

---

République Algérienne Démocratique et Populaire  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Belhadj Bouchaib

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Spécialité : structures

Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master en Génie Civil

## L'UTILISATION DE LA TECHNIQUE PNEU SOL

Présenté par :

- Benzoura ikram
- Boudieb fadila

Devant le Jury composé de :

Encadreur :	Mme laziz Amina
Président :	Mme Attia Amina
Examineur :	Mr Houmadi Youcef

2019/202

---

## Remerciements

*Dieu merci pour nous avoir donnée la santé, la volonté et le courage sans lesquels ce travail n'aurait pas été réalisé.*

*J'adresse mes vifs remerciements à mon encadreur Mme lazizi amina pour m'avoir suivi le long de ce travail et tous les efforts qu'elle a fait pour son accomplissement.*

*Nous remercions profondément les membres des jurys, qui nous ont fait l'honneur de juger ce travail.*

*Nous remercions également Mr manaa Ghali, Mr nadreddinekrenich et Mr mhadji abdelkader pour leur encouragements et leur aides.*

*Nous adressons également notre remerciement à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.*

*Nous remercions tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin afin de réaliser ce travail*

---

## Dédicace

A la mémoire de Ghorzi Fatna.

Je dédie ce travail de fin d'étude à mes parents sur tout car ils m'avaient soutenu de puis mon enfance, aussi à mes tous mes professeurs qu'ils m'avaient accompagné durant tout mon chemin d'étude et grâce à leurs efforts, leurs soutiens j'ai appris un bagage riche d'un formation.

Je tiens à dédier mes sœurs (boudieb fatima et badra ) et mes petits frers (said et moetaz ) et tout ma famille, sans oublier mes amies ikram, rym, fatima, reda, ali et amine , mariem .

Ma chérie ghorzi sarah

Enfin, a tous ce qui m'aime

fadila

---

## Dédicace

A la mémoire de notre cher lezrag omar elfarouq رحمه الله

A Mes parents, ma tante qui mon encouragés à aller de l'avant; aidés; soutenu et qui m'ont donnée tous leurs amour pour me voir toujours en haut.

A ma jumelle zahra

A mes sœurs et mon cher frere, pour leurs grandes tendresses.

A tous mes amis qui m'ont encouragés et accompagnés tout au long de ces années : Amine , Fadila ,sara ,ahmed ,abdelnour ,youcef, houssem, madjid et asma

Enfin, a tous ce qui m'aime

**Ikram**

---

## Résumé :

Le renforcement des sols par des inclusions est une idée forte ancienne. Dans un contexte de développement durable, le renforcement des sols par des déchets pneumatiques dans le secteur du BTPH s'est développé ces dernières années.

Cette recherche se base sur l'utilisation des pneus dans le domaine de genie civil, les méthodes de valorisations des déchets et le comportement de pneusol.

Dans cette perspective, un modèle numérique a été développé en utilisant un programme d'éléments finis le PLAXIS, pour la simulation du comportement d'une structure rigide de soutènement supportant du sable. Pour la validation du model proposé, il est fait référence aux résultats d'un modèle réduit testé, par un précédent chercheur (étudié dans deux cas sol renforcé et non renforcé)

**Mots clé :** Renforcement des sols Sol, pneus usagés, renforcement, homogénéisation, analytique, numérique

## ملخص :

تعزير التربة هو مجال حديث ومحدّد لتحسين التربة. وهو يغطي التقنيات التي تتكون من وضع شوائب مقاومة داخل التربة.

يعتمد هذا البحث على استخدام الإطارات في الهندسة المدنية وطرق استرداد النفايات وسلوك الإطارات. في هذا المنظور، تم تطوير نموذج رقمي باستخدام برنامج العناصر المحدودة PLAXIS لمحاكاة سلوك هيكل الدعم الصلب الذي يدعم الرمال. للتحقق من صحة النموذج المقترح ، تتم الإشارة إلى نتائج نموذج مختزل تم اختباره في جهاز طرد مركزي ، بواسطة باحث سابق (تمت دراسته في حالتين بتربة مقواة وغير مسلحة).

**الكلمات المفتاحية:** تقوية التربة التربة ، الإطارات المستعملة ، التسليح ، التجانس ، التحليلي ، العددي.

---

## Obstact :

Soil reinforcement is a recent and particular area of soil improvement. It covers techniques which consist in placing resistant inclusions within the soil.

This research is based on the use of tires in civil engineering, waste recovery methods and the behavior of tiresol.

In this perspective, a numerical model has been developed using a finite element program PLAXIS, for the simulation of the behavior of a rigid support structure supporting sand. For the validation of the proposed model, reference is made to the results of a reduced modeltested in a centrifuge, by a previous researcher (studied in two cases with reinforced and unreinforced soil)

**Keywords:** Soil reinforcement Soil, used tires, reinforcement, homogenization, analytical, numerical.

---

## Symboles et abréviations

**BTPH** : *Bâtiment, Travaux Publics et Hydrauliques.*

**PU** : *Pneu Usagé.*

**MA** : *Ménagers et assimilés.*

**I** : *Inertes.*

**S** : *Spéciaux.*

**SD** : *Spéciaux Dangereux.*

**VL** : *Véhicule Léger.*

**PL** : *Poids Lourds.*

**PCI** : *Pouvoirs Calorifiques Intéressants.*

**PUNR** : *Pneus usagés non réutilisables.*

**LCPC** : *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.*

**ANRED** : *Agence Nationale (Française) pour la Récupération et l'Élimination des Déchets*

**EUREC** : *European Renewable Energy Research Centers.*

**TDA** : *Tire Derived Aggregate.*

**TDF** : *Tire Derived Fuel.*

**LRPC** : *Laboratoire Régionale des Ponts et Chaussées.*

**INSA** : *Institut National des Sciences Appliquées.*

**VER** : *Volume Élémentaire Représentatif.*

**$\Omega$**  : *Volume constitué d'un sol homogène.*

**$\eta_j$**  : *Fraction volumique de la phase j.*

**$\eta_r$**  : *Fraction volumique de la phase renforcement.*

**$R_{int}$**  : *Rayon intérieur de l'armature.*

**$R_{ext}$**  : *Rayon extérieur de l'armature.*

**$h_a$**  : *Hauteur de l'armature.*

**$h_m$**  : *Hauteur de la matrice.*

**$E_w$**  : *Module de Young de mur de soutènement.*

**$\rho_w$**  : *Densité de mur de soutènement.*

**$\nu_w$**  : *Coefficient de Poisson de mur de soutènement.*

**$E_s$**  : *Module de Young du sable.*

---

**$\nu_s$**  : Coefficient de Poisson du sable.

**$\gamma_s$** : Densité du sable.

**$c_c$**  : Coefficient de courbature.

**$E_{CVR}$** : Module de Young équivalent.

**$E_s, E_a$** : Module de Young du sable et pneu.

**$v_c, v_s$**  : Volume du pneu et sable.

**$K_a$**  : Coefficient de poussée des terres active.

**$\Phi$**  : Angle du frottement interne du sol.

**$P_a$**  : Force de poussée des terres statique.

**$\gamma_t$**  : Poids volumique total du remblai.

**$H$**  : Hauteur de mur de soutènement.

**$F_f$**  : Force frictionnel entre le béton et le sol.

**$R_v$**  : Composante verticale de la force résultante.

**$F_r$**  : Force opposante au glissement.

**$W$**  : Poids résultant de mur.

**$F_s$**  : Facteur de sécurité contre le glissement.

**$a_{max}$**  : Accélération maximale.

**$P_e$** : Force pseudo statique sismique.

**$P_a P_e$** : Somme des forces statique( $P_a$ )et pseudo statique( $P_e$ ).

**$N$**  : La somme de poids du mur, pied et la composante verticale de la force résultante de poussée des terres active.

**$\delta_1$** : Frottement entre la fondation et le remblai du sol.

**$P_H$**  : Composante horizontale de la force résultante de poussée des terres active.

**$q_{av}$** : Contrainte sous la semelle en aval.

**$B$** : Largeur de la semelle.

**$e_{rc}$** : Excentricité de la force résultante par rapport au centre de la semelle.

**$e_{r0}$**  : Excentricité de la force résultante par rapport au point 0.

**$M_{rn}$**  : Moment résultant.



---

**Mst** : Moment stabilisant.

**Mr** : Moment renversant.

**Qam** : Contrainte sous la semelle en amont.

**A** : La distance latérale de la résultante du poids du mur et la base.

**H** : Hauteur de mur de soutènement.

**e** : Distance latérale de la composante verticale de force résultante de la poussée des terres active.

**Pv** =  $P_a \sin \delta$  par rapport à la base du mur.

**Pae** : Somme des forces statique ( $P_a$ ) et sismique pseudo statique ( $P_e$ ).

**Fs** : Facteur de sécurité.

**v(y)** : Champ de déplacement

**$\epsilon$ (y)** : Champ de déformation

**C\*v** : Rigidités homogènes équivalentes de l'approche de Voigt

**E\*v** : Module de Young équivalent de Voigt

**S\*R** : Le tenseur de souplesse équivalente de Reuss

**E\*R** : Module de Young équivalent de Reuss

**S\*VR** : Rigidité équivalente du modèle complet par l'approximation de Reuss.

**C\*RV** : Rigidité équivalente totale selon l'approximation de Voigt.

---

## Liste des figures

Figure 1 : constructeurs de pneumatiques en Europe (Akkouch.naim, 2017).....	19
Figure 2:production mondiale (en million de pneus ) des véhicules de tourisme et commerciaux (ETRMA, 2014) .....	20
Figure 3: Coupe longitudinale d'un pneu michelin .....	23
Figure 4:cimenterie (idir.abdelhalim, 2017) .....	34
Figure 5:Acéri (idir.abdelhalim, 2017).....	35
Figure 6:poudrette (idir.abdelhalim, 2017).....	36
Figure 7:Granulats (idir.abdelhalim, 2017) .....	37
Figure 8:Les différentes filières des pneus usagés(lazizi.A, 2014).....	38
Figure 9:schéma d'un remblai pneusol (lazizi.Amina, 2014) .....	40
Figure 10:Tire DerivedAggrigate (lazizi.Amina, 2014).....	42
Figure 11:Mise en œuvre Tire balles (lazizi.Amina, 2014).....	42
Figure 12:la Technique Tirecell (lazizi.Amina, 2014). .....	43
Figure 13:Tire derived fuel (tumers) .....	43
Figure 14:Courbes "contrainte-déformation" d'éprouvettes de sable et de sable armé d'aluminium ou de latex(LONG, 1993).....	47
Figure 15:Courbe intrinsèque d'un sable et d'un sable armé de caoutchouc(LONG, 1993) .....	48
Figure 16:Comportement en traction d'un matériau composite(LONG, 1993) .....	48
Figure 17: Comportement comparé d'un sable et d'un sable latex(LONG, 1993) .....	48
Figure 18:: Vue en plan des remblais(LONG, 1993) .....	50
Figure 19: Allure des bandes de roulement sur chant après essai(LONG, 1993).....	52
Figure 20: Assemblage de pneumatiques en nappes (Long, 1993).....	54
Figure 21: Essais en nappes(LONG, 1993) .....	55
Figure 22 :Bandes de roulement sur chant en nappes (trame carrée). Vue avant remblaiement(LONG, 1993).....	55
Figure 23:Flancs en nappe(LONG, 1993) .....	56
Figure 24:modèle réduit de l'universite de sidi belabbas(H.Trouzine, 2008) .....	61
Figure 25: Dynamics .....	64
Figure 26:Plaxflow .....	65
Figure 27:Thermal .....	65
Figure 28:organigramme de la structure du plaxis code (Ahmed, 2005) .....	69
Figure 29:Principe de la méthode d'homogénéisation (SALENÇON).....	70
Figure 30 : Volume élémentaire représentatif V.E.R d'un sol renforcé (Lazizi.A, 2014).....	72
Figure 31:Détails géométriques du mur (Lazizi.A, 2014).....	73
Figure 32:la fenêtre plaxis input.....	77
Figure 33:modèle numérique ( plaxis input ).....	77
Figure 34:maille d'élément finis typique et les conditions limites de déplacement .....	78
Figure 35:fenêtre de calcul d'une phase.....	79
Figure 36:fenêtre typique de la progression des calculs. ....	79
Figure 37:Fenêtre de calcul réussi d'une phase .....	80
Figure 38:maille déformée du modèle d'éléments finis.....	80

---

Figure 39:déplacements totaux .....	80
Figure 40:déplacements incrémentaux .....	81
Figure 41:total strain.....	81
Figure 42:déplacements calculés du mur.....	82
Figure 43:chemin de déplacements dans différents points. ....	83
Figure 44:déplacement totaux des nœuds. ....	83
Figure 45:les contraintes totales .....	84
Figure 46 : les contraintes totales .....	84
Figure 47:tableau des contraintes .....	85
Figure 48:modèle numérique (pneusol).....	86
Figure 49:maille d'élément finis typique .....	86
Figure 50:maille d'élément finis typique .....	87
Figure 51:déplacements horizontal .....	87
Figure 52:les Déplacements vertical .....	88
Figure 53: total strain .....	88
Figure 54:total incessamment .....	88
Figure 55: les déplacements.....	89
Figure 56:chemin des déplacements.....	89
Figure 57:déplacements des nœuds .....	90
Figure 58: les contraintes totales .....	91
Figure 59:tableau des contraintes4 .....	91

---

## Liste des tableaux :

Tableau 1: Quantités des pneu usagés générés par an en Algérie(lazizi.A, 2014). .....	22
Tableau 2: Compositions typique de pneus de VL et PL (Williams, 2013) .....	25
Tableau 3: les caractéristique des pneumatiques (Long, 1993) .....	25
Tableau 4:Ouvrages pneusol en Algérie (lazizi.Amina, 2014) .....	39
Tableau 5:Effort de traction en fonction du nombre d'éléments (bandes de roulement aplaties) (Long, 1993).....	51
Tableau 6:Déformation maximale(LONG, 1993).....	51
Tableau 7: Traction maximale dans les bandes de roulement(LONG, 1993).....	52
Tableau 8:Allongements maximaux en fonction du nombre d'élémentspour des bandes de roulement aplaties(LONG, 1993).....	52
Tableau 9:Allongements maximaux globaux en fonction du nombre d'éléments pour des bandes de roulement sur chant.(LONG, 1993) .....	53
Tableau 10:Tractions maximales dans les flancs des pneus en fonction du nombre d'éléments (LONG, 1993).....	54
Tableau 11:Valeurs mesurées et calculées des efforts de tractions(LONG, 1993).....	57
Tableau 12:Résultats de coefficients de sécurité .....	76

