

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعلیم العالی والبحث العلمی

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En : GENIE CIVIL**

**Spécialité : GEOTECHNIQUE**

**Par : BENTALHA Hicham et MEDJAHDI Mehdi Abdelkader**

### **Sujet**

**Analyse du cycle de vie en géotechnique :  
Cas de la stabilisation d'un glissement de terrain  
au niveau de la rocade côtière de Ghazaouet**

Soutenu publiquement, le 23 /05 /2025, devant le jury composé de :

Dr. BENYELLES Z.	Mc. B	Université de Tlemcen	Président
Dr. BOURABAH M.A.	Mc. B	Université de Tlemcen	Examinatrice
Dr. TROUZINE H.	Prof.	Université de Tlemcen	Encadrant
Dr. ZADJAOUI A.	Prof.	Université de Tlemcen	Co-Encadrant

Année universitaire : 2024 /2025

# *Dédicace*

**À ceux qui ont illuminé mon parcours,**

**À ma mère,** mon premier amour et ma force tranquille,

**À mon père Abderrahim,** mon guide et mon modèle de persévérance,

**À mes frères Hadj, Fayçal, Iyad,** mes complices et mes piliers au quotidien,

**À mes grands-pères et mes grands-mères,** dont les prières et la sagesse m'ont porté,

**À mes tantes et oncles,** pour leur soutien indéfectible et leurs précieux conseils,

**À mes cousins,** et particulièrement à **Sofiane,** avec qui j'ai partagé tant de joies, de défis et de moments inoubliables,

**À mon binôme Abdelkader Mehdi,** compagnon de travail et de réflexion, sans qui ce travail n'aurait pu aboutir sa contribution, son engagement et son amitié ont été déterminants

**À mes amis, Senhadji, Anwar, Redwan, Amar,** ces étoiles qui ont brillé à mes côtés dans les moments d'ombre et de lumière,

**Une pensée spéciale** pour mon ami **Ghanem Omar** et tous **les combattants de la liberté en Palestine,** dont la résistance et la dignité sont une inspiration permanente,

Ce mémoire est le fruit de vos encouragements, de votre amour et de votre confiance.  
Qu'il soit un hommage à votre présence inestimable dans ma vie.  
Avec toute ma gratitude.

Bentalha Hicham

# *Dédicace*

Je dédie ce travail à :

## **Ma mère Malika**

Tu as été ma première enseignante, mon plus grand soutien, et ma lumière dans les moments d'ombre. Ce diplôme est autant le tien que le mien. Je te suis reconnaissant à vie Maman.

## **Mon père Noureddine**

Pour le gout à l'effort qu'il a suscité en moi de par sa rigueur, Merci Papa.

## **Mon frère Sofyane et ma sœur Rima**

Merci pour votre soutien sans faille Et cette complicité unique qui a rendu ce parcours plus léger.

## **Mes tantes Rachida ; Khadîdja et Merieme**

Qui m'ont chaleureusement supporté et encouragé durant mon cursus.

Mon **oncle Abdelkrim** ; merci d'être cette personne si simple et bienveillante.

Mes cousins **Salma ; Fayçal ; Zohir ; Marwa ; Sabrina** ainsi que les deux petits **Imran** et **Anfel**.

Toutes **la famille Medjahdi et Larbi** ainsi que tous ceux qui m'ont donné du courage et de l'amour.

## **Mon binôme Hicham**

Merci pour ta patience, tes idées brillantes, Et cette alchimie qui a transformé nos heures de travail en moments mémorables. Sans toi, ce mémoire n'aurait pas été le même.

**Mes amis** Abdeljalil ; Derriche ; Adel ; Rayenne ; Amar et Zaki, Vos fous rires ont éclairé mes journées de stress, merci d'être là.

**A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail  
Merci à vous.**

Medjahdi Abdelkader Mehdi

# Remerciements

Nous exprimons notre profonde gratitude à **Allah**, Le Tout-Puissant et Le Très Miséricordieux, qui nous a accordé la patience, la force et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail. Sa guidance et Sa bienveillance ont été notre soutien tout au long de ce parcours

Nos premiers remerciements vont à nos chers **parents** pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants tout au long de notre parcours universitaire.

Nous adressons nos sincères remerciements à notre encadrant principal, Monsieur **Trouzine Habib**, ainsi qu'à notre co-encadrant, Monsieur **Zadjaoui Abdeldjalil**, pour leur accompagnement précieux, leurs conseils avisés et leur disponibilité tout au long de ce mémoire. Leurs orientations éclairées ont été déterminantes pour la réalisation de ce projet.

Nous exprimons également notre reconnaissance à l'entreprise **SEROR** pour avoir mis à disposition les documents et données nécessaires, ainsi que pour son soutien technique tout au long de cette recherche.

**DTP** Tlemcen (Direction des travaux publics de Tlemcen) pour l'autorisation et le complément de document. **Afitex** Algérie pour la documentation sur les Géosynthétiques.

Nous tenons à remercier chaleureusement Monsieur **Benyelles Zoheir** qui a accepté de présider notre jury, ainsi que Madame **Bourabah Maghnia Asmahane** pour avoir pris le temps d'examiner notre travail.

Enfin, nous adressons notre gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cette recherche. Leur soutien a été précieux pour l'aboutissement de ce mémoire.

Tous ceux qui ont assuré la formation de la promotion master géotechnique 2023/2025.

# ملخص

تستكشف هذه المذكرة تطبيق تحليل دورة الحياة (LCA) في مجال الهندسة الجيوتقنية، مع التركيز على حالة ملموسة لتثبيت الانزلاقات الأرضية على طول الطريق الجانبي الساحلي للغزوات (الجزائر). تمت مقارنة حلين تقنيين: جدار استنادي من الخرسانة المسلحة على الخوازيق (البديل 1) مع نظام تصريف باستخدام مواد حبيبية، وبديل محسن يتضمن نظام تصريف محسن مع نسيج جيوتكستائل خلف الجدار الاستنادي (البديل 2). تُظهر النتائج أن البديل 2 يقلل من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة 24% واستهلاك الطاقة بنسبة 23%، مع استعادة 90% من المساحة الزراعية المفقودة مع الحل التقليدي. تسلط الدراسة الضوء على أهمية دمج تحليل دورة الحياة منذ مرحلة تصميم المشاريع الجيوتقنية للتوفيق بين الأداء الفني والاستدامة واحترام البيئة.

**الكلمات المفتاحية:** تحليل دورة الحياة، هندسة جيوتقنية، انزلاق أرضي، جيوتكستائل، استدامة.

# Abstract

This dissertation explores the application of Life Cycle Assessment (LCA) in the field of geotechnical engineering, focusing on a concrete case of landslide stabilisation along the Ghazaouet coastal bypass (Algeria). Two technical solutions are compared: a traditional reinforced concrete retaining wall on piles (Variant 1) with a drainage system using granular materials, and an improved alternative incorporating an optimised drainage system with geotextile behind the retaining wall (Variant 2). The results show that Variant 2 reduces CO<sub>2</sub> emissions by 24% and energy consumption by 23%, while recovering 90% of the agricultural area lost with the conventional solution. The study highlights the importance of incorporating LCA right from the design stage of geotechnical projects to reconcile technical performance, sustainability and respect for the environment.

**Keywords:** LCA, geotechnics, landslide, geotextile, sustainability.

# Résumé

Ce mémoire explore l'application de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) dans le domaine de la géotechnique, en se concentrant sur un cas concret de stabilisation d'un glissement de terrain le long de la rocade côtière de Ghazaouet (Algérie). Deux solutions techniques sont comparées : un mur de soutènement cantilever en béton armé sur pieux (Variante 1) avec un système de drainage réalisé qu'avec des matériaux granulaire, et une alternative améliorée intégrant un système de drainage optimisé avec géotextile derrière le mur de soutènement (Variante 2). Les résultats démontrent que la Variante 2 réduit de 24 % les émissions de CO<sub>2</sub> et de 23 % la consommation énergétique, tout en récupérant 90 % de la surface agricole perdue avec la solution conventionnelle. L'étude souligne l'importance d'intégrer l'ACV dès la conception des projets géotechniques pour concilier performance technique, durabilité et respect de l'environnement.

**Mots-clés** : ACV, géotechnique, glissement de terrain, géotextile, durabilité.

# Sommaire

<b>Dédicace.....</b>	<b>I</b>
<b>Remerciements.....</b>	<b>III</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>IV</b>
<b>Table des figures.....</b>	<b>X</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>XII</b>
<b>Notations.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Synthèse bibliographique sur le cycle de vie .....</b>	<b>4</b>
1.1 Définition du cycle de vie .....	5
1.2 Le cycle de vie d'un ouvrage en génie civil.....	6
1.2.1 Fabrication des matériaux, matériels et engins de chantier .....	6
1.2.2 Transport des matériaux, matériels et engins de chantier .....	7
1.2.3 Réalisation de l'ouvrage.....	7
1.2.4 Vie de l'ouvrage.....	7
1.2.5 Fin de vie.....	7
1.3 Cycle de vie en géotechnique.....	8
1.4 Le cycle de vie d'un projet de route.....	9
1.4.1 Étape de production .....	9
1.4.2 Étape de construction .....	10
1.4.3 Étape de vie en œuvre.....	10
1.4.4 Étape de fin de vie.....	11
1.4.5 Potentiel de recyclage, réutilisation, récupération.....	11
1.5 Le cycle de vie d'un ouvrage de soutènement.....	11
1.5.1 Étapes du cycle de vie d'une structure de soutènement .....	12
1.5.2 Effets néfastes .....	12
1.6 Le cycle de vie des géosynthétiques .....	12
1.6.1 Fabrication .....	12

1.6.2	Transport et stockage .....	15
1.6.3	Utilisation et Maintenance .....	15
1.6.4	La fin de vie.....	17
1.7	Cycle de vie dans le cas des glissements de terrains agricoles .....	17
1.7.1	Définition des glissements de terrain.....	17
1.7.2	Facteur déclencheur .....	17
1.7.3	Conséquences.....	18
1.7.4	Glissement de terrain agricole.....	18
1.8	Conclusion .....	19
<b>Synthèse bibliographique sur l'analyse du Cycle de Vie (ACV) .....</b>		<b>20</b>
2.1	Définition de l'analyse de cycle de vie (ACV) .....	21
2.2	Cadre méthodologique de l'ACV.....	22
2.2.1	Définition des objectifs et du champ de l'étude .....	22
2.2.2	Inventaire de cycle de vie.....	25
2.2.3	Evaluation de l'impact de cycle de vie .....	27
2.2.3.3	L'analyse de la qualité des données d'ACVI supplémentaire .....	33
2.2.3.4	ACVI utilisée dans des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public.....	34
2.2.3.5	Limitation de l'ACVI.....	35
2.2.4	Interprétation de cycle de vie .....	36
2.3	Spécificités des ouvrages géotechniques.....	37
2.4	Les outils et les logiciels de l'analyse du cycle de vie pour les ouvrages géotechniques ....	38
2.5	Limites de l'ACV .....	39
2.6	Conclusion .....	40
<b>Présentation du projet.....</b>		<b>42</b>
3.1	Position du problème .....	43
3.2	Projet étudié .....	43
3.3	L'histoire du glissement .....	47
3.4	Situation du projet .....	53
3.4.1	Situation géographique.....	53
3.4.2	Situation topographique.....	54
3.4.3	Situation géologique .....	56
3.4.4	Contexte hydrogéologique.....	59
3.4.5	Contexte Géotechnique.....	60
3.4.6	La sismicité de la région .....	66
3.5	Conclusion .....	68
<b>Évaluation environnementale par ACV .....</b>		<b>69</b>
4.1	Les outils d'analyse .....	70
4.2	Objectif et portée de l'ACV .....	71
4.3	Rappel et description des variantes .....	72
4.3.1	Variante 1 .....	72
4.3.2	Variante 2.....	75
4.4	Frontières du système .....	85
4.4.1	Phases incluses .....	85
4.4.2	Phases exclues.....	85

4.5	Les sources des données .....	88
4.5.1	Données primaires :.....	88
4.5.2	Données secondaires .....	89
4.6	Résultats d'analyse .....	90
4.7	Conclusion .....	91
<b>Dépouillement et interprétation des résultats .....</b>		<b>92</b>
5.1	Observations sur le terrain.....	93
5.1.1	Limites de la solution actuelle .....	93
5.1.2	Manifestations du glissement et risques persistants .....	93
5.1.3	Recommandations .....	94
5.2	Les gains dans les matériaux.....	94
5.3	La surface récupérer .....	96
5.4	Gain technique .....	97
5.5	Interprétations des résultats de l'ACV .....	97
5.5.1	L'évaluation du potentiel de réchauffement climatique (GWP) pour les deux variantes.....	102
<b>Conclusion générale.....</b>		<b>107</b>
<b>Bibliographie.....</b>		<b>109</b>

# Table des figures

1.1 : Cycle de vie d'un béton (Josa, et al., 2005).....	5
1.2 : Cycle de vie d'un ouvrage en génie civil (Guiraud, 2019).....	8
1.3 : Cycle de vie d'un projet routier (RF, 2021).....	9
1.4 : Photo d'un mur de soutènement à Ghazaouet prise par Bentalha & Medjahdi le 24 février 2025.....	11
1.5 A : Différents types des géosynthétiques (CFG, 2022).....	13
1.5 B : Différents types des géosynthétiques (CFG, 2022).....	14
2.1 : Les phases de l'ACVI (Léonard, et al., 2019).....	22
2.2 : Limitation du système analysé (Eric et al. 2024).....	24
2.3 : Éléments de l'ACVI (ISO 14040, 2006).....	28
3.1 : Photo du projet global prise par Bentalha & Medjahdi le 24 février 2025.....	44
3.2 : Photos de terrain endommagé prise par Bentalha & Medjahdi le 24 février 2025.....	45
3.3 : Photos de l'ouvrage prise par Bentalha & Medjahdi le 3 février 2025.....	46
3.4 : Photo satellitaire de la zone d'étude en mars 2009 (Google Earth , 2023).....	47
3.5 : Photo satellitaire de la zone d'étude en mars 2016 (Google Earth , 2023).....	48
3.6 : Photo satellitaire de la zone d'étude en février 2020 (Google Earth , 2023).....	49
3.7 : Photo sur terrain de l'apparition des fissures sur le talus (SET Sétif, 2022).....	50
3.8 : Photo satellitaire de la zone d'étude en juillet 2022 (Google Earth , 2023).....	51
3.9 : Photo satellitaire de la zone d'étude en octobre 2023 (Google Earth , 2023).....	52
3.10 : Localisation du site (Mapcarta, 2025).....	53
3.11 : Photo satellitaire du site (Topographic-map, 2025).....	54
3.12 : La carte topographique de la région (Topographic-map, 2025).....	54
3.13 : La ligne de la pente du terrain (Google Earth, 2023).....	55
3.14 : La ligne de la pente du tronçon routier (Google Earth, 2023).....	56
3.15 : Extrait de la Carte géologie Nord Oran au 1/500000 (SET Sétif, 2022).....	57
3.16 : Photo montrant la présence de Basalte sur le site (SET Sétif, 2022).....	57
3.17 : Photos de Tufs sur le terrain (SET Sétif, 2022).....	58
3.18 : Photos des Argiles et Marnes sur le terrain (SET Sétif, 2022).....	58
3.19 : Zonage sismique des wilayas d'Algérie (RPA, 2024).....	67
3.20 : Les coefficients d'accélération selon les zones sismiques (RPA, 2024).....	68

4.1 : Captures du logiciel OpenLCA.....	70
4.2 A : Coupe transversale de la variante 1.....	73
4.2 B : Les dimensions de la variante 1.....	74
4.3 : Les courbes granulométriques des sols.....	76
4.4 : La courbe granulométrique moyenne.....	76
4.5 : La courbe granulométrique moyenne du sol.....	78
4.6 : La courbe granulométrique du matériau drainant.....	79
4.7 : Les critères de perméabilité.....	80
4.8 : Les caractéristiques du géotextile AS10 (Afitex industrie, 2024).....	82
4.9 A : Coupe transversale de la variante 2.....	83
4.9 B : Les dimensions de la variante 2 .....	84
4.10 A : Limites de la variante 1.....	86
4.10 B : Limites de la variante 2.....	87
4.11 : Résultats d'ACV pour la variante 1.....	90
4.12 : Résultats d'ACV pour la variante 2.....	91
5.1 : Potentiel de réchauffement climatique (GWP) pour la variante 1.....	98
5.2 : Potentiel de réchauffement climatique (GWP) pour la variante 2.....	98
5.3 : Demande cumulée en énergie (CED) pour la variante 1.....	100
5.4 : Demande cumulée en énergie (CED) pour la variante 2.....	100
5.5 : Le potentiel de réchauffement climatique (GWP) pour les deux variantes.....	102
5.6 : La demande cumulée en énergie (CED) pour les deux variantes.....	103

# Liste des tableaux

1.1 : Les principales fonctions des géosynthétiques (CFG, 2022).....	16
3.1 : Les résultats des essais pressiométriques (LTPO, 2021).....	61
3.2 : Les résultats des essais piézométriques (LTPO, 2021).....	62
3.3 : Les résultats des essais inclinométriques (LTPO, 2021).....	63
3.4 : Les résultats des essais de cisaillement (LTPO, 2021).....	65
4.1 : Les critères de Terzaghi et Peck.....	77
4.2 : Les diamètres caractéristiques du sol.....	78
4.3 : Les diamètres caractéristiques du matériau drainant.....	78
4.4 : Coefficient d'uniformité du matériau drainant.....	79
4.5 : Facteurs d'ajustement (C) (CFG, 2002).....	81
4.6 : La formulation granulaire du matériau drainant.....	82
4.7 : Quantités pour la variante 1.....	88
4.8 : Quantités pour la variante 2.....	89
5.1 : Réduction des matériaux.....	95
5.2 : Synthèse des résultats.....	104
5.3 : Différents résultats d'ACV comparative.....	105

# Notations

## Générale :

- **ACV** : Analyse du Cycle de Vie (LCA en anglais)
- **ICV** : Inventaire du Cycle de Vie (LCI)
- **ACVI** : Analyse des Impacts du Cycle de Vie (LCIA)
- **GWP** : Potentiel de Réchauffement Climatique (*Global Warming Potential*)
- **CED** : Demande Cumulée en Énergie (*Cumulative Energy Demand*)

## Géotechnique & Matériaux :

- **MDS** : Mur de Soutènement (éléments préfabriqués en béton)
- **SC1, SC2, SC3** : Sondages Carottés (géotechniques)
- **PMT1** : Sondage Pressiométrique
- **D50, D15, D85** : Diamètres caractéristiques des granulats
- **Cu** : Coefficient d'uniformité ( $Cu = D_{60}/D_{10}$ )
- **$\gamma_d$**  : Poids volumique sec ( $t/m^3$ )
- **$\gamma_h$**  : Poids volumique humide ( $t/m^3$ )
- **w** : Teneur en eau naturelle (%)
- **IP** : Indice de Plasticité
- **WL** : Limite de Liquidité

**Paramètres Mécaniques :**

- **C** : Cohésion du sol (kPa)
- **$\phi$  (Phi)** : Angle de frottement interne ( $^{\circ}$ )
- **i** : Gradient hydraulique

**Géosynthétiques :**

- **O<sub>90</sub>** : Ouverture des mailles du géotextile ( $\mu\text{m}$ )
- **VH<sub>50</sub>** : Vitesse de perméabilité du géotextile

**Autres :**

- **BET** : Bureau d'Études Techniques
- **LTPO** : Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest (Tlemcen)
- **SEROR** : Société d'Études et de Réalisation d'Ouvrages d'Art de l'Ouest Tlemcen
- **RN98/RN99** : Routes Nationales algériennes
- **RPA 2024** : Règlement Parasismique Algérien

# Introduction générale

Le débat politique, tout comme la recherche scientifique, est aujourd'hui profondément marqué par l'impératif du développement durable. Bien au-delà d'une simple logique d'économie d'énergie ou d'optimisation des ressources, ce concept repose sur une vision globale visant à la préservation des ressources naturelles à l'échelle mondiale. Pour y parvenir, une transition écologique efficace exige la réduction des émissions de gaz à effet de serre notamment le CO<sub>2</sub> et l'économisations de l'énergie.

L'évaluation d'impact environnemental (EIE) constitue un outil indispensable pour concilier développement économique et préservation des écosystèmes, en identifiant et minimisant les effets négatifs des projets sur l'environnement. Dans le domaine de la construction, cette démarche revêt une importance cruciale elle permet d'intégrer des normes écologiques dès la conception des bâtiments et infrastructures, de réduire l'empreinte du carbone des chantiers, et d'optimiser l'utilisation des richesses naturelles. L'EIE contribue également à préserver la biodiversité, à limiter les pollutions et à promouvoir des solutions innovantes. En encadrant les projets de construction par une approche durable, elle devient ainsi un levier essentiel pour répondre aux défis climatiques tout en garantissant des aménagements viables et respectueux de l'environnement.

Dans le domaine du génie civil et de la géotechnique, l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) offre une vision globale des impacts environnementaux des projets, de l'extraction des matières premières jusqu'à la déconstruction. Cette méthode permet d'optimiser les choix techniques, notamment par l'utilisation de géomatériaux recyclés ou de techniques de stabilisation des sols à faible impact environnemental. Cependant, malgré son potentiel, l'ACV reste peu utilisée en géotechnique, avec une littérature encore limitée sur son application aux ouvrages spécifiques. Peu d'études quantifient systématiquement les impacts environnementaux des projets géotechniques.

Ce mémoire s'inscrit dans cette problématique en explorant l'ACV comme outil d'aide à la décision pour choisir l'impact environnemental le plus faible. L'étude se concentre sur un cas concret : cas de la stabilisation d'un glissement de terrain au niveau de la rocade côtière de Ghazaouet, initialement stabilisé par un mur de soutènement en béton fondé sur pieux.

L'objectif de ce travail est double : d'une part, évaluer techniquement la stabilisation d'un glissement de terrain à proximité d'une route, ensuite évaluer les impacts environnementaux de la solution initiale proposée par le bureau d'étude et une variante proposée dans ce PFE visant à assurer un bon drainage des eaux par des géotextiles. D'autre part, proposer une méthodologie reproductible pour intégrer l'ACV dans les pratiques des ingénieurs géotechniciens. Pour y parvenir, le mémoire est structuré en cinq chapitres. Le premier chapitre établit un cadre théorique en définissant les spécificités des cycles de vie des ouvrages géotechniques, notamment les routes, les murs de soutènement et les géosynthétiques. Le deuxième chapitre détaille les principes méthodologiques de l'ACV, conformément aux normes ISO 14040-44, en insistant sur les indicateurs clés et les outils logiciels utilisés.

Les chapitres 3 et 4 forment le volet appliqué de cette étude, prenant pour cadre l'analyse du cas concret du mur de soutènement de Ghazaouet. Le troisième chapitre offre une description approfondie du projet tel qu'il a été réalisé, en exposant les caractéristiques techniques et opérationnelles. Le quatrième chapitre, introduit une solution innovante reposant sur l'utilisation de géosynthétiques. Cette approche est complétée par une modélisation ACV permettant une quantification rigoureuse des impacts environnementaux des matériaux utilisés pour les deux variantes étudiées, offrant ainsi une base comparative solide pour l'évaluation de leur performance écologique.

Le cinquième chapitre examine l'efficacité de la variante retenue en termes de stabilité, tout en interprétant et comparant les gains et les résultats d'ACV des deux variantes. Le mémoire se termine par une conclusion générale et donne quelques perspectives.

# **Partie Bibliographique**

---

# Chapitre 1

## Synthèse bibliographique sur le cycle de vie

L'évaluation environnementale a pour objectif de concevoir des plans-programmes et des projets avec un impact réduit sur l'environnement. Ce processus d'amélioration intègre les considérations environnementales à toutes les étapes de vie d'un projet, depuis sa conception jusqu'à sa démolition, ainsi qu'à la mise en œuvre d'un programme ou plan, afin de limiter leurs effets néfastes. Elle adopte une approche transversale, prenant en compte l'environnement dans son ensemble, y compris le climat, terres, sol, biodiversité, santé humaine, paysage, eau, patrimoine culturel, bien matériels, etc.

Egalement les interactions entre ces divers facteurs. L'évaluation permet d'identifier les impacts environnementaux négatifs tels que les risques pour les espèces protégées, la destruction d'habitats naturels, la pollution sonore, les émissions de gaz polluants et de particules, la détérioration du paysage visuel, ainsi que la pollution des eaux souterraines et superficielles et la production de déchets. En étant mise en œuvre dès le début du projet, l'ACV facilite la définition de mesures visant à éviter, réduire ou compenser ces impacts (CGDD, 2022).

## 1.1 Définition du cycle de vie

Le cycle de vie d'un produit englobe toutes les activités liées à sa fabrication, son utilisation, son transport et son élimination. Ce cycle est souvent illustré par une série d'étapes, allant de la production (extraction et récolte des matières premières) à l'élimination finale (recyclage ou mise au rebut) (ACTU, 2025).

Ce parcours se compose de plusieurs phases dans son évolution (CIRAIG, 2022) :

- L'extraction et la transformation des matières premières ;
- La fabrication ;
- L'emballage et la distribution ;
- L'utilisation ;
- La fin de vie.

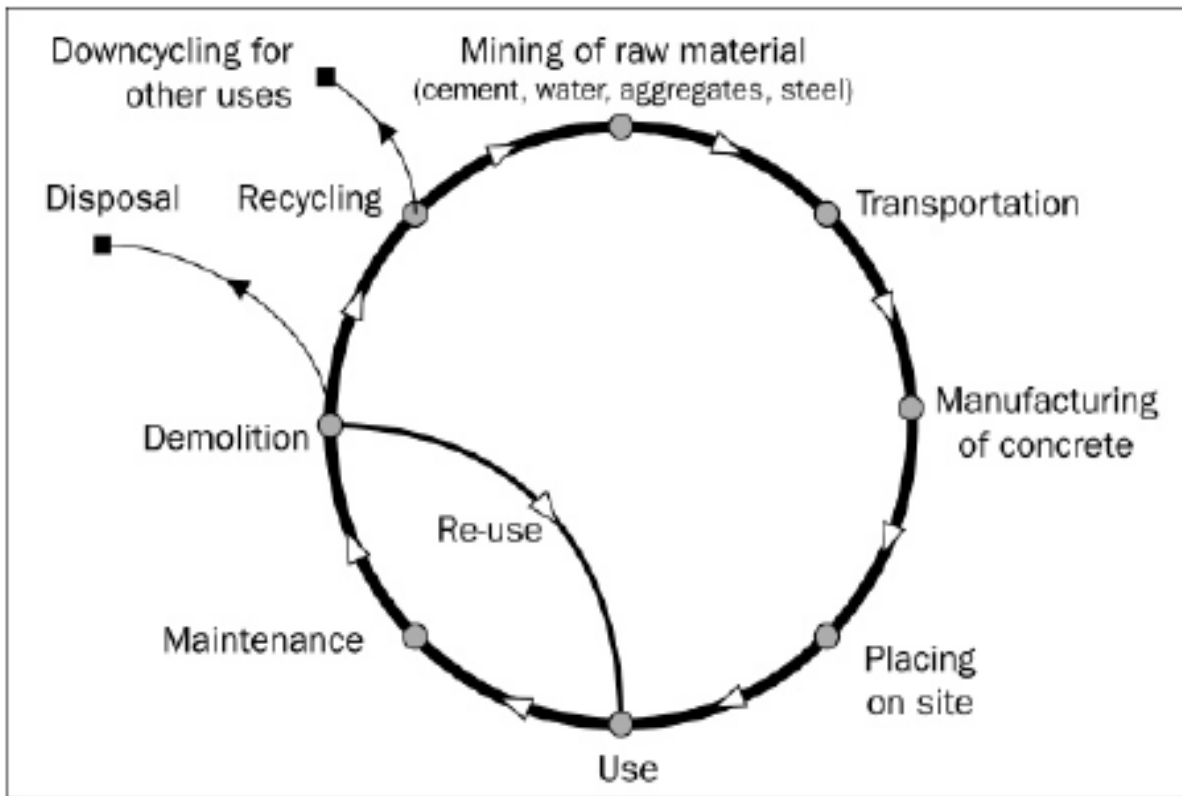


Figure 1.1 : Cycle de vie d'un béton (Josa, et al., 2005)

## 1.2 Le cycle de vie d'un ouvrage en génie civil

### 1.2.1 Fabrication des matériaux, matériels et engins de chantier

Cette phase comprend plusieurs étapes essentielles (Guiraud, 2019) :

- **Extraction des matières premières** : Cela inclut la collecte des granulats pour le béton, ainsi que du calcaire et de l'argile pour le ciment.
- **Production des matériaux** : Cette étape concerne la création d'éléments nécessaires à la construction, tels que les coffrages, les huiles de décoffrage et les produits de cure.
- **Fabrication, transformation et assemblage** : Cela englobe la fabrication de béton en centrale BPE, ainsi que le montage ou l'assemblage des matériaux.
- **Fabrication des matériels et engins de chantier** : Cette étape concerne les équipements utilisés pour réaliser l'ouvrage, à condition que leur utilisation sur le chantier soit significative par rapport à leur durée de vie.
- **Évaluation des impacts** : L'analyse prend en compte tous les effets, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la sortie des produits ou matériels de leur site de production.

Elle inclut également les transports nécessaires pour acheminer les différents composants de leurs sites d'origine vers le site de production final.

On distingue plusieurs catégories :

- **Matériaux structurants** : armatures de précontrainte, bétons, poutres en acier ou en bois, armatures passives, etc.
- **Équipements de l'ouvrage** : exemple pour un pont, la couche de roulement, l'étanchéité, les appareils d'appui, les joints de chaussée et les dispositifs de retenue.
- **Matériaux nécessaires à la construction** : étaielements, coffrages, huiles de décoffrage, etc.
- **Matériels et engins de chantier** utilisés pour l'exécution de l'ouvrage.

### 1.2.2 Transport des matériaux, matériels et engins de chantier

Cette étape englobe tous les transports indispensables pour garantir la livraison des produits depuis chaque site de fabrication jusqu'au chantier. Cela inclut les matériaux structurants, les équipements et les éléments requis pour la construction de l'ouvrage, ainsi que le transport des matériels et engins de chantier depuis les dépôts des entreprises jusqu'au site de construction (Guiraud, 2019).

### 1.2.3 Réalisation de l'ouvrage

La réalisation de l'ouvrage englobe toutes les phases nécessaires à sa construction sur le site, ainsi que les ressources humaines et matérielles déployés durant toute la durée d'exécution.

Cette étape se divise en plusieurs phases pour distinguer les travaux effectués par l'entreprise générale présente sur le site tout durant la période du chantier et ceux réalisés par divers sous-traitants qui interviennent de manière ponctuelle (Guiraud, 2019).

Elle comprend également :

- **Moyens généraux spécifiques au chantier** : consommation d'eau, éclairage et chauffage des structures de chantier, installations temporaires etc.
- **Impacts des déplacements des véhicules** : cela inclut les mouvements de tous les intervenants sur le chantier, notamment le personnel et l'encadrement (entreprise générale et sous-traitants) depuis leur domicile ou le siège de leur entreprise.
- **Consommation de carburant et d'énergie** : cela concerne tous les matériels et engins utilisés sur le chantier, tels que les groupes électrogènes, les pompes à béton et les grues mobiles.

### 1.2.4 Vie de l'ouvrage

Durant toute sa durée d'utilisation, qui peut atteindre jusqu'à 100 ans pour un ouvrage d'art, l'ouvrage nécessite un ensemble d'interventions régulières. Ces interventions sont classées en trois catégories : l'entretien courant, la surveillance et l'entretien spécialisé incluant les petites réparations (Guiraud, 2019).

### 1.2.5 Fin de vie

Cette étape concerne, par exemple, la déconstruction de l'ouvrage à la fin de son cycle de vie, ainsi que le transport des matériaux vers un centre de valorisation et leur stockage (Guiraud, 2019).



Figure 1.2 : Cycle de vie d'un ouvrage en génie civil (Guiraud, 2019)

### 1.3 Cycle de vie en géotechnique

La définition des limites du système est essentielle pour décrire les étapes du cycle de vie et les processus inclus ou exclus dans le champ d'application. Cela garantit la précision de la collecte des données et des résultats de l'ACV. En géotechnique, ces limites sont particulièrement spécifiques à chaque projet, car l'étendue des opérations varie selon les conditions du site.

Les étapes généralement considérées par les praticiens pour un ouvrage géotechnique, depuis sa conception jusqu'à sa fin de vie, incluent (De Melo, et al., 2024) :

- **Acquisition des matières premières** : Cela englobe les processus nécessaires pour extraire des matériaux tels que le minerai de fer, les agrégats, le charbon et le pétrole brut, par des méthodes comme l'exploitation minière ou le forage.
- **Traitement des matériaux** : Cette étape implique les processus industriels qui transforment les matières premières en produits finis souhaités.
- **Transport** : Elle concerne le déplacement des matériaux ainsi que la mobilisation de l'équipement sur le site du projet.
- **Fabrication ou construction** : Cela inclut les activités spécifiques au projet sur le site, comme le forage de trous, l'enfoncement de pieux pour les fondations profondes, le compactage ou l'injection de coulis pour améliorer le sol, ainsi que l'application de techniques de bio-géotechnique.

- **Maintenance** : Cette phase concerne l'utilisation du produit et son entretien, comme la réparation des enrochements et le renforcement des sections de barrages. Elle est souvent omise dans de nombreux modèles, car les structures souterraines, telles que les fondations, ne nécessitent généralement pas d'entretien après achèvement.
- **Fin de vie** : Cela englobe les processus qui interviennent après l'expiration de la durée de vie du système, y compris la démolition et la gestion des déchets. Cette étape est également fréquemment exclue des modèles, car de nombreux systèmes géotechniques peuvent rester en place indéfiniment.

## 1.4 Le cycle de vie d'un projet de route

Les infrastructures routières sont cruciales pour le développement économique et la mobilité. Leur cycle de vie, allant de la conception à la démolition, doit prendre en compte des critères de durabilité, de résistance mécanique et d'impact environnemental. Ce processus est régulé par des normes techniques et des pratiques internationales.

