

Thèse de Doctorat

Yaarob AUDI

Développement d'une méthodologie d'évaluation au sens du développement durable des aménagements souterrains

Résumé

Cette thèse a pour objectif de développer une méthodologie d'évaluation au sens du développement durable des aménagements souterrains, afin de mettre en évidence leurs spécificités. La construction et l'exploitation des aménagements souterrains ont de forts impacts sur l'environnement et représentent un investissement financier conséquent le plus souvent déterminant dans le processus décisionnel. Or, ces aménagements offrent de nombreux avantages pour la ville, et pour leurs usagers. Cette méthodologie, qui propose une évaluation complète d'aménagements souterrains, prend en compte les différents volets : environnemental, social et économique. La dimension « gouvernance » est intégrée en balayant les normes et les textes réglementaires liés à chaque étape du travail. La première partie du mémoire comprend une étude approfondie de types de projets souterrains permettant d'étudier leur fonctionnalité et de mettre en évidence la place du souterrain dans la ville durable. Dans les parties suivantes, une évaluation environnementale menée par la méthode d'analyse du cycle de vie (ACV) et une évaluation au sens du développement durable se basant sur la méthode Haute Qualité Environnementale (HQE) sont présentées. L'objectif est d'évaluer tous les aspects du développement durable en s'appuyant sur un système de notation avantages/inconvénients construit spécifiquement pour le souterrain. La méthodologie appliquée à un cas d'étude de tunnel urbain est capable d'évaluer plusieurs variantes et de proposer un système de hiérarchisation des résultats d'indicateurs. Grâce à la méthodologie développée, les différentes variantes proposées peuvent être classées en choisissant les plus avantageuses au sens du développement durable.

Mots clés

Développement durable, analyse du cycle de vie, haute qualité environnementale, souterrain, urbain.

Abstract

This thesis aims to develop a methodology for evaluating the sustainable development of underground constructions, so that we can highlight their specificities. The construction and operation phases of underground facilities have a strong environmental impact; they represent also a consequent financial investment, which is usually a key factor in the decision-making process. In the other hand, these facilities offer many benefits to the city and to their users. This methodology, that proposes a complete evaluation of underground constructions, takes into account the different dimensions of sustainable development: environmental, social, economic. The governance dimension is also integrated through analyzing standards and legislation related to every step of this work. The first part of this thesis contains a detailed study of underground construction projects: functionality and their contribution in the sustainable city. The other parts contain an evaluation of environmental impacts carried out by the Life-Cycle Assessment (LCA) and the analysis of social and economic impacts carried out by the High Environmental Quality (HQE). The aim is to evaluate all the sustainable development aspects on the basis of a scoring system "benefits / drawbacks" for underground constructions. This methodology, applied to an urban tunnel case study, enables to evaluate several alternatives and then to propose a prioritization system of indicator results. By using the developed methodology, the different proposed alternatives can be classified by choosing the most advantageous ones within the meaning of sustainable development.

Key Words

Sustainability, life-cycle Assessment, High Environmental Quality, underground, urban.