---

## 1 Sommaire

Introduction générale :.....	16
Chapitre 1 : Généralités et statistique sur les pneus usagés .....	17
1. Introduction : .....	17
2. L'industrie pneumatique dans le monde : .....	17
3. Réglementation :.....	20
4. Quantités de pneus usagés en Algérie :.....	21
5. Composition et structure d'un pneu : .....	22
5.1. Principaux constituants et catégories d'un pneu : .....	22
5.2. Composition chimique d'un pneu :.....	25
5.3. Caractéristiques mécaniques des PUNR :.....	26
6. Critères de durée de service des PUNR : .....	26
7. Les déchets pneumatiques :.....	27
8. Gisement du pneumatique usagé non rechapable .....	28
9. Conclusion :.....	29
Chapitre 2 : Valorisation des pneus usagée .....	31
1. Introduction : .....	31
2. Valorisation des pneus usagés :.....	31
3. Filières de valorisation :.....	31
3.1. Le rechapage :.....	31
3.2. La valorisation énergétique :.....	32
3.3. L'incinération en cimenterie : .....	33
3.4. Acierie :.....	34
3.5. Autres valorisations thermiques : .....	35
4. La valorisation sous forme des matières premières :.....	36
4.1. Poudrettes :.....	36
4.2. Granulés : .....	36
5. La technique Pneusol : .....	39
5.1. Définition et généralités :.....	39
5.2. L'intérêt de la technique de Pneusol :.....	40
5.3. Les techniques dérivées du PNEUSOL :.....	40
5.3.2. L'ARMAPNEUSOL : .....	41

5.3.5. <i>La technique TDA</i> :	41
5.3.8. <i>La technique TDF</i> :	43
6. Conclusion :	44
Chapitre 3 : Comportement de pneusol	46
1. Introduction :	46
2. Etude en laboratoire :	46
3. L'ADHERENCE SOL-PNEUMATIQUE :	49
3.1. ESSAIS D'ARRACHEMENT :	49
4. Assemblage de type linéaire :	51
4.1. Bandes de roulement aplaties :	51
4.2. Bandes de roulement sur chant :	51
4.3. Les flancs.....	53
5. Assemblages en nappes :	54
5.1. Bandes de roulement sur chant :	55
5.2. Cas des flancs de pneus :	56
5.3. Tentatives d'interprétation de l'adhérence "sol-pneumatique" :	56
6. Conclusions :	58
7. Comportement statique du Pneusol :	58
7.1. Essais en vraie grandeurs :	58
7.2. Essais sur modèle réduit de laboratoire :	60
8. Conclusion :	62
CHAPITRE 4 : Modélisation Numérique	63
1. Introduction générale :	63
2. Introduction au logiciel utilisé :	63
2.1. Introduction :	63
2.2. Option par défaut, Solution approchées :	63
2.3. Les sous-programmes de Plaxis :	65
2.3.1. Le programme d'entrée de données (Input)	65
2.3.2 Le programme de calcul (Calculassions)	66
2.3.3 Le programme derésultats (Output)	66
2.3.4 Le programme courbes(Curves)	66
2.4. La méthode d'homogénéisation :	69
2.5. Notre modèle réduit :	73

---

2.5.1.	Mur de soutènement derrière un remblai du sable :.....	73
2.5.2.	<i>Mur de soutènement derrière un remblai du sable avec couches de Pneusol ....</i>	73
2.6.	Création de la géométrie du modèle :.....	76
2.7.	Production du maillage des éléments :.....	77
2.8.	Identification et exécution des phases :.....	78
2.9.	Résultats :.....	79
3.	Traitement des résultats : .....	92
3.	Conclusions : .....	92
6.	Conclusion générale :.....	93
7.	Bibliographie .....	95

---

## Introduction générale :

L'une des principales activités des ingénieurs de Génie Civil est la stabilisation des sols. Ce terme rassemble un ensemble de techniques qui ont pour but d'améliorer la résistance des sols et/ou de limiter les déformations sous des ouvrages existants. Par ailleurs, le renforcement des sols de fondations ou de remblais consiste en l'amélioration de la résistance vis à vis du cisaillement. En géotechnique, plusieurs techniques ont été utilisées pour stabiliser le sol.

L'utilisation de la technique pneusol (pneus hors usage) pour l'amélioration des sols a reçu une grande attention dans la période récente appliquant dans le lixiviat, système de collecte, ouverture de décharge, récifs artificiel, remplissage propre pour la route remblai etc...

La mise au rebut des pneus est un dilemme environnemental cependant, ils peuvent améliorer les caractéristiques de sol qui est un matériau de construction essentiel, des éclats de pneus sont utilisés comme sol renforcement non seulement à des fins de résistance.

Il a également un autre des propriétés telles que le remplissage léger, le drainage, la déformabilité etc...

Le mémoire comporte deux parties, une partie théorique dans laquelle une généralité et chiffres sur les pneus usagés. De plus, la valorisation des pneus, le comportement des pneus, les composants et ses applications en génie Civil,

Dans la partie expérimentale, nous avons présenté une simulation numérique d'un ouvrage en pneus usages (mur de soutènement) avec logiciel PLAXIS.

Pour arriver aux objectifs de cette recherche, nous avons structuré le mémoire en quatre chapitres;

- Introduction générale.
- Chapitre 1 : Généralités et statistiques sur les pneus usagés.
- Chapitre 2 : Valorisation des pneus usagés.
- Chapitre 3 : les comportements des pneus usages.
- Chapitre 4 : simulation numérique d'un ouvrage en pneus usages.
- Conclusion.



---

## Chapitre 1 : Généralités et statistique sur les pneus usagés

### 1. Introduction :

Ce chapitre donne des définitions et des chiffres sur les pneus usagés. Ces derniers représentent un danger sur l'environnement. Les ingénieurs génie civil pensent de trouver des solutions pour réutiliser ces déchets afin de protéger notre environnement contre la pollution. Les déchets Pneumatiques sont devenus un problème qui exige des solutions urgentes ; Il est maintenant avéré que les méthodes antérieures de gestion des déchets tels que l'enfouissement, l'incinération et le recyclage n'ont pas réussi à assurer des possibilités de réutilisation complète des déchets pneumatiques.

### 2. L'industrie pneumatique dans le monde :

Dans le monde entier, s'agissant de l'industrie automobile, l'utilisation des pneus en caoutchouc augmente chaque année, en citant quelque cas :

Au Canada, le nombre de pneus usés, est estimé en fonction du nombre de pneus neufs vendus (Chaque pneu neuf vendu génère un pneu usé) (Merzoug.karima, 2016).

La même méthode est utilisée en France Sur la base des statistiques de l'Office National des Statistiques ([http://www.ons.dz/them\\_sta.htm](http://www.ons.dz/them_sta.htm)) concernant la répartition du parc automobile par genre de véhicules au 31/12/2006 ainsi que les immatriculations des véhicules automobiles durant le premier semestre 2007, le calcul du nombre de véhicules en circulation au premier semestre 2007 par genre. Le parc automobile national algérien compte 3445129 véhicules qui se répartissent en 60,226 % de véhicules de tourisme, 9,431 % en camions et 20,134 % en camionnettes. Les autocars et autobus représentent 1,605 % du parc. Les tracteurs routiers 1,568 %, les tracteurs agricoles 3,659 %, les remorques 3,012 %, les motos 0,276 % et les véhicules spéciaux 0,089 %. Nous avons classé les pneus usagés non rechapables en trois catégories. Les pneus VL (Véhicules légers), les pneus PL (Poids lourds) et Autres. En plus de la différence en dimension entre les pneus VL et PL, la différence de structure est très importante, avec la présence de métal à un taux de 15 % et de 25 % respectivement. Les pneus VL, équipent les véhicules de tourisme et camionnettes avec une moyenne de 4 pneus Le type de pneus PL, équipe les camions, autocars et autobus, tracteurs routiers et les remorques. La moyenne est de 8 pneus pour les camions (un camion peut être

---

équipé de 6 à 12 pneus selon le nombre de ponts), 6 pneus pour les autocars et autobus ainsi que les remorques et de 8 pneus pour les tracteurs routiers (un tracteur routier peut être équipé généralement de 6 à 10 pneus selon le nombre d'essieux). Les tracteurs agricoles, véhicules spéciaux et motos, sont équipés de type de pneu désigné par autres avec une moyenne de 2 pneus pour les motos et 4 pneus pour les véhicules spéciaux et tracteurs agricole.

La France, en 2008, plus de 366.000 tonnes de pneumatiques ont été collectés ce qui constitue une progression de 36% par rapport à 2004; la Thaïlande, un pays asiatique, le bilan de la seule année 2000 indique une consommation d'environ 94.000 tonnes de pneus (Sukontasukkul, 2006).

Dans l'Algérie, Selon une étude statistique estimative du gisement des Pneus Usagés Non Réutilisables (PUNR) publiée en 2011, la quantité générée annuellement en Algérie est de l'ordre de 1439514 unités, soit 25918 tonnes par an (3500000 véhicules en 2007). Cette quantité évoluera à la hausse à cause de l'augmentation du parc automobile Algérien qui est estimé à 8,4 millions de véhicules, d'après les déclarations du Ministre du Transport en septembre 2016 au journal El Moudjahid (Abdelhalim, 2017).

L'expérience montre que l'incendie des pneumatiques devient rapidement non maîtrisable. Ainsi, les sites de stockage constituent un risque pour l'eau en surface, ainsi que pour l'eau souterraine. Ils représentent aussi un danger sanitaire car ils constituent un habitat privilégié des insectes.

Les pneumatiques sont fabriqués selon des procédés relativement standardisées dans environ 455 usines de pneus dans le monde. Il est estimé qu'environ 1.5 milliard de pneus sont fabriqués annuellement dans le monde (Williams 2013). Actuellement, les 90 usines de l'Union Européen, produisent annuellement environ 355 millions de pneus (24% de la production mondiale) (European tyre and rubberindustry statistics, 2015).

Les principaux constructeurs des pneus, implantés en Europe, sont montrés dans la figure 1 :

- 90 Usines
- 16 Centres de R&D
- 12 Sièges Social

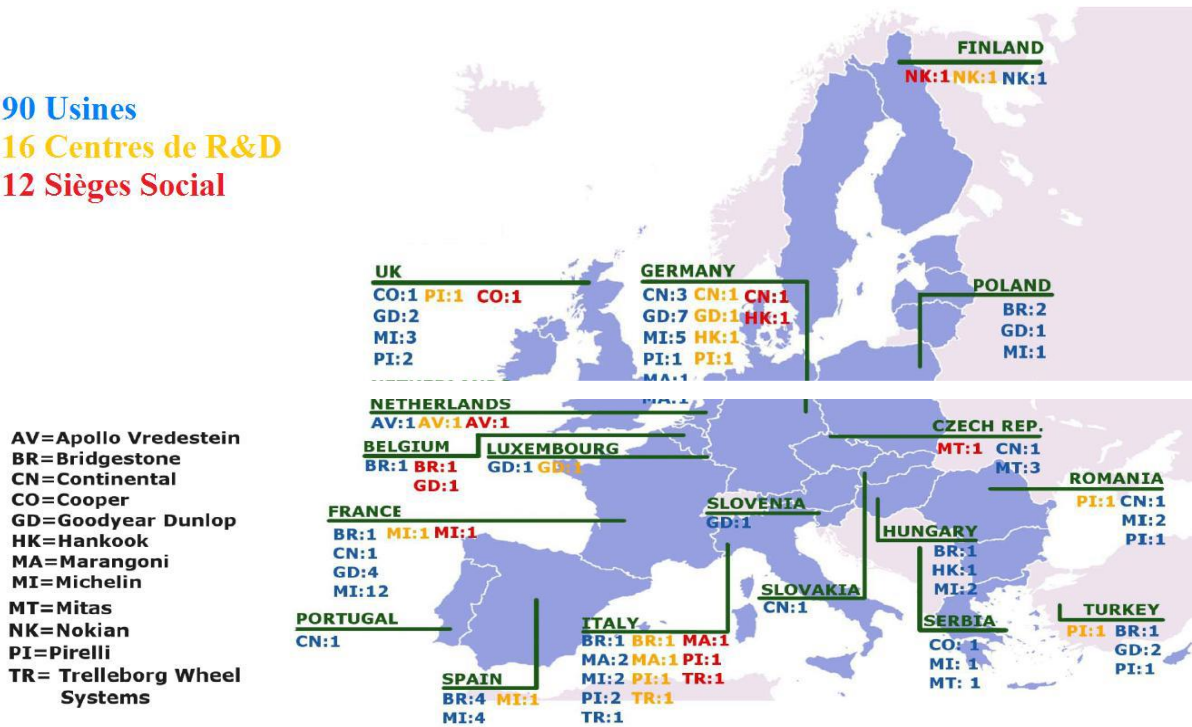


Figure 1 : constructeurs de pneumatiques en Europe (Akkouch.naim, 2017).

L'industrie Européenne des pneus et caoutchoucs (ETRMA, 2011) classe les pneus en deux Catégories (pneus de véhicule de tourisme et pneus de véhicules commerciaux). Les Histogrammes de la figure 2 montrent les évolutions de la production mondiale des pneumatiques pour la période s'étalant de 2008 à 2013.

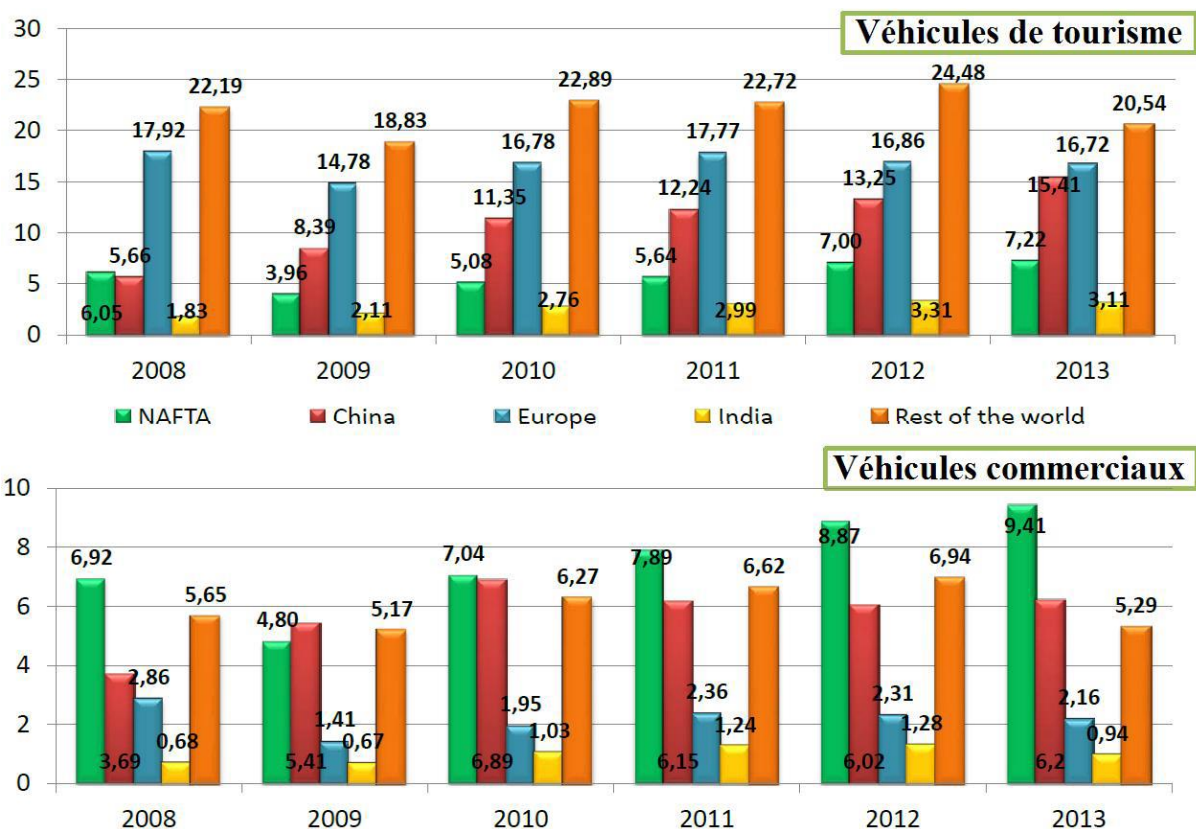


Figure 2: production mondiale (en million de pneus) des véhicules de tourisme et commerciaux (ETRMA, 2014)

Généralement, les pneus sont classés en fonction de ceux des véhicules légers et ceux des véhicules poids lourds. En moyenne, le pneu d'un véhicule léger (VL) pèse 11 kg quand il est neuf et 9 kg quand il est mis au rebut, le pneu du poids lourd (PL) pèse 54 kg quand il est neuf et 45 kg quand il est mis au rebut. (Martinez, 2013) (Williams, 2013).