Cette analyse explore les cinq étapes clés du cycle de vie d'une route (RF, 2021) (figure 1.3) :

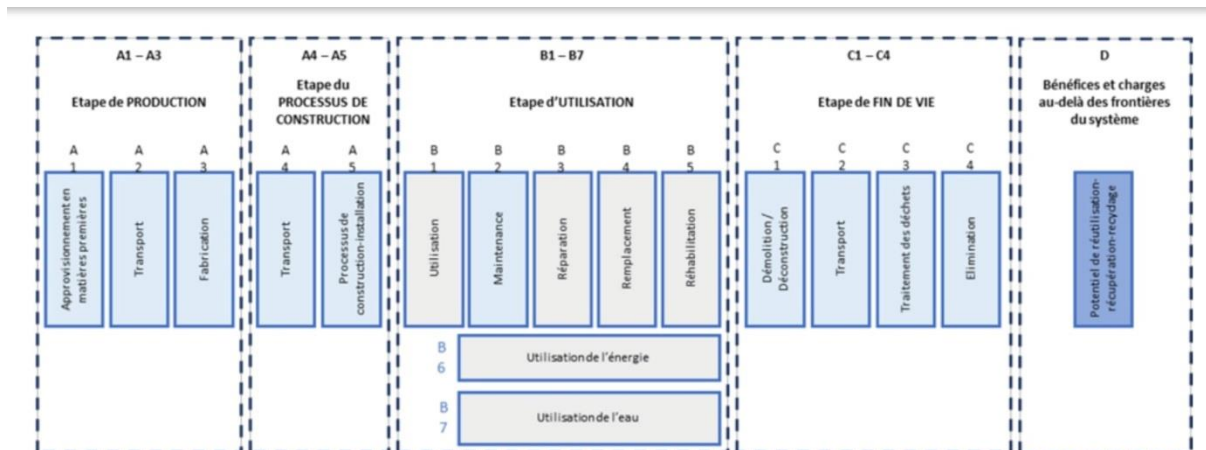


Figure 1.3 : Cycle de vie d'un projet routier (RF, 2021)

### 1.4.1 Étape de production

Les phases de production comprennent :

- **Extraction et traitement des matières premières pour l'enrobé** :
  - Bitume ;
  - Granulats (massifs et alluvionnaires) ;

- Agrégats d'enrobés ;
- Autres matières nécessaires (filler, colorant, etc.).
- **Transport des matières premières vers les sites de production d'enrobé.**
- **Production de l'enrobé**, qui inclut :
  - Consommation d'énergie pour les malaxeurs, le stockage du bitume et le fonctionnement des équipements ;
  - Consommation et rejets d'eau ;
  - Utilisation de consommables (huiles, dégriffants, etc.) ;
  - Transport et élimination des déchets.
- **Production et acheminement des matériaux pour les autres couches de la chaussée.**

#### 1.4.2 Étape de construction

- **Transport vers le chantier :**

L'étape de transport couvre le déplacement de l'enrobé et des autres composants de la chaussée vers le chantier, ainsi que les émissions de fumées de bitume lors du chargement des camions.

- **Installation sur le chantier :**

L'étape d'installation concerne l'utilisation d'engins pour appliquer les différentes couches de matériaux, ainsi que les émissions de fumées de bitume pendant cette mise en œuvre.

#### 1.4.3 Étape de vie en œuvre

L'étape d'utilisation inclut la maintenance de la surface, comprenant :

- Production, transport et mise en œuvre des matériaux nécessaires à l'entretien (Enduit Superficiel d'Usure Monocouche et Béton Bitumineux Semi Grenu) ;
- Utilisation d'engins de chantier tels que raboteuse, niveleuse, compacteur mixte, répandues gravillonneur synchrone (PATA), finisseur et compacteur tandem ;
- Gestion des déchets générés, notamment les fraisats d'enrobé. Aucun processus n'est prévu pour les autres étapes d'utilisation.

#### 1.4.4 Étape de fin de vie

Dans ce scénario, la chaussée est complètement démolie, et les matériaux récupérés sont envoyés vers des filières de recyclage ou d'élimination.

#### 1.4.5 Potentiel de recyclage, réutilisation, récupération

Cette étude considère que les couches de fondation, de base et de roulement de la chaussée sont recyclées, au moins partiellement, à la fin de leur vie. De plus, les fraisats d'enrobés ainsi que les déchets générés par l'entretien et la mise en œuvre de la chaussée (pour l'acier uniquement) sont également recyclés.

### 1.5 Le cycle de vie d'un ouvrage de soutènement

Les ouvrages de soutènement du sol sont des systèmes techniques destinés à soutenir et retenir le sol, afin de prévenir l'effondrement et l'érosion. Divers types de structures peuvent être employés pour atteindre cet objectif, notamment les murs de soutènement et les murs en terre renforcée mécaniquement (MSE). Les murs de soutènement se déclinent sous plusieurs formes, telles que les murs-poids, les murs cantilevers et les murs de pieux, et sont généralement des structures rigides fabriquées à partir de divers matériaux (Berg, et al., 2009) (Rajapakse, 2016). En raison de leur nature structurelle, l'utilisation de nouveaux matériaux et la construction de ces murs peuvent engendrer des impacts environnementaux significatifs (Balasbaneh, et al., 2020).



Figure 01.4 : Photo d'un mur de soutènement à Ghazaouet

Prise par Bentalha & Medjahdi le 24 février 2025

### 1.5.1 Étapes du cycle de vie d'une structure de soutènement

Ces étapes sont proposées par Egloffstein, et al. (2011) :

- Excavation des matières premières (par exemple, terre, sable, gravier, pierre à chaux, argile, minerai de fer, pétrole brut).
- Transport des matières premières vers le chantier ou le fabricant.
- Production des produits primaires (par exemple, ciment, acier de construction).
- Transport des produits primaires vers le fabricant ou le chantier de construction.
- Fabrication des produits (par exemple, le béton).
- Transport des produits vers le chantier de construction.
- Intégration des produits (par exemple, distribution, fraisage, consolidation, pose).

### 1.5.2 Effets néfastes

Le secteur de la construction représente 10 % de la main-d'œuvre mondiale et génère 7 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (Heerten, 2012). De plus, il est responsable d'une consommation d'énergie élevée, de grandes quantités de déchets solides, de pollution interne et externe, ainsi que d'importants dommages environnementaux. Par exemple, en 2004, l'industrie de la construction aux États-Unis a consommé 122 millions de tonnes de ciment et 1 240 millions de tonnes de sable et de gravier (Kahhat, et al., 2009) (Kelly, et al., 2006). Les quantités considérables d'énergie consommée et de déchets générés par l'utilisation de ces matériaux soulèvent des préoccupations environnementales (Kahhat, et al., 2009).

## 1.6 Le cycle de vie des géosynthétiques

Les géosynthétiques sont largement utilisés dans diverses applications de génie civil, où ils remplacent ou améliorent souvent l'utilisation d'autres matériaux (Nancey, et al., 2013).

### 1.6.1 Fabrication

- **Matériaux** : un géosynthétique est un produit composé d'au moins un constituant en polymère synthétique (comme le polyéthylène, le polyamide, le polyester ou le polypropylène) ou en matériau naturel. Il se présente sous forme de nappe, de bande ou de structure tridimensionnelle, voir figure 1.5 (CFG, 2022).

- **Procédés** : les géosynthétiques se divisent en deux grandes catégories :
  - Géotextiles et produits similaires, qui sont des matériaux perméables.
  - Géomembranes et produits associés, qui sont principalement imperméables (CFG, 2022).



Figure 1. 5 A: Différents types des géosynthétiques (CFG, 2022)



**Géotextile Alvéolaire**



**Géocomposites**



**Géotextile de protection**

*Figure 1.5 B : Différents types des géosynthétiques (CFG, 2022)*

- **Impact environnemental** : les géosynthétiques contribuent à diminuer les émissions de carbone tout au long de leur cycle de vie. Cet objectif est atteint par plusieurs moyens :
  - Réduction des travaux de terrassement nécessaires sur site avant l'installation des géosynthétiques, ce qui limite l'utilisation d'équipements et leurs émissions associées.
  - Diminution de l'épaisseur du béton requise grâce à l'utilisation de géosynthétiques, entraînant une réduction des émissions de carbone sur site et du carbone incorporé.
  - Minimisation des réparations grâce à des fondations plus solides et de meilleure qualité, assurant des installations durables (Geoworks, 2025).

### 1.6.2 Transport et stockage

Lors des opérations de transport, de chargement et de déchargement, il est essentiel de prendre toutes les mesures nécessaires pour éviter d'endommager chaque rouleau. Il est important de respecter les précautions suivantes lors du stockage des géosynthétiques sur le chantier (CFG, 2017) :

- Disposer d'une aire plane, propre et sèche, dotée d'une portance suffisante et maintenue à l'abri de l'eau pour permettre la circulation des engins, débarrassée de tout matériau ou outil.
- Ne pas superposer les rouleaux de géosynthétiques de manière à créer des porte-à-faux ou en couches croisées.
- Pour des raisons de sécurité, il est interdit de superposer les rouleaux de géosynthétiques à plus de trois niveaux.
- Protéger les géosynthétiques, en particulier les géotextiles et produits similaires, des rayons du soleil et des intempéries lors d'un stockage prolongé (supérieur à 15 jours).

### 1.6.3 Utilisation et Maintenance

- **Durée de vie** : pour garantir une durée de vie appropriée des géosynthétiques en fonction de leur utilisation dans l'ouvrage, les concepteurs doivent considérer les facteurs environnementaux qui affectent leur durabilité. Le vieillissement des géosynthétiques exposés est principalement causé par le rayonnement ultraviolet, la chaleur et l'oxygène, ainsi que par d'autres éléments climatiques tels que l'humidité et la pluie.

De plus, une caractérisation adéquate des matériaux en contact avec les géosynthétiques est essentielle pour évaluer correctement leur durabilité lorsqu'ils sont enfouis. Les facteurs à prendre en compte incluent le pH, la présence d'oxygène, l'agressivité chimique, la teneur en eau, la température, la matière organique et les micro-organismes (CFG, 2017).

- **Fonctions principales des géosynthétiques :**

<b>Fonction</b>	<b>Descriptifs</b>	<b>Application</b>
Séparation	Prévenir le mélange de sols ou de matériaux de remblai de nature différente.	Routes, autoroutes, voies ferrées, pistes forestières
Filtration	Maintenir le sol ou d'autres particules sous l'effet de forces hydrodynamiques tout en permettant le passage de fluides à travers un géotextile ou un produit similaire.	Routes, voies ferrées, barrages, tranchées drainantes, protection des rivages et des berges
Drainage	Collecter et transporter les eaux souterraines et/ou d'autres fluides à travers un géotextile ou un produit apparenté	Drainage sous dallage, drainage sous remblai, drainage dans les installations de stockage de déchets (ISD)
Renforcement	Améliorer les propriétés mécaniques du sol ou d'autres matériaux de construction en utilisant le comportement en résistance déformation d'un géotextile	Remblai sur sols compressibles, murs de soutènement, renforcement de talus.
Étanchéité	Utiliser un géosynthétique pour prévenir ou limiter la migration de fluides.	bassins, ouvrages souterrains
Protection	Limiter les dommages localisés à un élément ou à un matériau en utilisant un géotextile.	Protection des Géomembranes dans diverses applications
Lutte contre l'érosion de surface	Utiliser un géotextile pour éviter ou réduire les mouvements de sol ou d'autres particules à la surface.	Talus de déblai, pentes naturelles
Anti-fissuration	Retarder l'apparition de fissures en surface en utilisant un géotextile	Chaussées, aéroports

Tableau 1.1 : Les principales fonctions des géosynthétiques (CFG, 2022)

### **1.6.4 La fin de vie**

Dans le cadre de l'économie circulaire, il est essentiel de planifier la fin de vie d'un produit. Comme mentionné précédemment, la durée de vie des géosynthétiques peut atteindre plusieurs décennies, voire plus de 100 ans. Cependant, pour certaines applications temporaires, leur utilisation peut générer des déchets si l'ouvrage est déconstruit. Dans ces situations, les géosynthétiques remplissent généralement les critères de recyclabilité, sauf pour quelques matériaux composites rares et complexes qui ne peuvent pas être séparés de leurs composants d'origine. Les principaux défis liés au recyclage des géosynthétiques en fin de vie incluent la distance entre le projet et l'éventuelle installation de recyclage, ainsi que le nettoyage requis avant le recyclage (Fontana, 2022).

## **1.7 Cycle de vie dans le cas des glissements de terrains agricoles**

### **1.7.1 Définition des glissements de terrain**

Les glissements de terrains sont l'un des principaux risques naturels désignant un ensemble varié de mouvements de masse, incluant notamment les chutes de pierres, les coulées de débris peu profondes et les ruptures profondes de pentes. Ces phénomènes résultent principalement de l'action de la gravité sur des pentes raides, bien qu'ils puissent être influencés par d'autres facteurs (Dai, et al., 2002). Ils surviennent dans divers matériaux géologiques, et sous différentes conditions climatiques, sur des pentes aussi bien graduelles que raides, comme observé dans la région de la mer Noire orientale. Leur occurrence et leur intensité dépendent de l'interaction complexe entre la géomorphologie locale, les propriétés des sols ou roches, et les déclencheurs naturels ou anthropiques (Yalcin, 2007) (Khochni, et al., 2023).

### **1.7.2 Facteur déclencheur**

Les glissements de terrain résultent de l'interaction complexe de facteurs géologiques, climatiques, anthropiques et sismiques. Sur le plan géologique, l'altération profonde des roches réduit leur résistance au cisaillement (diminution de la cohésion  $C$  et de l'angle de frottement  $\varphi$ ) et augmente leur perméabilité, les rendant vulnérables aux contraintes gravitationnelles. L'érosion par les rivières, glaciers ou vagues océaniques crée des pentes instables, tandis que la saturation des sols due aux fortes pluies ou à la fonte des neiges affaiblit leur cohésion.

Les dynamiques climatiques, comme les précipitations intenses ou la fonte rapide, exacerbent la pression interstitielle et l'infiltration d'eau, aggravant les risques de rupture. Les activités humaines jouent également un rôle clé : la surcharge des pentes (accumulation de matériaux, constructions, déchets) et les perturbations des terrains (barrages, routes, canaux) déséquilibrent les masses naturelles.

Enfin, les secousses sismiques déstabilisent les pentes, même à faible intensité. Ces mécanismes combinés soulignent l'interdépendance des processus naturels et anthropiques dans le déclenchement des glissements de terrain (Dai, et al., 2002) (Luzi, et al., 1999) (Moon, et al., 2004).

### 1.7.3 Conséquences

- **Pertes économiques directes et indirectes :**

- Pertes annuelles élevées : Dans la région orientale de la mer Noire en Turquie, les glissements de terrain entraînent des pertes économiques annuelles estimées à 80 millions de dollars, principalement dues aux dommages matériels (habitations, infrastructures industrielles, réseaux de transport) (Yalcin, 2007).
- Coûts directs : Réparation des infrastructures endommagées (routes, maisons, usines). Exemple : En Écosse (2004 et 2007), les coûts directs variaient entre 400 000 et 1,7 million de livres sterling par événement.
- Coûts indirects : Pertes de productivité, fermetures d'entreprises, impacts sur le tourisme. En Écosse, ces coûts atteignaient 180 000 à 1,4 million de livres sterling (Winter, et al., 2016).

- **Impacts environnementaux**

- Modifications topographiques : Les glissements de terrain massifs altèrent durablement la morphologie et la topographie des zones touchées, rendant certaines zones inhabitables ou inexploitable (Yalcin, 2007).

- **Conséquences socio-économiques**

- Pertes humaines : Entre 1900 et 2022, les glissements de terrain ont causé 72 000 décès dans le monde (EM-DAT, 2023).
- Déplacements de population : Destruction de maisons et de biens personnels, obligeant les habitants à quitter leurs terres (Yalcin, 2007).

### 1.7.4 Glissement de terrain agricole

Les glissements de terrain dans les zones agricoles, représentent un risque majeur pour les populations et les écosystèmes. Leur occurrence est étroitement liée à la déforestation intensive, elle-même motivée par l'expansion des activités agricoles. En effet, le remplacement des forêts par d'autres plantations fragilise les sols, réduisant leur capacité à résister à l'érosion et aux précipitations (Dai, et al., 2002). Cette transformation des paysages accroît significativement la propension aux glissements de terrain, surtout dans les régions aux reliefs accidentés.

- **Impacts directs et indirects**

Les dommages directs des glissements de terrain se manifestent par (Saptutyningasih, et al., 2023) :

- Une perte partielle ou totale des récoltes ;
- Une diminution progressive de la productivité des sols ;
- Une dépréciation de la valeur des terres agricoles.

Les dommages indirects concernent quant à eux la perturbation des activités économiques et des services écosystémiques (Saptutyningasih, et al., 2023) :

- Interruption des cycles agricoles (labourage, récolte) ;
- Réduction des zones de pâturage ;
- Dégradation des infrastructures locales (chemins, systèmes d'irrigation) ;
- Affaiblissement des services publics, tels que l'accès à l'eau ou à l'énergie.
- Conséquences socio-économiques

Dans les régions rurales dépendantes de l'agriculture et de l'élevage, ces glissements de terrain exacerbent la pauvreté et la vulnérabilité. La dégradation des sols entraîne une baisse durable des rendements, menaçant la sécurité alimentaire et les revenus des ménages. De plus, la perte de terres cultivables pousse souvent les populations à exploiter des zones encore plus fragiles, créant un cercle vicieux de déforestation et d'instabilité environnementale (Saptutyningasih, et al., 2023).

## **1.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons abordé le cycle de vie de manière générale, avant de mettre en lumière les spécificités des cycles de vie des ouvrages géotechniques étudiés, notamment les routes, les ouvrages de soutènement, les géosynthétiques et les glissements de terrain. Ces analyses soulignent l'importance d'une ingénierie géotechnique durable, qui passe par une analyse approfondie de leurs cycles de vie. Dans cette optique, le chapitre suivant présentera en détail l'ACV.

## **Chapitre 2**

# **Synthèse bibliographique sur l'analyse du Cycle de Vie (ACV)**

**L'**ACV est une méthode clé pour évaluer les impacts environnementaux des produits, de la production à leur fin de vie. Ce chapitre en résume les principes, normes (ISO 14040-44) et outils, tout en soulignant ses forces et limites. À travers une revue critique de la littérature, il offre un cadre théorique pour discuter son rôle dans l'éco-conception et la durabilité.

## 2.1 Définition de l'analyse de cycle de vie (ACV)

L'ACV est une méthode scientifique et normalisée au niveau international, régie par les normes ISO 14040:2006 (révisée en 2020) et ISO 14044:2006 (révisée en 2018 et 2020) (Rousseaux, 2022). Elle permet une évaluation complète et quantitative des impacts environnementaux potentiels d'un processus, d'un service, d'un produit ou d'une activité humaine tout au long de son cycle de vie (Rousseaux, 2022) (Maes, 2015). Ce cycle comprend toutes les étapes du cycle de vie du service ou du produit, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie (y compris la fabrication, la production, l'utilisation et l'élimination), y compris la collecte des consommations d'énergie, des flux de matières premières et de leur rejet dans l'environnement (ISO 14040, 2006) (ISO 14044, 2006).

L'ACV diffère des autres méthodes d'évaluation environnementale par deux caractéristiques principales :

- Une approche systématique du cycle de vie, évitant le transfert de pollution entre les étapes ou les catégories d'impact (Guineheuc, 2012).
- Mesure précise des impacts, basée sur des données scientifiques et des indicateurs normalisés (Rousseaux, 2022).

Elle intègre également le concept d'unité fonctionnelle, qui recentre l'analyse sur la fonction remplie par le produit ou le service, facilitant la comparaison de solutions alternatives et l'innovation respectueuse de l'environnement (Guineheuc, 2012).

En plus de déterminer l'empreinte environnementale globale d'un système, l'ACV fournit des informations puissantes pour éclairer les décisions stratégiques des entreprises, des décideurs politiques et des consommateurs, dans le but d'atteindre la durabilité (Esperanza, et al., 2025). Ces données aident aussi à guider les choix commerciaux, politiques et personnels durables (Ecochain, 2024).

Son cadre méthodologique rigoureux, aligné sur les normes ISO, assure la cohérence et la comparabilité des résultats, tout en encourageant une vision holistique des enjeux environnementaux.

## 2.2 Cadre méthodologique de l'ACV

Le cadre méthodologique de l'ACV, tel que défini dans les normes **ISO 14040** et **ISO 14044**, repose sur une approche systématique et standardisée pour évaluer les impacts environnementaux d'un produit, d'un service ou d'un processus tout au long de son cycle de vie. Les 4 principales étapes méthodologiques sont les suivantes :

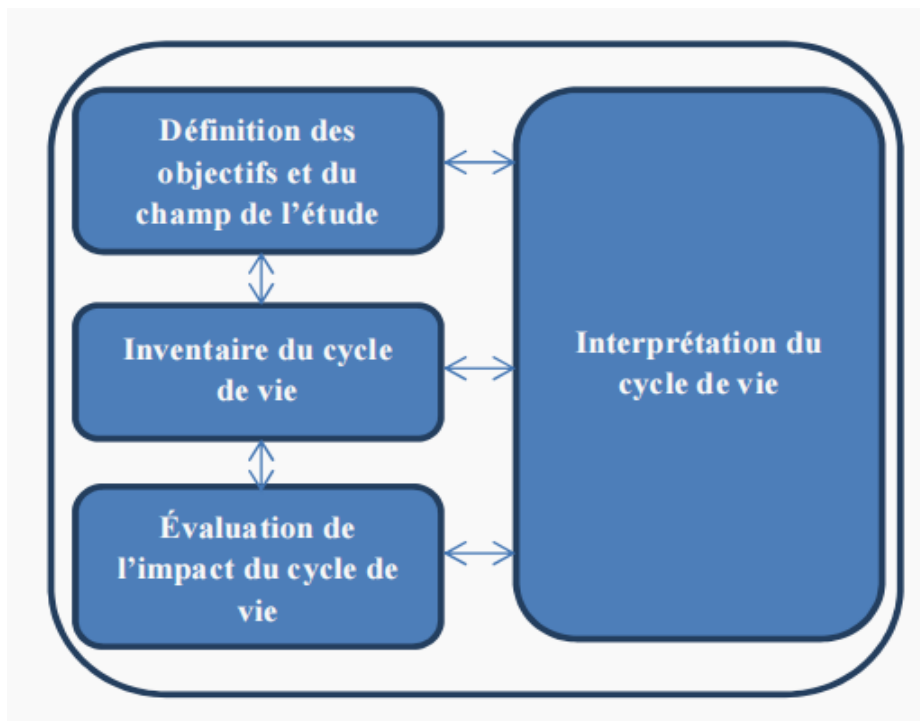


Figure 2.1 : Les phases de l'ACV (Léonard, et al., 2019)

### 2.2.1 Définition des objectifs et du champ de l'étude

L'étape de définition des objectifs et le champ de l'étude est une étape structurelle de l'ACV, déterminant sa validité, sa pertinence et sa conformité aux normes internationales (ISO 14044, 2006).

Cette étape, souvent appelée cadrage, nécessite une rigueur méthodologique pour éviter les biais, les omissions ou les interprétations erronées des résultats (Rousseaux, 2022).

Les objectifs et la portée de l'étude du cycle de vie doivent également être clairement définis dès le départ. Toutefois, en raison de la nature itérative de l'ACV, il peut être nécessaire de redéfinir le champ de l'étude en cours de la réalisation de l'ACV (ISO 14044, 2006).

### 1.1.1.1. Objectifs de l'étude

Les objectifs doivent être formulés avec précision et répondre aux questions clés suivantes (ISO 14044, 2006) :

- **Application prévue** : Quel est l'objectif concret de l'ACV ? S'agit-il d'améliorer le processus ou de comparer des produits ou des services concurrents ?

Dans l'ACV, il y a deux objectifs principaux :

- Comparaison des étapes d'un même cycle de vie pour identifier les étapes ayant le plus grand impact sur l'environnement ou le transfert de pollution (Rousseaux, 2022).
  - La comparaison de plusieurs cycles de vie alternatifs, évalués sur la base d'une seule fonction ou d'un seul service, permet d'identifier les systèmes humains présentant les meilleures performances environnementales (Rousseaux, 2022).
- **Motivation** : Pourquoi faisons-nous cette étude ? Par exemple, répondre aux réglementations, réduire l'empreinte carbone ou innover dans les approches de conception environnementale.
  - **Public cible** : Qui sera informé des résultats ? Les attentes varient selon que les personnes impliquées sont des décideurs politiques, des experts scientifiques, des gestionnaires ou des consommateurs.
  - **Affirmations comparatives** : Si l'étude vise à comparer des systèmes, la norme ISO 14044 impose des exigences strictes pour éviter des conclusions trompeuses, notamment en ce qui concerne la similitude des fonctions comparées et la représentation des données (ISO 14044, 2006).

### 1.1.1.2. Le champ de l'étude

Le champ définit les limites techniques, méthodologiques et temporelles de l'ACV. Il comprend les éléments suivants, avec l'explication de certains points importantes (ISO 14044, 2006) (ISO 14040, 2006) :

- Les règles d'affectation ;
- Cadre d'interprétation ;
- Spécifications des données requises ;
- Les hypothèses ;
- Les choix de valeurs et les éléments facultatifs ;

- Le type de revue critique, le cas échéant ;
- Le type et le format du rapport spécifié pour l'étude ;
- Système de produits : une description détaillée du ou des produits étudiés, y compris leurs composants, leurs procédés de fabrication, leur utilisation et leur fin de vie ;
- Fonction : un système peut exécuter de nombreuses fonctions, mais le choix des fonctions à retenir pour l'étude dépend des objectifs et de la portée spécifique (ISO 14040, 2006) ;
- Unité fonctionnelle (UF) : c'est un indicateur de performance mesurable d'un système de produits, utilisé comme référence dans l'ACV (ISO 14044, 2006) ;

Une unité fonctionnelle est utilisée pour pondérer et standardiser les résultats de l'ACV sur une base commune, permettant ainsi de les comparer et de clarifier les options (Eco-conception, 2023) ;

- Flux de référence : Il est nécessaire de déterminer le débit de référence pour chaque système de produits, c'est-à-dire la quantité nécessaire pour assurer la fonction prévue (ISO 14040, 2006) ;
- Limites du système : Les limites du système définissent les processus à inclure dans la modélisation du cycle de vie, permettant de créer un inventaire des flux entrants et sortants et de définir le périmètre de l'étude (Eco-conception, 2023).

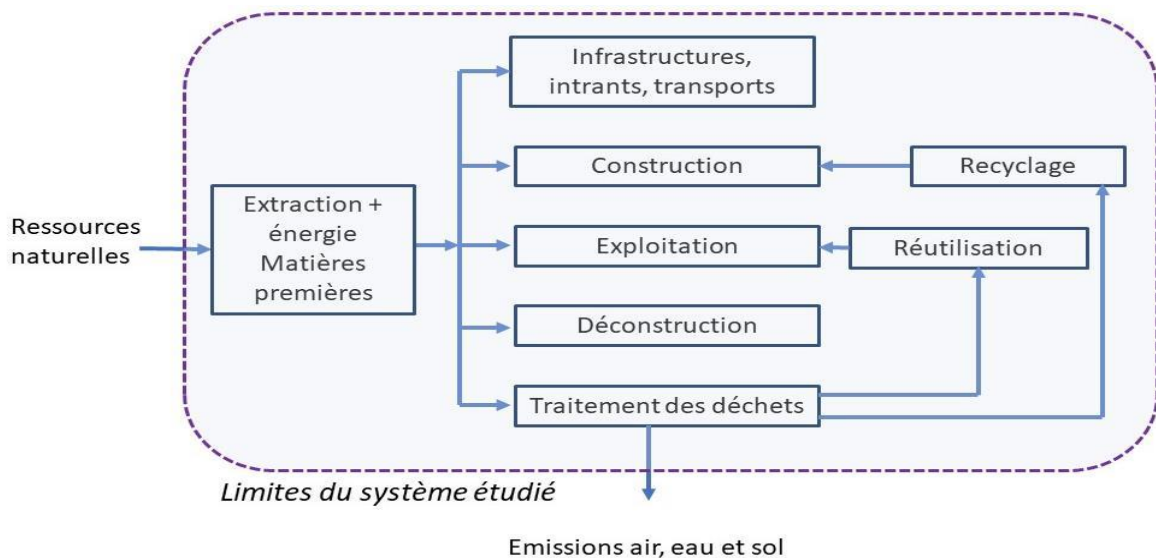


Figure 2.2 : Limitation du système analysé (Eric, et al., 2024)

Le choix des critères d'identification est crucial car il détermine la fiabilité des résultats et la capacité de l'ACV à atteindre ses objectifs (ISO 14040, 2006).

Les modèles d'ACV analysent les systèmes de produits qui représentent les éléments de base des systèmes physiques. La limite du système définit les processus primaires qui doivent être inclus, dans le but d'atteindre les flux primaires à la limite, mais sans surestimer les entrées/sorties non spécifiées. Le choix des éléments à modéliser dépend des objectifs, du périmètre de l'étude, des contraintes (données et coûts) et des critères de coupure, qui doivent être expliqués pour garantir la fiabilité des résultats. La définition des limites doit couvrir les principales étapes du cycle de vie (extraction, fabrication, transport, utilisation, fin de vie, etc.), tout en restant adaptable aux évolutions ultérieures (ISO 14040, 2006).

- Méthodologie d'évaluation d'impact : L'étude d'ACV doit inclure un ensemble soigneusement sélectionné de catégories d'impact, d'indicateurs associés et de modèles de caractérisation. Ce choix méthodologique doit rester cohérent avec les objectifs de l'étude pour assurer la cohérence de l'analyse des stocks (ISO 14044, 2006).
- Exigences de qualité des données Les exigences de qualité des données définissent les caractéristiques nécessaires de l'étude. Leur description permet d'évaluer la fiabilité des résultats et d'assurer leur interprétation appropriée (ISO 14040, 2006).

### 2.2.2 Inventaire de cycle de vie

L'inventaire du cycle de vie (ICV) constitue l'étape centrale de l'ACV, représentant 50 à 75 % du temps d'étude (Eco-conception, 2023). Cette étape difficile implique la collecte, la description et la vérification complètes des données sur les intrants, les processus, les émissions et d'autres facteurs pertinents tout au long du cycle de vie (Buyle M. , et al., 2013) (Ecochain, 2024), ainsi que la mesure systématique de tous les flux entrants et sortants du système analysé. Les praticiens s'appuient sur diverses sources de données : mesures industrielles, documents comptables, nomenclature des produits, expérience et bases de données spécialisées (Eco-conception, 2023) (Pamu Y. , et al., 2022). L'étendue de cet ensemble est déterminée par le cadre initial de l'étude (objectifs, précision requise, ressources disponibles), restant sujette à des ajustements itératifs lorsque des contraintes opérationnelles apparaissent (Eco-conception, 2023).

Cette étape représente un investissement important en ressources humaines, techniques et financières, notamment en ce qui concerne l'obtention de logiciels spécialisés et de bases de données fiables. Certaines études se limitent à cette étape d'inventaire (valeur ajoutée locale), ce qui donne lieu à des analyses utiles, quoique partielles, qui excluent l'évaluation des impacts environnementaux (Rousseaux, 2022).

La collecte de données est l'étape la plus sensible de l'analyse environnementale. Pour assurer la cohérence, il est nécessaire d'utiliser des sources homogènes, de préférence une base de données unique. Si l'obtention de certaines données s'avère trop difficile, l'évaluateur peut modifier la portée de l'ACV ou formuler des hypothèses simplificatrices, à condition que ces choix soient justifiés de manière transparente. Toutes les hypothèses et données manquantes doivent être soigneusement documentées et vérifiées (Eco-conception, 2023).

Lors de la collecte d'informations, l'évaluateur doit collecter trois catégories distinctes de données : (Eco-conception, 2023)

- Les données primaires (ou spécifiques) : sont collectées directement sur le terrain ou sont spécifiques à l'usine, mesurées ou calculées par l'entreprise responsable de l'étude ou obtenues par l'intermédiaire d'un sous-traitant.
- En revanche, les données secondaires proviennent de bases de données externes publiques et reflètent des valeurs moyennes.
- Données semi-spécifiques : Il s'agit des données par défaut, issues des bases de données internes de l'entreprise, qui peuvent être remplacées par des données primaires si nécessaire. Ces documents servent de référence principale, combinant une base interne générale avec la flexibilité d'intégrer des informations plus spécifiques.

La qualité des résultats de l'ACV dépend principalement de la précision appliquée lors de l'ACV (Labouze, et al., 1998).

Les principaux défis identifiés concernent :

- Accès à des données primaires précises
- Niveau de détail des informations disponibles
- L'adéquation des données secondaires aux spécificités du système étudié (Rousseaux, 2022) (Labouze, et al., 1998).

Ainsi, cette étape fondamentale détermine la force des conclusions ultérieures et détermine la capacité de l'étude à atteindre ses objectifs initiaux (Eco-conception, 2023) (Rousseaux, 2022) (Labouze, et al., 1998).

Pour garantir la qualité des données, quatre critères principaux ont été pris en considération :

- Cohérence : vérification de l'uniformité systématique des sources ;
- Exhaustivité : vérifier l'exhaustivité des données (par exemple, les émissions supprimées) ;
- Précision : distinction entre les données mesurées, calculées ou estimées ;
- Représentation : adéquation aux contextes géographiques, temporels et technologiques (Eco-conception, 2023).

### 2.2.3 Evaluation de l'impact de cycle de vie

L'analyse d'impact du cycle de vie (ACVI) est une étape fondamentale dans l'analyse environnementale des produits et des systèmes. Cette phase consiste à identifier les impacts environnementaux et la consommation de ressources à partir des données de l'ICV (Buyle M. , et al., 2013).

Le processus repose sur un principe de base : regrouper différentes émissions en impacts environnementaux uniformes (Ecochain, 2019). Cette approche permet de transformer des données hétérogènes en catégories d'effets comparables, facilitant ainsi l'interprétation des résultats. Par exemple, différentes substances qui contribuent au changement climatique sont exprimées en équivalents dioxyde de carbone (Ecochain, 2019).

Le processus ACVI est considéré comme l'étape la plus technique de l'ACV et suscite des débats scientifiques en raison de la complexité des mécanismes d'impact et des méthodes de caractérisation utilisées (Rousseaux, 2022). Le cadre normatif ISO distingue trois étapes : la classification et la description (obligatoires) et l'évaluation (facultative en fonction des objectifs de l'étude) (Rousseaux, 2022) (Buyle M. , et al., 2013).