### 3. Réglementation :

Pour se placer dans une logique de développement durable, il a été nécessaire à l'Algérie de construire, sur la base d'un constat, une stratégie nationale de l'environnement dans une perspective décennale, à la fois bénéfique pour l'environnement et le développement durable. Au sens de la loi (Loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets) on entend par déchet : tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance ou produit

---

et tout bien, meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou d'éliminer. (Habib trouzine, 2010)

Selon le Décret exécutif n° 06-104 du 28 février 2006 fixant la nomenclature des déchets, y compris les déchets spéciaux dangereux (Journal officiel du 5 mars 2006). Les déchets sont classés en quatre catégories : les déchets ménagers et assimilés (MA), inertes (I), spéciaux (S) et spéciaux dangereux (SD).

Les déchets spéciaux selon le même décret exécutif sont : tous déchets issus des activités industrielles, agricoles, de soins, de services et toutes autres activités qui, en raison de leur nature et de la composition des matières qu'ils contiennent, ne peuvent être collectés, transportés et traités dans les mêmes conditions que les déchets ménagers ni assimilés à des déchets inertes.

Les pneus hors d'usage sont classés comme déchets spéciaux « classe S » sous le code « 16.1.1 » sans aucun critère de dangerosité, selon la réglementation algérienne.

La loi algérienne précise que tout générateur et/ ou détenteur de déchets, est tenu d'assurer ou de faire assurer la valorisation des déchets engendrés par des matières qu'il importe ou écoule et les produits qu'il fabrique. Lorsque le générateur et/ou le détenteur de déchets est dans l'impossibilité d'éviter de générer et/ou de valoriser ces déchets, il est tenu d'assurer ou de faire assurer, à ses frais, l'élimination de ses déchets de façon écologiquement rationnelle, conformément aux dispositions de la loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, article 7 et 8 et de ses textes d'application. (lazizi.A, 2014).

#### **4. Quantités de pneus usagés en Algérie :**

Une autre estimation du gisement pneumatique usagé en Algérie est proposée. Elle est basée sur le tonnage de pneus neufs entrants en circulation. Les pneus neufs en Algérie sont, soit produits localement, soit importés. Michelin Algérie détient 30 % de la part du marché algérien avec une production annuelle de 700 000 pneus, essentiellement poids lourds (2007)(*Quotidien Liberté du 14 juin 2007*). Environ 60 % de la production Michelin Algérie (spécialisée dans la fabrication des pneus poids lourds) est exportée. Ses principaux clients locaux sont SNVI, BTK Tiaret et les fabricants de remorques (2008) (*Quotidien El Watan du*

03 mai 2008). A partir de ces informations, on peut supposer que les pneus neufs destinés au remplacement de pneus usés sont essentiellement des pneus importés. Selon le Réseau d'Information Commercial ALGEX([www.promex.dz](http://www.promex.dz)), l'Algérie a importé les quantités suivantes de pneumatiques neufs en caoutchouc (Tableau1).

Types de pneus	Pneu/an	Tonne/an	Pneu/tonne/an
Véhicule poids léger (VL)	1107410	7966.97	-
Véhicule poids lourd (PL)	332104	17951.53	-
<b>Total</b>	<b>1439514</b>	<b>25918.50</b>	<b>0.0413</b>

Tableau 1: Quantités des pneu usagés générés par an en Algérie (Iazizi.A, 2014).

## 5. Composition et structure d'un pneu :

### 5.1. Principaux constituants et catégories d'un pneu :

Si on effectue une coupe, d'un pneumatique de type radial, dans le sens transversal, sa complexité, par le nombre de constituants, on distingue alors : ([www.michelin.fr](http://www.michelin.fr)) Les fabricants des pneus introduisent constamment de nouveaux matériaux et méthodes de construction afin d'atteindre des performances supérieures et à moindre coût. Selon le constructeur, le type, la classe et l'utilisation du pneu, les méthodes de construction diffèrent d'un pneu à un autre dans le nombre et le type de composants utilisés. Un pneumatique peut être constitué de plus de 200 composants, qui se répartissent en 4 groupes :

**Caoutchouc** : principal composant de la bande de roulement des pneus; il est naturel (issu du latex) et/ou synthétique (issu de la pétrochimie), voire issu d'un mélange.

**Noir de carbone et silice** : il est utilisé pour renforcer la résistance du caoutchouc à l'usure et à l'abrasion.

**Câbles métalliques et fibres textile** : ils constituent la structure et assure la rigidité du pneu. Ils se composent de nylon, polyester, rayon, aramide, acier et/ou laiton...etc.

---

**Agents chimique** : ils concernent l'huile de dilution, soufre, accélérateur, oxyde de zinc, acide stéarique, antioxydant, résines, ...etc. L'huile de dilution est un mélange d'hydrocarbures aromatiques, qui sert à amortir le caoutchouc et à améliorer sa maniabilité. Le soufre est utilisé pour réticuler les chaînes des polymères au sein du caoutchouc et aussi durcit et empêche la déformation excessive à des températures élevées. L'accélérateur est un composé organique soufré qui agit comme catalyseur dans le procédé de vulcanisation. L'oxyde de zinc et l'acide stéarique servent également à contrôler la vulcanisation et, en plus d'améliorer les propriétés physiques du caoutchouc. Les antioxydants et antiozonants empêchent les fissures dans le flanc en raison de l'action du soleil et de l'ozone.

Le processus de fabrication d'un pneumatique est complexe, long et très minutieux.

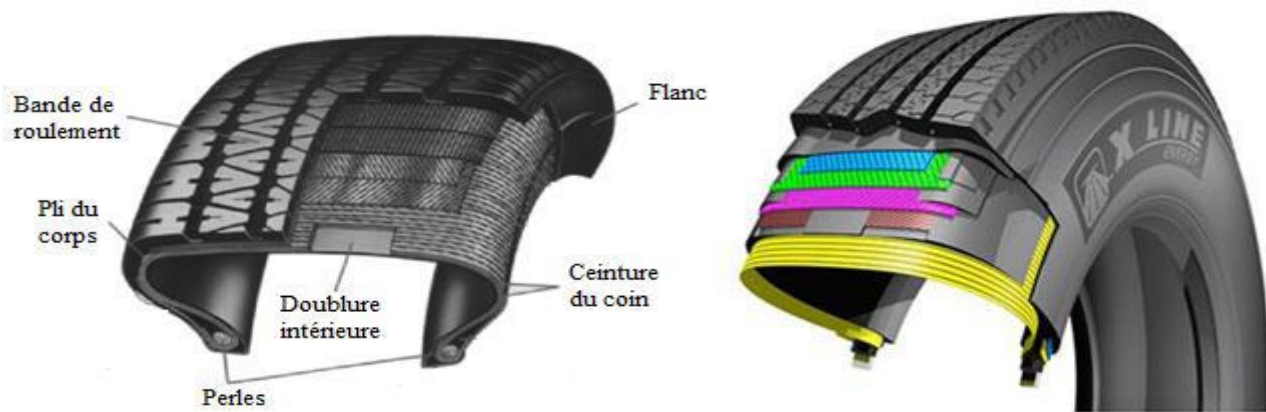


Figure 3: Coupe longitudinale d'un pneu Michelin

([www.michelin.fr](http://www.michelin.fr))

Afin de former une matière homogène, ces produits, entrant dans la composition de la gomme, sont malaxés à forte température dans un grand mélangeur. Ils sont construits sur un tambour et ensuite durcis dans une presse à chaud et sous pression. Après polymérisation, en présence d'un système de vulcanisation et d'énergie thermique, un cas particulier de réticulation, appelé vulcanisation, s'engage. La vulcanisation est le procédé chimique consistant à incorporer un agent vulcanisant (soufre, le plus souvent) à un élastomère (caoutchouc) brut pour former après cuisson des ponts entre les chaînes moléculaires. Cette opération rend notamment le matériau moins plastique mais plus élastique. Elle permet au pneu d'être comprimé dans la zone en contacts avec la surface de la route et retourne à sa forme initiale en vertu de cycles à haute fréquence.

---

Pour rendre le pneu plus fiable, chaque zone doit répondre à des exigences particulières et par conséquent, la composition diffère d'une zone à une autre. La figure 3 montre une section transversale montrant les principales couches constituant le pneu. (Iazizi, A., 2014)

**La doublure intérieure :** est une feuille de caoutchouc composée avec des additifs dont l'objectif est d'avoir une faible perméabilité à l'air.

**Le Pli :** du corps est une feuille constituée de trois couches superposées. Une couche de caoutchouc, une couche de tissu (en textile ou en acier) de renforcement et une deuxième couche de caoutchouc. Les pneus des véhicules légers se composent généralement d'un ou deux plis du corps. Les pneus des véhicules lourds se composent de plusieurs plis du corps. (www.michelin.fr)

**Le Flanc :** (parois latérales), qui sont des couches non-renforcées, sont profilés et extrudés avec des additifs pour donner aux côtés du pneu une bonne résistance à l'abrasion et à l'environnement. Les additifs utilisés comprennent des antioxydants et antiozonants.

**Les Perles :** sont des bandes de fil d'acier à haute résistance à la traction, enfermées dans un composé de caoutchouc. Selon l'angle ( $\beta$ ) que forment les câbles du pli par rapport à l'axe de la bande roulement, on distingue des pneus ( $R$ ) à carcasse Radiale ( $\beta = 90^\circ$ ), des pneus ( $B$ ) à carcasse Biaise (ligne oblique) et des pneus ( $D$ ) à carcasse Diagonale ( $\beta = 45^\circ$ ).

**La Ceinture du coin :** est une feuille constituée d'une couche de caoutchouc, d'une couche de câbles d'acier étroitement espacés et d'une deuxième couche de caoutchouc. Elle augmente la résistance du pneu tout en lui permettant de rester flexible. Les pneus de véhicules légers comprennent généralement deux ou trois ceintures.

**La Bande de roulement :** est un profilé extrudé d'épaisseur qui entoure la carcasse du pneu. Elle est composée d'une gomme comprenant des additifs permettant de conférer une résistance à l'usure et à la traction en plus de la résistance à l'environnement. Les fractions des principaux composants dépendent de la nature du pneu (usagé, usé, neuf...etc.), de la zone considérée dans le pneu (flanc, bande de roulement...etc.), du type de pneu (véhicule léger, lourd, agricole, engin,...etc.) et de la marque du fabricant de pneu (Bridgeton.). (Akkouch, Naim, 2017) (www.michelin.fr)



## 5.2. Composition chimique d'un pneu :

Dans le tableau suivant : Composition typique de pneus de véhicules légers et lourds (Williams, 2013)

NB : wt : weight, le poids de la matière .

<b>Composant</b>	<b>Léger Wt (%)</b>	<b>Lourd Wt (%)</b>	
<b>Caoutchoucs</b>	47	45	Plusieurs caoutchoucs synthétiques et naturel sont utilisés (caoutchouc styrène-butadiène (SBR), caoutchouc naturel (polyisoprène) (NR), caoutchouc nitrile, caoutchouc chloroprène, caoutchouc de polybutadiène (BR)...etc.
<b>Noire de Carbone</b>	21.5	22	Utilisé pour renforcer les caoutchoucs et améliorer la résistance à l'abrasion.
<b>Acier</b>	15.5	21.1	Ceintures en acier et cordon pour le renforcement.
<b>Oxyde de Zinc</b>	1	2	Utilisé (avec de l'acide stéarique) pour contrôler le processus de vulcanisation et pour améliorer les propriétés physiques du caoutchouc.
<b>Soufre</b>	1	1	Utilisé pour réticuler (crosslinking) les chaînes des polymères au sein du caoutchouc et pour augmenter la résistance à la déformation à des températures élevées.
<b>Textile</b>	5.5	-	Utilisées pour le renforcement.
<b>Aditif</b>	7.5	5	L'argile ou silice sont utilisés pour le remplacement partiel de noir de carbone.

Tableau 2: Compositions typique de pneus de VL et PL (Williams, 2013)

- Les caractéristiques des pneumatiques pour véhicule léger et poids lourds, sont présentées dans le tableau3 :

<b>Caractéristiques</b>	<b>VL</b>	<b>PL</b>
<b>Poids moyen</b>	1,7 kg	50 kg
<b>Densité moyenne</b>	0,2 entier	0,4 déchiqueté
<b>Diamètre intérieur</b>	0,30 m	0,55 à 0,66m
<b>Diamètre extérieur</b>	0,60 m	1,10 à 1,20 m
<b>Nombre de pneus /m 3</b>	20	3

Tableau 3: les caractéristique des pneumatiques (Long, 1993)

---

### 5.3. Caractéristiques mécaniques des PUNR :

Un pneu usé non rechapable conserve encore de nombreuses qualités, ce qui en fait une véritable matière première. Mécaniquement, les armatures du pneu doivent être souples pour lui donner une bonne déformabilité. Elles doivent par ailleurs supporter des efforts de traction importants et posséder une bonne adhérence avec le matériau de remblai. Des essais mécaniques ont été effectués par des chercheurs dans le domaine du Pneu sol sur une presse munie d'un enregistreur d'efforts de traction en fonction de la déformation sur des pneus usagés. A noter que toutes les marques de pneus, ont été testées, les résultats obtenus sont les suivants :

La valeur moyenne de la résistance à la traction des bandes de roulement est de 65 KN, avec un écart type de 24 KN. La probabilité pour que toutes les bandes de roulement, aient une résistance supérieure à 26 KN est de 90 %. Elle n'est que de 80 % pour une résistance supérieure à 36 KN. Il n'y a pratiquement pas de différence entre les deux flancs d'un même pneu.