L'ACVI remplit plusieurs fonctions essentielles :

- Crée un lien entre les données d'inventaire et les impacts environnementaux potentiels
- Fournit les éléments essentiels à l'interprétation des résultats.
- Permet de modifier à plusieurs reprises les objectifs initiaux de l'étude (ISO 14040, 2006).

Mais cette étape requiert une attention particulière aux choix méthodologiques, qui peuvent introduire un certain degré de subjectivité. Par conséquent, la transparence dans la documentation des hypothèses et des paramètres utilisés est essentielle pour garantir la crédibilité des résultats (ISO 14040, 2006).

L'ACVI peut être résumé dans les éléments suivants (figure 2.3) :

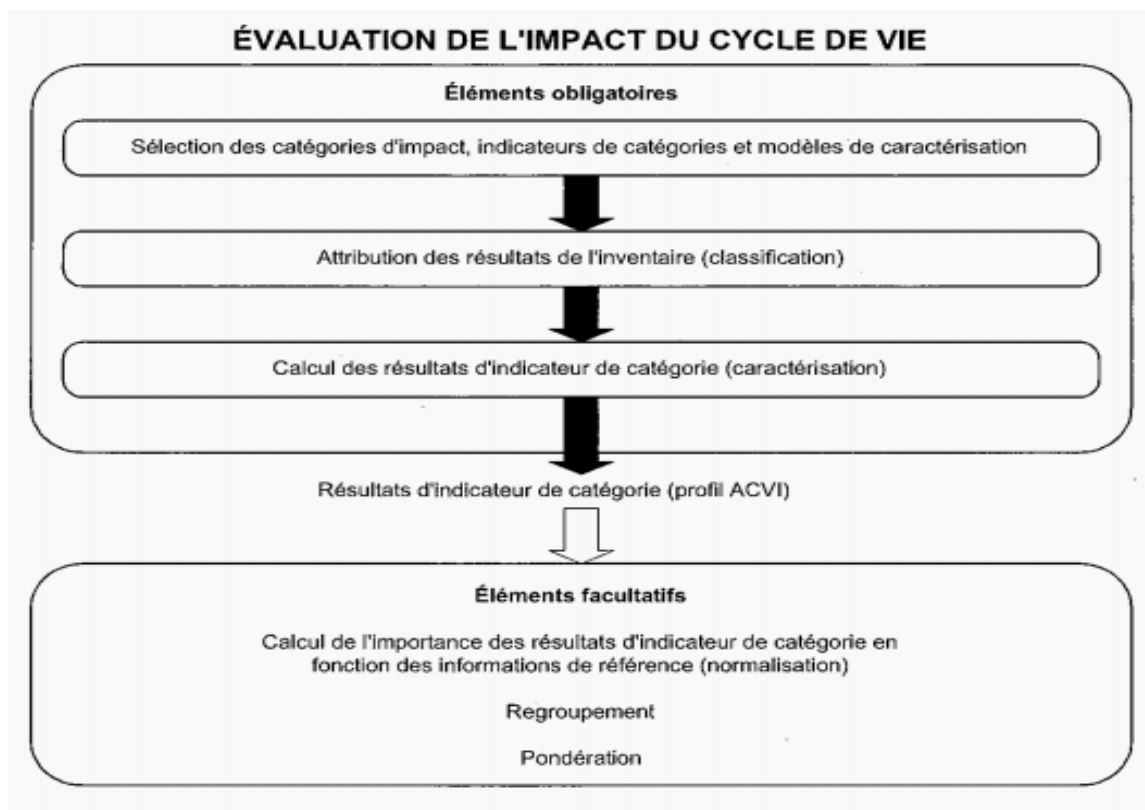


Figure 2.3 : Éléments de l'ACVI (ISO 14040, 2006)

### 2.2.3.1 Éléments obligatoires

L'étape d'ACVI doit inclure trois éléments obligatoires (ISO 14044, 2006) :

- Sélection
- Classification
- Caractérisation

#### 2.2.3.1.1 Sélection des catégories d'impact, des indicateurs de catégorie et des modèles de caractérisation

Tout choix de catégories d'impact, d'indicateurs de catégorie et de modèles de caractérisation dans l'ACV doit être documenté et référencé, y compris les nouvelles définitions. Les noms doivent être spécifiques et descriptifs. La sélection doit être justifiée et compatible avec les objectifs et la portée de l'étude, et couvrir une gamme complète de questions environnementales liées au système étudié.

Le mécanisme écologique et le modèle de caractérisation qui relie les résultats de l'ICV aux indicateurs de catégorie doivent être décrits, ainsi que leur pertinence par rapport aux objectifs

de l'étude. Les résultats des stocks (autres que les flux de masse et d'énergie) doivent être identifiés et liés aux indicateurs correspondants.

La plupart des analyses du cycle de vie utilisent des classes et des modèles existants, mais si de nouvelles classes et de nouveaux modèles sont nécessaires, les mêmes exigences s'appliquent. Les modèles de caractérisation décrivent la relation entre les scores de l'indice du cycle de vie, les indicateurs et les impacts finaux, permettant de déduire les facteurs de caractérisation.

Pour chaque catégorie d'impact, les éléments requis sont :

- L'identification des impacts finaux,
- La définition de l'indicateur de catégorie,
- L'identification des résultats de l'ICV pertinents,
- La sélection du modèle et des facteurs de caractérisation.

Cette approche facilite l'attribution des résultats des stocks et l'évaluation de la validité scientifique du modèle. L'indicateur peut être sélectionné à n'importe quelle étape du mécanisme environnemental. L'importance écologique évalue la relation entre l'indicateur et l'impact final (par exemple, relation forte, moyenne ou faible).

Des recommandations supplémentaires :

- Reconnaissance internationale : Les catégories, les indicateurs et les modèles doivent être approuvés au niveau international.
- Représentation : Les catégories doivent couvrir tous les effets des entrées/sorties sur les effets finaux.
- Minimiser les choix subjectifs : limiter les hypothèses et les choix de valeur.
- Évitez le double comptage (sauf si cela est justifié par les objectifs de l'étude).
- Validité scientifique : Les modèles doivent être basés sur des mécanismes écologiques clairs et des observations reproductibles.
- Champ de validité : Déterminer les limites scientifiques et techniques des modèles.
- Importance environnementale : les indicateurs doivent refléter les conséquences des impacts.

La diversité spatiale et temporelle, ainsi que le devenir et le transport des matériaux, doivent être pris en compte dans les modèles.

L'importance environnementale doit être déterminée en fonction de :

- La capacité de l'indicateur à refléter les conséquences des résultats de l'inventaire.
- Intégrer les données environnementales dans le modèle, notamment :
  - La nature des effets finaux,
  - L'importance relative des changements,
  - Aspects spatiaux (surface, échelle),
  - Aspects temporels (durée, continuité, réversibilité),
  - Incertitude dans les liens entre les indicateurs et les impacts finaux.

#### **2.2.3.1.2 Attribution des résultats sélectionnés (classification) de l'ICV aux catégories d'impact :**

L'attribution des résultats de l'ICV aux catégories d'impact doit suivre les principes suivants, à moins que les objectifs et la portée de l'étude ne nécessitent une approche différente :

- Attribution exclusive : les résultats ICV associés à une seule catégorie d'impact doivent lui être attribués.
- Identifier les contributions multiples :
  - Mécanismes parallèles : certains résultats d'ACV peuvent se rapporter à plusieurs catégories d'impact (par exemple, le SO<sub>2</sub> contribue à la fois à la santé humaine et à l'acidification).
  - Mécanismes séquentiels : Certains résultats peuvent affecter successivement plusieurs catégories (par exemple, le NO, qui est impliqué dans la formation et l'acidification de l'ozone troposphérique).

#### **2.2.3.1.3 Calcul des résultats d'indicateurs de catégorie (caractérisation) :**

Le processus de caractérisation consiste à convertir les scores l'ICV en unités communes et à les regrouper dans la même catégorie d'impact, à l'aide de facteurs de caractérisation. Le résultat final est un indicateur numérique.

#### **Exigences méthodologiques**

La méthode de calcul doit être clairement définie et documentée, y compris le choix des valeurs et les hypothèses appliquées.

Si les données de l'ICV sont manquantes ou de qualité insuffisante pour atteindre les objectifs de l'étude, il est nécessaire de procéder comme suit :

- Recommencez à collecter des données,
- Modifier les objectifs et le champ de l'étude.

### **Facteurs influençant la qualité des résultats**

L'utilité des indicateurs dépend :

- Précision, validité et caractéristiques des modèles et facteurs descriptifs.
- Le nombre et le type d'hypothèses simplificatrices et de choix de valeurs, qui varient en fonction :
  - Catégories d'impact,
  - Zone géographique.

Il existe souvent un compromis entre la simplicité et la précision des modèles.

La qualité des indicateurs peut varier en fonction :

- Complexité des mécanismes environnementaux entre les limites du système et l'impact final.
- Propriétés spatiales et temporelles (par exemple, persistance d'une substance dans l'environnement).
- Relation dose-effet.

### **Amélioration des résultats**

L'intégration de données supplémentaires sur l'état de l'environnement renforcerait la pertinence et l'utilité des indicateurs. Cette question peut également être abordée dans l'analyse de la qualité des données.

### **Données après caractérisation**

Après la description (et avant les étapes facultatives), les données du système produit se présentent sous trois formes :

- Profil d'ACVI : Compilation des résultats des indicateurs par catégorie d'impact.
- Résultats d'inventaire non attribués : flux primaires non attribués à des

catégories d'impact.

- Données hors flux primaires : informations qui ne sont pas liées aux flux primaires.

### **2.2.3.2 Éléments facultatifs de l'ACVI**

En plus des éléments obligatoires de l'ACVI, des éléments optionnels peuvent être utilisés en fonction des objectifs et de la portée de l'étude (ISO 14044, 2006) :

#### **2.2.3.2.1 Normalisation**

La normalisation permet d'évaluer l'importance relative des résultats de l'indicateur par rapport à la référence. Utile pour :

- Vérifier les écarts,
- Communiquer l'ampleur des impacts,
- Prise en charge d'autres méthodes (agrégation, pondération, interprétation).

Le calcul consiste à diviser le résultat de l'indicateur par une valeur de référence, telle que :

- Flux totaux pour une zone (globale, régionale, nationale, locale),
- Flux par habitant,
- Scénario de référence.

Le choix de la référence doit prendre en compte les échelles spatiales et temporelles du mécanisme environnemental.

La normalisation peut affecter les conclusions de l'ACVI. Il est donc conseillé d'utiliser plusieurs références et d'effectuer une analyse de sensibilité.

#### **2.2.3.2.2 Regroupement**

Le regroupement consiste à organiser les catégories d'impact en groupes prédéfinis, en :

- Tri nominal (par exemple, par flux entrants/sortants, portée géographique),
- Classification hiérarchique (ex : priorité élevée, moyenne, faible).

Cette étape dépend de choix de valeurs subjectifs, qui peuvent varier selon les acteurs. Par conséquent, des résultats différents peuvent émerger des mêmes données.

### **2.2.3.2.3 Pondération**

La pondération transforme les résultats des indicateurs à l'aide de facteurs numériques (basés sur les préférences) et peut impliquer leur agrégation.

Il y a deux manières possibles :

- Transformez les résultats (bruts ou normalisés) à l'aide de facteurs de pondération.
- Résultats pondérés agrégés dans toutes les catégories.

Comme pour l'agrégation, la pondération repose sur des choix subjectifs, qui peuvent conduire à des résultats variables selon les acteurs. Il est donc conseillé d'explorer plusieurs méthodes de pondération et de réaliser une analyse de sensibilité.

Les données brutes ou normalisées (avant pondération) doivent rester accessibles, afin de :

- Maintenir les règlements et les informations pour les décideurs,
- Permettre une compréhension complète des résultats et de leurs implications.

### **2.2.3.3 L'analyse de la qualité des données d'ACVI supplémentaire**

Des méthodes analytiques complémentaires peuvent être utilisées pour mieux évaluer la portée, l'incertitude et la sensibilité des résultats de l'ACVI (ISO 14044, 2006), afin de :

- Détecter les différences importantes,
- Identifier des résultats d'ICV négligeables,
- Diriger le processus d'analyse itérative du cycle de vie.

Le choix des techniques dépend du niveau de précision requis pour atteindre les objectifs de l'étude (ISO 14044, 2006). Les techniques disponibles :

- Analyse de gravité : c'est une méthode statistique pour déterminer quelles données ont le plus contribué aux résultats. Elle permet aussi de prioriser les investigations sur des éléments clés.
- Analyse d'incertitude : évalué comment l'incertitude des données et les hypothèses affectent la fiabilité des résultats.
- Analyse de sensibilité : étudier l'impact des différences méthodologiques et de données sur les résultats.

Selon la nature itérative de l'ACV, ces analyses peuvent conduire à une révision de l'étape d'ICV pour améliorer la qualité des données. (ISO 14044, 2006)

Ces méthodes peuvent utiliser des informations extérieures à l'étude, à condition que leur utilisation soit justifiée et documentée. Sa mise en œuvre doit être cohérente avec les objectifs de l'ACV et totalement transparente, avec une documentation complète des méthodes et des calculs. (ISO 14044, 2006)

#### **2.2.3.4 ACVI utilisée dans des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public**

Les principales exigences sont (ISO 14044, 2006) :

- Ensemble complet d'indicateurs :
  - Utiliser un ensemble suffisant d'indicateurs de catégorie.
  - Comparaisons effectuées indicateur par indicateur
- Limites des données comparatives :
  - Le critère de supériorité environnementale globale ne peut constituer la seule base pour déclarer une supériorité ou une équivalence environnementale globale.
  - Informations supplémentaires requises pour compenser les restrictions, notamment :
    - Choix de valeurs subjectifs
    - Manque de données spatiales/temporelles
    - Non prise en compte des seuils et des relations dose-effet
    - Différences de précision entre les catégories d'impact
  - Les résultats n'évaluent pas :
    - Effets réels sur les impacts finaux
    - Dépassement des limites ou des marges de sécurité
    - Risques environnementaux

- Critères d'indexation :
  - Validité scientifique :
    - Mécanisme environnemental identifiable
    - Ou observation expérimentale reproductible
  - Importance environnementale :
    - Liens clairs vers les effets finaux
    - Prise en compte des aspects spatiaux et temporels
  - Une reconnaissance internationale est recommandée
- Interdictions : Aucune pondération autorisée
- Analyses obligatoires : La sensibilité et l'incertitude doivent être systématiquement évaluées.

### **2.2.3.5 Limitation de l'ACVI**

L'ACVI ne couvre que les problèmes environnementaux identifiés dans les objectifs et le champ de l'étude et ne constitue donc pas une évaluation complète de tous les impacts environnementaux du système de produits analysé.

En outre, l'ACVI ne permet pas toujours d'établir des distinctions claires entre les catégories d'impact et les résultats des indicateurs pour différentes alternatives de systèmes de produits. Cette limitation s'explique par plusieurs facteurs :

- Modèles de caractérisation inadéquats : développement limité des modèles d'évaluation d'impact, ainsi que des analyses de sensibilité et d'incertitude (ISO 14040, 2006).
- Limites de l'ICV :
  - Définition incomplète des limites du système, exclusion de certains processus primaires ou de certaines entrées/sorties en raison de coupures ou de données manquantes.
  - Qualité insuffisante des données d'ICV en raison de l'incertitude ou des différences dans les règles d'attribution et d'agrégation.
  - Difficultés à collecter des données d'inventaire représentatives pour chaque catégorie d'impact (ISO 14040, 2006).

L'absence de dimensions spatiales et temporelles dans les résultats de l'inventaire augmente l'incertitude dans les résultats de l'ACVI, et cette incertitude varie en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque catégorie d'impact (ISO 14040, 2006).

Enfin, il n'existe pas de méthodologies universellement acceptées permettant de relier de manière précise et cohérente les données d'inventaire aux impacts environnementaux potentiels. De plus, les modèles d'évaluation des catégories d'impact sont à différents stades de développement.

## **2.2.4 Interprétation de cycle de vie**

L'interprétation est la phase d'ACV qui combine les résultats de l'inventaire et de l'évaluation d'impact (ou simplement les résultats de l'inventaire pour les études du cycle de vie), qui doit fournir des résultats cohérents avec les objectifs de l'étude tout en formulant des conclusions, en identifiant les limites et en proposant des recommandations. Ses résultats sont traduits en conclusions et recommandations à destination des décideurs, en ligne avec les objectifs initiaux, et visent à présenter les résultats de l'ACV de manière claire et cohérente (ISO 14040, 2006).

La phase d'interprétation du cycle de vie d'une étude d'ACV comprend trois éléments principaux :

### **2.2.4.1 Identifier les problèmes importants** (ISO 14044, 2006)

L'objectif est de structurer les résultats pour identifier les éléments clés, en tenant compte :

- Données d'inventaire (énergie, émissions, déchets).
- Catégories d'impact (changement climatique, utilisation des ressources).
- Contributions majeures des étapes spécifiques du cycle de vie (transport, production d'énergie).

Quatre types d'informations sont requis :

- Résultats des phases ICV et ACVI (avec qualité des données).
- Choix méthodologiques (allocation, limites du système, modèles d'impact).
- Valeurs prédéterminées (objectifs et portée de l'étude).
- Rôles des parties prenantes et résultats d'une éventuelle revue critique.

### **2.2.4.2 Vérification** (ISO 14044, 2006)

La vérification vise à améliorer la fiabilité des résultats en :

- Contrôle de complétude : s'assurer que toutes les données nécessaires sont disponibles.
- Contrôle de sensibilité : évaluation de l'effet de l'incertitude sur les résultats.
- Vérification de cohérence : vérifiez la cohérence des hypothèses, des méthodes et des données.

#### **2.2.4.3 Conclusions, limites et recommandations (ISO 14044, 2006)**

Les conclusions devraient être :

- Être cohérent avec les objectifs initiaux.
- Intégrer les enjeux significatifs, les vérifications méthodologiques et les limitations.
- Proposer des recommandations pertinentes aux décideurs.

### **2.3 Spécificités des ouvrages géotechniques**

Les premières analyses du cycle de vie réalisées sur des ouvrages géotechniques ont permis d'apporter un premier retour d'expérience :

- Unicité des ouvrages géotechniques : contrairement aux produits manufacturés standardisés, chaque ouvrage géotechnique constitue un unique prototype avec des caractéristiques spécifiques liées à son environnement géologique. Cette singularité implique :
  - Des solutions techniques adaptées à chaque contexte géotechnique ;
  - Des impacts environnementaux variables selon les conditions du site.
- Durée de vie exceptionnellement longue : la durée de vie de ces structures est longue, voire très longue ( $\geq 100$  ans). Ce qui influence considérablement leur ACV :
  - Impacts différés sur de longues périodes (maintenance, durabilité) ;
  - Incertitudes sur les scénarios de fin de vie.
- Défis de la déconstruction et fin de vie : une partie des ouvrages géotechniques ne peut pas être déconstruite en fin de vie de l'ouvrage supporté. C'est le cas par exemple des pieux en béton coulés dans le sol.
- Impacts des phases provisoires : les travaux et structures nécessaires (injection, traitement des sols) pour les phases provisoires peuvent avoir un impact significatif.
- Interaction complexe avec le milieu naturel : l'ACV des ouvrages géotechniques

doit intégrer :

- Les impacts des modifications du milieu naturel ;
- La consommation d'espace et les perturbations écologiques ;
- Les interactions hydrologiques à long terme.

Il est souvent difficile de définir l'unité fonctionnelle car les limites entre les ouvrages géotechniques et la structure supportée ne sont pas forcément pertinentes. Il est donc essentiel d'avoir une vision globale de la conception (vision holistique), au niveau de l'unité fonctionnelle, pour éviter d'augmenter les impacts environnementaux d'une structure sous-optimale (Eric, et al., 2024) (Antoinet, et al., 2025).

## 2.4 Les outils et les logiciels de l'analyse du cycle de vie pour les ouvrages géotechniques

L'ACV appliquée aux ouvrages géotechniques s'appuie sur des outils et des logiciels intégrant des modèles avancés pour analyser les flux de matières, d'énergie et de transport, en s'appuyant sur des bases de données environnementales spécifiques au secteur de la construction. De nombreuses solutions logicielles sont adaptables aux spécificités des projets géotechniques parmi eux nous citons :

- **Ecow** (intégré à Orbow) : pour l'évaluation du carbone dans les travaux géotechniques (Terrasol, 2017);
- **One Click LCA** : compatible BIM, vous permettant d'extraire des quantités à partir de modèles pour analyser les impacts, y compris sur les structures géotechniques (One Click LCA, 2025) ;
- **Pleiades ACV** : utilisez la base de données Ecoinvent pour des analyses multicritères incluant les infrastructures et les bâtiments (ZUBA ÉNERGIES, 2025) ;
- **SimaPro** et **GaBi** : solutions expertes pour des scénarios complexes, mais nécessitant une formation (Altermaker, 2015-2025) (Leaf, 2024) ;
- **OpenLCA** : un logiciel gratuit développé par GreenDelta, il offre une alternative économique à l'ACV, bien qu'il soit moins convivial que les solutions payantes. Soutenu par la communauté internationale, il est particulièrement adapté aux structures aux budgets limités mais requiert une certaine expertise (OpenLCA, 2025).

Pour compléter ces outils, les bases de données suivantes sont nécessaires :

- **INIES** : base de données FDES française, utilisée par des programmes comme AGLO et One Click LCA (AGLO, 2024).

- **Ecoinvent** : une référence mondiale pour les données d'inventaire, intégrée à Pleiades ACV et SimaPro (Altermaker, 2015-2025).
- **Base IMPACTS** : base de données gratuite en français, mise à jour régulièrement (Altermaker, 2015-2025).

Le choix d'une plateforme d'ACV dépend de trois éléments essentiels :

- finalité : objectif de l'analyse
- budget : ressources financières disponibles
- Expertise technique de l'utilisateur en matière d'ACV (Leaf, 2024).

## 2.5 Limites de l'ACV

Bien que l'ACV soit un outil puissant pour évaluer les impacts environnementaux, elle présente plusieurs limites importantes. D'autre part, la modélisation est souvent compliquée par le manque de données disponibles dans les bases de données existantes, ce qui rend difficile la représentation précise des processus (Eco-conception, 2023) (Bpifrance, 2025) (Sablayrolles, 2013) . En revanche, la collecte exhaustive des flux entrants et sortants sur l'ensemble du cycle de vie s'avère particulièrement difficile, ce qui peut compromettre la fiabilité des résultats (Eco-conception, 2023) (Bpifrance, 2025) (Pollutec, 2023).

Une limitation majeure est l'incomplétude des impacts évalués : l'ACV ne permet pas de quantifier certains impacts environnementaux tels que la pollution lumineuse, les impacts paysagers, le bruit ou les odeurs, et l'impact des ondes (Eco-conception, 2023) (Gendre, 2025) (UVED, 2012). De plus, la méthode repose sur des hypothèses qui conduisent à un certain degré de subjectivité, notamment dans le choix des limites du système et des données prioritaires (Eco-conception, 2023) (Gendre, 2025) (Eric, et al., 2024).

Il existe d'autres limitations pratiques à son application :

- Exigences en matière de compétences techniques avancées pour une interprétation correcte des résultats (Pollutec, 2023) (Gendre, 2025);
- La variation géographique des données empêche l'extrapolation entre les régions (Sablayrolles, 2013) ;
- Ressources importantes requises (temps, coûts et accès à des logiciels spécialisés) (Sablayrolles, 2013) (Rousseaux, 2022) (Vade, et al., 2025) ;
- Les indicateurs sont encore perfectibles, notamment en ce qui concerne les impacts non climatiques (Rousseaux, 2022) ;

---

Enfin, l'ACV n'intègre pas les dimensions économiques et sociales, nécessitant des outils complémentaires pour évaluer la durabilité complète (Eric, et al., 2024) (Ghosn, et al., 2021). Ces limites démontrent que l'ACV, bien que précieuse, doit être utilisée en tenant compte de ses limites méthodologiques et est souvent combinée à d'autres méthodes d'évaluation environnementale.

## **2.6 Conclusion**

En conclusion, cette revue bibliographique a permis clarifier l'ACV comme un outil essentiel pour une évaluation environnementale rigoureuse et multicritère. Malgré ses limites et complexité, l'ACV reste incontournable pour guider les stratégies d'éco-conception et les politiques de durabilité. Dans le chapitre suivant, nous passerons de la théorie à la pratique en appliquant cette méthodologie à une étude de cas concrète.

# **Partie Pratique**

---

## Chapitre 3

### Présentation du projet

**C**e chapitre vise à présenter de manière détaillée le projet étudié en mettant en lumière ses différents aspects techniques et contextuels. Nous commencerons par exposer la problématique à laquelle le projet répond, suivie d'une description précise du projet lui-même. Ensuite, nous analyserons la situation du projet sous plusieurs angles : sa situation géographique, sa topographie, ainsi que le contexte géologique, hydrogéologique et géotechnique. Enfin, nous aborderons la sismicité de la région, un élément clé pour la compréhension des risques et des contraintes liés au projet.

### 3.1 Position du problème

Le site se composait à l'origine d'un terrain agricole large et en pente. L'entreprise chargée de la construction de la pénétrante de Ghazaouet a commencé les travaux d'ouverture des fouilles pour les piles de pont, et le sol enlevé a été stocké en haut d'une colline à proximité de ce terrain surchargeant ainsi le terrain. Après, les travaux de la rocade côtière ont également commencé, et pendant le terrassement du tronçon situé entre la RN99 et la RN98, une butte a été enlevée, ce qui a provoqué l'apparition de fissures et de glissements de terrain. Donc, la direction des travaux publics a décidé d'adopter un projet de soutènement de la pente afin de stabiliser le terrain et d'arrêter les effondrements qui menacent la sécurité de la route et de ses usagers.

### 3.2 Projet étudié

Ce projet concerne l'analyse de la stabilité de glissement d'un talus qui se trouve sur un tronçon routier qui est situé entre la RN 99 et la RN 98 de la rocade côtière à Ghazaouet, s'étendant de pk1+00 à pk1+150 (SET Sétif, 2022). L'étude a été réalisée par la société d'Étude Technique de Sétif BET SET-SETIF, tandis que les essais géotechniques ont été conduits par le laboratoire LTPO de Tlemcen. Les travaux de construction ont été exécutés par l'entreprise SEROR.

La zone identifiée comme instable s'étend sur une longueur d'environ 200 mètres (dans le sens parallèle à l'axe de la rocade côtière) et une largeur d'environ 65 mètres (perpendiculaire à l'axe), couvrant une superficie totale de 7500 m<sup>2</sup> (figure 3.1). Ce glissement, qui affecte le talus en déblai, a été détecté lors des travaux de déblaiement en mars 2021, marqué par l'apparition d'une fissure de quelques centimètres. Cette fissure commence au pied du talus et s'étend jusqu'à son sommet, atteignant une longueur de 100 mètres sur le talus amont, d'où les travaux sur la route sont arrêtés au niveau de la section qui est face au glissement (SET Sétif, 2022).

Le BET SET-SETIF a donc opté pour une solution consistant, en premier lieu, en un reprofilage avec adoucissement de la pente du talus, puis en la réalisation d'un mur de soutènement en béton armé. Ce mur est caractérisé par un voile constitué d'éléments préfabriqués d'une hauteur variant de 5,20 m à 7,60 m, avec une épaisseur comprise entre 30 cm et 50 cm en tête, et une largeur de 1,49 m pour chaque élément. Ces éléments sont posés sur deux types de semelles : la première d'une longueur de 6 m, et la seconde de 5 m, partageant toutes deux une largeur de 4,5 m et une épaisseur de 1 m. Chaque semelle supporte ainsi 3 éléments préfabriqués de mur (3 MDS) (Plan n°04A, 2023).

Ce mur (figure 3.2) sera fondé sur des pieux de 1.2 m de diamètre et 15 m de longueur ancrés dans les formations marneuses, l'espacement entre eux varie entre 2.6 m et 3.6 m horizontalement en fonction de la semelle au-dessus. Chaque semelle sera reposée sur 4 pieux, avec une couche de 10 cm de béton de propreté (Plan n°03, 2023).

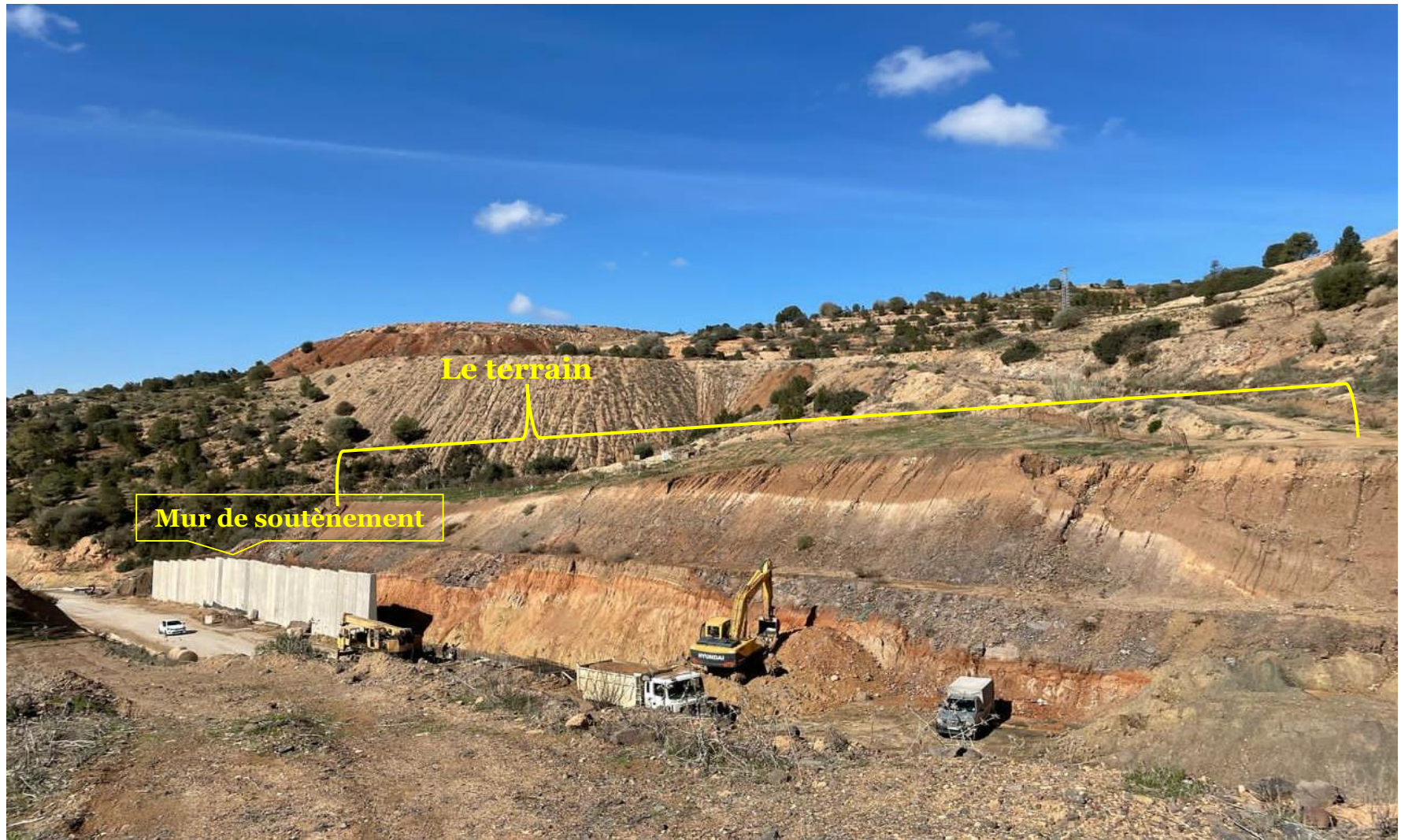


Figure 3.1 : Photo du projet global

Prise par Bentalha & Medjahdi le 24 février 2025

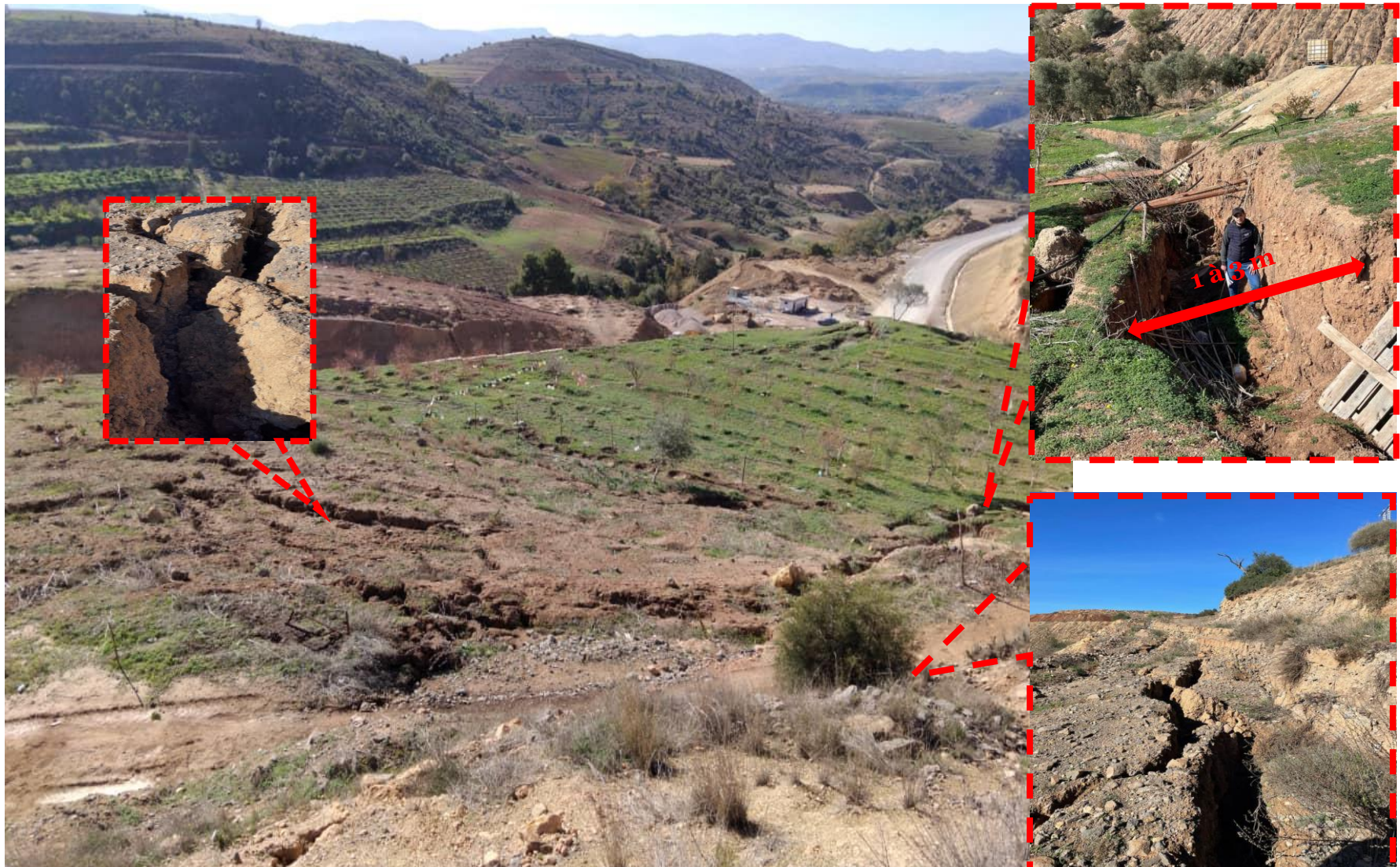


Figure 3.2 : Photos du terrain endommagé

Prise par Bentalha & Medjahdi le 24 février 2025



*Figure 3.3 : Photos de l'ouvrage  
Prise par Bentalha & Medjahdi le 3 février 2025*

### 3.3 L'histoire du glissement

Au début, le terrain était composé de terre agricole en pente, que le propriétaire exploitait pour cultiver diverses plantes et arbres (figure 3.4).

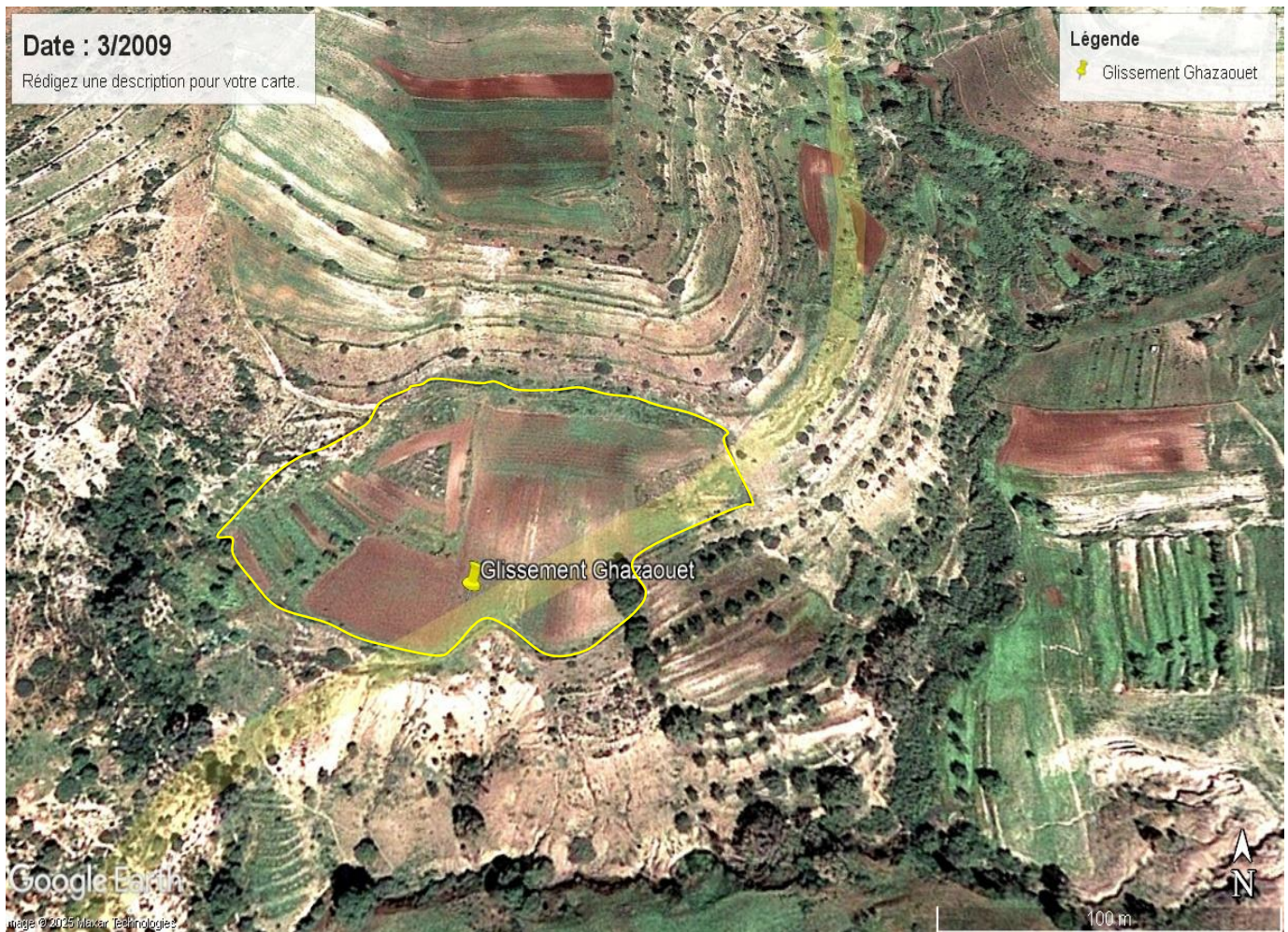


Figure 03.4 : Photo satellitaire de la zone d'étude en mars 2009 (Google Earth , 2023)

Et plus tard, la pénétrante de Ghazaouet, qui passait à côté de ce terrain, a été lancée. De grands travaux d'excavation ont été entrepris pour poser les fondations du pont, qui fait partie de la pénétrante et l'extraction a entraîné d'importants volumes des déblais.

Ces déblais ont ensuite été stockés au sommet d'un plateau situé à proximité du terrain, cela augmente les charges appliquées au terrain (figure 3.5).



Figure 03.5 : Photo satellitaire de la zone d'étude en mars 2016 (Google Earth , 2023)

Après la fin des travaux de la pénétrante de Ghazaouet dans la région, les travaux de terrassement de la future rocade côtière ont commencé (figure 3.6), et comme la route traversait le terrain en son milieu, d'importantes quantités de sol ont dû être excavées, entraînant la suppression d'une butte et des perturbations dans la stabilité du terrain.

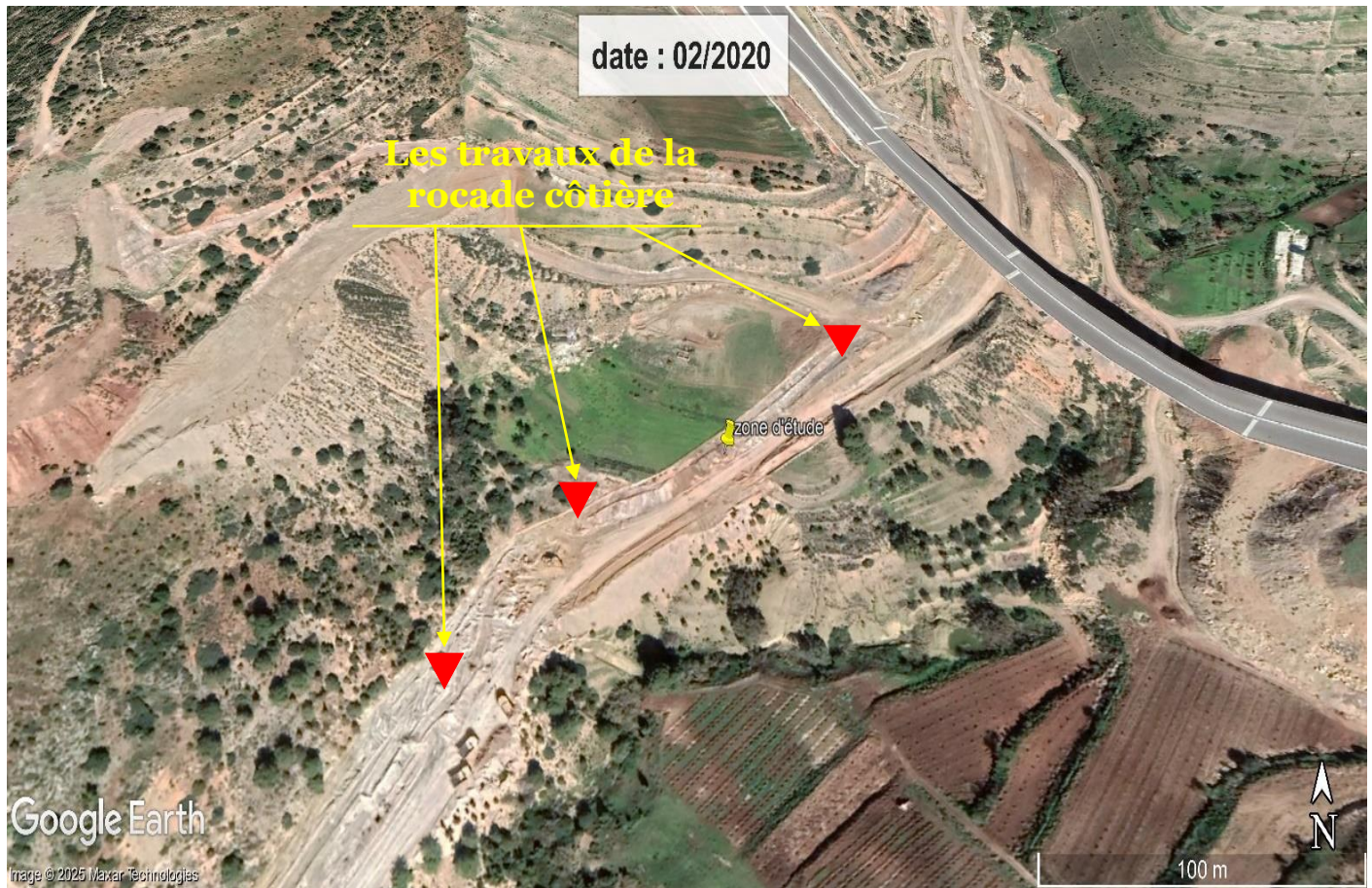


Figure 3.6 : Photo satellitaire de la zone d'étude en février 2020 (Google Earth , 2023)

À la suite de ces travaux de terrassement en grand masse, il a été constaté l'apparition de fissures partant de la base du talus jusqu'à son sommet, ainsi que des effondrements du sol. C'est ce qui a poussé la direction des travaux publics en mars 2022 à demander une étude pour stabiliser le talus afin de remédier l'instabilité de terrain sur ce tronçon routier (figure 3.7) (SET Sétif, 2022).



Figure 3.7 : Photo sur terrain de l'apparition des fissures sur le talus (SET Sétif, 2022)

Quelques mois après l'achèvement du tronçon de route menacé par le glissement de terrain, et avant le début des travaux de soutènement du talus, des soulèvements se sont produits sur la route le long du talus. Ces déformations ont perturbé la circulation et exposé les usagers à des risques d'accidents. Par conséquent, ce tronçon a été fermé. Malheureusement, nous n'avons pas pu obtenir ou trouver de photos illustrant cette situation.



Figure 3.8 : Photo satellitaire de la zone d'étude en juillet 2022 (Google Earth , 2023)

Après que le bureau d'études SET-SETIF a terminé l'étude du projet, l'entreprise SEROR de Tlemcen a commencé les travaux de traitement du glissement de terrain sur la rocade côtière le 19 septembre 2023. (fiche-de-présentation-glisement) Cette intervention a inclus des travaux de forage de puits dépassant 15 mètres de profondeur et le reprofilage de la pente à l'aide de divers engins lourds. Avec les cycles de sécheresse et d'humidité liés aux changements de saisons, le problème s'est aggravé : les fissures, dont l'épaisseur ne dépassait initialement que quelques centimètres, se sont élargies pour atteindre dans certaines zones plus d'un mètre. De plus, les effondrements se sont produits continuellement pendant l'avancement des travaux, ce qui a accru les défis et rendu la tâche beaucoup plus difficile.

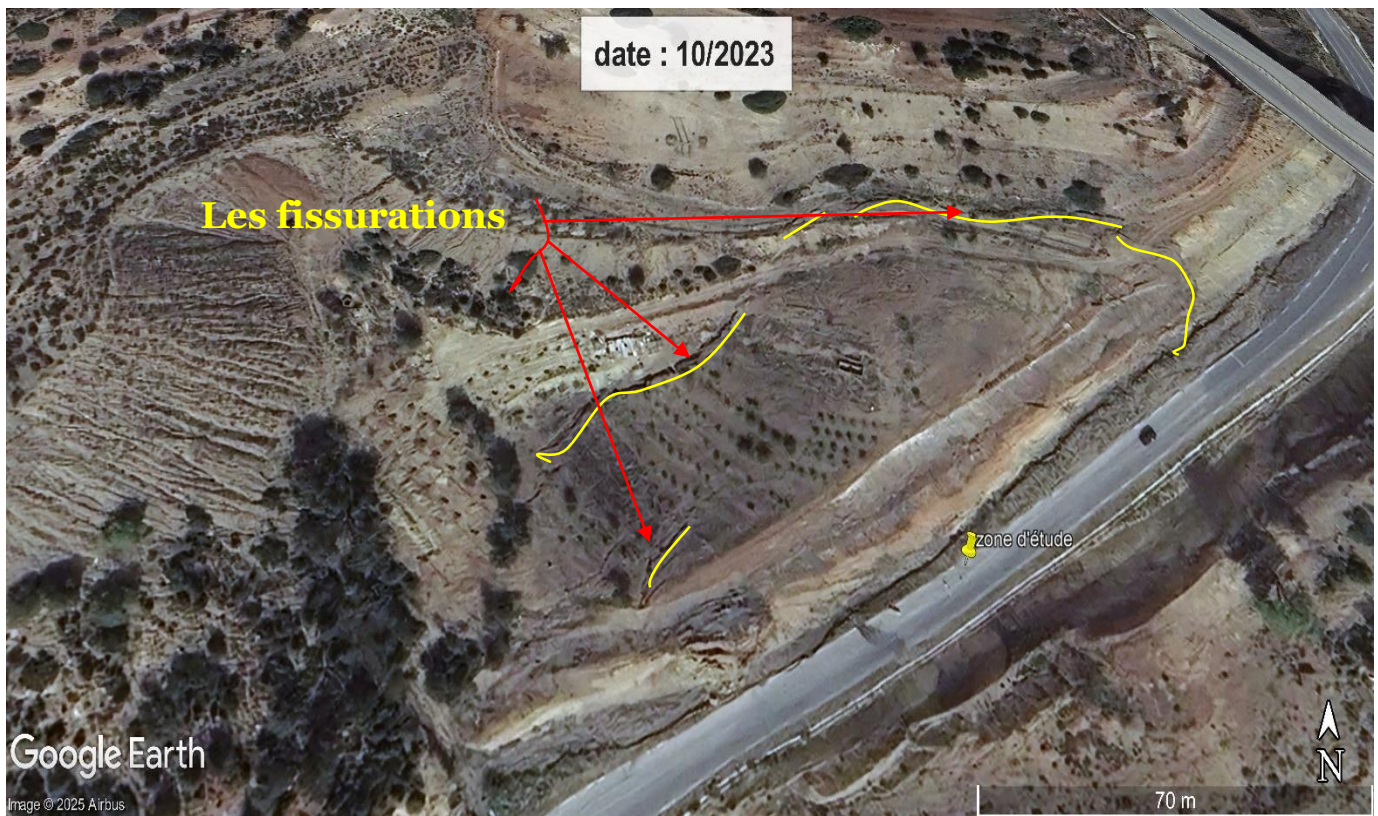


Figure 3.9 : Photo satellitaire de la zone d'étude en octobre 2023 (Google Earth , 2023)

D'après nos observations via les images satellitaires et les visites sur le terrain, ainsi qu'après l'analyse de la topographie du lieu, il nous est apparu que le glissement ne se dirige pas directement vers la route, c'est-à-dire qu'il ne la coupe pas de manière perpendiculaire, mais plutôt qu'il suit un trajet parallèle à celle-ci en se dirigeant spécifiquement vers le sud-ouest. Par conséquent, la solution proposée qui consiste en un mur de soutènement le long de ce tronçon routier, ne permettra pas d'arrêter le glissement, car celui-ci se déplace en réalité parallèlement au mur. De plus, nous pensons que ce qui se produit ici est un grand glissement, ce qui explique les soulèvements observés sur la route avant le début des travaux, ainsi que les fissures importantes qui entourent le terrain de tous les côtés et le cercle de glissement visible sur le talus du côté de la route. Il est également probable que ces soulèvements au niveau de la route se reproduisent à nouveau, même après la construction du mur de soutènement.

## 3.4 Situation du projet

Dans cette partie, nous aborderons en détail les aspects essentiels pour comprendre un site ou une région donnée. Nous étudierons notamment la géographie, la topographie, la géologie, l'hydrogéologie et la géotechnique, ainsi que la sismicité de la région. Ces éléments sont fondamentaux pour identifier les contraintes et les potentialités du site, que ce soit dans le cadre d'un projet de construction, d'une planification territoriale, ou d'une étude environnementale.

### 3.4.1 Situation géographique

Le projet est situé au niveau d'un talus qui fait partie de la rocade côtière qui traverse un terrain agricole en pente dans la partie qui relie les deux routes nationales RN98 et RN99 au-dessus du village de Bab Khroufa, qui se trouve à proximité des villages d'Ouled Hmida et El Bor, dans la daïra de Ghazaouet, la wilaya de Tlemcen au nord-ouest de l'Algérie (figure 3.10). Le site se trouve à une altitude de 35,081899 nord et à longitude de -1,809044 ouest ; cette région est caractérisée par un relief varié avec plusieurs collines, et un climat méditerranéen, des étés chauds et secs et des hivers modérés et humides.

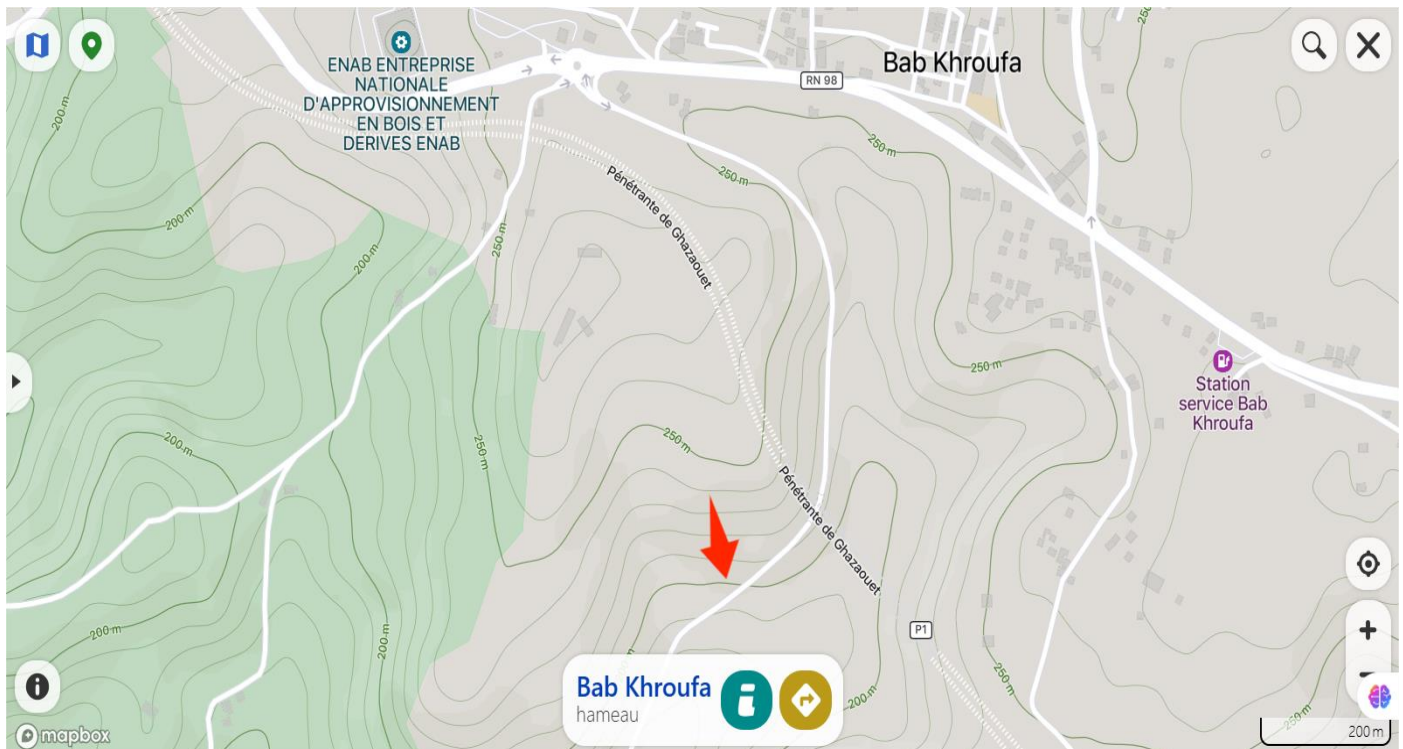


Figure 3.10 : Localisation du site (Mapcarta, 2025)

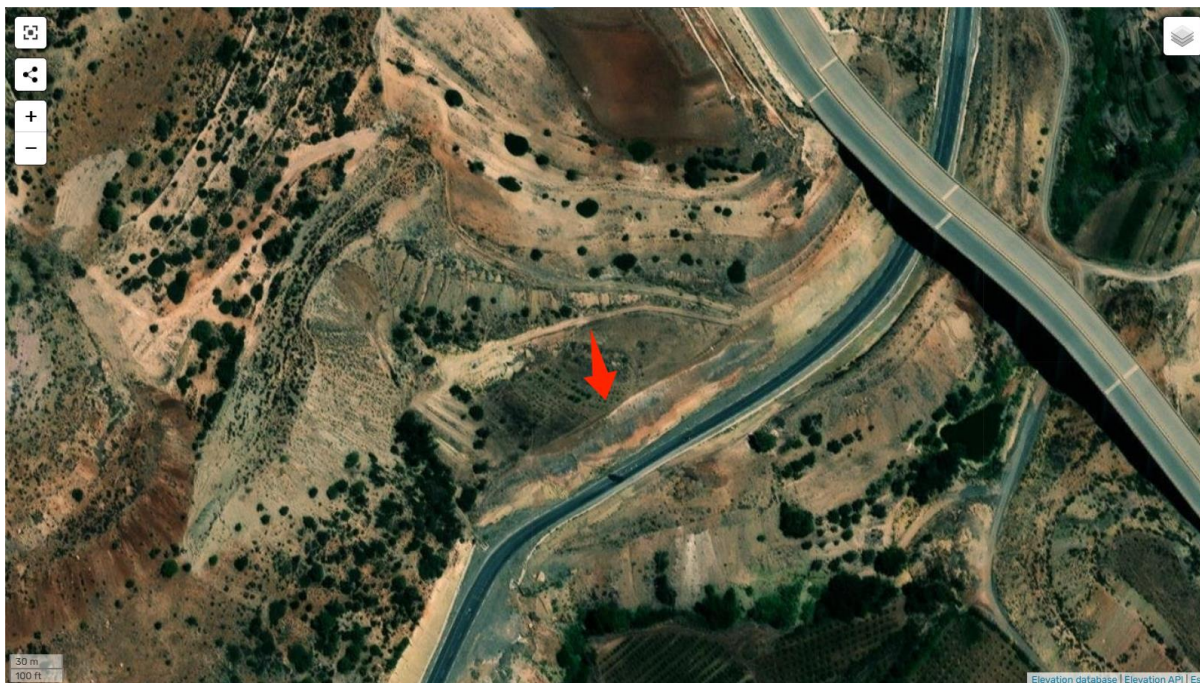


Figure 3.11 : Photo satellitaire du site (Topographic-map, 2025)

### 3.4.2 Situation topographique

La région est connue pour la diversité de son relief, comprenant des plateaux, des montagnes et des vallées, comme le montrent les cartes topographiques, où l'altitude minimale est de 25 mètres et l'altitude maximale est de 360 mètres.

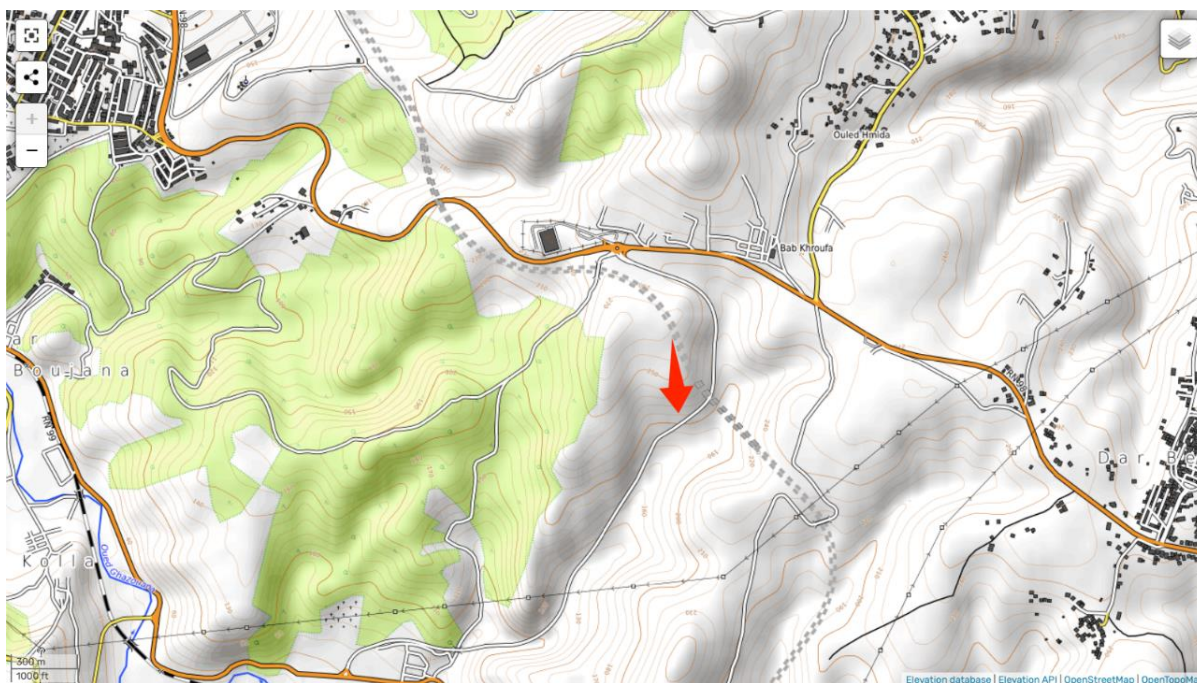


Figure 3.12 : La carte topographique de la région (Topographic-map, 2025)

Le glissement en question était à l'origine un terrain agricole en pente, qui présente une topographie accentuée. Le rapport du bureau d'étude (BET SET-SETIF) précisait que le glissement se fait selon la direction désignée sur la figure 1 par un trait vert, avec une pente maximale de 35% et une pente moyenne de 26.4 %, et des altitudes de 236m au Côté amant du versant, et 188 m au Côté de l'oued en pied du versant.

Cependant lors de notre visite du chantier nous avons estimé que le glissement se produit dans une direction différente comme le montre la figure suivante. D'après les données obtenues à partir de Google Earth ce terrain est marqué par une pente maximale de 38.7% et une pente moyenne de 36.8%, et des altitudes atteignant 220 m au sommet de la pente, tandis qu'à son pied, l'altitude descend jusqu'à 192 m. Ces variations de relief et de dénivelé contribuent à la dynamique du glissement dans cette zone.



Figure 3.13 : La ligne de la pente du terrain (Google Earth , 2023)

Le tronçon de route qui est face au glissement de terrain est incliné vers le sud-ouest avec une pente maximale de 10.5% et une pente moyenne de 2.5%. Et le talus qui est situé entre le terrain glissant et la route, a une hauteur comprise entre 5 et 7 mètres, sachant que les pentes et les altitudes sont obtenues à l'aide du logiciel Google Earth.



Figure 3.14 : La ligne de la pente du tronçon routier (Google Earth , 2023)

### 3.4.3 Situation géologique

Le tracé de la route, situé dans la région de Ghazaouet, qui fait partie des montagnes de « Traras », présente différents types de relief avec des altitudes de quelques centaines de mètres par rapport au niveau de la mer. La zone étudiée, située au sud de Ghazaouet, dans un terrain en pente qui mène vers le lit d'oued.

La série stratigraphique qui affleure dans cette région est complexe et se compose de marne et de grès du miocène et des basaltes avec un aspect conglomératique du Moi-Pliocène de l'ère Cénozoïque au formation calcaires sous forme de rognons attribués stratigraphiquement au Jurassique de l'ère Mésozoïque dans les régions montagneuses.

L'hétérogénéité des formations de cette région est principalement due au mouvement tectonique qu'a connu cette région, qui confirme la présence des failles supposées ou déterminées et le chevauchement naturel supposé ou déterminé (SET Sétif, 2022).

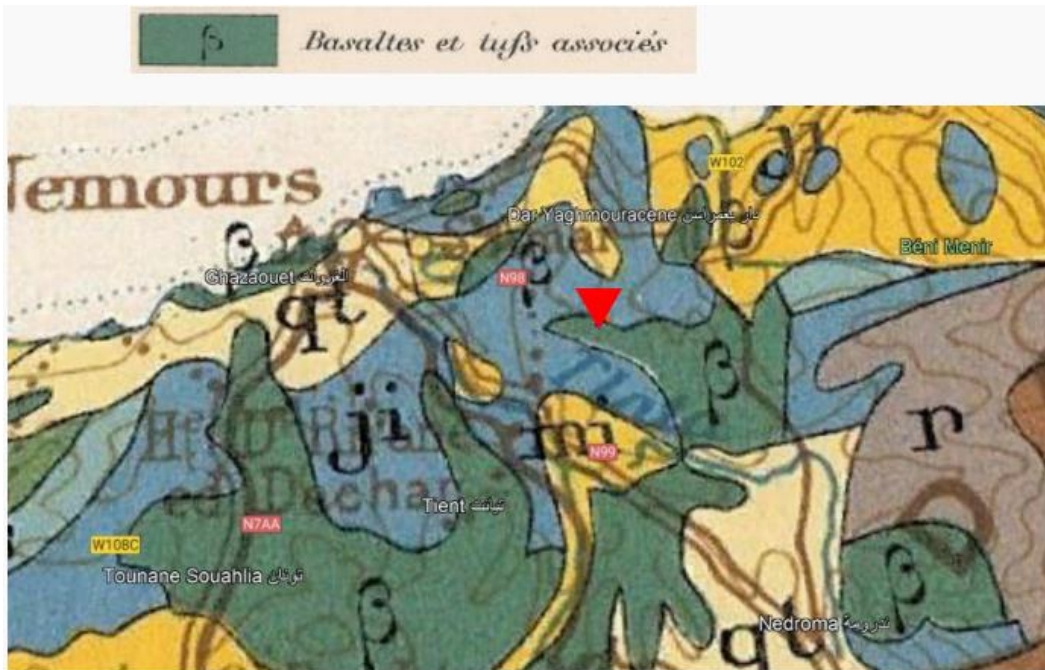


Figure 03.15 : Extrait de la Carte géologie Nord Oran au 1/500000 (SET Sétif, 2022)

### 3.4.3.1 L'examen visuel de site

L'examen visuel détaillé de la géologie locale, permet de signaler l'existence des unités lithologiques suivante :

- Des basaltes :

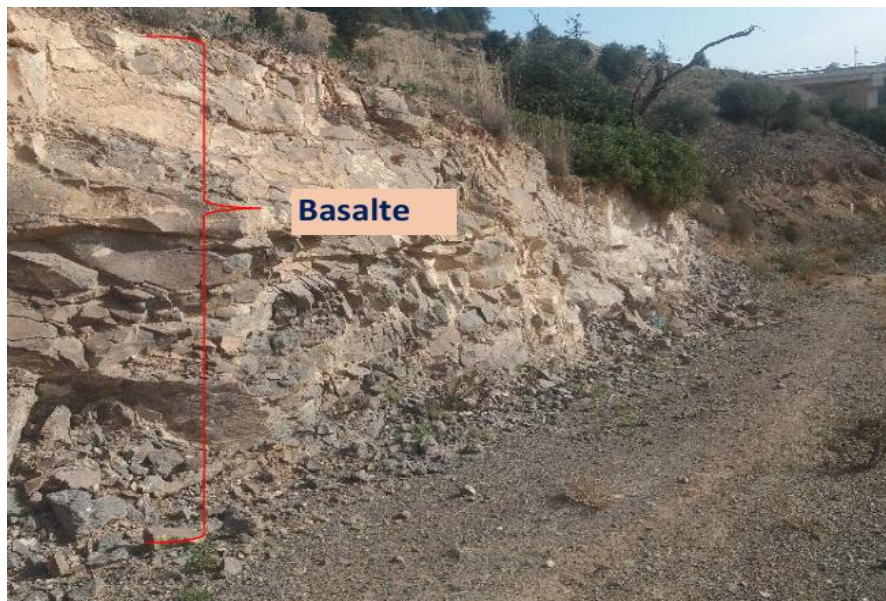


Figure 3.16 : Photo montrant la présence de Basalte sur le site (SET Sétif, 2022)

- Des tufs :



Figure 3.17 : Photos de Tufs sur le terrain (SET Sétif, 2022)

- Des argiles et des marnes :

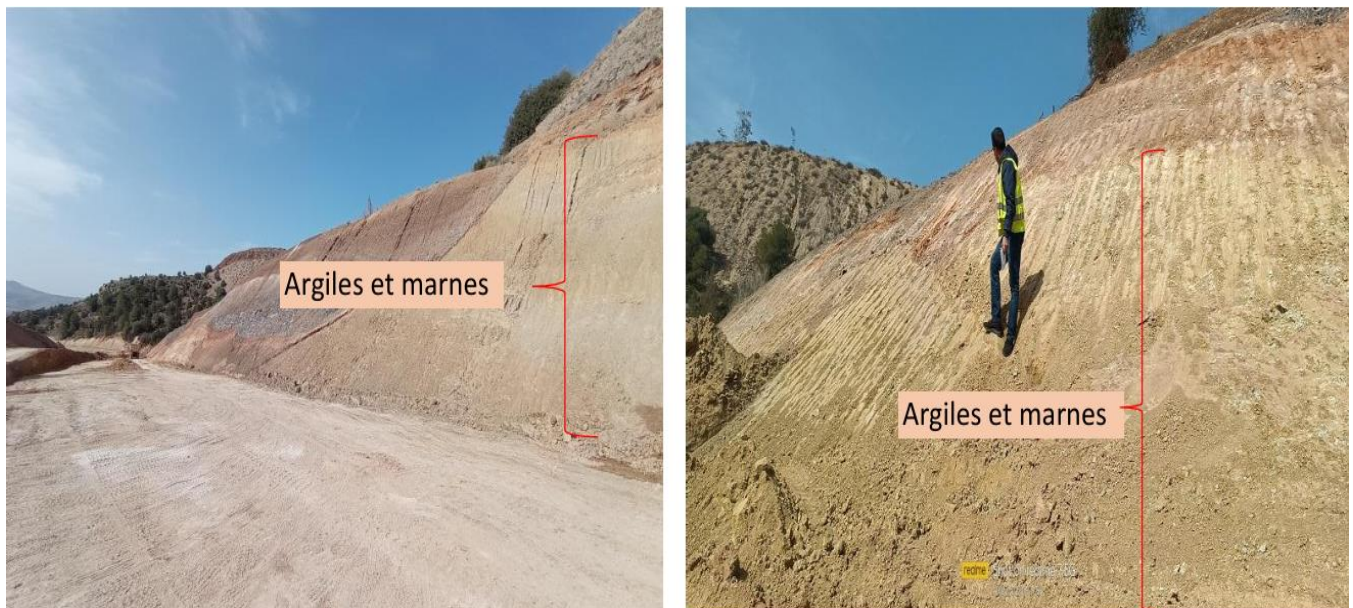


Figure 3.18 : Photos des Argiles et Marnes sur le terrain (SET Sétif, 2022)

### 3.4.3.2 La description géologique des sondages

La campagne de reconnaissance à base de 03 sondages carottés et un sondage pressiométrique de 20 m à 30 m de profondeur a mis en évidence la présence de (LTPO, 2021):

- Sondage SC1 : Cordonnés GPS : latitude 35.081900° ; longitude -1.809197°

De 0.00 à 0.30 m : terre végétale ; et de 0.30 à 11.40 m argile marronne peu sableuse et graveleuse mi- raide ; et de 11.40 à 11.90 m roche noirâtre poreuse d'origine volcanique ; de 11.90 à 28.90 m argile marron mi- raide pâteuse par endroit, peu sableuse et graveleuse devenant indurée par endroits, avec un passage de sable fin grisâtre entre 27.00 et 28.00 m ; et de 28.90 jusqu'à 30.00 m marne grisâtre indurée à aspect schisteux.