Les résistances des flancs varient de 17 à 25 KN, selon le taux d'armatures, avec un écart type de 10 KN (Long, 1993).

### 6. Critères de durée de service des PUNR :

Les résultats des travaux de recherches, publiés par de très nombreux chercheurs, ont montré la complexité du phénomène de vieillissement du caoutchouc de pneumatique. Il apparaît que les paramètres influençant cette détérioration, sont nombreux, mais que finalement leurs actions restent négligeables. On peut néanmoins, en dénombrer quatre très importants :

**La lumière et la chaleur :** (les rayons Ultra- Violet) ont pour effet de provoquer une décomposition superficielle qui se manifeste par un dessèchement du caoutchouc avec apparition de craquelures plus ou moins profondes. Un tel problème ne se pose pas si le pneumatique est complètement enterré car il serait totalement à l'abri de la lumière. En plus, dans un remblai, la température moyenne en profondeur varie dans une fourchette relativement étroite (3 à 4°C) suivant la teneur en eau du matériau. Près de la surface du sol, elle est beaucoup influencée par les variations saisonnières. Il reste néanmoins, que la

---

température la plus grande qui serait de l'ordre de 15°C, est beaucoup plus faible que celle subie par le pneu lors de son utilisation (Long, 1993).

**L'ozone** : le caoutchouc est influencé par l'ozone, mais la présence de ce dernier est faible voire négligeable dans le sol.

**L'acidité du sol** : on sait qu'un acide fort (PH de l'ordre de 1) détruit le caoutchouc. Or pour l'eau extraite des remblais, le PH est généralement de l'ordre de 4 à 5, ce qui montre qu'en général les sols naturels sont relativement peu acides.

**L'eau** : K. Ab-Malek et A. Stevenson (1986) ont mis en évidence le bon comportement des pneus dans l'eau de mer. Ils ont en effet effectué des analyses poussées sur des échantillons de pneus, se trouvant dans un bateau coulé par les Allemands pendant la seconde guerre mondiale. Quarante-deux ans après, toutes les armatures sont absolument intactes. Leurs caractéristiques mécaniques n'ont pas changé, seule la teneur en eau du caoutchouc, a légèrement changé en quelques points des pneus (K. Ab-Malek, 1986).

## 7. Les déchets pneumatiques :

Les déchets de pneumatiques, bien que classés comme des déchets non dangereux, représentent un danger pour l'environnement et la santé publique en cas d'incendies (émissions de gaz toxiques) ou de dépôts sauvages (refuges pour les moustiques potentiellement porteurs de virus...).

Il est interdit de mettre des pneumatiques en décharge, de les abandonner dans le milieu naturel ou de les brûler.

La gestion des déchets de pneumatiques est encadrée depuis 2003 sur la base du principe de responsabilité élargie des producteurs (REP). La réglementation a été renforcée en 2015 afin de préparer l'échéance de l'année 2020 qui verra l'agrément des organismes collectifs et l'approbation des systèmes individuels en matière de gestion des déchets.

Le fonctionnement de la filière est aujourd'hui performant puisque quasiment tous les déchets de pneumatiques issus de pneus neufs mis sur le marché sont collectés, puis traités principalement sous la forme de valorisation énergétique (en cimenterie), matière (granulats pour des usages divers) et par la réutilisation (pneus d'occasion).

On estime à 504 000 tonnes environ de pneumatiques (soit 52 millions de pneumatiques toutes catégories confondus) qui sont mis sur le marché par an en France.

---

Par ailleurs, les pouvoirs publics, associés aux acteurs de la filière de gestion des déchets de pneumatiques, ont organisé la résorption des stocks de déchets de pneumatiques dits "historiques" (constitués avant 2003) à travers l'association Recyvalor. Cette association, issue d'un accord interprofessionnel de 2008, a achevé dix ans après sa création sa mission : plus

d'une cinquantaine de sites représentant 55 000 tonnes de déchets de pneumatiques (soit plus de 7 millions de pneus) ont ainsi pu être traités. (pneumatiques-usages, 2018)

## **8. Gisement du pneumatique usagé non rechapable**

Le nombre de pneumatiques consommés progresse régulièrement avec la croissance du parc automobile.

Malgré l'amélioration de la longévité des pneumatiques, le gisement de ces déchets reste très important. Plusieurs méthodes sont utilisées pour estimer le nombre de pneus usagés, générés par an. Aux Etats Unis, l'US.EPA (US Environmental Protection Agency) estimait qu'entre 1990 et l'an 2000 pour tous les états du pays, chaque citoyen génère un (01) pneu usé par an . Pour l'Etat de la Californie, le CIWMB (CaliforniaIntegratedWaste Management Board) proposait un coefficient de (0,915) puis de (0,958) pneus usagés générés par personne par an . L'Etat de la Floride calcule le nombre de pneus usés générés par an, par un modèle basé sur la vente des pneus neufs par an. L'Etat de Washington propose un modèle basé sur les immatriculations des véhicules. L'Université de Sacramento en Californie propose un nouveau modèle d'estimation des déchets pneumatiques, basé sur les étapes suivantes :

1. Calculer le nombre de nouveaux pneus vendus ou entrant dans l'Etat chaque année.
2. Assigner ces pneus par catégories de véhicule.
3. Estimer la durée de temps, avant qu'ils entrent dans le flux de déchets en fonction des anciennes statistiques.
4. Tabuler le poids de ces déchets pneumatiques.
5. Calculer les quantités par pneu usé par personne et par tonnes.

Au Canada, le nombre de pneus usés, est estimé en fonction du nombre de pneus neufs vendus (Chaque pneu neuf vendu génère un pneu usé) . La même méthode est utilisée en France. Selon une enquête réalisée par l'Ecole Nationale des Travaux Publics auprès de la Sonatrach, en 1994, pas moins de 1 million de pneus usagés, ont été dénombrés contre

---

385000 unités en 1990. Ces chiffres sont éligibles à la hausse a cause de l'augmentation du nombre de véhicules ces trois dernières années . Faute de statistiques récentes et précises sur le gisement de pneumatiques usagés en Algérie, une estimation de ce déchet par type de pneu, est proposée selon la méthodologie suivante :

1. Estimation du parc automobile algérien selon le genre.
2. Calcul du nombre de pneus en circulation selon le type (VL, PL, Autres).
3. Estimation de la durée de vie d'un pneu selon le type en Algérie.
4. Calcul du nombre de pneus usagés et tonnage selon chaque type de pneu.
5. Calcul du nombre de pneus usés par personne par an. Sur la base des statistiques de l'Office National des Statistiques ([http://www.ons.dz/them\\_sta.htm](http://www.ons.dz/them_sta.htm)) .

Notons que 1 tonne PUNR = 139 pneus type VL =18,5 pneus type PL = 2m<sup>3</sup>pneus broyés. (www.aliapur.fr).

## **9. Conclusion :**

L'utilisation des déchets pneumatiques dans le domaine du génie civil a connu un développement rapide durant les dernières années. Ils ont entièrement remplacé les matériaux de construction traditionnel, après une valorisation de ses déchets en plusieurs type .



---

## Chapitre 2 : Valorisation des pneus usagés

### 1. Introduction :

Environ 300 milliards de pneus sont fabriqués chaque année dans le monde et on compte environ 200 matières premières qui entrent dans la fabrication d'un pneu. Les matériaux qui constituent un pneu varient d'un producteur à l'autre. (<http://www.lecaoutchouc.com/nos-compétences/propriétés>).

Les pneus font l'objet d'une attention toute particulière et d'une réglementation stricte en raison des nombreux matériaux qui entrent dans sa composition.

### 2. Valorisation des pneus usagés :

La valorisation des pneus est très encadrée. Les pneus sont triés par taille et composition. Ils sont ensuite déchiquetés pour séparer la gomme et la ferraille et obtenir des copeaux de caoutchouc et divers résidus.

De nombreuses valorisations sont alors possibles : broyé finement sous forme de poudre, le pneu entre dans les revêtements routiers pour faire baisser le niveau sonore et apporter plus de résistance. D'autres utilisations comme les gazons synthétiques ou les aires de jeux amortissant pour enfants montrent la grande diversité du recyclage des pneumatiques (idir.abdelhalim, 2017).

### 3. Filières de valorisation :

Le cheminement des pneus usagés est organisé comme suit : Après le démontage des pneus usagés, ils sont stockés par les garagistes puis collectés par les collecteurs qui trient les pneus pour sélectionner les pneus pouvant être réutilisés ou faire l'objet d'un rechapage. Les pneus usagés non réutilisables sont, soit stockés entiers ou déchiquetés ou broyés, afin de les livrer aux valorisateurs. (lazizi.A m. , Approche par changement d'échelle du comportement dynamique des sols renforcés par des pneus usagés, 2014)

Les principales filières de valorisation des déchets pneumatiques sont présentées dans la figure 8.

La valorisation des pneus usagés, peut se présenter sous l'une des formes suivantes :

#### 3.1. Le rechapage :

Permettant d'allonger considérablement la vie du pneu, le rechapage est la première solution de recyclage.

Cette technique consiste à changer les bandes de roulement des pneus usagés, en les remplaçant par des bandes de roulement neuves. Cette technique a pour cible les pneumatiques usagés dont les carcasses ont gardé intacte l'ensemble de leurs qualités intrinsèques et notamment leurs durées. Cette activité génère à son tour des déchets, dont la poudre de caoutchouc.

---

En Algérie, Michelin Algérie est la seule unité de rechapage inscrite au registre de commerce. L'unité en question ne recape que les pneus homologués par Michelin et avait pour objectif d'atteindre 100 pneus rechapés/ jour en fin 2006 (QUOTIDIEN EL WATAN , 2004)



Figure 4:Bandes de roulement (idir.abdelhalim, 2017)

### 3.2. La valorisation énergétique :

Le pneumatique, de par son origine polymérique, a un excellent pouvoir calorifique (**3 tonnes de pneus =2 tonnes de fuel**) (<http://www.aliapur.fr/>) (<http://www.aliapur.fr/>).

Sa composition homogène en fait par ailleurs un combustible de substitution stable. La valorisation énergétique, est cependant limitée en France où 18 % des pneus usagés sont valorisés, contre 63 % au Japon, 44 % en Allemagne et 29 % en Grande-Bretagne. Elle repose de surcroît, quasi essentiellement, sur les cimenteries. Le recours à des installations dédiées, étant très faible. (trouzine & al., 2011)

La valorisation énergétique est l'utilisation de broyats de pneus usagés ou de pneus entiers comme combustible alternatif pour la production d'énergie. Cette énergie sert à fournir de la chaleur et/ou de l'électricité. C'est donc le pouvoir calorifique du pneu qui est recherché lorsque celui-ci est brûlé. (idir.abdelhalim, 2017)

#### Applications :

- Aciérie ;



---

– Cimenteries ;

### 3.3. L'incinération en cimenterie :

L'industrie cimentière a commencé à utiliser des pneus usagés en substitution partielle des combustibles traditionnels en 1992 – 1993. Ces pneus sont le plus souvent utilisés broyés, plus rarement entiers. En 1998, 26 000 tonnes de pneus usagés, ont été valorisés en cimenterie en France. Ces quantités pourraient progresser, mais les pneus sont concurrencés par d'autres déchets beaucoup plus rémunérateurs (comme les farines animales) et dont la destruction, peut présenter un caractère prioritaire ([www.aliapur.fr](http://www.aliapur.fr)) Le processus cimentier consiste à mélanger 80% de calcaire et 20% de marne pour produire du ciment.

Ce mélange est concassé, broyé puis cuit dans des fours rotatifs où les matières montent en température à 1400° C et devient du Clinker, principal composant du ciment.

Ce processus est extrêmement énergivore, il utilise une quantité importante de combustible fossile (gaz naturel, fuel, charbon ,coke...), mais aujourd'hui il y'a une alternative pour les substituer par des pneus usagés.

Ces pneus sont introduits dans des lignes de cuisson équipées des dernières technologies permettant notamment la valorisation de déchets servant de combustibles.

Les pneus usagés sont utilisés comme combustible des substitutions dans les fours des cimenteries, de façon à réduire leur consommation en combustibles fossiles en vue de diminuer leur consommation énergétique.

Les pneus usagés ont l'avantage de présenter un Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) élevé proche à d'autres combustibles conventionnels.

La valorisation en cimenterie des PUNR revêt un double intérêt en termes d'écologie industrielle: D'une part, la fraction combustible composée d'hydrocarbures polymérisés constitue un apport énergétique pour le procédé cimentier. C'est la valorisation énergétique;

Il représente un combustible de substitution pour la production de l'énergie ,il représente un apport thermique significatif correspondant à son pouvoir calorifique Inférieur élevé proche à d'autres combustibles fossile (gaz naturel Algérien). À titre indicatif, 15% d'apport thermique dans un four a été réalisé suite à une incinération de 8 t de PNUR par an (30% de combustible de substitution) au niveau d'une cimenterie en France. (idir.abdelhalim, 2017)

D'autre part, la fraction minérale essentiellement composée de la trame d'acier des pneus, constitue un apport de matière qui se substitue aux matériaux de carrière. C'est la valorisation de matière. (idir.abdelhalim, 2017)



Figure 4:cimenterie (idir.abdelhalim, 2017)

### 3.4. Aciérie :

La composition du pneumatique présentant une grande quantité de carbone, il est ainsi possible de remplacer l'anthracite que les aciéries électrique utilisent pour réduire la rouille des ferrailles usagées.

La qualité de l'acier reste identique, procédé efficace, économique et écologique ,cette utilisation des broyats de pneus est adoptée depuis une dizaine d'année.

Chaque année, plusieurs milliers de tonnes sont valorisées en Europe.

La fabrication de l'acier en four à arc électrique repose sur la fusion de ferrailles à haute température (1650°C) pendant 45 minutes environ ,pour qu'elles soient fondues.

Un arc électrique d'une température supérieure à 15000° Cassure cette montée progressive en température.

Habituellement, dans un four à arc électrique, on ajoute aux 100 tonnes de ferrailles environ 3300 kg de chaux et 1150 kg de carbone sous forme d'anthracite et de coke.

L'anthracite fournit du carbone qui se dissout dans le métal liquide, où il joue le rôle de réducteur des oxydes de fer (la rouille).