- Sondage SC2 : Cordonnées GPS : latitude 35.081835° ; longitude -1.808913°

De 0.00 à 1.50 m : terre végétale ; 1.50 à 14.50 m : argile marron pâteuse concrétionnaire à partir de 9.30 m, et des conglomérats de calcaire entre 11.00 à 11.50 m ; 14.50 à 23.10 m : roche volcanique noirâtre poreuse fragmenté à peu compact à partir de 17.80 m ; 23.10 à 30.00 m marne beige mi- raide devenant grisâtre sableuse à partir de 26.80 m.

- Sondage SC3 : Cordonnées GPS : latitude 35.081653° ; longitude -1.808740°

De 0.00 jusqu'à 0.20 m : remblai graveleux ; 0.20 à 14.50 m : argile marronne peu sableuse à pâteuse et indurée entre 7.00 à 7.70 m devenant marneuse graveleuse de couleur grisâtre à partir de 13.00 m ; 14.50 à 20.00 m marne grisâtre mi- raide indurée à un aspect schisteux.

- Sondage PMT1 : Cordonnées GPS : latitude 35.081714° ; longitude -1.808619°

De 0.00 à 0.50 m : remblai sableux ; 0.50 à 10.65 m : argile marron mi- raide avec quelques conglomérats par endroit ; 10.65 à 13.50 m : calcaire dolomitique grisâtre fragmenté ; 13.50 à 18.70 m : grisâtre fragmenté avec une fine passée d'argile grisâtre à partir de 14.00 m ; et de 18.70 jusqu'à 20.50 m : calcaire dolomitique grisâtre fragmenté avec une fine passée d'argile grisâtre entre 19.50 et 19.90 m.

### 3.4.4 Contexte hydrogéologique

La présence d'eau au pied du talus s'explique par la géologie et les aquifères présents dans ce sol, caractérisé par une richesse en fissures ainsi qu'une capacité à stocker et à transmettre l'eau, ce qui favorise la stagnation des eaux. De plus, ces fissures constituent des chemins préférentiels pour l'écoulement des eaux souterraines, facilitant ainsi une recharge rapide en eau de pluie. Cette dynamique hydrologique engendre des plans de cisaillement visibles vu la différence des densités et des natures des sols en place (des marnes et argiles surmontés par des basaltes) ainsi l'érosion des formations de surface.

Lors de notre visite sur le chantier, nous avons observé la présence de sources d'eau au niveau du talus, particulièrement pendant les périodes de pluie, et cette région est également connue par sa richesse en eaux souterraines, dont certaines ressortent à la surface sous forme de source d'eau.

### **3.4.5 Contexte Géotechnique**

Le Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest LTPO de Tlemcen a mené des investigations géotechniques sur le terrain retenu, comprenant des sondages géotechniques, des essais in situ et des essais en laboratoire. Ces opérations ont été réalisées conformément au programme d'investigation établi par le Bureau d'Études Techniques BET SET-SETIF, responsable de l'étude de stabilité.

L'intervention a consisté en la réalisation de 5 sondages, avec des prélèvements d'échantillons pour les essais en laboratoire. Parmi ces sondages, 3 étaient carottés : SC1 et SC2, chacun d'une profondeur de 30 mètres, et SC3, d'une profondeur de 20 mètres. Un sondage pressiométrique PMT1 de 20 mètres de profondeur et un sondage destructif SD1 de 20 mètres ont également été réalisés.

En complément, des tubes piézométriques ont été installés au niveau des sondages SC1 et SC3 pour permettre des lectures périodiques du niveau d'eau. Des tubes pour inclinomètre ont été installés au niveau des sondages SD1 et SC2 pour les lectures d'inclinomètre. Enfin, des essais pressiométriques ont été effectués au niveau du sondage PMT1.

#### **3.4.5.1 Les essais in-situ**

- Essais pressiométriques :

Les essais pressiométriques ont été exécutés au droit du sondage PMT1, à raison d'un essai tous les 1 mètre. Les essais réalisés dans le cadre de cette étude ont conduit aux résultats présentés dans le tableau suivant (tableau 3.1) :

Avec :

- Plm : Pression limite.
- P\*lm : Pression limite nette.
- Em : Module pressiométriques

Information sur l'essai				Paramètres fondamentaux		
Forage	N° essais	Profondeur	Formation	$P_{lm}$ (MPa)	$P^*_{lm}$ (MPa)	$E_m$ (MPa)
<b>PMT1</b>	1	1	Argile	0,96	0,95	23,3
	2	2		1,94	1,93	138,9
	3	3		3,91	3,88	140,4
	4	4		1,15	1,12	33,1
	5	5		1,47	1,42	62,2
	6	6		3,25	3,2	129,3
	7	7		3,48	3,41	160,3
	8	8		3,98	3,91	2201,8
	9	9		2,77	2,69	91,8
	10	10		0,87	0,78	71,7
	11	11	Calcaire	4,1	4	739,4
	12	12		4,13	4,02	1546,5
	13	13		4,16	4,04	1150,6
	14	14	Argile	4,15	4,03	948,4
	15	15		1,95	1,81	54,1
	16	16		2,24	2,1	46,9
	17	17		2,75	2,6	128,5
	18	18		1,98	1,82	47,7
	19	19	Calcaire	4,22	4,05	676,2
	20	20		4,21	4,03	858,1

Tableau 3.1 : Les résultats des essais pressiométriques (LTPO, 2021)

- Essais piézométriques :

Le LTPO a procédé à des relevés périodiques du niveau d'eau, au niveau des trous des sondages SC1 (partie haute du talus) et SC3 (partie basse du talus).

Les résultats des relevés sont présentés dans le tableau suivant (tableau 3.2) :

<b>Date de relevé</b>	<b>Sondage</b>	<b>Niveau d'eau nette (m)</b>
22/08/2021	SC1	17,8
	SC3	6,75
29/08/2021	SC1	17,6
	SC3	6,75
31/08/2021	SC1	17,6
	SC3	7,05
01/09/2021	SC1	17,5
	SC3	7,25
14/09/2021	SC1	17,6
	SC3	6,87
16/09/2021	SC1	17,6
	SC3	6,87
06/10/2021	SC1	17,7
	SC3	6,97
23/11/2021	SC1	17,75
	SC3	6,82

Tableau 3.2 : Les résultats des essais piézométriques (LTPO, 2021)

- Les mesures inclinométriques :

La surveillance inclinométrique repose sur des mesures réalisées à l'aide d'un inclinomètre. Ces mesures permettent, selon les cas, de déterminer localement les variations d'inclinaison du tube de mesure au fil du temps, de connaître la position du tube par rapport à la verticale du lieu, ou d'évaluer les déplacements du tube dans le temps par rapport à l'une de ses extrémités, supposée fixe ou dont la position est connue par ailleurs. Les mesures sont effectuées avec un pas constant d'un mètre.

Le tableau ci-dessous résume les mesures effectuées (tableau 3.3) :

<b>Sondage</b>	<b>Date de la mesure</b>	<b>N° de la mesure</b>	<b>Observation</b>
SD 01	14/09/2021	0	Mesure effectuée sur 30,00 m de profondeur
SC 02	14/09/2021	0	Mesure effectuée sur 20,00 m de profondeur
SD 01	06/10/2021	1	Mesure effectuée sur 20,00 m de profondeur
SC 02	06/10/2021	1	Mesure effectuée sur 30,00 m de profondeur
SD 01	23/11/2021	2	Mesure effectuée sur 20,00 m de profondeur
SC 02	23/11/2021	2	Mesure effectuée sur 21,00 m de profondeur
			" il y a obstruction à cette profondeur "

Tableau 3.3 : Les résultats des essais inclinométriques (LTPO, 2021)

NB :

Lors des mesures du 23/11/2021 au niveau du sondage SC 02, un blocage à la profondeur de 21 m a été observé. Celui-ci pourrait être dû à des éléments extérieurs (caillou ou autres), ou à un cisaillement causé par le passage du plan de glissement à cet endroit (LTPO, 2021).

### **3.4.5.2 Les essais de laboratoire**

Les essais géotechniques d'identification et géomécaniques en laboratoire ont été réalisés sur des échantillons intacts et remaniés, prélevés à différentes profondeurs lors des sondages carottés.

Les essais effectués en laboratoire étaient conformes au programme d'investigations exigé par le BET SET-SETIF.

Les essais menés comprenaient des essais physiques, mécaniques et chimiques, pour les formations argileuses. Et des essais physiques destinés à déterminer la densité pour les formations rocheuses. Les résultats obtenus sont les suivants (LTPO, 2021) :

### 3.4.5.2.1 *Pour les formations argileuses*

- **La densité** : le poids volumique sec  $\gamma_d$  est compris entre 1,49 t/m<sup>3</sup> et 1,88 t/m<sup>3</sup>, tandis que le poids volumique humide  $\gamma_h$  est compris entre 1,79 t/m<sup>3</sup> et 2,16 t/m<sup>3</sup>. Ces valeurs indiquent que le sol est lâche à très dense.
- **L'imbibition** : la teneur en eau naturelle  $w$  se situe entre 15 % et 29 %, avec un degré de saturation  $SR$  compris entre 69 % et 99 %, ce qui indique un sol mouillé à très mouillé.
- **La Granulométrie** : l'analyse granulométrique met en évidence que le sol se compose de textures variées, à savoir : Argileux-Limoneux-Sableux-Graveleuse, à Sableux-Argileux-Limoneux-Graveleuse, et parfois Sableux-Graveleux-Limoneux-Argileuse.
- **Limite d'Atterberg** : l'indice de plasticité  $IP$  de l'échantillon étudié est compris entre 20 % et 59 %. La limite de liquidité  $W_L$  se situe quant à elle entre 41 % et 90 %. Alors d'après ces résultats, on peut conclure que le sol présente une plasticité moyenne à très élevée.
- **La teneur en Carbonate** : la teneur en carbonate de calcium  $CaCO_3$  est de 5 à 22%, et ça confirme que c'est une formation d'argile.
- **La teneur en Sulfate** : la teneur en sulfate et chlorure ( $SO_4^{2-}$ ) des échantillons de sol analysés varie entre 0 et 822,8 mg/kg. Selon la norme NA 16002 (2016), qui évalue l'agressivité des sols, cette concentration place le sol dans la classe  $XA_1$ , indiquant un sol faiblement agressif.
- **La valeur de Bleu de Méthylène** : l'essai au bleu de méthylène est utilisé pour caractériser l'activité des sols argileux, en complément de la détermination des limites d'Atterberg. Les valeurs de bleu  $VB$  obtenues, comprises entre 0,4 et 2,7, indiquent que cette formation est peu sensible à sensible à l'eau.
- **L'essai de cisaillement rectiligne** : Afin de déterminer les propriétés mécaniques des argiles en place, des essais de cisaillement rectiligne ont été effectués à l'aide de la boîte de CASAGRANDE, de type « non consolidé non drainé U.U » et consolidé drainé C.D ». Les résultats de ces essais sont présentés dans le tableau ci-dessous. Les valeurs issues des essais ( $\Phi$ ,  $C$ ) permettent d'évaluer les comportements mécaniques des échantillons à court et long terme, en lien direct avec leurs propriétés physiques naturelles, telles qu'observées lors des sondages carottés.

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (tableau 3.4) :

N° Sondage	Profondeur (m)	Cohésion "C" (kPa)	Angle de frottement "φ" (degré)	Type d'essai
SC 1	6,30 - 6,90	89	11	UU
	9,60 - 9,90	27	18	UU
	16,70 - 17,00	18	19	UU
	22,00 - 22,30	15	2	UU
SC 2	4,30 - 4,70	31	14	UU
		24	26	CD
	9,40 - 9,90	33	35	UU
		74	26	CD
	14,00 - 14,40	18	23	UU
		-	-	CD
25,20 - 25,50	16	28	UU	
	180	10	CD	
SC 3	2,60 - 3,00	77	9	UU
		20	26	CD
	7,70 - 8,00	44	23	UU
		-	-	CD
	9,00 - 9,35	32	23	UU
		65	33	CD

Tableau 3.4 : Les résultats des essais de cisaillement (LTPO, 2021)

#### 3.4.5.2.2 Pour les formations rocheuses

- **La densité** : le poids volumique sec  $\gamma_d$  est compris entre 2.43 t/m<sup>3</sup> et 2.65 t/m<sup>3</sup>, tandis que le poids volumique humide  $\gamma_h$  est compris entre 2.48 t/m<sup>3</sup> et 2.70 t/m<sup>3</sup>.
- **Les essais mécaniques** : aucun essai mécanique n'a pu être programmé sur les formations rocheuses (pour déterminer la cohésion et l'angle de frottement interne) en raison de leur état fragmenté.



Le niveau minimal de protection sismique accordé à un bâtiment dépend de sa destination et de son importance vis à vis des objectifs de protection fixés par la collectivité. Ainsi, les ouvrages sont classés en 4 groupes d'importance.

- **Groupe 1A** : ouvrage d'importance vitale.
- **Groupe 1B** : ouvrage de grande importance.
- **Groupe 2** : ouvrage d'importance moyenne.
- **Groupe 3** : ouvrage de faible importance.

Cet ouvrage appartient au **groupe 1B** des ouvrages de grandes importances il joue un rôle essentiel dans la sécurité de la population et l'utilité puisqu'il a un protégée en termes de services publique.

Le coefficient d'accélération (A) à prendre en considération dans les calculs dans ce cas selon le (RPA, 2024) est :

- $A_{horizontal} = 0.20$
- $A_{vertical} = 0.216$

Zonage sismique	Coefficient d'accélération				
	A.I (horizontal)	$A_v.I$ (vertical)			
		Catégorie d'Importance			
		1A	1B	2	3
I	<b>0.07 I</b>	0.054	0.046	0.039	0.031
II	<b>0.10 I</b>	0.077	0.066	0.055	0.044
III	<b>0.15 I</b>	0.116	0.099	0.083	0.066
IV	<b>0.20 I</b>	<b>0.252</b>	<b>0.216</b>	0.180	0.144
V	<b>0.25 I</b>	<b>0.315</b>	<b>0.270</b>	0.225	0.180
VI	<b>0.30 I</b>	<b>0.378</b>	<b>0.324</b>	<b>0.270</b>	0.216

L'action sismique verticale,  $A_v$ , est obligatoire lorsque  $(A_v.I.g)$  dépasse **0.25 g**

Figure 3.20 : Les coefficients d'accélération selon les zones sismique (RPA, 2024)

### **3.5 Conclusion**

Ce chapitre a analysé le contexte géotechnique, géologique, hydrogéologique et topographique du site de Ghazaouet (Tlemcen, Algérie), où un glissement de terrain a été observé suite à des travaux de déblaiement le long d'un tronçon routier de la rocade côtière. Les investigations menées par le LTPO de Tlemcen et le BET SET-SETIF ont révélé une hétérogénéité des sols, composés d'argiles, marnes, basaltes et calcaires, avec des propriétés mécaniques variables. La présence d'eau, due aux aquifères et fissures, a aggravé le glissement. La solution retenue inclut un adoucissement de la pente et un mur de soutènement en béton armé ancré dans les marnes, tout en respectant les normes parasismiques (Zone IV, RPA 2024) pour ce projet de Groupe 1B, essentiel pour la sécurité publique et la continuité des services.

## **Chapitre 4**

# **Évaluation environnementale par ACV**

**C**e chapitre a pour objectif de détailler méthodiquement les différentes étapes et les éléments clés de l'ACV appliquée à notre étude. Nous aborderons l'ensemble du processus, depuis la définition des objectifs et du champ de l'étude, la présentation des variantes et la collecte des données. Les résultats obtenus seront présentés de manière détaillée, à l'aide de données chiffrées et d'illustrations graphiques, afin d'en faciliter la compréhension et d'en souligner les tendances significatives. Cette analyse quantitative et visuelle permettra de mettre en évidence les principaux enseignements et d'alimenter la réflexion sur les implications environnementales du cas étudié.

## 4.1 Les outils d'analyse

**Logiciel OpenLCA** : est un logiciel libre et gratuit spécialisé dans l'ACV, développé et maintenu par GreenDelta depuis 2006. Conforme aux normes ISO 14040-44, il offre un cadre méthodologique rigoureux pour modéliser l'ensemble des flux matériels et énergétiques liés à un produit, procédé ou service. Le logiciel s'appuie sur une approche par processus interconnectés, exploitant des bases de données environnementales reconnues (ecoinvent, AgriBalyse) et diverses méthodes d'évaluation (ReCiPe, ILCD) afin de calculer différents indicateurs d'impact environnemental (GreenDelta, 2024). Sa conception modulaire permet d'effectuer des analyses avancées (incertitude, analyses comparatives) tout en garantissant une bonne compatibilité avec d'autres plateformes (OpenLCA, 2025). Ces caractéristiques en font un outil privilégié tant pour la recherche académique que pour l'application industrielle en écoconception (figure 4.1).

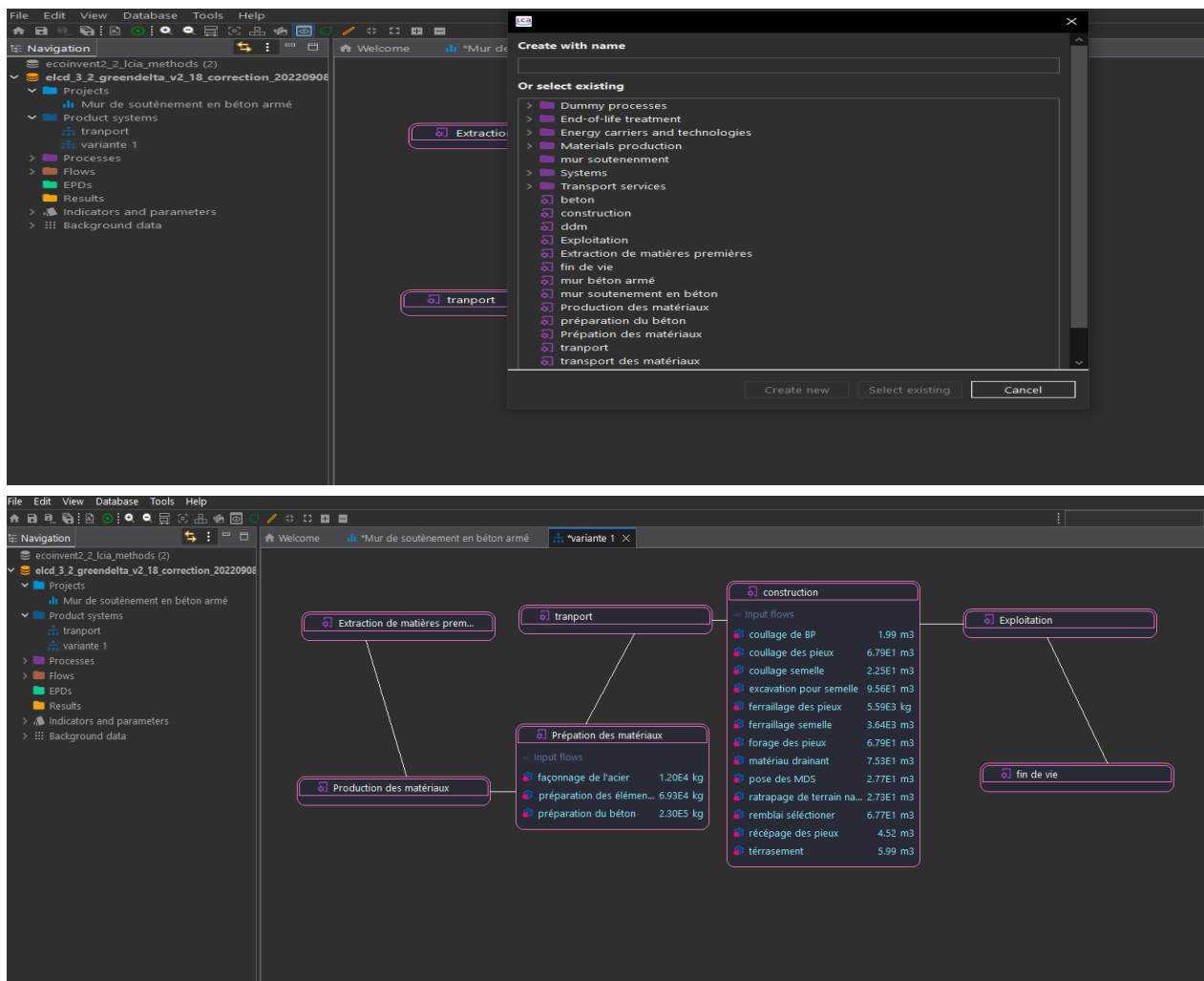


Figure 4.1 : Captures de logiciel OpenLCA

**Deux tableurs avec des macros VBA sont aussi utilisés :**

- Tableur 1 (dernière mise à jour sept 2021) : Ce tableur permet l'ACV d'un projet en béton armé dans le domaine de la géotechnique. Les entrées (inputs) sont les quantités des matériaux pour la confection du béton armé ainsi que les travaux de terrassement. La fonction du système filtre/Drain a été ajoutée récemment pour cette étude. Une première vérification du rapport E/C, du dosage du béton et des quantités des agrégats est automatiquement faite. Le tableur calcul alors le potentiel de réchauffement climatique (GWP), et la demande cumulée en énergie (CED).
- Tableur 2 (mise à jour mai 2025). Ce tableur intègre en plus des fonctionnalités du tableur 1, les géosynthétiques (7 types de géosynthétiques à base de 5 types de matériaux) dans l'AVC.

## 4.2 Objectif et portée de l'ACV

Cette étude comparative repose sur une ACV appliquée pour deux conceptions techniques de murs de soutènement pour le traitement d'un glissement de terrain situé sur la rocade côtière (PK1+000). Bien qu'assurant une fonction de stabilisation commune, les deux solutions présentent des différences significatives dans leur conception et leur mise en œuvre. L'analyse porte sur un bloc type représentatif, sélectionné parmi les 42 blocs identiques composant l'ouvrage complet.

- Variante 1 : Mur en béton armé sur pieux avec remblai drainant ;
- Variante 2 : Mur en béton armé sur pieux avec système de drainage en géotextile.

Ces deux solutions ont pour fonction commune de retenir un terrain agricole en pente, limitant ainsi son glissement vers la rocade côtière. L'étude comparera leurs performances environnementales afin de déterminer la solution la plus écologique et la moins impactante pour l'environnement.

L'étude se base sur une unité fonctionnelle définie comme suite : un bloc de mur assurer la stabilité d'un terrain agricole en pente sur une période de 50 ans, en prévenant tout glissement vers la rocade côtière, pour une surface stabilisée de 180 m<sup>2</sup> (SET Sétif, 2022), et une hauteur de mur de 7,5 m.

Cette analyse se concentre sur deux catégories d'impacts environnementaux clés :

- Potentiel de réchauffement climatique (GWP : Global Warming Potential) : Il quantifie les émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O), exprimées en kg CO<sub>2</sub>-équivalent, afin de refléter l'impact climatique des deux variantes, en particulier celui lié à la production de béton, au transport et aux travaux sur chantier ;
- Demande en énergie (CED : Cumulative Energy Demand) : Elle évalue la consommation énergétique totale sur l'ensemble du cycle de vie, exprimée en MJ (mégajoules), et permet d'identifier la solution la plus économe en énergie, depuis la préparation des matériaux jusqu'à la phase de construction.

## 4.3 Rappel et description des variantes

### 4.3.1 Variante 1

Pour cette analyse, nous avons conservé une solution déjà réalisée sur terrain, représentée par un bloc de mur composé de 4 pieux et d'une semelle, intégrant 3 éléments préfabriqués (MDS). Cette modélisation permet d'analyser le cycle de vie du système et d'évaluer son impact environnemental.

**Description du bloc étudié** (figure 4.2) :

- Semelle de fondation : 4,5 m de largeur, 5 m de longueur, et 1 m d'épaisseur.
- Mur de soutènement : Composé de 3 éléments préfabriqués (MDS), chacun d'une hauteur de 7,5 m et d'une épaisseur variable (de 0,30 m en tête à 0,65 m en base) et d'une largeur de 1,49 m.
- Fondations profondes : 4 pieux forés de 1,2 m de diamètre et 15 m de profondeur.
- Remblai drainant : Le mur soutient un remblai en matériau drainant, recouvert d'une couche de remblai sélectionné.

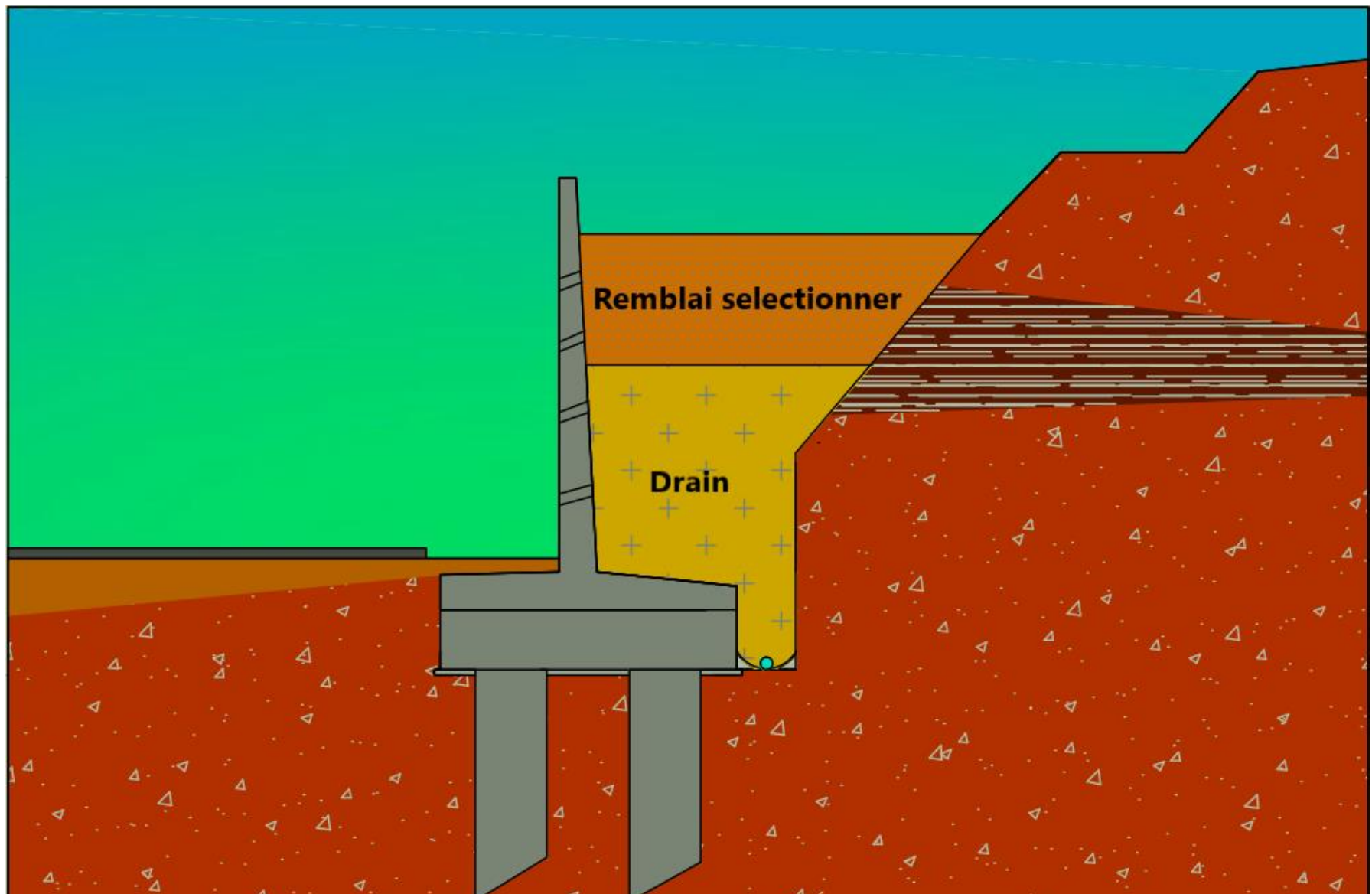


Figure 4.2. A : Coupe transversale de la variante 1

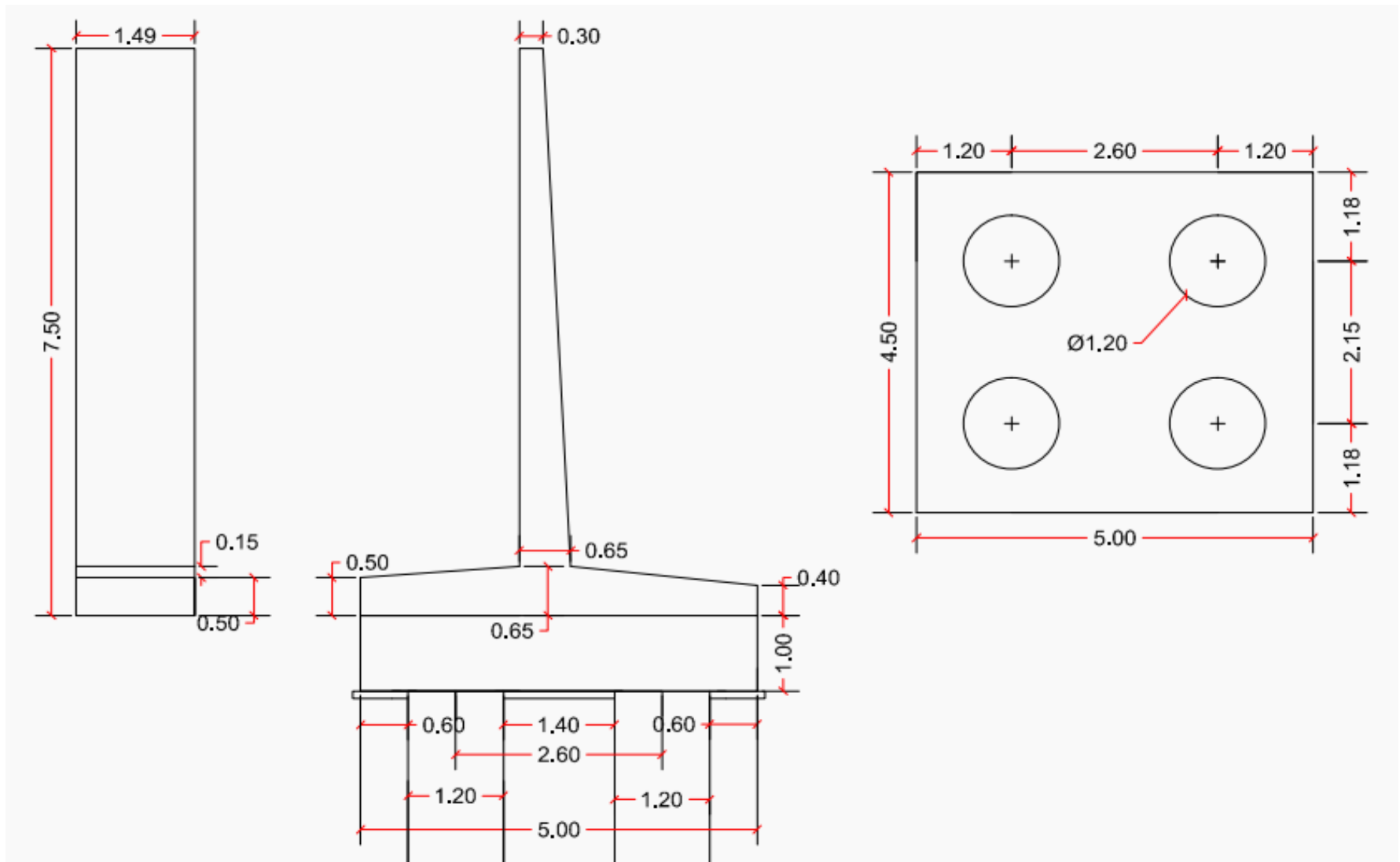


Figure 4.2.B : Les dimensions de la variante 1

### 4.3.2 Variante 2

Le mauvais drainage est souvent à l'origine de nombreux désordres des ouvrages de soutènement ; cette variante a été conçue pour un bon drainage des eaux tout en minimisant l'impact environnemental de ma solution proposée. Elle reprend la structure de base du bloc de référence avec les modifications suivantes, apportées après une analyse approfondie en concertation avec le projet de fin d'étude intitulé « analyse des glissements de terrain en tenant compte de la composante climatique » par Benaaza, Zadjoui & Trouzine (2025) :

- Amélioration du système de drainage, rendue nécessaire par les caractéristiques du sol (terrain cohésif et agricoles avec forte présence d'eau).
- Ajustement et redimensionnement du mur, justifié par ces contraintes géotechniques et environnementales.

#### 4.3.2.1 Caractéristiques techniques de la variante proposée

- Semelle de : 4,5 m de largeur, 5 m de longueur, et 0,8 m d'épaisseur ;
- Mur de soutènement : Composé de 3 éléments préfabriqué (MDS), chacun d'une hauteur de 7,5 m et d'une épaisseur variable de 0,55 m à 0,25 m et d'une largeur de 1.49 m ;
- Système de fondation : 4 pieux forés de 1 m de diamètre et 15 m de profondeur.

#### 4.3.2.2 Système de drainage amélioré

- Couche drainante continue sur toute la surface de contact mur-sol ;
- Géotextile de filtration associé au système drainant
- Remblaiement complémentaire avec une couche de terre agricole pour :
  - ✚ Restaurer la surface cultivable
  - ✚ Optimiser l'utilisation du terrain

#### 4.3.2.3 Dimensionnement du système de drainage

- **Analyse granulométrique des sols :**

Les essais d'analyse granulométrique, fournis dans le rapport géotechnique, ont permis de tracer le fuseau granulométrique représentatif des sols étudiés (figure 4.2) :

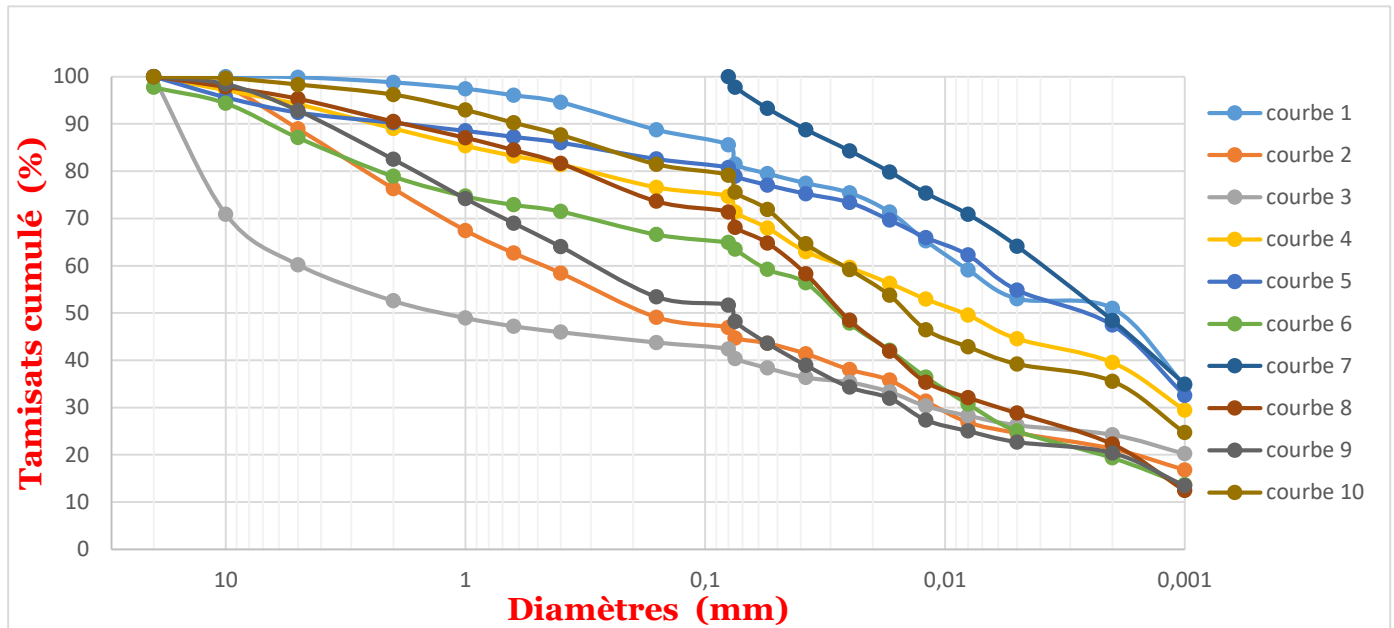


Figure 4.3 : Les courbes granulométriques des sols

À partir de ces courbes granulométriques, une **courbe moyenne** a été sélectionnée (courbe n°8) pour déterminer les diamètres caractéristiques de système filtre drainage (figure 4.3) :

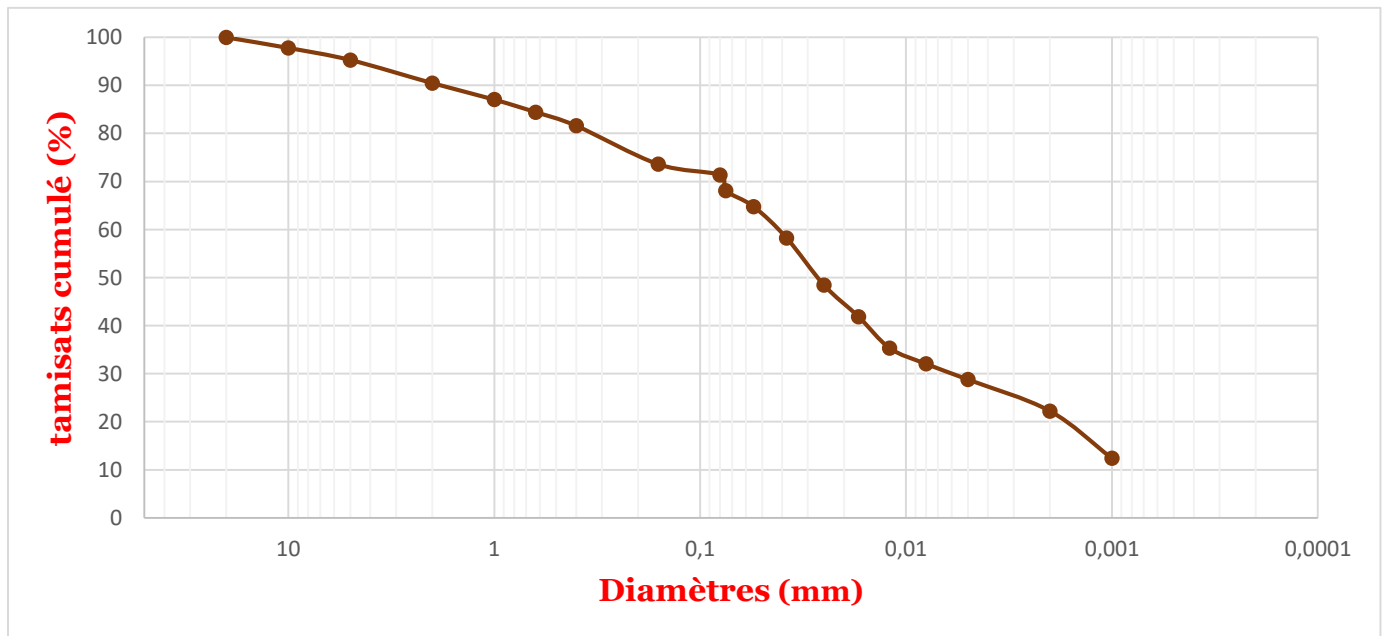


Figure 4.4 : La courbe granulométrique moyenne

- **Dimensionnement de matériau drainant :**

La durée de vie du géotextile est estimée à 25 ans (Afitex industrie, 2024), tandis que celle du mur de soutènement est de 50 ans. Pour harmoniser ces durées et réduire les besoins de maintenance sur la durée totale du projet, une stratégie de dimensionnement dual a été adoptée :

- Phase 1 (0–25 ans) :

Le géotextile assure les fonctions de filtration et de séparation, permettant au matériau drainant de fonctionner de manière optimale sans colmatage.

- Phase 2 (25–50 ans) :

Après dégradation progressive du géotextile (ou perte de ses propriétés fonctionnelles), le matériau drainant est conçu pour reprendre simultanément les rôles de filtration et de drainage, garantissant ainsi la pérennité du système.

Cette démarche proactive permet de maintenir l'efficacité globale du système sans nécessiter d'interventions majeures, tout en réduisant les coûts d'exploitation et en limitant l'impact environnemental de la maintenance à long terme.

Les critères de Terzaghi et Peck sont appliqués pour le dimensionnement de matériau granulaire (Terzaghi, et al., 1967) :

<b>Les critères de Terzaghi &amp; Peck (1967)</b>	
Non entrainement des particules	$D_{15d} < 5 D_{85s}$
	$D_{50d} < 25 D_{50s}$
Perméabilité	$D_{15d} > 4 D_{15s}$
Ségrégation	$2 < Cu < 8$

*Tableau 4.1 : Les critères de Terzaghi et Peck*

Avec :

- $D_{15d}$ ,  $D_{50d}$  : les diamètres correspondants respectivement aux 15 %, 50 % de tamisât cumuler du matériau drainant ;
- $D_{85s}$ ,  $D_{50s}$ ,  $D_{15s}$  : les diamètres correspondants aux 85%, 50%, 15%, respectivement de tamisât cumuler de sol ;

- Cu : coefficient de uniformité avec  $Cu = D_{60d}/D_{10d}$ . Ce coefficient permet de vérifier l'homogénéité granulométrique du matériau drainant et d'éviter la ségrégation.

À partir de la courbe granulométrique moyenne du sol, nous avons déterminé les diamètres caractéristiques suivants pour le sol (D85, D50, D15) :

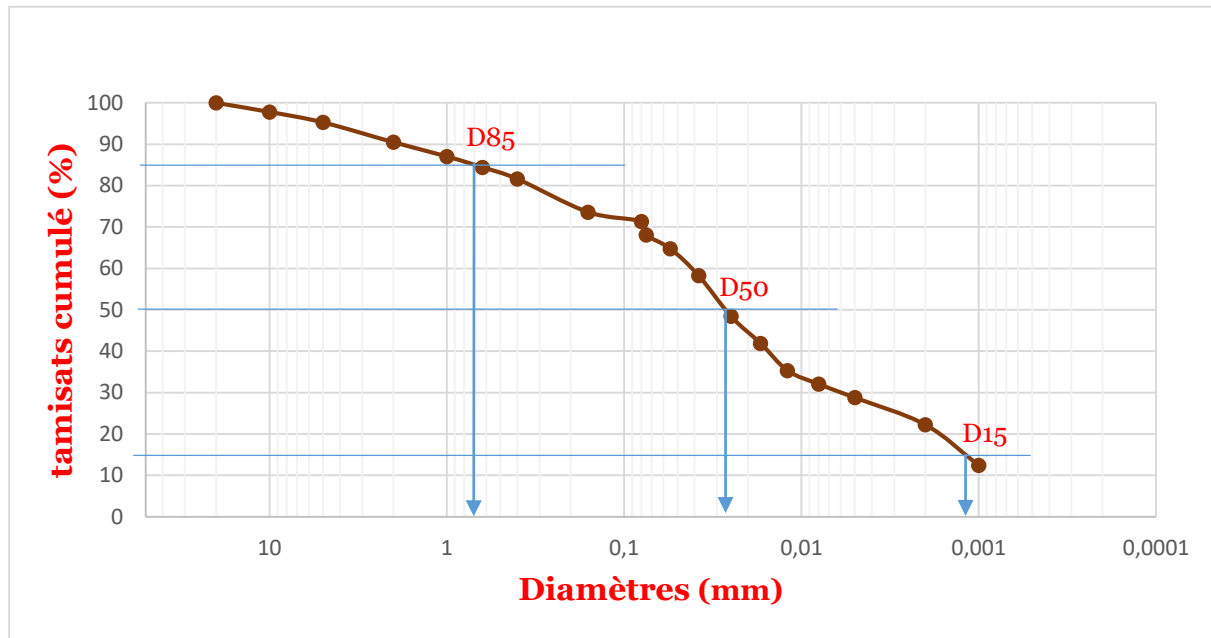


Figure 4.5 : La courbe granulométrique moyenne du sol

Les diamètres caractéristiques de sol
D85s = 0,7 mm
D50s = 0,027 mm
D15s = 0,0012 mm

Tableau 4.2 : Les diamètres caractéristiques de sol

Vérification des critères :

Les critères		Diamètres caractéristiques de matériau drainant
$4 D_{15s} < D_{15d} < 5 D_{85s}$	$0,0048 < D_{15d} < 3,5 \text{ (mm)}$	$D_{15d} = 0.22 \text{ mm}$
$D_{50d} < 25 D_{50s}$	$D_{50d} < 0,675 \text{ (mm)}$	$D_{50d} = 0.5 \text{ mm}$

Tableau 4.3 : Les diamètres caractéristiques de matériau drainant

Choix de la courbe granulométrique du matériau drainant :

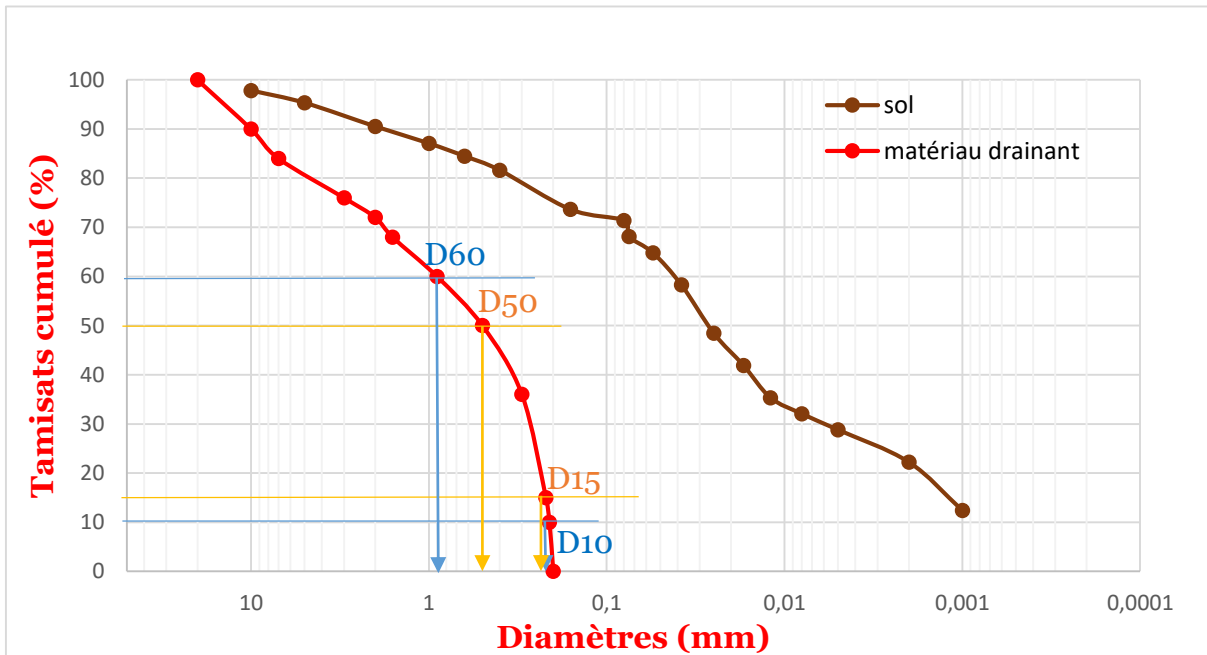


Figure 4.6 : Courbe granulométrique de matériau drainant

Vérification de critère de ségrégation :

Les critères		Coefficient d'uniformité de matériau drainant
$2 < D_{60d} / D_{10d} < 8$	$2 < 0.9 / 0.21 < 8$	$2 < C_u = 4.285 < 8$

Tableau 4.4 : Coefficient d'uniformité de matériau drainant

Tous les critères de conception sont satisfaits, confirmant l'adéquation du matériau drainant sélectionné avec les exigences techniques du projet.

- **Choix du géotextile :**

Selon le (CFG, 2002), les géosynthétiques doivent être dimensionnés selon les critères suivants :

- **Faible résistance à la pénétration de l'eau :** La hauteur d'eau (H) à travers le géotextile doit être  $\leq 5$  mm
- **Perméabilité :** Le géosynthétique doit être plus perméable que le sol :  $V_{H50}$  (vitesse d'écoulement dans le géosynthétique) > vitesse de l'eau dans le sol.

Types d'ouvrage	Critère de perméabilité
Pour les ouvrages de classe de conséquence élevée (barrages en terre, par exemple)	$V_{H50} > 10^3 k_s \cdot i_s$
Autres ouvrages (tranchée drainante, drainage talus et versants)	$V_{H50} > 10^2 k_s \cdot i_s$
Dans le cas de sables propres	$V_{H50} > 10 k_s \cdot i_s$

Où :

- $k_s$  : coefficient de perméabilité du sol (m/s)
- $i_s$  : gradient hydraulique dans le sol.

Figure 4.7 : Les critères de perméabilité

- **Non-rétention des fines :** pour garantir que les particules fines ne colmatent pas le filtre il faut que :  $O_{90} \geq 63 \mu\text{m}$
- Rétention du squelette du sol :

Dimension représentative ( $d_n$ )

- $C_u < 6$  (granulométrie serrée)  $\rightarrow d_n = d_{85}$
- $C_u \geq 6$  (granulométrie étalée)  $\rightarrow d_n = d_{50}$

Plage d'ouverture admissible ( $O_{90}$ )

- $63 \mu\text{m} \leq O_{90} \leq C \times d_n$
- Coefficient  $C = C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4$

Facteur	Condition	Valeur
$C_1$ (granulométrie)	Courbe continue et étalée	1
	Courbe uniforme	0,8
$C_2$ (compacité)	Sols lâches / non confinés	0,8
	Sols denses et confinés	1,25
$C_3$ (gradient hydraulique)	$i_s < 5$	1
	$i_s \geq 5$	0,8
	Ecoulement alterné	0,6
$C_4$ (rôle du géosynthétique)	Filtre seul	1
	Filtre-drain	0,3

Tableau 4.5 : Facteurs d'ajustement ( $C$ ) (CFG, 2002)

## Cas particuliers

- Dans les sols cohérents : si  $O_{90} < 80 \mu\text{m} \rightarrow 63 \mu\text{m} \leq O_{90} \leq 80 \mu\text{m}$ .

Au terme de notre analyse, le géotextile AS10 a été sélectionné pour son faible impact environnemental et sa compatibilité avec les caractéristiques du matériau drainant dimensionné (figure 4.8) :

Caractéristiques	Normes	Unités	AS10	AS15	AS20	AS25	AS30	AS35	AS40
<b>Caractéristiques physiques</b>									
Masse surfacique	ISO 9864	g/m <sup>2</sup>	100	150	200	250	300	350	400
Epaisseur sous 2 kPa	ISO 9863-1	mm	0,50	0,80	1,00	1,25	1,60	1,70	2,20
<b>Caractéristiques mécaniques</b>									
Résistance à la traction SP*	ISO 10319	kN/m	06	10	13	16	20	23	27
Résistance à la traction ST*	ISO 10319	kN/m	07	12	16	20	25	30	33
Déformation à la force maximale SP*	ISO 10319	%	70	70	70	75	75	80	80
Déformation à la force maximale ST*	ISO 10319	%	90	90	90	95	100	100	105
Perforation dynamique	ISO 13433	mm	30	25	17	15	11	10	09
Résistance au poinçonnement statique CBR	ISO 12236	kN	1,00	1,70	2,10	2,90	3,40	4,00	4,40
Résistance au poinçonnement pyramidal	EN 14574	kN	0,70	1,00	1,20	1,50	1,80	1,90	2,30
<b>Caractéristiques hydrauliques</b>									
Perméabilité normale au plan	ISO 11058	m/sec	0,080	0,065	0,050	0,045	0,040	0,020	0,020
Ouverture de filtration	ISO 12956	µm	90	90	70	70	65	60	55
<b>Caractéristiques du rouleau</b>									
Largeur		m	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80
Longueur		m	300	250	200	160	140	120	100
Surface		m <sup>2</sup>	1740	1450	1160	928	812	696	580
Poids		kg	174	218	232	232	244	244	232

Figure 4.8 : Les caractéristiques de géotextile AS10 (Afitex industrie, 2024)

- **Synthèse du système de drainage :**

- Géotextile : AS10 (non tissé) ;
- Matériau drainant :

<b>Formulation granulaire de matériau drainant</b>		
Matériau	Graviers	Gros Sable
Diamètre (mm)	2 - 20	0,2 - 2
Pourcentage (%)	28	72

Tableau 4.6 : La formulation granulaire de matériau drainant

- Épaisseur de la couche drainante : 50 cm (pour une efficacité optimale).
- Avec l'installation d'un tuyau en PVC (diamètre  $\geq 200$  mm) au pied du mur, les perforations doivent être orientées vers le haut pour une captation optimale de l'eau. Le système doit maintenir une pente de 0,5 à 1 % en direction de l'exutoire afin d'assurer une évacuation efficace des eaux.

Cette solution alternative combine ainsi performance technique et respect de l'environnement, avec une attention particulière portée à la préservation des surfaces agricoles.

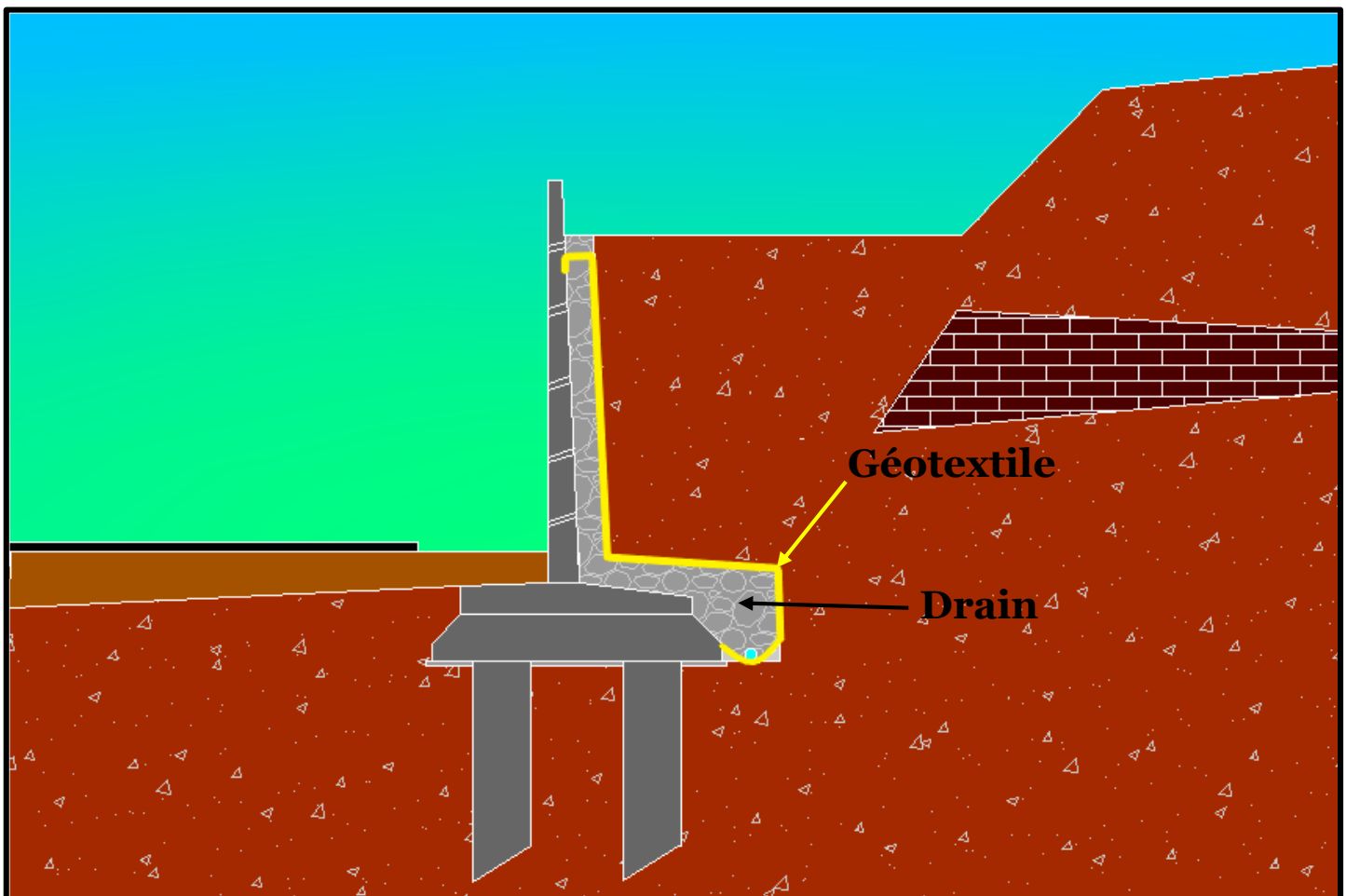


Figure 4.9.A : Coupe transversale de la variante 2

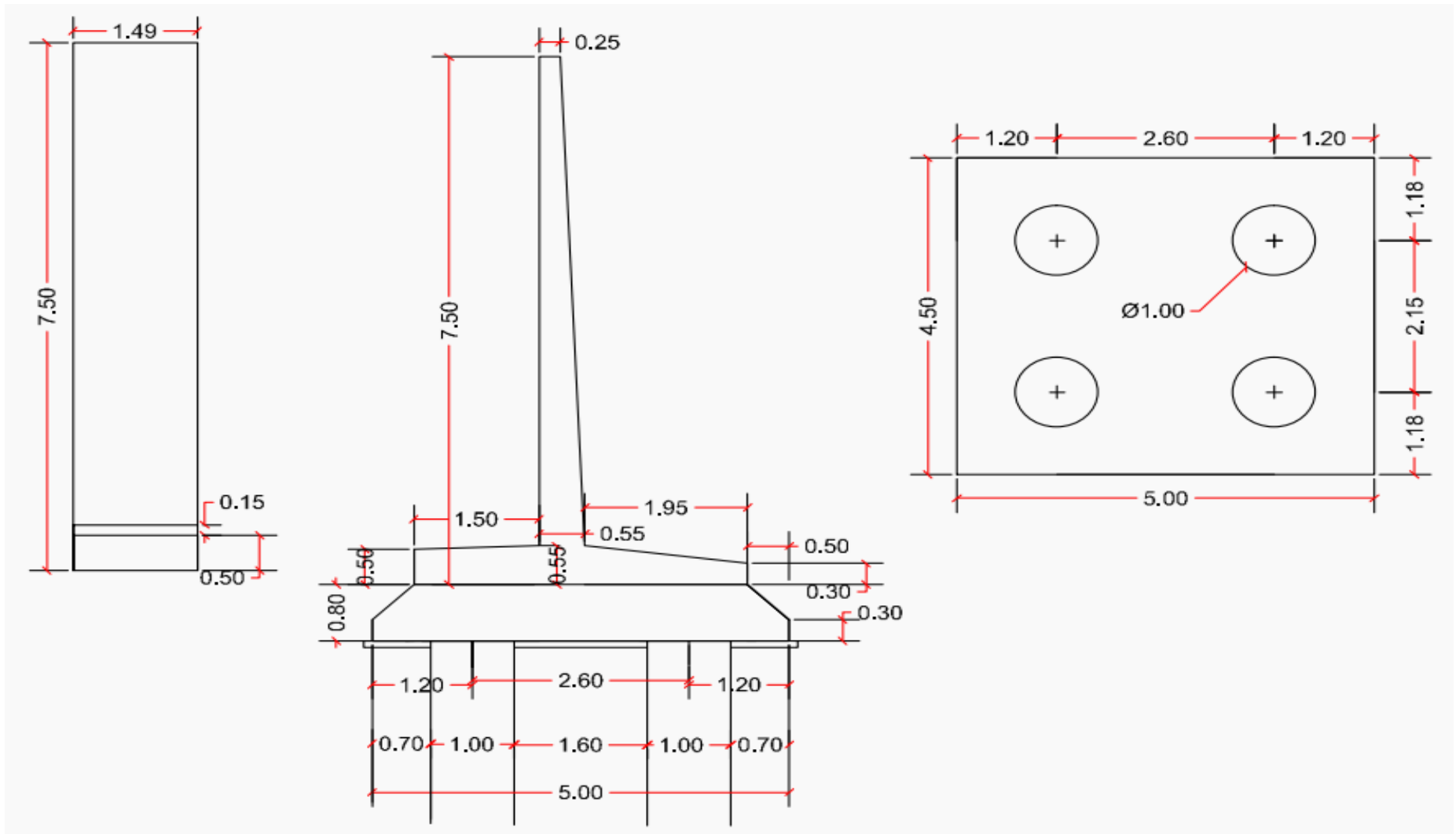


Figure 4.9.B : Les dimensions de la variante 2

## 4.4 Frontières du système

### 4.4.1 Phases incluses

L'analyse ACV prend en compte les phases les plus significatives du cycle de vie du mur de soutènement du point de vue environnemental.

Les limites du système (figure 4.9) comprennent :

- **Préparation des matériaux** : telle que la préparation du béton et façonnage des armatures en acier réalisés dans l'unité de l'Hennaya (SEROR) ;
- **Transport** : Acheminement des matériaux et des engins vers le chantier situé dans la commune de Dar Bentata (PK 1+000 de la rocade côtière) ;
- **Construction** : Processus complet de réalisation incluant (Préparation du terrain, Réalisation des semelles et pieux, Mise en œuvre du corps du mur, Installation du système de drainage, et Remblaiement...).

### 4.4.2 Phases exclues

Les phases suivantes ont été exclues de l'analyse :

- **Phase de conception** : Impacts considérés comme négligeables ;
- **Extraction des matières premières et fabrication des matériaux** : Non incluse dans le périmètre d'étude, (telle que l'extraction des agrégats, la production de ciment, la production de géotextile), (données non disponibles).
- **Phase d'exploitation** : Le projet ne nécessitant pas d'entretien particulier selon nos hypothèses ;
- **Fin de vie** : Exclusion justifiée par l'absence prévue de démolition ou de recyclage de l'ouvrage.

Cette délimitation permet de concentrer l'analyse sur les phases présentant les impacts environnementaux les plus significatifs tout en garantissant la pertinence des résultats obtenus.