Un pneu est composé de carbone et de fer. La possibilité de substituer tout ou une partie de l'anthracite enfourné dans les fours électriques par des pneumatiques usagés, ouvre la voie à une nouvelle technologie de recyclage des pneumatiques. (idir.abdelhalim, 2017)



Figure 5:Aciéri (idir.abdelhalim, 2017)

### 3.5. Autres valorisations thermiques :

Elles sont actuellement très limitées. De nombreux projets existent, cependant, celles-ci sont développées notamment par des réchappeurs soucieux de valoriser des pneus, ne pouvant être rechapés et des rebuts de rechapage, afin de produire in situ de l'énergie nécessaire aux unités de production.

Ces projets buttent sur des contraintes réglementaires. Les pneus usagés sont considérés comme des « déchets », et non des « combustibles », et à ce titre, soumis à une réglementation contraignante notamment en terme d'émissions dans l'air.

En Algérie, le problème reste posé puisque la réglementation n'est pas encore claire sur la valorisation énergétique. Les cimenteries algériennes préfèrent utiliser du gaz naturel qui est nettement moins coûteux que les pneus usés déchiquetés. (trouzine & al., 2011)

#### Domaines d'Applications :

- Aciérie et Cimenteries ;
- Aires de jeux et piste d'athlétisme ;
- Bétons ;
- Eclisses de tramway ;
- Ecrans acoustiques ;
- Enrobés routiers ;
- Revêtement de chaussées ;
- Gazons synthétiques ;
- Murs de soutènement ;
- Objets moulés et pièces automobiles ;
- Recyclage de fils métalliques. (idir.abdelhalim, 2017)

---

#### 4. La valorisation sous forme des matières premières :

La valorisation matière est le processus de traitement et de transformation des pneus usagés qui en permet une nouvelle utilisation sous une autre forme, par exemple en broyats, en granulat ou en poudrette. (idir.abdelhalim, 2017)

##### 4.1. Poudrettes :

Il s'agit de particules de caoutchouc dont les dimensions sont inférieures à 2mm. Son coût d'obtention dépend de sa finesse, de son origine chimique et de l'absence ou non de corps étrangers. Les poudrettes sont utilisées comme charges dans des mélanges servant à produire des pièces, ne subissant pas des contraintes mécaniques ou dynamiques élevées. Comme exemple d'utilisation, on a la fabrication de bandages et de roues pleines (caddie, poubelles, tondeuses, brouettes...), la modification des revêtements routiers (diminution du bruit et de l'aquaplaning du fait d'un drainage en surface)...etc. (trouzine & al., 2011)



Figure 6:poudrette (idir.abdelhalim, 2017)

##### 4.2. Granulés :

Il s'agit de particules de caoutchouc d'une taille supérieure à celle des poudrettes. Les granulés peuvent être agglomérés par des résines, colorés ou non, et permettent, par moulage, de réaliser facilement des feuilles ou des plaques. Comme exemple d'utilisation, on a les aires de jeux, les pavés anti-dérapants, les revêtements pour terrains de sport (surfaces souples, diminution des nuisances sonores...) .

---

D'autres types de valorisation de matière, par transformation chimique, sont possibles, telle que la régénération (par combinaison d'actions chimiques, mécaniques et thermiques), ou la Pyrolyse – Thermolyse.

Les produits issus de cette décomposition, sont des huiles combustibles lourdes et légères, du carbone...etc. Le développement industriel de ces types de valorisation, est cependant freiné par le coût de mise en œuvre. (Akkouch.Naim, 2017)



Figure 7:Granulats (idir.abdelhalim, 2017)

**Domaines d'Applications :**

- Aires de jeux ;
- Piste d'athlétisme ;
- Bétons ;
- Eclisses de tramway ;
- Ecrans acoustiques ;
- Enrobés routiers ;
- Revêtement de chaussées ;
- Gazons synthétiques ;
- Objets moulés et pièces automobiles ;
- Recyclage de fils métalliques. (idir.abdelhalim, 2017)

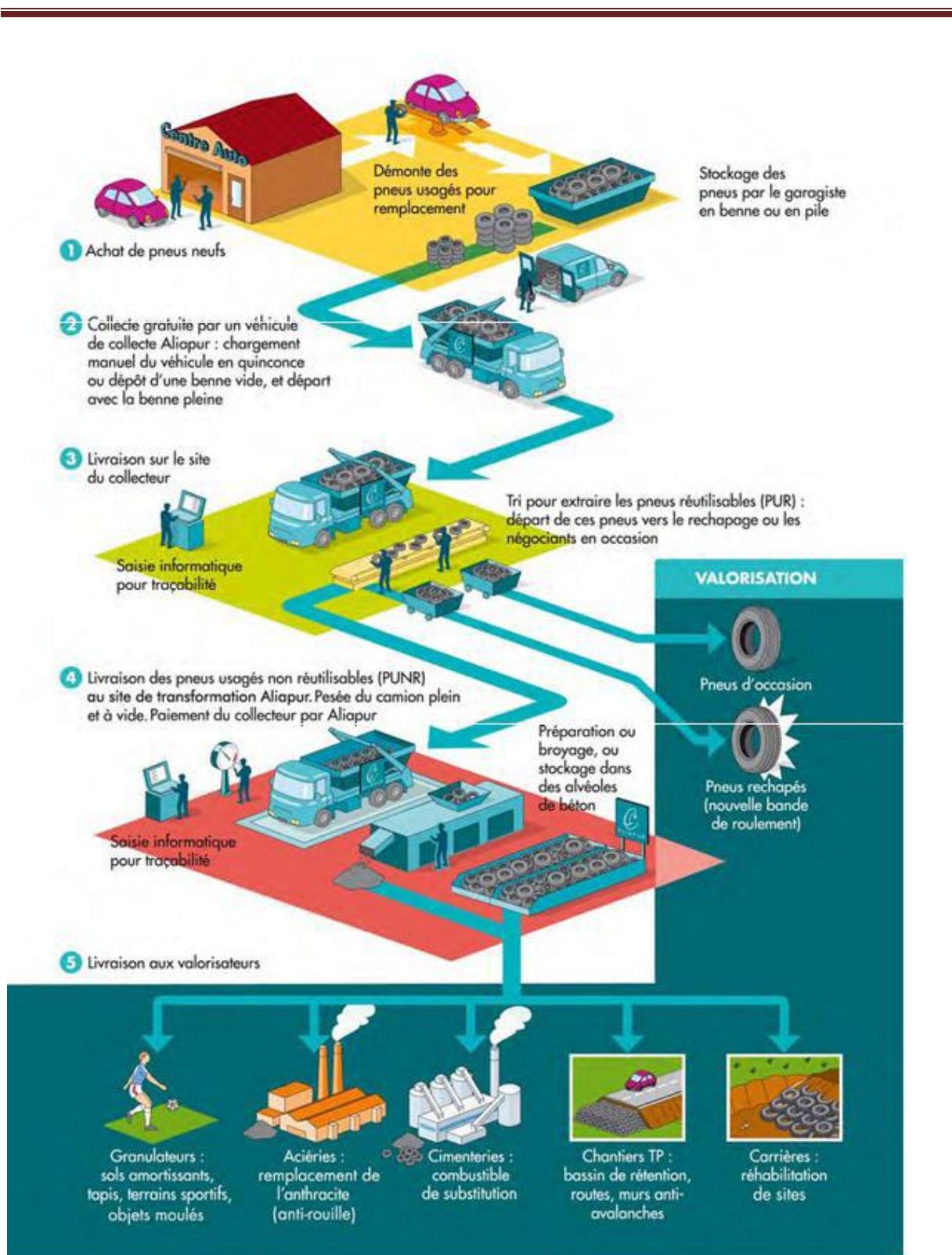


Figure 8: Les différentes filières des pneus usagés (lazizi.A m. , Approche par changement d'échelle du comportement dynamique des sols renforcés par des pneus usagés, 2014)

---

## 5. La technique Pneusol :

### 5.1. Définition et généralités :

Le Pneusol est inventé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC-1974) et classée par l'Agence Française pour la Récupération et l'Élimination des Déchets (ANRED) comme une valorisation originale.

D'après (Long, 1993) Le Pneusol est formé de l'association de deux éléments (Figure 9): Le pneu et le sol. Le mot « pneus » désigne tous les éléments du pneu usagé (deux flancs, une bande de roulement) ou les pneus entiers qui sont associés linéairement ou en nappes et susceptibles de supporter des efforts de traction importants.

Le mot « sol » englobe toutes les variétés de terrains naturels, artificiels ou des déchets divers. Le Pneusol présente l'avantage de pouvoir améliorer de façon durable les propriétés mécaniques du sol, soit de manière anisotrope, c'est-à-dire dans les directions où le matériau est le plus sollicité (nappes, bandes linéaires), soit de manière isotrope, dans toutes les directions (chaines continues d'éléments ou de pneus remplis ou non) [LCPC/SETRA, 1989].

Les principaux avantages que confère le Pneusol aux ouvrages utilisant cette technique sont essentiellement :

- Une souplesse d'adaptation permettant de supporter des tassements différentiels importants.
- Une meilleure répartition des efforts dans la masse du matériau et sur les fondations.

Plus de 2000 ouvrages valorisant les pneus, selon les différentes techniques, sont connus dans le monde, en Algérie, au Canada, aux États Unis et en France. Plus de 12 ouvrages Pneusol anti Marston sont réalisés en Algérie en 1985. Quelques ouvrages Pneusol réalisés en Algérie sont cités dans le tableau 4. (Trouzine.H, 2011)

Type d'ouvrage	Lieu de réalisation	Nombre d'ouvrage
<b>Répartiteur des contraintes</b>	Ain t'émouchent	12 ouvrages
<b>Ouvrages de soutènement</b>	Mur de soutènement provisoire Métro d'Alger (2002)	01 ouvrage
<b>Stabilité de talus</b>	Renforcement d'un talus Evitement de la ville de Bousmail Wilaya de Tipaza (2005)	01 ouvrage
<b>Protection contre le glissement</b>	Wilaya de Bejaia (2006)	01 ouvrage
<b>Stabilité de talus</b>	Modernisation de la RN 11-Wilaya de Mostaganem (2007)	01 ouvrage
<b>Digue de protection</b>	Pont de Bou Arfa - Wilaya de Blida (2008)	01 ouvrage

Tableau 4:Ouvrages pneusol en Algérie (Iazizi.Amina, 2014)

## 5.2. L'intérêt de la technique de Pneusol :

- Valorisation de déchets (on estime qu'il est produit 35 000 000 de pneus usagés par an en France).
- Montage simple et économique (coût Pneusol=50% coût ouvrage traditionnel).
- Approvisionnement des constituants aisé : on trouve des pneus usagés partout dans le monde et se prête à une large gamme d'utilisation de remblais (seuls les matériaux argileux mous sont à proscrire).
- Mise en œuvre ne faisant pas appel à de gros moyens. (caoutchouc.com/nos-compétences/propriétés.)

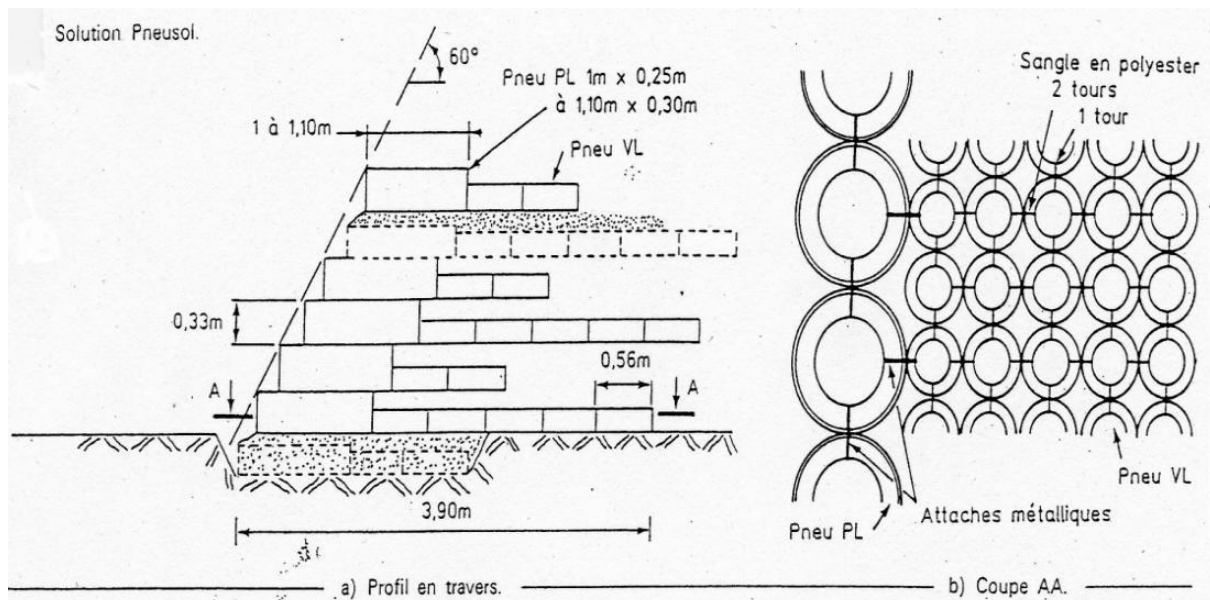


Figure 9:schéma d'un remblai pneusol (Iazizi.Amina, 2014)

## 5.3. Les techniques dérivées du PNEUSOL :

### 5.3.1. Le PNEURESIL:

Une autre technique brevetée par EUREC (EuropeanRenewableEnergyResearchCenters) sous le nom "PNEURESIL", (Réalisation Souple Isolante Légère) consiste à empiler des pneus de poids lourds en colonnes et à empêcher le sol courant de remplir les vides créés à l'intérieur et entre les pneus. Cette structure légère peut être utilisée comme soubassement de routes ou comme remblai derrière les culées de pont ou les murs de soutènement (www.aliapur.fr) (T. Coupez, 1992).



---

### 5.3.2. L'ARMAPNEUSOL :

Il fait l'objet d'un brevet LCPC – Forézienne d'Entreprise (Saint Etienne – 42). Il s'agit d'une technique de massif de sol renforcé par des nappes de treillis soudés. Les pneus sont des pneus de poids lourds entiers avec un flanc en face supérieure découpé remplis de sol. Ils sont disposés horizontalement et longitudinalement et jouent le rôle de parement. Dans le sens vertical, les lits de pneus sont décalés d'un niveau à un autre. Les éléments de renforts sont disposés horizontalement et pincés entre deux rangs de pneus. La pente de talus de l'ouvrage est relativement raide, de l'ordre de 75° (C. Coulet J. P., 1992).

### 5.3.3. LE PNEUTEX :

Le renforcement du massif de sol est assuré par des nappes de géotextile. Les pneus sont des pneus poids lourds entiers avec un flanc en face supérieure découpé. Ils sont disposés horizontalement et longitudinalement et jouent le rôle de parement. Les nappes de géotextile de renfort sont disposées horizontalement et pincées entre deux rangs de pneus (C. Coulet J. , 1989).