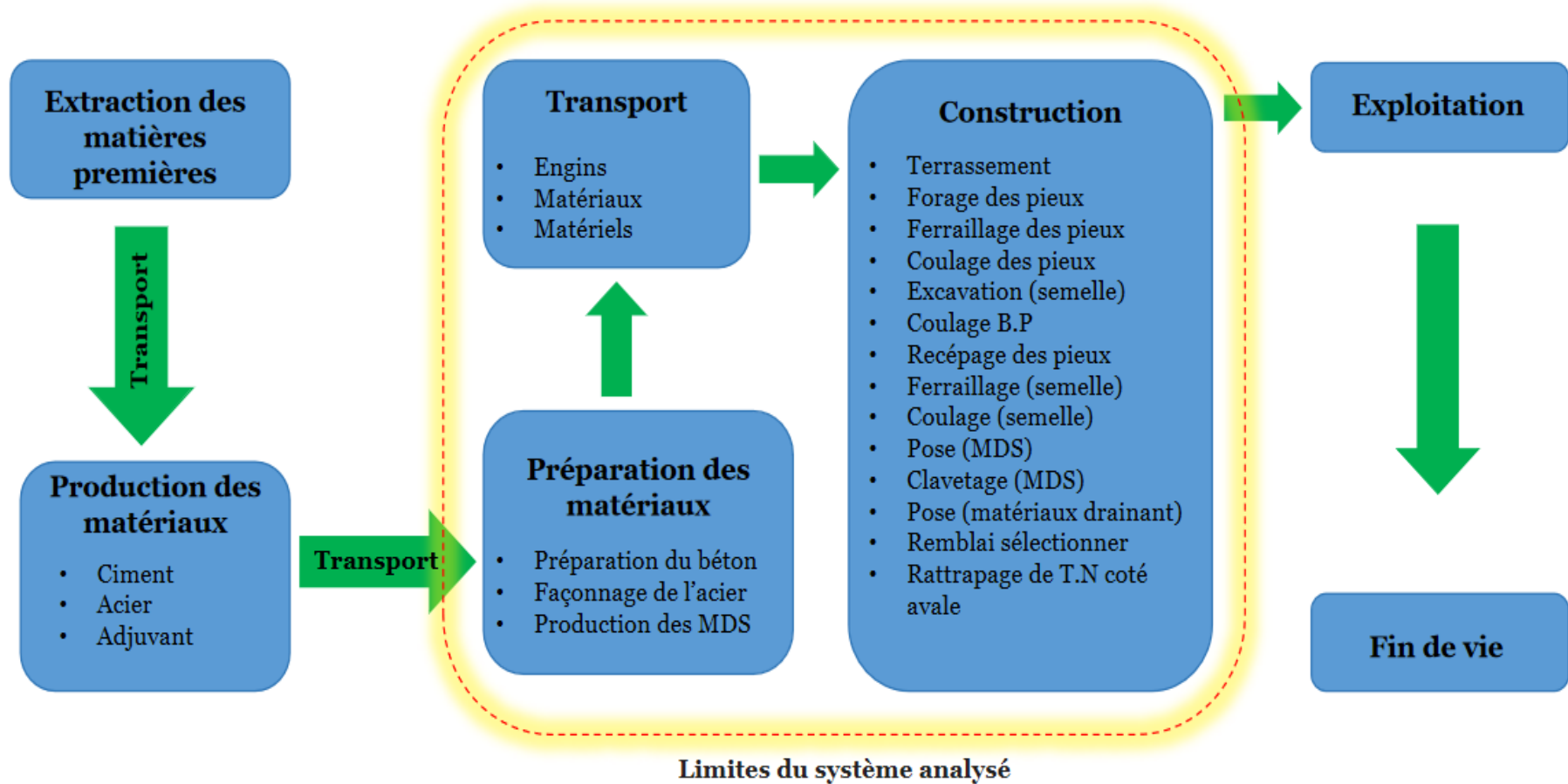


Figure 4.10.A : Limites de la variante 1

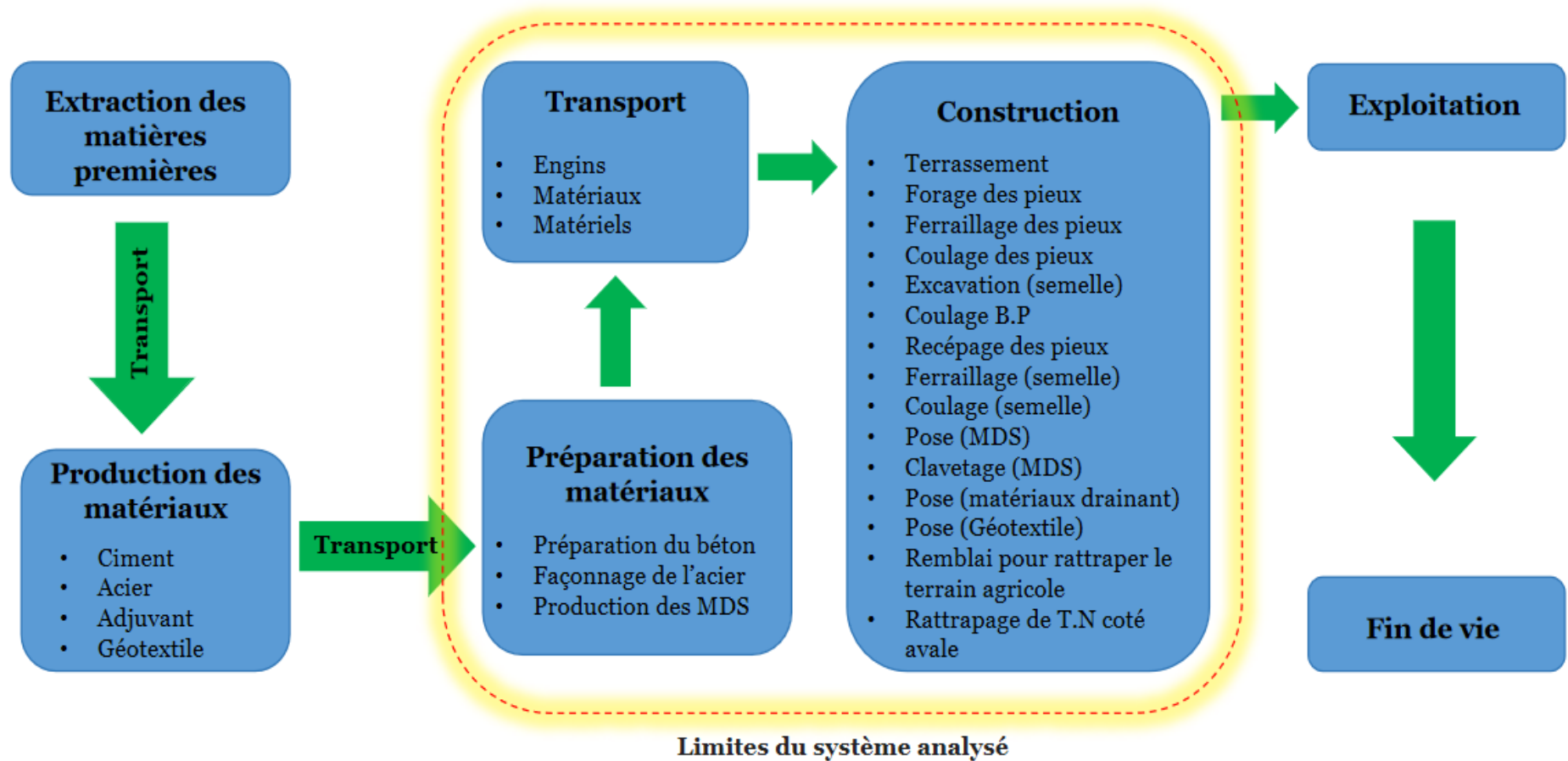


Figure 4.10.B : Limites de la variante 2

## 4.5 Les sources des données

### 4.5.1 Données primaires :

Dans le cadre de ce projet, nous avons réalisé un stage au sein du bureau technique de l'entreprise SEROR. Cette expérience nous a permis d'étudier divers documents de référence (plans, fiches techniques...).

Par la suite, nous avons intégré l'unité de production de l'Hennaya (SEROR). Durant cette phase opérationnelle, nous avons observé et participé aux différentes étapes de préparation des matériaux (formulation du béton, façonnage des armateurs), suivi le processus de production des éléments préfabriqués (MDS), documenté précisément les quantités de matériaux utilisées, les procédures techniques et les étapes clés de chaque processus

Nous avons ensuite poursuivi notre immersion sur le chantier pour analyser les méthodes de construction du mur, et effectuer des inspections détaillées.

Cette expérience globale nous a permis de consolider notre compréhension des enjeux techniques et opérationnels du projet.

#### 4.5.1.1 Les quantités de la variante 1

Le tableau suivant (tableau 4.7) rassemble l'ensemble des éléments relatifs au bloc étudié : Les matériaux de construction utilisés, Les heures de travaille des engins de chantier, et Les travaux réalisés.

Désignation	Unité	Quantités
Sable	kg	100 198
Gravier 4/8	kg	44 106
Gravier 8/16	kg	64 588
gravier 16/25	kg	23 195
Ciment	kg	46 505
Adjuvant	kg	340
Ferrailage	kg	12 019
Eau	kg	20 117
Système de drainage	m <sup>3</sup>	143
Travaux d'excavation	m <sup>3</sup>	170
Surface occupé	m <sup>2</sup>	43
Transport	km	4 343
Compactage	h	0,5
Engins d'excavation	h	44
Engins d'élévation	h	4

Tableau 4.7 : Quantités pour la variante 1

#### 4.5.1.2 Les quantités de la variante 2

Ces valeurs ont été obtenues par des calculs basés sur Les spécifications de la variante 1, le scénario de réalisation du projet, et la méthodologie d'exécution définie. Tout en garantissant le respect des exigences de stabilité, et le bon fonctionnement de l'ouvrage (tableau 4.8).

Désignation	Unité	Quantités
Sable	kg	72 945
Gravier 4/8	kg	32 105
Gravier 8/16	kg	47 005
Gravier 16/25	kg	16 885
Ciment	kg	33 676
Adjuvant	kg	247
Ferrailage	kg	8 749
Eau	kg	14 625
Système de drainage	m <sup>3</sup>	26
Travaux d'excavation	m <sup>3</sup>	149
Surface occupé	m <sup>2</sup>	12
Surface récupérer	m <sup>2</sup>	27
Géotextile	m <sup>2</sup>	52
Transport	km	3 326
Compactage	h	0,5
Engins d'excavation	h	38
Engins d'élévation	h	5

Tableau 4.8 : Quantités pour la variante 2

#### 4.5.2 Données secondaires

Les facteurs d'impact pour les catégories suivantes : Potentiel de réchauffement climatique (GWP), et Demande cumulée en énergie (CED). Ont été extraits des bases de données suivantes :

- Athena Impact Estimator for Buildings (2022)
- OpenLCA (GreenDelta, 2025)
- Ecoinvent (v3.10)

## 4.6 Résultats d'analyse

L'ACV comparative des deux variantes a permis d'évaluer leur performance environnementale au travers de deux indicateurs principaux :

- Le potentiel de réchauffement climatique (GWP)
- La demande cumulée en énergie (CED)

### Méthodologie appliquée :

- Quantification des matériaux consommés et de leurs émissions associées
- Évaluation des consommations énergétiques :
  - Utilisation de diesel pour les engins de chantier
  - Consommation énergétique liée au transport des matériaux et équipements
- L'énergie électrique a été exclue du champ d'analyse conformément au protocole établi, son impact étant considéré comme négligeable dans le cadre de cette étude.

Les résultats de Notre analyse ont révélé les résultats suivants (figure 4.10) et (figure 4.11) :

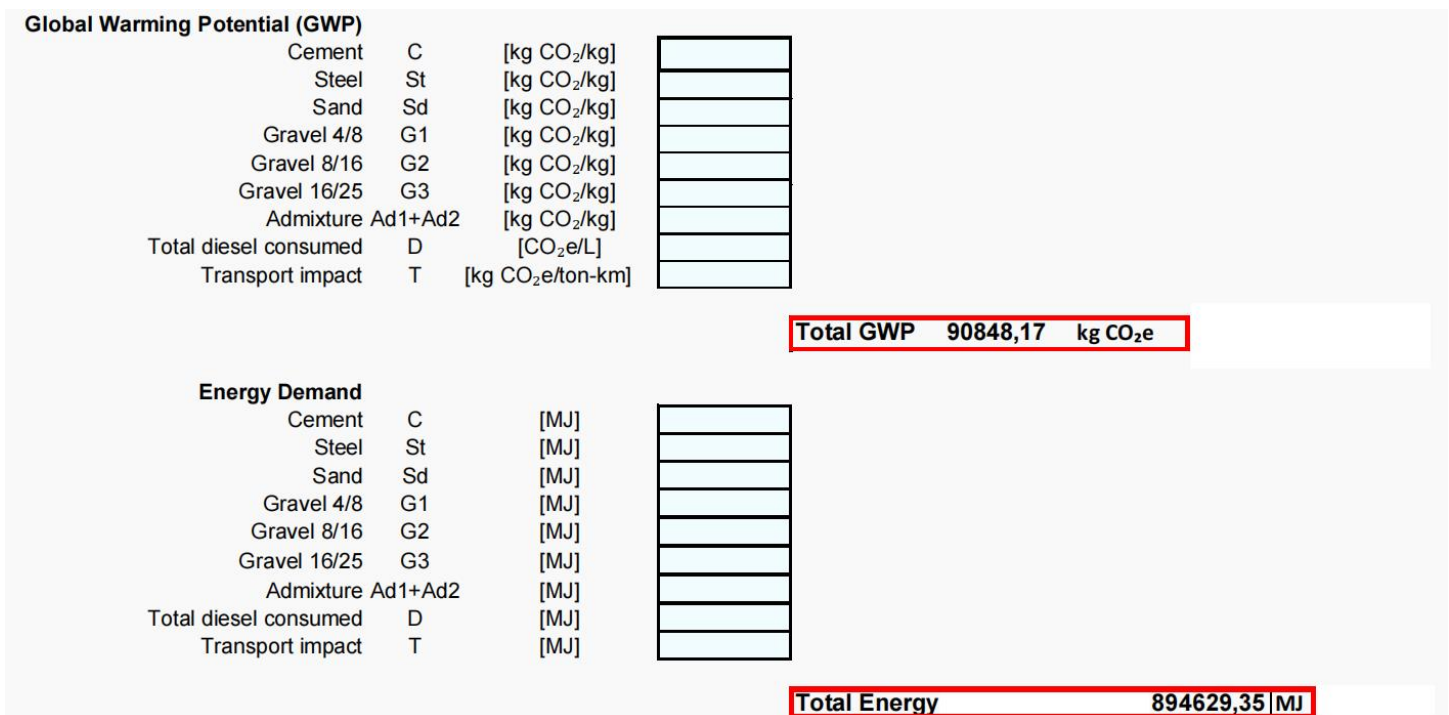


Figure 4.11 : Résultats d'ACV pour la variante 1

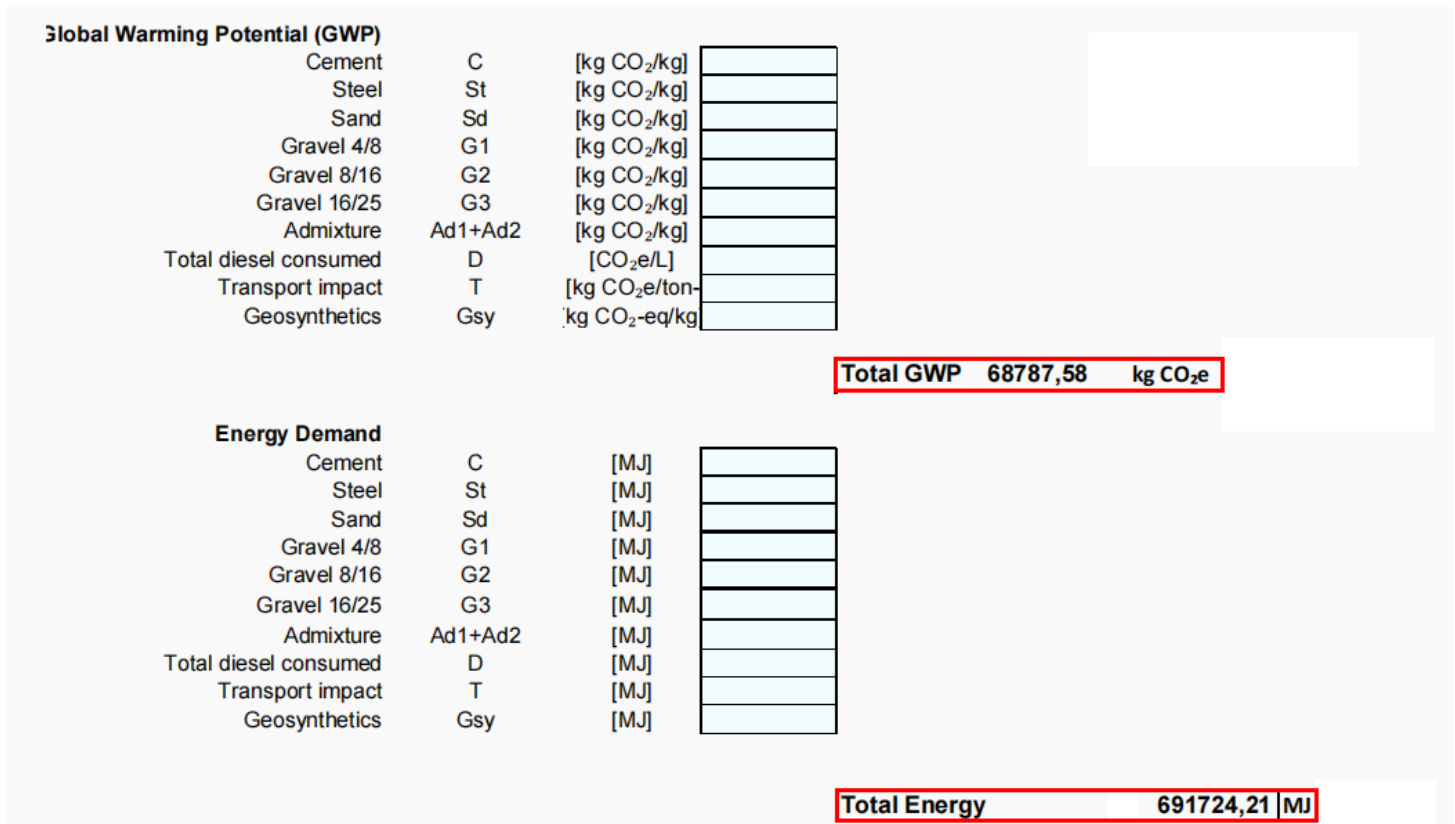


Figure 4.12 : Résultats d'ACV pour la variante 2

## 4.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté une analyse comparative par ACV de deux solutions de mur de soutènement destinées à stabiliser un glissement de terrain sur la rocade côtière (PK1+000). L'étude a évalué les deux variantes selon les indicateurs GWP et CED, en considérant les phases clés du cycle de vie. Les résultats démontrent la supériorité environnementale de la variante 2, avec des réductions significatives de 24 % des émissions de CO<sub>2</sub>éq et de 23 % de la consommation énergétique. La méthodologie rigoureuse, conforme aux normes ISO 14040-44, valide l'efficacité des géotextiles pour concilier performance technique et durabilité dans les ouvrages de soutènement.

## **Chapitre 5**

# **Dépouillement et interprétation des résultats**

**C**e chapitre présente une analyse approfondie des résultats de l'ACV menée sur les deux variantes de conception du mur de soutènement. Fondée sur des données quantitatives recueillies lors de notre stage et validées par des modélisations spécifiques, cette évaluation environnementale comparative permet d'objectiver les avantages de la solution proposée (Variante 2) face à l'approche conventionnelle (Variante 1).

## 5.1 Observations sur le terrain

Lors de notre stage et de nos multiples visites sur le chantier, la configuration topographique singulière du site a immédiatement attiré notre attention. Le terrain, situé sur un plateau à déclivité prononcée, présente des caractéristiques géomorphologiques particulières. Nos investigations, combinant :

- Analyse d'imagerie satellitaire
- Relevés topographiques de terrain
- L'examen visuel sur site
- Étude géotechnique préliminaire

Ont clairement mis en évidence que le mouvement de glissement suit une orientation sud-ouest, développant une trajectoire parallèle à l'axe routier plutôt qu'une direction de coupe perpendiculaire.

### 5.1.1 Limites de la solution actuelle

Le mur de soutènement en béton armé sur pieux construit le long de la route, présente plusieurs inadaptations :

- Orientation inadéquate : L'ouvrage est disposé perpendiculairement à la route, alors que le glissement progresse parallèlement, limitant ainsi son efficacité.
- Phénomène mal appréhendé : L'ampleur du mouvement (grand glissement) et ses facteurs déclenchants n'ont pas été correctement pris en compte (la forte présence des eaux souterraines)

### 5.1.2 Manifestations du glissement et risques persistants

Les désordres observés confirment l'importance du phénomène :

- Soulèvements significatifs de la chaussée
- Fissurations périphériques étendues sur le terrain glissant
- Cercle de glissement bien marqué sur le talus

Malgré la construction du mur, plusieurs facteurs laissent présager une réactivation des désordres :

- Géologie défavorable : Nature des sols et structure géologique propice aux mouvements ;
- Topographie accidentée : Pente accentuée favorisant les instabilités ;
- Problématique hydrologique : Infiltrations d'eau et présence de nappes souterraines mal maîtrisées ;
- L'appréciation du problème : le grand glissement non considéré dans le dimensionnement.

### **5.1.3 Recommandations**

Une approche corrective devrait intégrer :

- Un système de drainage adapté (notre variante proposé (variante 2) est choisi à fin de améliorer ce problème) ;
- Des solutions de stabilisation tenant compte de la cinématique réelle du glissement.

En l'état, la solution actuelle ne permettra pas de résoudre durablement le problème, risquant même d'entraîner une aggravation des désordres. Notre solution proposée (variante 2) vise à corriger les insuffisances de l'ouvrage actuel en agissant sur la cause principale du glissement à savoir, la présence des eaux souterraines. Elle combine un système de drainage complet avec géotextiles sur toute l'interface mur-sol, permettant de réduire efficacement les pressions hydrostatiques et de stabiliser durablement le terrain. Cette approche ciblée offre une réponse adaptée à la problématique hydromécanique du site.

## **5.2 Les gains dans les matériaux**

L'analyse des données collectées durant notre stage dans l'entreprise de réalisation nous a permis de quantifier les gains des matériaux, dont les résultats sont synthétisés dans le tableau suivant :

Matériaux	Unité	Quantités de réduction	Pourcentage de réduction (%)
Sable	kg	27 253	27
Gravier 4/8	kg	12 001	27
Gravier 8/16	kg	17 584	27
Gravier 16/25	kg	6 311	27
Ciment	kg	12 829	28
Adjuvant	kg	93	27
Ferrailage	kg	3 270	27
Eau	kg	5 492	27
Système de drainage	kg	225 300	82
<b>Pourcentage totale de réduction</b>			<b>33 %</b>

Tableau 5.1 : Réduction des matériaux

L'amélioration du système de drainage dans la deuxième variante, adaptée aux besoins réels du terrain, a permis de réduire la poussée hydrostatique exercée sur le mur, notamment en éliminant la stagnation des eaux souterraines. Ce système combine :

- Un matériau drainant granulaire
- Un géotextile positionné sur toute l'interface mur-sol, assurant une double fonction :
  - Filtration : permettant le passage de l'eau tout en retenant les particules fines
  - Séparation : empêchant le mélange des couches de matériaux adjacentes Cette solution assure

Un drainage efficace des eaux provenant de toutes les directions, tout en évacuant les eaux pluviales vers la surface grâce à des drains intégrés.

Grâce à cette optimisation, nous avons pu redimensionner le mur, ce qui a engendré :

- Une réduction significative des quantités de matériaux (béton, acier, granulats)
- Une structure tout aussi stable et fiable
- Une solution plus écologique, limitant l'impact environnemental.

Ainsi, cette approche permet non seulement des économies substantielles, mais aussi une meilleure durabilité de l'ouvrage.

### 5.3 La surface récupérée

Dans le cadre des travaux de la rocade côtière de Ghazaouet, une portion importante de terrain agricole située à proximité a été intégrée au projet en raison des opérations de terrassement et de reprofilage des talus. Par la suite, un glissement de terrain est survenu sur cette pente, provoquant :

- Apparition de fissures dans la terre cultivables.
- Élargissement progressif des fissures (jusqu'à 3 m de largeur dans quelque une).
- Réduction de la surface agricole exploitable.

#### **Solution réalisé :**

Pour stabiliser le terrain, les responsables ont opté pour la construction d'un mur de soutènement en béton accompagné d'un remblai en matériau inadapté à l'agriculture mis derrière le mur. Cette solution a entraîné une perte supplémentaire de terres cultivables, avec une superficie perdue pouvant atteindre 30 m<sup>2</sup> par bloc.

#### **Solution proposé :**

Notre variante propose un mur de soutènement en béton associé à un système de drainage avec un géotextile placé à l'interface mur-sol. Avec un remblaiement complémentaire surmonté d'une couche de terre agricole, permettant de récupérer jusqu'à 27 m<sup>2</sup> de surface cultivable par bloc.

Donc ce choix nous a accordé un gain de 90% de surface cultivable par rapport à la solution initiale.

## 5.4 Gain technique

Variante 1 :

- Bétonnage important : Volume élevé de béton requis pour la structure.
- Remblai conséquent : Mise en place d'un remblai drainant et technique en grande quantité derrière le mur.
- Moyens lourds mobilisés : Recours à plusieurs engins et techniques complexes pour la réalisation.

Solution proposée (variante 2) :

- Réduction des matériaux : Diminution des quantités de béton, tout en garantissant la stabilité de l'ouvrage.
- Fonctionnement optimisé : Adaptation aux besoins réels du projet, assurant une performance améliorée avec des moyens simplifiés.
- Gain global :
  - ✓ Économique : Réduction des coûts de matériaux et de main-d'œuvre.
  - ✓ Environnemental : Diminution de l'empreinte carbone grâce à une utilisation plus raisonnée des ressources.
  - ✓ Organisationnel : Simplification logistique (moins d'engins, temps de chantier réduit).

Notre solution offre une alternative optimisée, combinant efficacité technique, économie de moyens et respect de l'environnement, tout en garantissant la stabilité et la durabilité de l'ouvrage.

## 5.5 Interprétations des résultats de l'ACV

Nous avons visualisé les résultats de l'ACV sous forme graphique afin de faciliter l'interprétation des données.

Les diagrammes suivants présentent les principaux résultats de notre analyse.

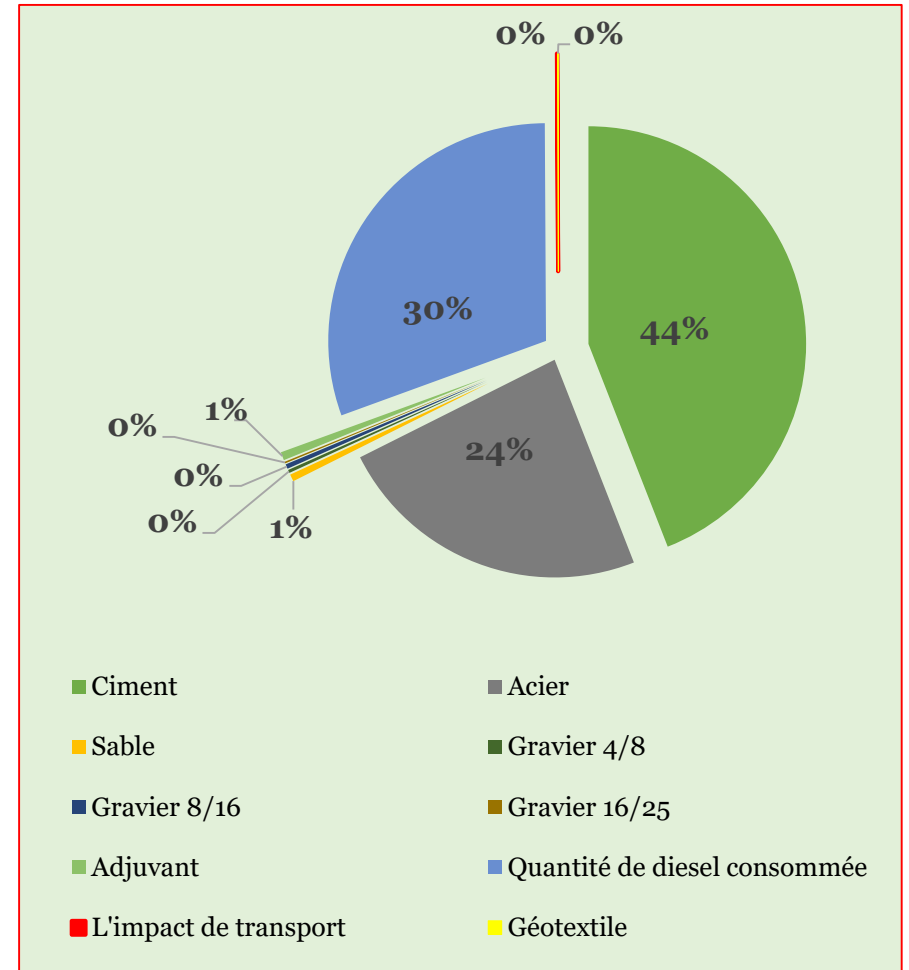
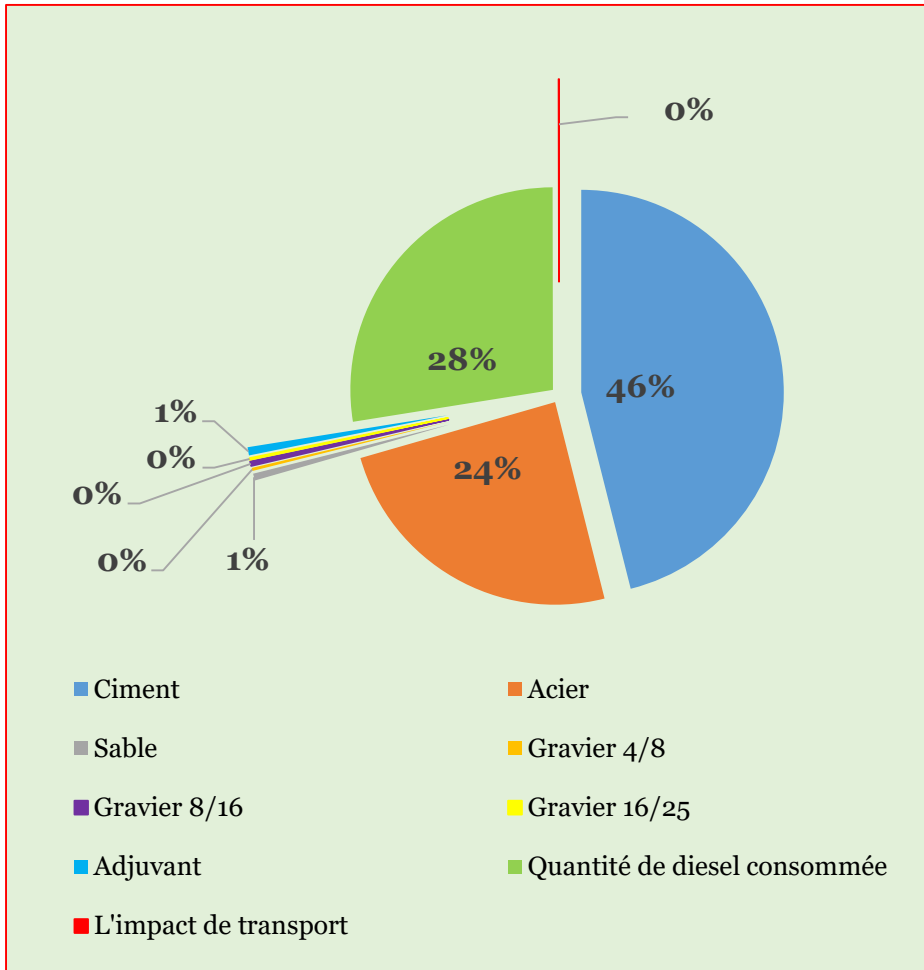


Figure 5.01: Potentiel de réchauffement climatique (GWP) pour la variante 1    Figure 5.2 : Potentiel de réchauffement climatique (GWP) pour la variante 2

- **Évaluation de GWP pour la variante 1** (Figure 5.1) :

Les principaux facteurs contribuant au potentiel de réchauffement climatique se répartissent comme suit :

- Ciment : 46%, impact majeur attribuable aux procédés de fabrication énergivores
- Acier : 24%, émissions principalement générées lors de la production et du transport
- Consommation de diesel : 28%, résultant de l'exploitation des équipements de chantier

Les composants secondaires (sable, graviers, adjuvant) présentent des contributions négligeables ( $\leq 1\%$ ), bénéficiant de processus moins polluants et d'un approvisionnement local.

- **Évaluation de GWP pour la variante 2** (figure 5.2) :

La structure des impacts environnementaux demeure dominée par les mêmes composants clés :

- Ciment : 44%, réduction modeste obtenue par optimisation des quantités
- Acier : 24%, niveau d'impact inchangé
- Consommation de diesel : 30%, augmentation imputable à des besoins opérationnels supplémentaires

Le géotextile présente un impact faible, tandis que les composants secondaires (sable, graviers, adjuvant) affichent des contributions négligeables ( $\leq 1\%$ ).

- **Recommandations :**

Les trois éléments principaux (ciment, acier, diesel) concentrent 98% des émissions totales. Les mesures correctives prioritaires incluent :

- Optimisation du ciment : adoption de liants alternatifs à faible empreinte carbone, et la rationalisation des quantités par modélisation avancée
- Amélioration des pratiques sidérurgiques : intégration d'acier recyclé, ou recours à des solutions innovantes (armatures en fibres de vers)
- Réduction des émissions énergétiques : électrification progressive des équipements, et la substitution par des biocarburants de nouvelle génération

Cette approche systémique permettra d'atteindre les objectifs de développement durable tout en maintenant les performances techniques requises.

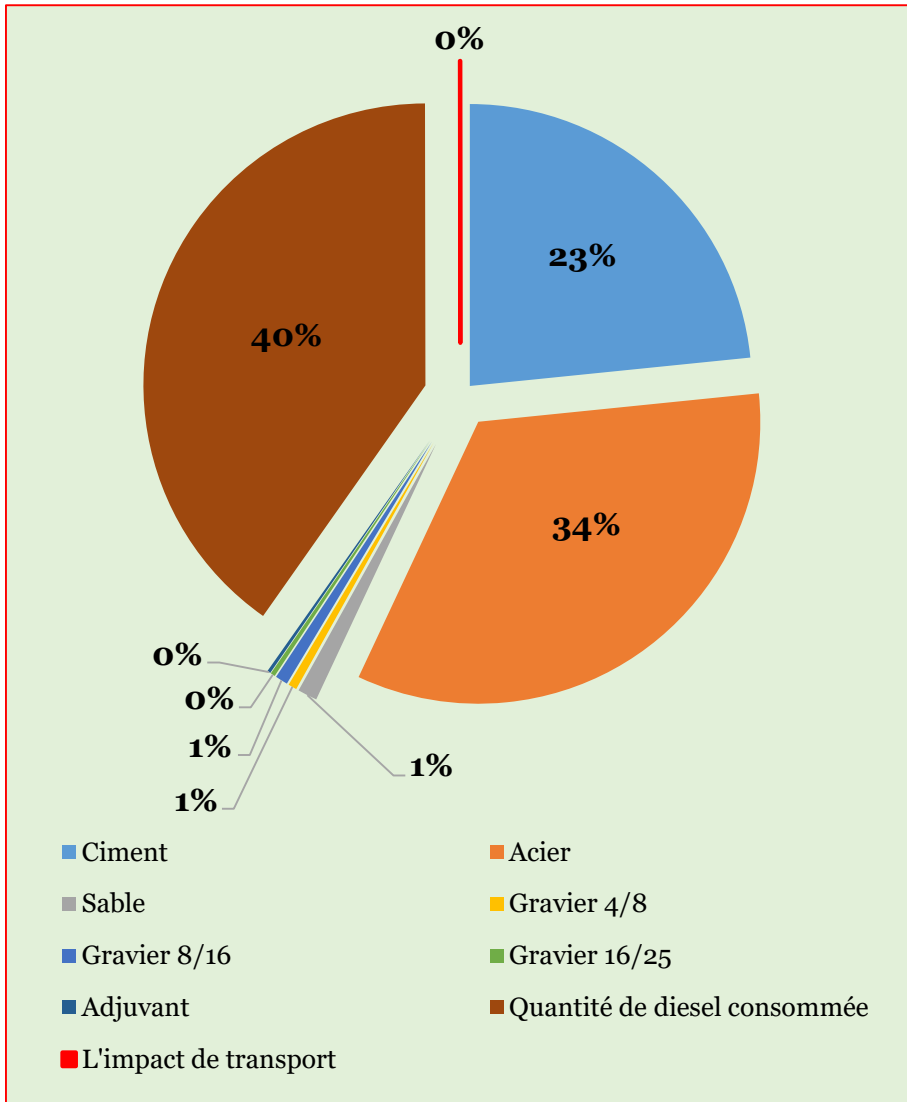


Figure 5.3 : Demande cumulée en énergie (CED) pour la variante 1

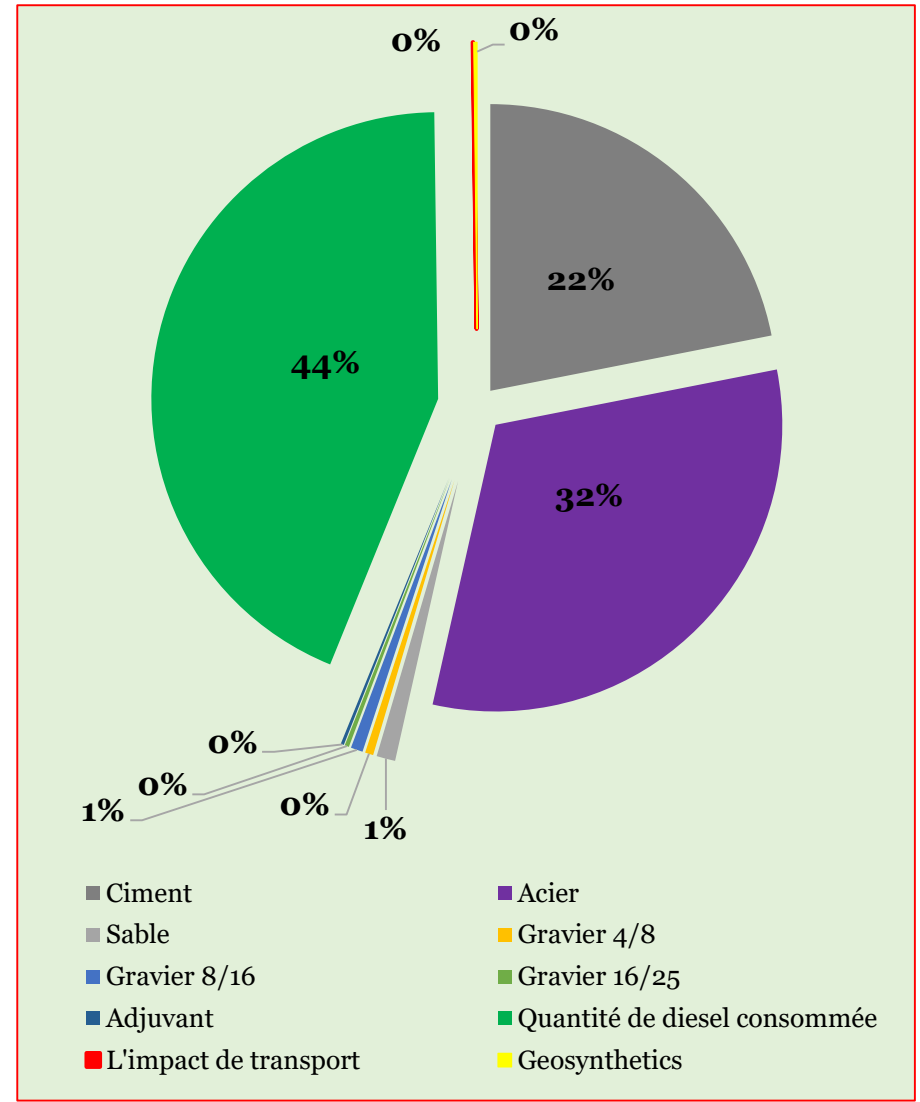


Figure 5.4 : Demande cumulée en énergie (CED) pour la variante 2

- **Évaluation de CED pour la variante 1** (figure 5.3)

Les trois éléments dominants représentent 97% de la demande cumulée en énergie :

- Consommation de diesel (40%) : principalement due à l'utilisation des engins de chantier
- Acier (34%) : impact énergétique élevé lié aux procédés de production (haut-fourneau, laminage)
- Ciment (23%) : besoin important en énergie thermique pour la production de clinker

Les autres composants (sable, graviers, adjuvant) présentent une contribution négligeable.