### 5.3.4. LE PNEUSOL LEGER :

L'utilisation des pneus de poids lourds permet de diviser approximativement le poids volumique du matériau de base par deux. A titre d'exemple, l'association d'un remblai courant de 25 KN/m<sup>3</sup> et dont l'utilisation ne nécessite pas de dispositif de renforcement particulier (dalle de couverture en béton). L'application du Pneu sol léger se trouve en : remblai léger, réducteur de poussée, répartiteur de contraintes, absorbeur d'énergie. (Long, 1993)

### 5.3.5. La technique TDA :

Le TDA (Tire DerivedAggregate) ou agrégats dérivés des pneus déchiquetés en morceaux de 25 à 300mm (Figure 10). Il offre plusieurs solutions des problèmes géotechniques par ses propriétés importantes : poids volumique léger (1/3 du sol), poussée des terres faible (1/2 du sol), bonne isolation thermique (8 fois meilleur), bon drainage (10 fois meilleur) et une bonne compressibilité.

Les domaines d'utilisation du TDA sont variés : remblais de route, derrière les murs de soutènement, atténuation des vibrations pour les rails, isolation et limitation la pénétration du gel, couches de drainage pour les remblais et couches de drainage pour les systèmes de traitement des eaux résiduaires (D. N.HUMPHREY, 2006)



Figure 10: Tire Derived Aggregate (lazizi.Amina, 2014)

### 5.3.6. La technique TIRE BALLEES :

Dans cette technique les balles de PU généralement ceux de véhicules légers sont confectionnées à l'aide d'une presse et attachées par des câbles galvanisés ou d'acier inoxydable. Les balles de pneus ainsi formées ont une forme, presque parallélépipédique.

Les domaines d'application de ce matériau sont :  
Stabilité des pentes et des berges, remblai pour des structures de chaussées, matériaux de remblais derrière les murs de soutènement (Figure 11), la réduction de gonflement du au gel, des murs de barrière à proximité des autoroutes et des barrières de chute de roches (J. G. Zorenberg, 2005)



Figure 11: Mise en œuvre Tire balles (lazizi.Amina, 2014)

---

### 5.3.7. La technique TIRECELL:

Les deux flancs des pneus souvent de véhicules légers sont enlevés, la bande de roulement ainsi obtenue est attachée afin de former des cellules en forme du chiffre 8 (Figure 12). Les cellules de pneus sont associées au sable pour donner le Tirecell, ce matériau peut être utilisé pour les mêmes applications que le Geocell commercialisé (Y.W. Yoon, 2006). Les études montrent que la capacité portante de ce matériau est très intéressante. Cette technique est étudiée et utilisée en Asie notamment en Corée du sud.



Figure 12: la Technique Tirecell (Iazizi.Amina, 2014).

### 5.3.8. La technique TDF:

Le TDF (Tire Derived Fuel) celle-ci se définit par l'utilisation de ses PU dans des centrales thermiques pour la production d'énergie électrique (puisque ce combustible est moins cher que les combustibles classiques), ou l'utilisation dans des chaudières industrielles à production de vapeur, ou encore dans les usines d'incinération où les pneus mélangés à des déchets divers permettent une meilleure élimination des déchets. Cette activité est peu développée en Europe mais très développée aux États-Unis 2.000.000 de tonnes en 2001 et en Japon 611.000 tonnes en 2000 (Iazizi.Amina, 2014).



Figure 13: Tire derived fuel (tumers)

---

## 6. Conclusion :

Les pneus possèdent des propriétés multiples qui leur donnent un intérêt dans l'ingénierie civil et géotechnique. Les Pneus Usagés Non Réutilisables (PUNR) sont utilisés comme combustible de substitution en cimenteries et en aciérie est l'un des profils les plus envisageables pour la valorisation des pneus usagés en Algérie. (idir.abdelhalim, 2017)

Le Pneusol est une association des pneus usés entiers, partiellement ou entièrement découpés à des sols pulvérulents ou cohérents. Les domaines d'application sont variés (Ouvrages de soutènements, remblai léger, protection des ponts ...).



---

## Chapitre 3 : Comportement de pneusol

### 1. Introduction :

Les pneus usagés sont des déchets encombrants et polluants et non biodégradables. L'association des pneus usagés, entiers, partiellement ou entièrement découpés, à des sols, pulvérulents, cohérents ou déchets, peut donner des matériaux performants en génie civil et solutionner plusieurs problèmes rencontrés par l'ingénieur dans le secteur du BTPH. (Iazizi. A. m. , Approche par changement d'échelle du comportement dynamique des sols renforcés par des pneus usagés, 2014)

### 2. Etude en laboratoire :

Le Pneusol est un matériau composite constitué de deux éléments ayant des modules de déformation très différents :

D'une part le pneu et d'autre part le sol. Le comportement global d'un tel matériau résulte des caractéristiques mécaniques des deux composants de base et leurs proportions relatives.

Renforcer un sol par un matériau de module plus faible que le sol est a priori une mauvaise idée. Le matériau ainsi réalisé serait intermédiaire et posséderait des caractéristiques plus faibles que le sol de base.

Or la plupart des constituants du pneu sont armés par des armatures très résistantes. Leur schématisation en laboratoire n'est pas aisée à réaliser. On peut cependant tenter de cerner partiellement leur comportement, notamment dans le cas simple où le fonctionnement du Pneusol est basé sur le frottement (bandes de roulement aplaties), c'est à dire avec les bandes de roulement sur chant. (LONG, 1993)

- **Courbes contrainte-déformation** (Fig.15)

La courbe contrainte-déformation de l'échantillon de sable armé classique (disques d'aluminium) possède une tangente commune avec celle du sable seul, contrairement à celle du latex (pente plus faible). (LONG, 1993)

La figure 14 montre les courbes "contrainte-déformation" de ces matériaux. Le module du sable-latex est toujours plus faible que celui du sable. Compte tenu des résultats précédents, en dosant convenablement la quantité de pneumatiques à "injecter" dans le sol, on devrait obtenir un matériau composite à faible module initial et à fort déviateur à la rupture. (LONG, 1993)

Courbes "contraintes-déformations" (La courbe du Pneusol est une hypothèse)

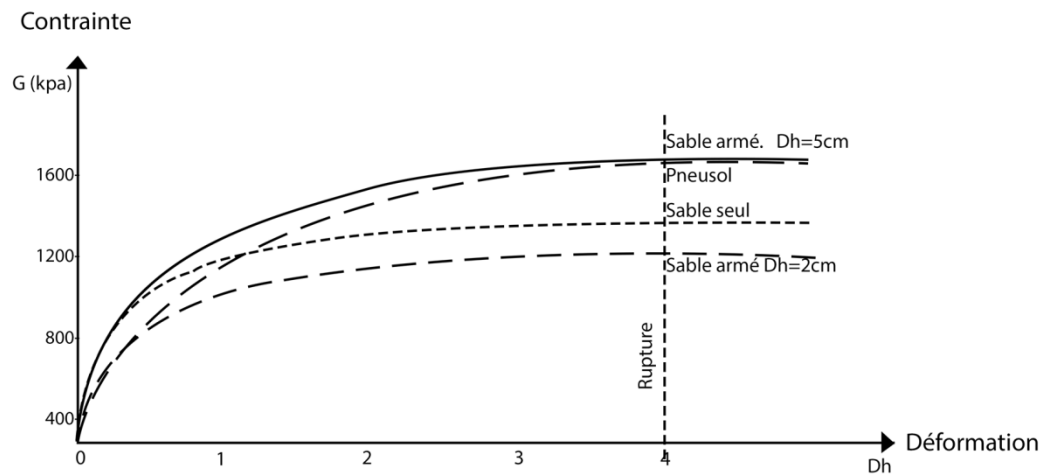


Figure 14: Courbes "contrainte-déformation" d'éprouvettes de sable et de sable armé d'aluminium ou de latex (LONG, 1993)

Cela signifie que les modules tangents à l'origine sont différents et dépendent des caractéristiques des armatures, de l'espacement  $\Delta H$  entre les armatures et de leur épaisseur. L'épaisseur non négligeable des disques de latex explique aussi pour une bonne part l'obtention d'un module tangent plus faible. (LONG, 1993)

- **Courbes intrinsèques :**

L'étude du comportement global du sable armé classique permet de dégager les conclusions suivantes, Il existe deux types de rupture de l'échantillon :

- rupture par défaut d'adhérence, caractérisée par une déformation en tonneaux de l'éprouvette et sans cassure des armatures;
- rupture des armatures, avec apparition d'un plan de rupture;

\* A la rupture, lorsqu'il y a cassure des armatures, le sable est à l'état limite et la présence des armatures se traduit par l'existence d'une cohésion anisotrope. (LONG, 1993)

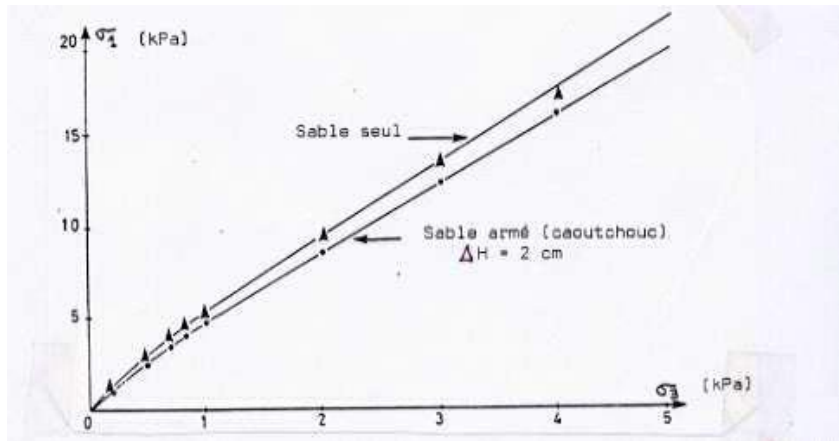


Figure 15: Courbe intrinsèque d'un sable et d'un sable armé de caoutchouc (LONG, 1993)

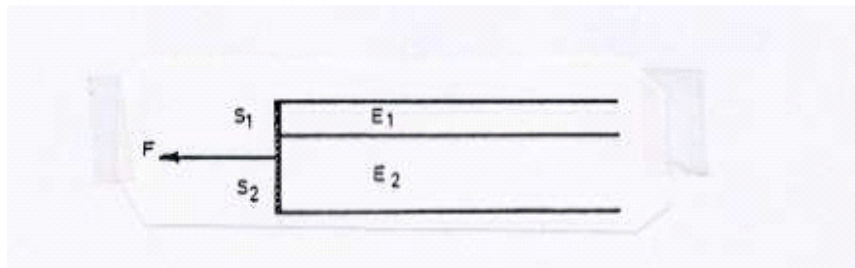


Figure 16: Comportement en traction d'un matériau composite (LONG, 1993)

Les efforts qui se développent dans la masse du sol sont repris alors par les armatures, par le biais du frottement sol-armature, ce qui confère au matériau la cohésion trouvée lors des essais triaxiaux. (LONG, 1993)

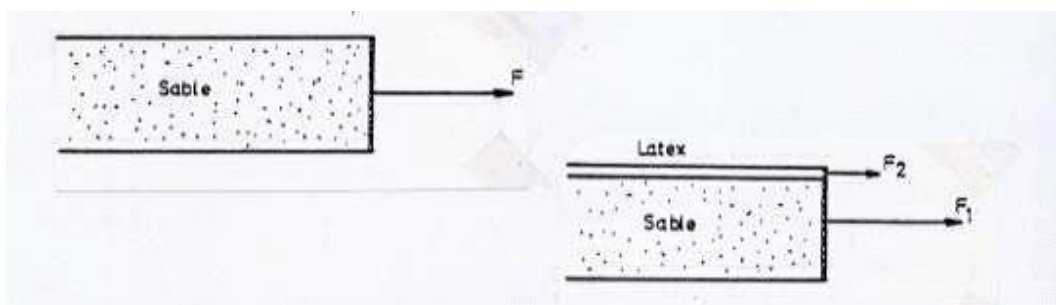


Figure 17: Comportement comparé d'un sable et d'un sable latex (LONG, 1993)

Dans la pratique, les pneumatiques sont fabriqués à partir du caoutchouc vulcanisé, c'est à dire comportant de l'ordre de 40% à 50% de latex, mais aussi différents autres éléments tels que l'huile, les copolymères,...etc. Ils possèdent de plus la particularité d'être particulièrement bien



---

Armés par des fils câblés (nylon, rayonne..)ou métalliques qui constituent une sorte d'armatures des pneus, supportant les flancs et la bande de roulement.

On peut donc penser qu'à partir de ces essais simples, la courbe intrinsèque du Pneusol est intermédiaire entre celle d'un sable armé d'acier et celle d'un sable armé de caoutchouc (mélange de latex et de divers produits chimiques) avec une cohésion induite importante par suite des caractéristiques élevées de l'acier. D'un tel matériau composite résulte tout d'abord de la rupture ductile. (LONG, 1993)

Le comportement du Pneusol est en fait très complexe et, suivant le mode d'utilisation des éléments de pneumatiques, l'effet du frottement "sol-pneumatique" peut devenir très secondaire par rapport à l'effet d'ancrage, qu'on ne peut étudier en laboratoire. (LONG, 1993)

### **3. L'ADHERENCE SOL-PNEUMATIQUE :**

#### **3.1. ESSAIS D'ARRACHEMENT :**

L'adhérence sol-pneumatique a été étudiée en 1974 au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Clermont Ferrand, au moyen d'essais en vraie grandeur de traction d'éléments de pneumatique noyés dans un remblai (LONG et POUGET, 1980), plus particulièrement pour chercher à mettre en évidence l'influence :

- du type d'armature, en bande ou en nappe,
- de la longueur de l'armature,
- de la contrainte verticale (hauteur du remblai)

Le pneumatique utilisé était du type MICHELIN ZX 145\*130 (LONG, 1993)

#### **- Formes d'assemblages :**

Les différents éléments de pneumatiques peuvent être disposés de plusieurs manières :

- flanc posé à plat,
- bande de roulement mise sur chant,
- bande de roulement aplatie ; une telle solution (double épaisseur de pneumatique) évite de couper transversalement la bande et de mettre ainsi à nu les aciers. De plus, c'est aussi une opération en moins, donc des économies lors de la mise en œuvre de ce matériau. (LONG, 1993)

L'assemblage de ces éléments permet de réaliser des armatures linéaires ou en nappes. Il convient de tenir compte dans cet assemblage de la possibilité de moduler la résistance de l'armature en certains points où les efforts de traction sont plus importants, ou tout

Simplement de limiter la déformation. De plus, le montage des éléments doit rester simple pour rendre le procédé techniquement et économiquement valable. La liaison entre les différents éléments est faite avec des pièces métalliques adaptées. Par la suite, diverses liaisons ont été étudiées. (LONG, 1993)

Six remblais de hauteurs différentes ont été réalisés:

- le remblai R1 a surtout permis la mise au point de l'ensemble des opérations de mise en œuvre et d'essai.
  - les remblais R2, R3, R4, de hauteurs différentes, reproduisent les mêmes types d'essais sur des armatures linéaires;
  - le remblai R5 a permis de tester des éléments de pneumatiques assemblés en nappes (flancs et bandes de roulement sur chant);
  - le remblai R6 a fourni en un complément d'essais de traction sur des élingues (étalonnage).
- (LONG, 1993)

La figure 19 montre une vue en plan des différents remblais

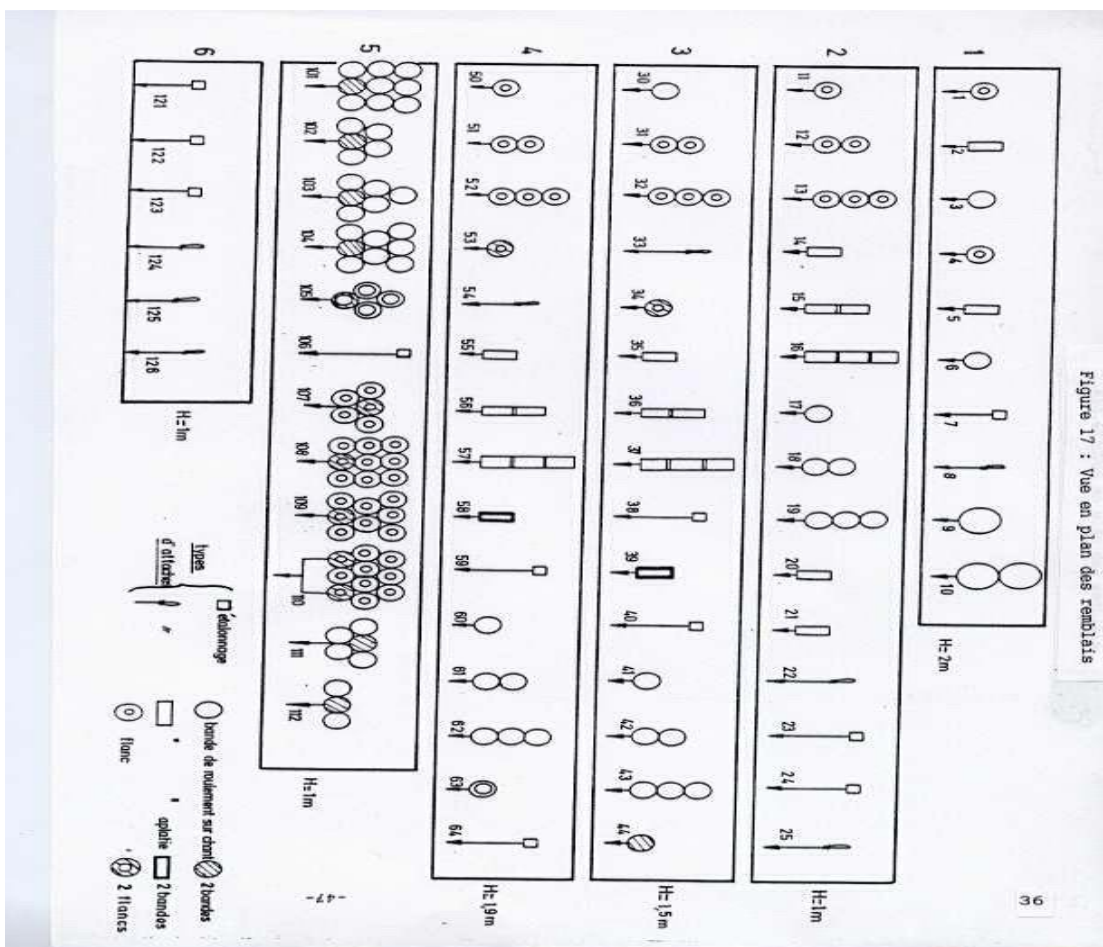


Figure 18:: Vue en plan des remblais (LONG, 1993)

#### 4. Assemblage de type linéaire :

##### 4.1. Bandes de roulement aplaties :

Le tableau 5 montre l'influence du nombre d'éléments et de la contrainte verticale sur l'effort maximum obtenu.

Bien que la dispersion des résultats soit importante, on constate que, dans l'ensemble, la traction maximale a plutôt tendance à augmenter avec le nombre d'éléments. Pour une armature composée de trois éléments, elle est de l'ordre de 60 kN.

Contrainte verticale	1 élément (KN)	2 élément (KN)	3 élément (KN)
H=1m (20,5kPa)	31	49	68
H=1,5m (30,7kPa)	16,3	49	68
H=1,8m (36,9kPa)	55*	85*	67*
H=2m (41kPa)	43,5		

Tableau 5: Effort de traction en fonction du nombre d'éléments (bandes de roulement aplaties) (Long, 1993)

	1 élément	2 éléments	3 éléments
<b>Traction Maximal</b>	30 KN	47,5 KN	69 KN
<b>Déformation maximale</b>	10 cm	30 cm	50 cm

6.1.1.

Tableau 6: Déformation maximale (LONG, 1993)

##### 4.2. Bandes de roulement sur chant :

Les valeurs de la traction maximale sont dans l'ensemble très dispersées. Le tableau 7 donne une idée de l'ordre de grandeurs des valeurs obtenues.

Efforts de traction (kN)

<b>Contrainte verticale</b>			
<b>H=1m(20,5kPa)</b>	33,50	32	41
<b>H=1,5m(30,75kPa)</b>	25,50	35	6
<b>H=1,85m(37,9kPa)</b>	Sup66*	Sup60*	Sup58*

Tableau 7: Traction maximale dans les bandes de roulement (LONG, 1993)

NB : \*Rupture des attaches



Figure 19: Allure des bandes de roulement sur chant après essai (LONG, 1993)

Allongement mesuré

(cm)

<b>Contrainte verticale</b>	1 élément	2élément	3élément
<b>H=1m (20,5 kPa)</b>	27	-	-
	34	9	-
	37	20	4
<b>H=1,5m (30,75kPa)</b>	17	-	-
	25	4	-
	24	11	6

Tableau 8:Allongements maximaux en fonction du nombre d'élémentspour des bandes de roulement aplaties (LONG, 1993)

---

Il apparaît également que les déformations sont moins importantes lorsque la contrainte verticale augmente.

Les déformations mesurées avec les bandes de roulement sur chant sont beaucoup plus importantes que celles mesurées dans le cas des bandes de roulement aplaties, du fait de l'ovalisation de la bande.

A titre indicatif, pour un effort de traction de 20kN, la déformation  $\Delta L$  à l'avant du premier élément est donnée dans le tableau 8. (LONG, 1993)

---

<b>Allongement global mesuré (cm)</b>				
<b>Contrainte verticale (kPa)</b>	<b>1élément</b>	<b>2élément</b>	<b>3élément</b>	
<b>20,5kPa</b>	5,5	<b>11</b>	<b>13</b>	
<b>30,75kpa</b>	13,5	<b>15</b>		
<b>37,9kpa</b>	4	<b>4</b>	<b>4</b>	

---

Tableau 9: Allongements maximaux globaux en fonction du nombre d'éléments pour des bandes de roulement sur chant. (LONG, 1993)

### 4.3. Les flancs

Les résultats obtenus pour ces essais sont beaucoup moins dispersés que lors des essais précédents. On pourrait penser que les aciers et la forme des tringles sont beaucoup plus homogènes. (LONG, 1993)

Traction maximale (kN)				
Contrainte (kPa)	verticale	1élément	2élément	3élément
20,50		19,50	30	Sup33,5*
30,75		33	Sup27*	
sup28*				
41		Sup30*	Sup27*	Sup26*

Tableau 10: Tractions maximales dans les flancs des pneus en fonction du nombre d'éléments (LONG, 1993)

NB : \*Rupture des flancs au niveau de l'attache

## 5. Assemblages en nappes :

Des essais de traction ont été réalisés sur des éléments de pneumatiques se prêtant particulièrement bien à un assemblage en nappe : (Fig.24) (LONG, 1993)

- les bandes de roulement sur chant,
- les flancs.

Les essais ont été réalisés sous une seule charge verticale (massif de hauteur 1m).

On trouvera en annexe les courbes "contrainte-déformation" des différents assemblages testés (trame en losange ou en carré). (LONG, 1993)



Figure 20: Assemblage de pneumatiques en nappes (Long, 1993)

## 5.1. Bandes de roulement sur chant :

### 5.1.1. Essais en nappes :

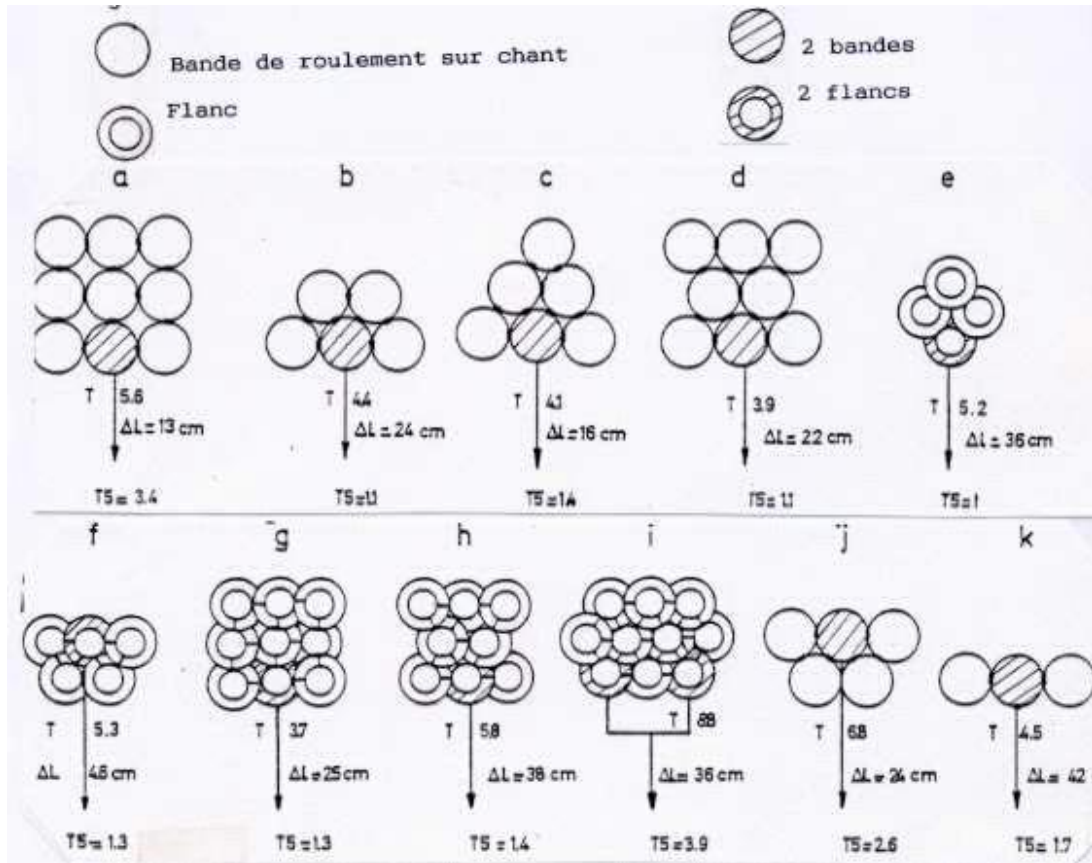


Figure 21: Essais en nappes (LONG, 1993)



Figure 22 :Bandes de roulement sur chant en nappes (trame carrée). Vue avant remblaiement (LONG, 1993)

---

On constate que la meilleure disposition est celle de la trame carrée (cas a), qui peut éventuellement être associée au cas j, c'est dire possédant une attache sur un élément situé au deuxième rang. (LONG, 1993)

## 5.2. Cas des flancs de pneus :

Cinq essais (e, f, g, h, i) ont été réalisés, et l'on constate que, malgré la symétrie de l'assemblage des éléments et le centrage des efforts appliqués, les déplacements des éléments se trouvant à l'arrière ne se produisent pas de manière symétrique. (LONG, 1993)

-(e) 11 cm (4 éléments selon une trame en losange),

-(f) 8 cm (5 éléments à trame en losange et attache sur l'élément central arrière),

-(h) 8 cm (8 éléments à trame en losange),

-(g) 10 cm (9 éléments à trame carrée), (LONG, 1993)

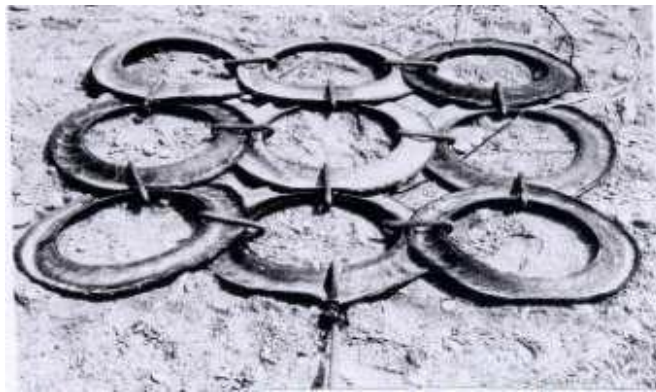


Figure 23: Flancs en nappe (LONG, 1993)

## 5.3. Tentatives d'interprétation de l'adhérence "sol-pneumatique" :

L'interprétation des résultats précédents n'est pas aisée affaire dans la plus part des cas à de grandes déformations. Cependant, on peut penser que certains calculs utilisés pour le dimensionnement des sols renforcés (Terre Armée, etc....) ou pour interpréter l'interaction sol-renforcement pourraient être adaptés aux cas des ouvrages en Pneusol. (LONG, 1993)

### **Bande de roulement aplatie :**

La mise bout à bout des bandes de roulement aplaties conduit à une armature linéaire et l'interprétation peut être faite simplement comme pour le cas d'une armature de Terre Armée de faible module.