- **Évaluation de CED pour la variante 2** (figure 5.4)

On observe une légère modification des contributions :

Consommation de diesel (44%) : augmentation probable des besoins opérationnels

Acier (32%) : légère optimisation des procédés

Ciment (22%) : amélioration marginale

L'ajout du géotextile présente un impact énergétique limité comparé aux trois éléments principaux.

- **Pistes d'optimisation**

Pour réduire significativement la demande énergétique, une action ciblée sur les trois postes clés est essentielle :

Pour le diesel :

- Électrification des engins de chantier
- Optimisation des plannings pour réduire les temps d'utilisation

Pour l'acier :

- Recours à l'acier recyclé

Pour le ciment :

- Substitution partielle par des liants alternatifs (cendres volantes, laitier)

- Optimisation des quantités

Pour les géosynthétiques :

- Choix de produits biosourcés ou recyclés
- Choix d'un produit biodégradable

### 5.5.1 L'évaluation du potentiel de réchauffement climatique (GWP) pour les deux variantes

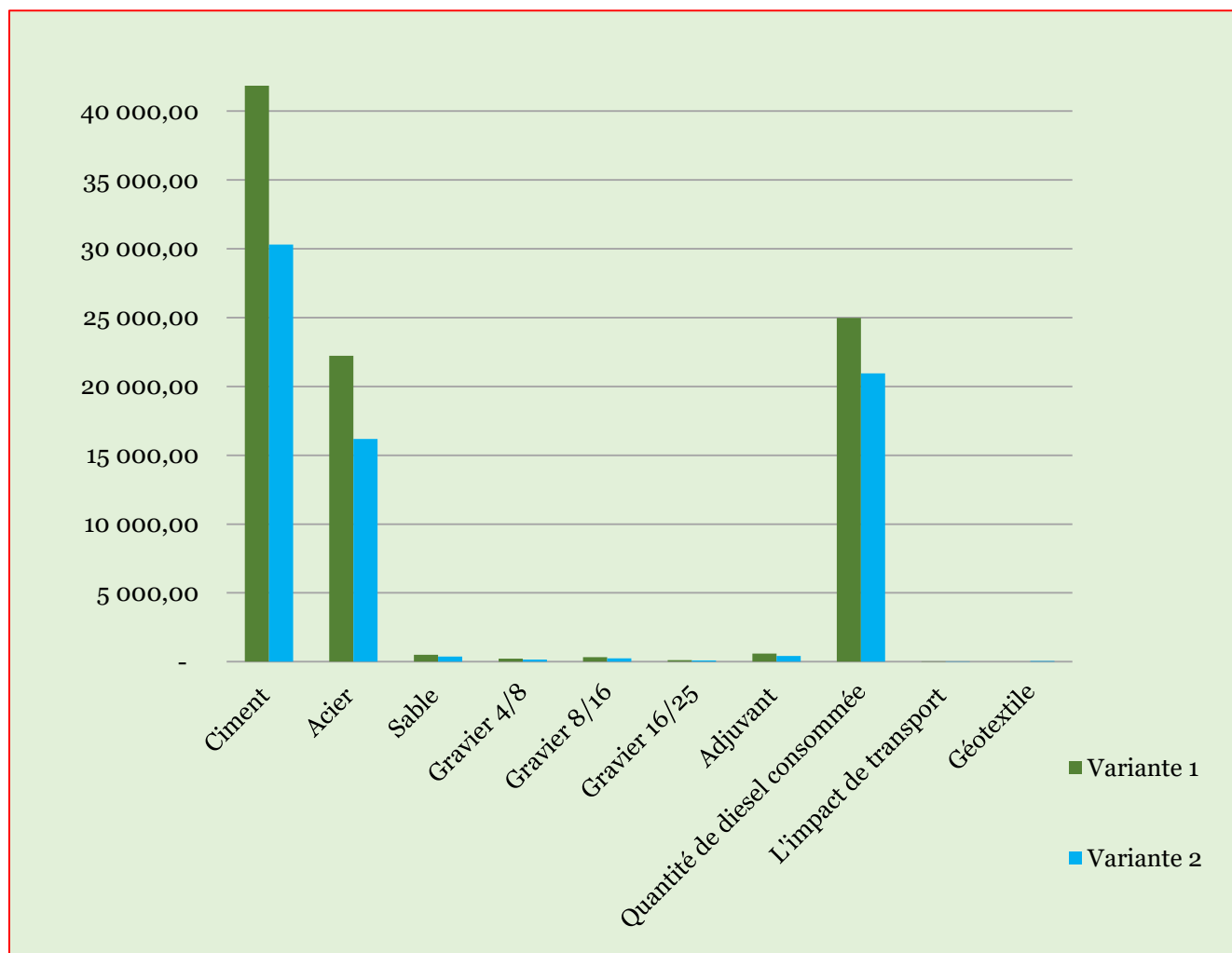


Figure 5.5 : Le potentiel de réchauffement climatique (GWP) pour les deux variantes

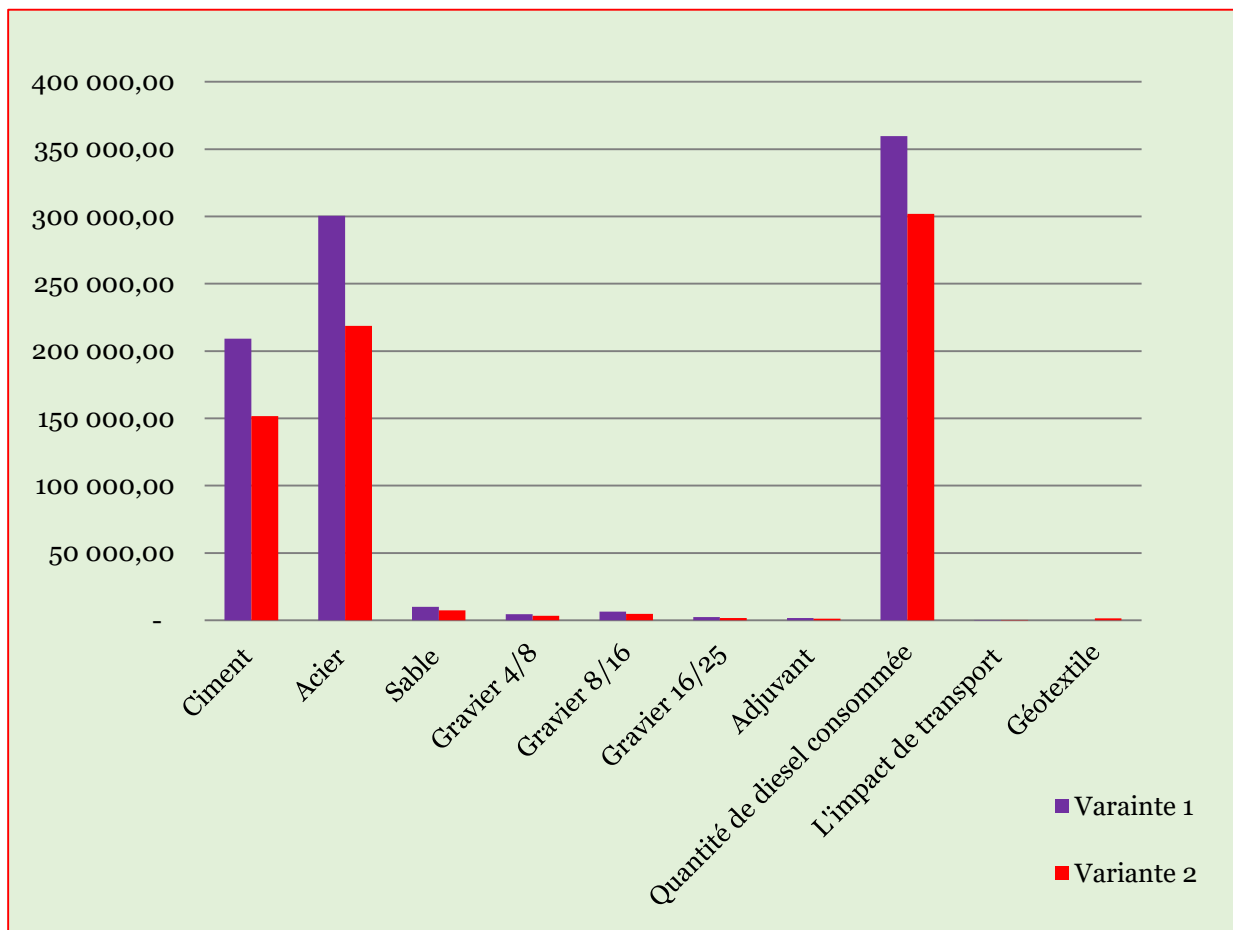


Figure 5.6 : La demande cumulée en énergie (CED) pour les deux variantes

• **Potentiel de Réchauffement Climatique (GWP) (figure 5.5) :**

La Variante 2 démontre une réduction significative du GWP par rapport à la Variante 1, indiquant une amélioration des performances environnementales.

Cette diminution suggère :

- Une optimisation des matériaux à fort impact (ciment, acier)
- Une meilleure efficacité énergétique des procédés
- Possible intégration de solutions bas-carbone

Points clés :

- Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> équivalent, et alignement potentiel avec les objectifs de développement durable

- **Analyse de la Demande Cumulée en Énergie (CED)** (figure 5.6) :

La Variante 2 présente une consommation énergétique inférieure à la Variante 1

Cette amélioration reflète :

- L'optimisation des processus de construction
- L'adoption de technologies plus efficaces
- Une possible réduction des besoins en énergie grise

Éléments notables :

- Diminution de l'intensité énergétique globale
- Potentiel d'économies opérationnelles à long terme

- **Synthèse des Résultats :**

Catégorie d'impact	Unité	Variante 1	Variante 2	Réduction (%)
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq	90848	68788	24
CED	MJ	894629	691724	23

*Tableau 5.2 : Synthèse des résultats*

- **Recommandations :**

Capitaliser sur les succès :

- Généraliser les bonnes pratiques de la Variante 2
- Documenter les solutions ayant conduit aux améliorations

Perspectives d'amélioration :

- Explorer des matériaux alternatifs supplémentaires
- Optimiser davantage la logistique et les processus

• **Validation des résultats :**

	Références	Descriptions	Hauteur (m)	Longueur (m)	GWP (t CO <sub>2</sub> éq)	CED (MJ)
<b>Autres travaux</b>	(Laidié, 2018)	Mur de soutènement en béton armé	3	1	1,3	2,7
		Mur de soutènement renforcé par géosynthétique	3	1	0,2	3,1
	(Djadouni, et al., 2018)	Mur en béton armé avec un remblai du sable	3,3	30,4	593	231480
		Mur en béton armé avec un remblai des pneus déchiquetés	3,3	30,4	375	141940
<b>Présent travail</b>	(Bentalha et Medjahdi, 2025)	Variante(1) mur de soutènement avec un drainage granulaire	7,5	4,5	90,848	894629
		Variante (2) mur de soutènement avec système de drainage associé à un géotextile	7,5	4,5	68,788	69172

Tableau 5.3 : Validation des résultats

Ce tableau présente une analyse comparative des impacts environnementaux de différents types de murs de soutènement, évalués à travers deux indicateurs clés : GWP (tonnes de CO<sub>2</sub> équivalent) et CED (MJ).

Les données montrent que les solutions intégrant des matériaux alternatifs, comme les géosynthétiques ou les pneus déchiquetés, permettent de réduire significativement ces impacts. Par exemple, le mur renforcé par géosynthétique présente un GWP bien inférieur (0,2 t CO<sub>2</sub> éq) à celui d'un mur traditionnel en béton armé (1,3 t CO<sub>2</sub> éq). De même, l'utilisation de pneus déchiquetés comme remblai réduit le GWP de 593 à 375 t CO<sub>2</sub> éq et la CED de 231 480 à 141 940 MJ par rapport au sable.

Les variantes proposées dans notre cas confirment cette tendance, avec une réduction notable des impacts lorsque le géotextile est associé au système de drainage (GWP passant de 90,848 à 68,788 t CO<sub>2</sub> éq).

Ces résultats mettent en évidence l'intérêt des approches écoresponsables pour réduire l'empreinte écologique des infrastructures. Ils encouragent à poursuivre l'innovation en éco-conception, tout en veillant à :

- La durabilité à long terme des solutions proposées ;
- L'équilibre entre performance environnementale et exigences techniques ;
- L'optimisation continue des méthodes pour une construction plus durable.

Cette analyse souligne ainsi la nécessité d'adopter des pratiques plus respectueuses de l'environnement dans le domaine du génie civil.

# Conclusion générale

**L**es glissements de terrain représentent un défi majeur en ingénierie géotechnique, particulièrement dans des contextes géologiques et climatiques sensibles comme celui de la rocade côtière de Ghazaouet. Face à ce problème, les solutions conventionnelles, bien que répandues, présentent souvent des limites en termes d'efficacité et d'impact environnemental. L'objectif de ce mémoire était donc de proposer une approche innovante et durable pour stabiliser ces mouvements de terrain, en combinant des techniques de génie civil avec une évaluation rigoureuse des impacts environnementaux via l'ACV.

Les résultats de cette étude ont permis de démontrer que la **variante 2**, intégrant un système de drainage optimisé avec géotextile, offre des avantages significatifs par rapport à la solution traditionnelle en béton armé (**variante 1**) :

- **Réduction de 24 % des émissions de CO<sub>2</sub> et 23 % de la consommation énergétique**, grâce à l'optimisation des matériaux et à l'efficacité du drainage.
- **Récupération de 90 % de la surface agricole** initialement perdue, répondant ainsi aux enjeux de préservation des terres cultivables.
- **Approche technique plus adaptée** à la dynamique réelle du glissement, notamment par une meilleure gestion des eaux souterraines, facteur clé de l'instabilité.

Les méthodes employées, alignées sur les normes ISO 14040-44 et soutenues par des outils comme OpenLCA, ont confirmé la pertinence de l'ACV pour guider les choix techniques dès la phase de conception. Cette démarche permet non seulement de minimiser l'empreinte écologique des ouvrages, mais aussi d'améliorer leur résilience face aux contraintes géotechniques, climatiques et environnementales.

## Difficultés rencontrées et limites

- **Disponibilité des données** : Certaines phases du cycle de vie (extraction des matières premières, fin de vie) n'ont pas pu être intégrées en raison du manque de données locales.

- Complexité des interactions hydro-géotechniques : La modélisation fine des effets du drainage sur la stabilité à long terme nécessiterait des études complémentaires.

### **Perspectives de recherche**

Pour approfondir cette démarche, les travaux futurs pourraient explorer :

- L'utilisation des géosynthétiques biosourcés ou recyclés pour réduire davantage l'impact environnemental.
- L'intégration de l'ACV sociale et économique afin d'évaluer les coûts globaux et l'acceptabilité des solutions proposées.
- L'adaptation de ces méthodes à d'autres contextes géologiques (sols gonflants, zones sismiques, etc.).

En conclusion, ce mémoire souligne l'importance d'une ingénierie géotechnique durable, où innovation technique et responsabilité environnementale vont de pair. Les solutions proposées, bien que perfectibles, ouvrent la voie à des pratiques de construction plus respectueuses des écosystèmes et plus efficaces face aux défis climatiques actuels. En fin cette approche démontre que la durabilité n'est pas une contrainte.

# Bibliographie

- **ACTU 2025.** Actu-environnement. [En ligne] 2025. [Citation : 16 mai 2025.] <https://www.actu-environnement.com/>. CNIL N°845317 - ISSN N°2107-6677.
- **Afitex industrie 2024.** *Fiche technique pour les géotextiles gamme AS.* 2024.
- **AGLO 2024.** Réalisez simplement votre ACV bâtiment. *AGLO.* [En ligne] 2024. [Citation : 20 avril 2025.] <https://www.aglo.ai/logiciel-acv/>.
- **Vade Akshay , Athalye Ashok et Mundkur Suman 2025.** Life Cycle Assessment and Carbon ImpactAssessment. 2025, Vol. III, 1.
- **Altermaker 2025.** Comment choisir un logiciel ACV ? *Altermaker.* [En ligne] 2015-2025. [Citation : 18 avril 2025.] <https://altermaker.fr/logiciel-acv-eco-conception/>.
- **Antoinet Éric et Sarelli Adrien 2025.** Ianalyse du cycle de vie (ACV) appliquée aux ouvrages géotechniques : une nouvelle méthode pour une évaluation globale des impacts environnementaux. [En ligne] 2025. [Citation : 03 mai 2025.] <https://www.solscope.fr/innovations-dans-les-metiers-du-sol-l-analyse-du-cycle-de-vie-acv-appliquee-aux-ouvrages-geotechniques-une-nouvelle-methode-pour-une-evaluation-globale-des-impacts-environnementaux,b43-1170.htm?impression=1>.
- **Balasbaneh A. T. et Marsono A. K. B. 2020.** *Applying multi-criteria decision-making on alternatives for earth-retaining walls: LCA, LCC, and S-LCA.* s.l. : The international Journal of Life Cycle Assessment, 2020. pp. 2140-2153. Vol. 25.
- **Berg R. , Christopher B. et Samtani N. 2009.** Design and Construction of Mechanically Stabilizes Earth Walls and Reinforced Soil Slopes. [éd.] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. National Highway Institute. s.l. : National Highway Institute U.S Department of Transportation Federal Highway Administration, 2009. Vol. Volume I.
- **Bpifrance 2025.** Analyse du cycle de vie : définition, objectifs, étapes de réalisation. *bigmedia.Bpifrance.* [En ligne] 2025. [Citation : 20 avril 2025.] <https://bigmedia.bpifrance.fr/nos-dossiers/analyse-du-cycle-de-vie-definition-objectifs-etapes-de-realisation#quels-sont-les-outils-pour-realiser-une-analyse->.
- **CFG 2002.** *Fascicule Filtration-Drainage : Recommandations pour l'emploi des géosynthétiques dans les systèmes de drainage et de filtration.* Paris : Comité français des Géosynthétiques, 2002.
- **CGDD 2022.** Commissariat général au développement durable. *Notre-environnement.* [En ligne] République Française, 22 novembre 2022. [Citation : 18 avril 2025.] <https://www.notre-environnement.gouv.fr/>.
- **CIRAIG 2022.** Le Centre international de référence sur l'analyse du cycle de vie et la transition durable. *Analyse du cycle de vie.* [En ligne] 2022. [Citation : 29 avril 2025.] [www.ciraig.org](http://www.ciraig.org).
- **Esperanza Conradi-Galnares, Begoña Blandón-González, et Madelyn Marrero-Meléndez 2025.** Life Cycle Assessment (LCA) Fundamental Principles. [auteur du livre] Pilar Mercader-Moyano et Paula Porras-Pereira. *Life Cycle Based on Nanoparticles Applied to the Construction Industry.* 2025, chapitre 2, pp. 27-41.

- **Dai F. , Lee C. et Ngai Y. 2002.** Landslide risk assessment and management. 2002. pp. 64-65.
- **De Melo Dora , Kendall Alissa et Dejong Jason 2024.** Evaluation of life cycle assessment (LCA) use in geotechnical engineering. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*. [En ligne] 2024. [Citation : 16 avril 2025.] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2634-4505/ad2154>. 10.1088/2634-4505/ad2154.
- **Djadouni Hachemi , Trouzine Habib , Correia Gomes António et Da Silva Miranda Tiago Filipe 2018.** Life cycle assessment of retaining wall backfilled with shredded tires. *Roadways and infrastructure*. s.l. : The international journal of life cycle assessment, 2018, pp.1-9
- **Ecochain 2019.** Impact Categories (LCA): The Complete Overview. *Ecochain Technologies*. [En ligne] 7 juin 2019. [Citation : 17 avril 2025.] <https://ecochain.com/blog/impact-categories-lca/>.
- **Eco-conception 2023.** Analyse du Cycle de Vie ACV. *Le Pôle Eco-conception Performance du cycle de vie*. [En ligne] 2023. [Citation : 22 avril 2025.] <https://www.eco-conception.fr/static/analyse-du-cycle-de-vie-acv.html>.
- **Egloffstein T. , Heerten G. et Maubeuge K. 2011.** Ecological comparison between construction methods with hydraulic binder as well as geosynthetics. *24th Annual GRI*. Dallas, Texas, 2011.
- **EM-DAT 2023.** *EM-DAT International Disaster Database*. [En ligne] 2023. [Citation : 5 mai 2025.] <https://public.emdat.be/>.
- **Antoinet Eric , Saadé Myriam , et Sarelli Adrien 2024.** L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) appliquée aux ouvrages géotechniques. *Antea Group france*. [En ligne] 2024. [Citation : 18 avril 2025.] <https://www.anteagroup.fr/actualites/blog/lanalyse-cycle-de-vie-acv-appliquee-aux-ouvrages-geotechniques>.
- **Fiche de présentation glissement.** traitement du glissement de terrain sur la rocade cotière au PK1+000. NK 5.521.3.262.113.11.21.
- **Fontana Francesco 2022.** Vers plus de recyclage dans les Géosynthétiques. Saint-Malo : 13ème rencontres Géosynthétiques, 5-7 avril 2022. pp. 1-7.
- **Gendre Ines 2025.** Analyse de cycle de vie (ACV) : tout savoir en 2025. *Leaf by greenly*. [En ligne] 6 février 2025. [Citation : 22 avril 2025.] <https://greenly.earth/blog/guide-entreprise/acv-produit>.
- **Geoworks 2025.** Environmental, social and governance. [En ligne] 2025. [Citation : 20 mai 2025.] <https://geoworks.eco>.
- **Ghosn S. , Sarelli A. , Lefebvre de laboulay G. , Feraille A. , Antoinet E. et Saadé M. 2021.** *performances environnementales des ouvrages géotechniques sur leur cycle de vie (PEOGEO)*. s.l. : fondation d'entreprise FEREC, 2021.
- **Google Earth 2023.** Google Earth. [En ligne] 2023. [Citation : 16 mars 2025.] <https://earth.google.com/web/>.
- **GreenDelta 2024.** *GreenDelta*. [En ligne] 2024. [Citation : 29 avril 2025.] <https://www.greendelta.com/about-us/>.
- **Guineheuc Pierre-Marie 2012.** L'analyse du cycle de vie dans l'entreprise. *ResearchGate*. [En ligne] avril 2012. [Citation : 19 avril 2025.] <https://www.researchgate.net/publication/284374040>.
- **Guiraud Patrick 2019.** Infociments. *Cycle de vie d'un ouvrage*. [En ligne] juillet 2019. [Citation : 15 mai 2025.] <https://www.infociments.fr/>.
- **Heerten G. 2012.** Reduction of climate-damaging gases in geotechnical engineering practice using geosynthetics. 2012. Vol. 30, pp. 43-49.
- **ISO 14040 2006.** *Management environnemental-Analyse du cycle de vie-Principes et cadre*. 2006.
- **ISO 14044 2006.** *Management environnemental-Analyse du cycle de vie-Exigences et lignes directrices*. 2006.
- **Josa A. , Gettu R. et Aguado A. 2005.** Environmental assessment of cement based products. *Life cycle assessment and the ecoconcrete software tool ands Dhir R. ; Dyer T. & Newlands M. proceedings of the international conference on achieving sustainability in construction*. Ecosse :

- University of Dundee, 2005. PP 281-290.
- **Kahhat R. , Crittenden J. , Sharif F. , Fonseca E. , Li K. , Sawhney A. et Zhang P. 2009.** Environmental impact over the life cycle of residential building using different exterior wall systems. s.l. : Infrastruct syst, 2009. Vol. 15, 3, pp. 211-221.
  - **Kelly T. , Matos G. , Buckingham D. , Difrancesco C. et Porter K. 2006.** Historical statistics for mineral and material commodities in the United States. s.l. : U.S. Geological survey, 2006.
  - **Khochni Bachir , Meghachou Mourad et Trouzine Habib 2023.** A novel algorithm to determine the safety factor in reinforced and unreinforced slopes. *Soil mechanics and foundation engineering*. Springer.2023. pp. 22-28, Vol. 60 (1).
  - **Labouze E. et Rousseaux P. 1998.** Evaluation de la qualité des données d'inventaire dans les analyses du cycle de vie. *RECORD*. [En ligne] 1998. [Citation : 15 avril 2025.] <https://record-net.org/media/etudes/151/public/rapport/rapport-record96-1002-1003-1a.pdf>. n°961002//1003/1A.
  - **Laidié Nicolas 2018.** Impact environnemental comparé des constructions conventionnelles avec les solutions utilisant des géosynthétiques. s.l. : comité français des Géosynthétiques, 2018.
  - **Leaf 2024.** Les 5 meilleures plateformes pour réaliser une ACV. *Leaf by greenly*. [En ligne] 2024. [Citation : 20 avril 2025.] <https://greenly.earth/blog/guide-entreprise/les-5-meilleures-plateformes-pour-realiser-une-acv>.
  - **Léonard Angélique , Belboom Sandra , Gerbinet Saïcha , Gros Lambert Sylvie et Merchan Arribas 2019.** L'analyse du cycle de vie : un outil multicritères et quantitatif pour l'évaluation des impacts environnementaux. 2019, Vol. 88, pp. 73 - 81.
  - **LTPO 2021.** Rapport Géotechnique. *Etude de sol : Stabilité au niveau d'un talus faisant partie de la rocade cotière*. Lot N°1, du PK1+000 au PK1+150 à Ghazaouet : LTPO - Unité de Tlemcen, 2021.
  - **Luzi L. et Pergalami F. 1999.** Slope instability in static and dynamic conditions for urban planning: The "Oltre Po Pavese" case history (Region Lombardia-Italy). 1999. p. 57. Vol. 20.
  - **Buyle M. , Audenaert A. et Braet J. 2013.** *Life cycle assessment in the construction sector*. 2013. pp. 379-388.
  - **Maes Pascale 2015.** Analyse du cycle de vie, énergie grise, économie circulaire. *Techniques de l'ingénieur*. [En ligne] 10 juin 2015. [Citation : 19 avril 2025.] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-construire-developpement-durable-43820210/analyse-du-cycle-de-vie-energie-grise-economie-circulaire-tba1420/analyse-du-cycle-de-vie-tba1420niv.TBA1420v1>.
  - **Mapcarta 2025.** Mapcarta. *OpenStreetMap*. [En ligne] 2025. [Citation : 18 mars 2025.] <https://mapcarta.com/fr/N1081858311>.
  - **Medine Malika , Trouzine Habib , Barroso De Aguiar José et Djadouni Hachemi 2020.** Life cycle assessment of concrete incorporating scrap tire rubber : Comparative study. s.l.:Revue nature et technologie (nature & technology journal), 2020. Vol. 12(2), pp. 1-11.
  - **Medine Malika 2018.** Etude expérimentale des bétons légers Incorporant des granulats issus du broyage des pneus usés, Thèse de doctorat en génie civil de l'université Djilali Liabés de Sidi Bel Abbés, encadré par Pr. H. Trouzine et soutenue publiquement le 01/03/2018.
  - **Moon V. et Blackstock H. 2004.** *A methodology for assessing landslide hazard using deterministic stability models*. s.l. : Nat Hazard, 2004. p. 111. Vol. 32.
  - **Nancey Alain et Laidié Nicolas 2013.** Analyse du cycle de vie des solutions géosynthétiques au regard des matériaux de construction conventionnels. Dijon : s.n., 9-11 avril 2013.
  - **One Click LCA 2025.** [En ligne] 2025. [Citation : 22 avril 2025.] <https://oneclicklca.com/fr/>.
  - **OpenLCA 2025.** *GreenDelta*. [En ligne] 2025. [Citation : 29 avril 2025.] <https://www.openlca.org/>.
  - **Plan n°03 2023.** Stabilité au niveau d'un talus faisant partie de la rocade cotière lot n°1 du PK 1+150 à Ghazaouet. 2023. 13/CN/01/15/23.
  - **PLAN n°04A 2023.** Cefferage et ferrailage des MDS et clavetage semelle de liaison 8.20 /H/ 8.30.

2023. 13/CN/01/15/23.
- **Pollutec 2023.** L'Analyse du cycle de vie (ACV), un outil indispensable de l'éco-conception. *Pollutec learn & connect 360*. [En ligne] 27 avril 2023. [Citation : 16 avril 2025.] <https://learnandconnect.pollutec.com/>.
  - **Rajapakse R. 2016.** *Pile design and construction rules of thumb*. deuxième édition. s.l. : Butterworth-Heinemann, 2016. pp. 99–141.
  - **RF 2021.** Routes de France . *FDES Chaussée pour véhicules légers en enrobé bitumineux*. décembre 2021.
  - **Rousseaux Patrick 2022.** Analyse du cycle de vie (ACV) - Présentation, méthodologie, applications et limites. *Techniques de l'Ingénieur*. [En ligne] 10 Mai 2022. [Citation : 29 mars 2025.] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/techniques-de-mesure-analogiques-et-numeriques-42416210/bruit-de-fond-et-mesures-r311/G5500V2>.
  - **RPA 2024.** Document technique réglementaire D.T.R. - B.C. 2.48. *Règles parasismiques Algériennes*. s.l. : Ministère de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville, 2024.
  - **Sablayrolles Caroline 2013.** Évaluation environnementale et analyse de cycle de vie. *Université de Toulouse*. [En ligne] juin 2013. [Citation : 15 avril 2025.] [https://pedagotech.inp-toulouse.fr/131010/co/forces\\_limites.html](https://pedagotech.inp-toulouse.fr/131010/co/forces_limites.html).
  - **Saptutyningsih Endah et Dewanti Diah Setyawati 2023.** Measuring the economic impact of landslide hazard : hedonic price approach. s.l. : Eath and environmental science, 2023.
  - **SET Sétif 2022.** *Rapport APD de la solution de confortement*. Sétif : s.n., 2022.
  - **Terrasol 2017.** *Terrasol Setec*. [En ligne] 2017. [Citation : 17 avril 2025.] <https://www.terrasol.fr/>.
  - **Terzaghi Karl et Ralph Peck B. 1967.** *Soil mechanics in engineering practice*. [éd.] John Wiley & Sons. 2nd. 1967. pp. 168-172 .
  - **Topographic-map 2025.** Topographic-map. *OpenStreetMap*. [En ligne] 2025. [Citation : 19 mars 2025.] <https://fr-fr.topographic-map.com/>.
  - **UVED 2012.** Méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV). *université virtuelle environnement & développement durable*. [En ligne] juin 2012. [Citation : 21 avril 2025.] [https://acvbat.uphf.fr//chap03/co/ch03\\_040\\_1-4.html](https://acvbat.uphf.fr//chap03/co/ch03_040_1-4.html).
  - **Winter Mike , Shearer Barbara , Palmer Derek , Peeling David , Harmer Clare et Sharpe Jonathan 2016.** The economic impact of landslides and floods on the road network. s.l. : Procedia Engineering, 2016. Vol. 143, pp. 1425-1434.
  - **Pamu Y. , Shakir M. , Ubbana H. et Kumar V. 2022.** *Life cycle assessment of a building using Open-LCA software*. 2022.
  - **Yalcin Ali 2007.** *Environmental impacts of landslides : A case study from east black sea region Turkey*. s.l. : Environmental engineering science, 2007. Vol. 24. 10.1089/ees.2006.0161.
  - **ZUBA ÉNERGIES 2025.** [En ligne] 2025. [Citation : 20 avril 2025.] <https://www.izuba.fr/logiciels/outils-logiciels/analyse-du-cycle-de-vie-acv/>.