L'effort de traction appliqué est équilibré par le frottement sol-caoutchouc exercé sur les deux faces des éléments enterrés dans le remblai. Suivant le degré d'usure et le type de dessins des pneus, une partie de ce frottement peut être considérée comme de type sol-sol. (LONG, 1993)

### **Bandes de roulement sur chant :**

L'effort de traction est équilibré par:

- le frottement sol-caoutchouc sur la surface verticale externe de l'élément, sur les côtés et à l'avant de celui-ci. Cette surface varie en fonction de l'effort appliqué ;
- le frottement sol-sol le long de deux surfaces engendrées par le remplissage de la bande de roulement. Ces deux surfaces sont initialement circulaires, mais là aussi, elles varient en fonction de l'effort appliqué et éventuellement du système d'attache (poinçonnement plus ou moins important du caoutchouc). On peut supposer pour simplifier le calcul, que les deux surfaces horizontales sont invariables et égales à la surface initiale du cercle proche du diamètre du pneu. (LONG, 1993)

Configuration	Contrainte Verticale (kpa)	Mesures	Calculs
		T <sub>m</sub> (kN)	T <sub>cal</sub> (kN)
1 élément	20,50	33,5	16
	30,75	20,5	23
	41,	30,5	30
2 élément	20 ,5	32,	24
	30,75	35,	35
3 élément	20,5	41,	32

Tableau 11: Valeurs mesurées et calculées des efforts de tractions (LONG, 1993)

### - **Les flancs des pneumatiques**

L'analyse la plus "aisée" à faire concerne les flancs associés linéairement puisqu'on peut supposer que leur comportement et leur fonctionnement sont semblables à ceux des bandes de roulement aplaties. Il est difficile de faire la part du frottement sol-sol provenant du cisaillement des tringles et du frottement sol-caoutchouc et, de plus, la surface des flancs est variable. On retiendra cependant que les efforts mesurés restent assez importants (supérieurs à

---

20 kN) pour l'ensemble des essais réalisés pour des déformations du même ordre de grandeur. (LONG, 1993)

## 6. Conclusions :

Les essais d'adhérence sol-pneumatique ont permis de bien connaître ce phénomène et surtout de dimensionner la longueur des renforcements (linéaire ou en nappe). Le phénomène de défaut d'adhérence n'est pas fréquent et, à partir d'une association de trois éléments, l'effort maximal est toujours obtenu par rupture des attaches. Les valeurs de cet effort sont en général très élevées de l'ordre de 20 à 60 kN avec cependant des déformations élevées. Néanmoins on peut limiter ces déformations en limitant l'effort appliqués. De toutes façons, dans tous les cas de figures, un assemblage en nappe paraît toujours être le meilleur (effort élevé, déformation la plus faible). Judicieux (par exemple, attache sur la deuxième rangée des éléments), permettra de limiter encore plus la déformation.

L'assemblage par nappe est extrêmement intéressant, notamment dans le cas d'une construction sur sols de faible portance; l'ensemble se comporte comme un massif cohérent constitué par des milliers de petits gabions liés les uns aux autres. Cette disposition permet de plus de mieux répartir les charges sur le sol de fondation, de limiter le tassement différentiel entre les différents points du massif et d'empêcher le développement des fissures à l'intérieur de la masse de remblai.

Et pour une déformation de 5 cm, on peut obtenir un effort de l'ordre de 20 kN pour une trame carrée. Un tel assemblage, associé à un dispositif d'accrochage. (LONG, 1993)

## 7. Comportement statique du Pneusol :

Plusieurs travaux (expérimentations sur modèles réduits de laboratoire ou en vraie grandeur) sur les différentes applications du Pneusol (Pneusol répartiteur des contraintes, Pneusol réducteur de poussée, Pneusol absorbeur d'énergie, Pneusol sous fondation en sols gonflants, ont été réalisés à travers le monde. (Iazizi. A. m. , Approche par changement d'échelle du comportement dynamique des sols renforcés par des pneus usagés, 2014)

### 7.1. Essais en vraie grandeur :

#### 7.1.1. Pneusol répartiteur de contraintes (Pneusol anti Marston)

Lorsqu'on enterre une canalisation rigide en béton sous des fortes hauteurs de remblais, on constate une très forte concentration des charges à la clé pouvant dépasser parfois deux

---

fois la hauteur des terres. C'est le phénomène de Marston, qui est dû à un tassement différentiel entre l'ouvrage enterré et le remblai technique environnant. Le remblai Pneusol léger, associé à un conduit rigide permet à celui-ci de se comporter comme un conduit souple par la création d'un effet de voûte. Il se développe sur les deux plans parallèles encadrant le conduit des contraintes de cisaillement qui sont orientées vers la surface libre. Il y a donc report des charges sur le remblai technique environnant. C'est le Pneusol Anti-Marston ou répartiteur de contraintes. (lazizi.A m. , Approche par changement d'échelle du comportement dynamique des sols renforcés par des pneus usagés, 2014)

- Application à Monistrol-sur-Loire (1985-1986):

L'ouvrage concerné sert de galerie technique à la conduite alimentant en eau potable la ville de St Etienne en France. Les résultats de l'application justifient que l'utilisation du Pneusol dans le corps d'un remblai permet de réduire la charge appliquée par la formation de voûte de décharge.

- Canalisation de Mouans-Sartoux (Alpes Maritimes, 1988):

Il s'agit d'une canalisation d'eau usée située dans les emprises des terrassements de la future RN 85 déviation de Mouans-Sartoux en France. Le but de cette réalisation par LRPC de Nice et le LCPC est de formuler un avis sur la pérennité de la canalisation et le cas échéant sur les dispositions constructives à prendre. (lazizi.A m. , Approche par changement d'échelle du comportement dynamique des sols renforcés par des pneus usagés, 2014)

### ***7.1.2. .Pneusol absorbeur d'énergie :***

Disposé au-dessus des ouvrages pare blocs, le Pneusol léger constitue quelquefois une solution intéressante pour protéger un ouvrage en béton des chutes de blocs.

- **Expérimentations en France (1993) :**

Les essais ont été réalisés en France en 1993 par la DDE du Var, l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Marseille et le LCPC, en lâchant un bloc artificiel en béton de 7 tonnes de 40 mètres de hauteur. Ces essais ont prouvé que le Pneusol a un grand pouvoir absorbeur . (lazizi.A m. , Approche par changement d'échelle du comportement dynamique des sols renforcés par des pneus usagés, 2014)

---

## 7.2. Essais sur modèle réduit de laboratoire :

### 7.2.1. Pneusol réducteur de poussée :

La mise en place d'un massif de Pneusol derrière un ouvrage de soutènement, peut constituer dans certains cas une solution économique et élégante pour construire ou réparer un ouvrage de soutènement fissuré, ou instable. En effet le massif de Pneusol par sa cohésion et son poids volumique faible permet de réduire convenablement la poussée des terres sur un

mur de soutènement. L'idée d'utiliser le Pneusol comme réducteur de poussée découle de l'observation du comportement des ouvrages de soutènements en Pneusol associés à des parements préfabriqués en béton. (lazizi.A m. , Approche par changement d'échelle du comportement dynamique des sols renforcés par des pneus usagés, 2014)

#### - Etude expérimentale de l'INSA de Lyon:

L'étude a été réalisée à l'INSA de Lyon dans une cuve parallélépipédique de dimensions 0.80m de hauteur, 0.80m de largeur et 1.20m de longueur. Son but set obtenir des résultats d'ordre qualitatifs qui permettent de mettre en évidence l'influence de certains paramètres (largeur et hauteur du Pneusol, mur poids ou cantilever) . (lazizi.A m. , Approche par changement d'échelle du comportement dynamique des sols renforcés par des pneus usagés, 2014)

#### - Modèle réduit tridimensionnel de l'ENSTP d'Alger (1989):

Il s'agit de répéter les essais de l'INSA de Lyon mais avec une modification des dimensions de la cuve, 0.87m de hauteur, 0.76m de largeur, 0.725m de longueur, et une capacité interne de 0.42978m<sup>3</sup>.

Cette recherche a pu mettre en évidence plusieurs paramètres, mais principalement une réduction de 30% de la poussée derrière un mur de soutènement par l'inclusion des pneus usagés. (lazizi.A m. , Approche par changement d'échelle du comportement dynamique des sols renforcés par des pneus usagés, 2014)

### 7.2.2. Pneusol répartiteur de contraintes (Pneusol anti Marston) :

L'étude est réalisée sur modèle réduit de LCPC Paris et l'INSA de Lyon. L'objectif de cette étude est d'illustrer l'effet répartiteur de pressions que peut jouer un massif de Pneusol. (lazizi.A m. , Approche par changement d'échelle du comportement dynamique des sols renforcés par des pneus usagés, 2014)

### 7.2.3. Pneusol sous fondation en sols gonflants :

Au sein de laboratoire de matériaux et hydrologie de l'université de Sidi Bel Abbes une recherche particulière d'un modèle réduit sur le Pneusol sous fondations en sol gonflants (Figure 31) est lancée afin de démontrer sa capacité portante pour supporter une structure légère et mettre en évidence le pouvoir d'absorber les ondes et le gonflement d'argile et les poussées des terres . (lazizi.A m. , Approche par changement d'échelle du comportement dynamique des sols renforcés par des pneus usagés, 2014)

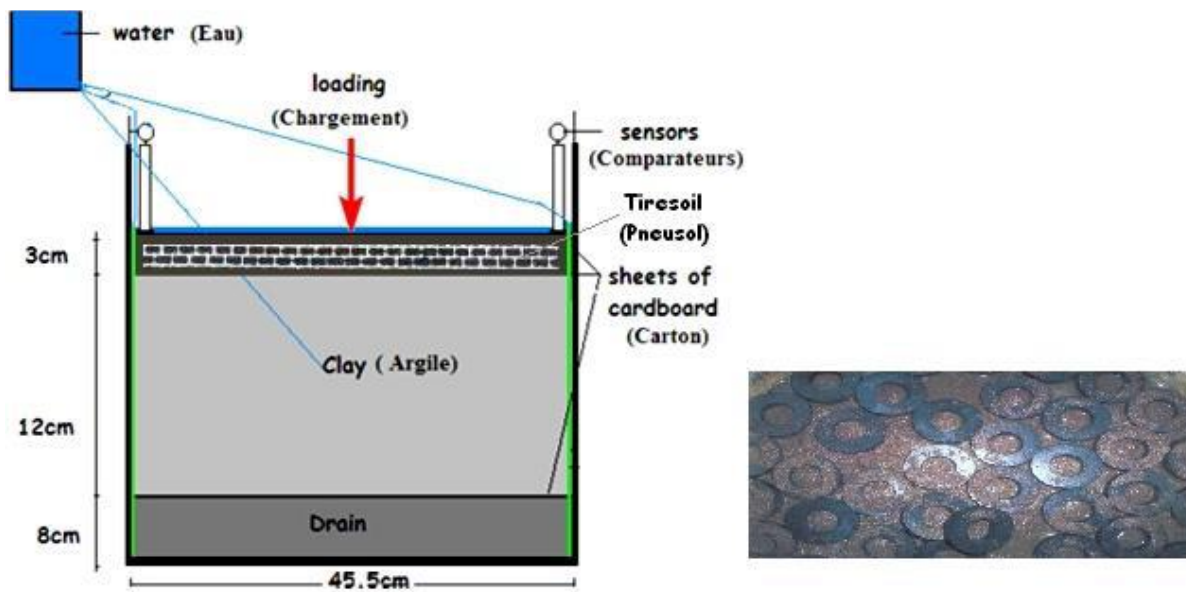


Figure 24: modèle réduit de l'université de sidi belabbas (H.Trouzine, 2008)

---

## 8. Conclusion :

Plusieurs recherches et études expérimentales ou en vraie grandeur, analytique ou numérique ont été lancées et réalisées pour bien étudier les différents comportements des déchets pneumatiques une fois les valoriser en particulier dans le secteur du BTPH. Les résultats obtenus montrent que l'ajout de ces derniers dans le sol augmente ses caractéristiques.

---

## CHAPITRE 4 : Modélisation Numérique .

### 1. Introduction générale :

Afin de vérifier la stabilité d'un mur de soutènement contre le glissement, le renversement, ...etc. On a choisi une méthode de modalisation numérique ;

Cette modélisation numérique est basée sur le choix de la méthode et le modèle utilisé. Pour notre étude, on a utilisé le logiciel Plaxis adapté aux différents sols et aux plusieurs ouvrages. L'étude numérique présentée dans ce travail, comporte deux calculs ( un cas d'un mur supporte un sable seulement et un deuxième cas ou le sable est renforcé par des nappes de pneus.).

### 2. Introduction au logiciel utilisé :

#### 2.1.Introduction :

L'analyse de projets géotechniques est possible grâce à de nombreux codes éléments finis. L'ingénieur ayant de l'expérience en ce domaine sait que le poids des hypothèses permettent le passage de la réalité au modèle est difficile à évaluer. Il sait que le jargon éléments finis est parfois rebutant-il souhaiterait ne pas avoir à intervenir sur la numérotation des nœuds, des éléments, sur certains choix réservés au numéricien. Il voudrait disposer du code sur le PC gérant sa bureautique et sa technique quotidiennes, afin de faire une étude paramétrique des problèmes délicats. Il exige avant tout que ses journées ne soient pas encombrées par de laborieuses entrées de données et interprétations de fichiers .Conçu par des géotechniciens numériciens, le code éléments finis :

#### *Plaxis 2D*

Plaxis 2D est un outil puissant et convivial pour la modélisation et l'analyse aux éléments finis des problèmes géotechniques en 2D (déformation, stabilité, en mécanique des sols et mécanique des roches). Ses applications sont nombreuses et couvrent les projets d'excavation, remblais et barrages, fondations, tunnels, mur de soutènement, etc....

Plaxis 2D peut s'accompagner de trois modules complémentaires pour étendre ses applications : Dynamics, Plaxflow and Thermal.

Le développement du PLAXIS code commence en 1987 à l'Université Technique de Delft, en Holland, comme initiative du Dutch Département of Public Works and Water Management.

#### 2.2.Option par défaut, Solution approchées :

---

Le système d'options par défaut et de solutions approchées spécifiques, qui est un des fers de lance de l'outil de projet pour la géotechnique, est destiné à faire gagner du temps à l'opérateur, à lui éviter de devoir faire des choix tracassant, et enfin à améliorer la convivialité du logiciel. Ce système est inséparable du traitement à partir d'un menu arborescent. Chaque branche du menu est évidemment figée, car elle réalise une tâche précise, bien définie, mais la diversité des branches en fait globalement un outil extrêmement souple.

Les options par défaut commencent dès le maillage : l'opérateur peut bien entendu spécifier un maillage très détaillé, mais si seules les grandes lignes de celui-ci importe, le détail des éléments, agencé de manière optimale du point de vue numérique, sera entièrement généré par le logiciel à partir d'un petit nombre de nœuds-clé, avec contrôle permanent à l'écran. Le meilleur est d'ailleurs en cours de refonte en vue d'accroître son efficacité. (terrasol, 2017)

### 2.2.1. LES POINTS FORTS DE PLAXIS 2D :

**Convivialité de l'interface** : pour la saisie des données, la définition des phases de projets et l'analyse des résultats

**Génération automatique des maillages** : Des jeux prédéfinis de **lois de comportement desol** (linéaire élastique, Mohr-Coulomb, HardeningSoil, Soft Soil, ...) et la possibilité de définir ses propres lois de comportement

Couplage avec les calculs **d'écoulement et de consolidation**

Prise en compte des **éléments de structure** et de **l'interaction sol-structure**

Calcul de **coefficients de sécurité (procédure c/phi réduction)**

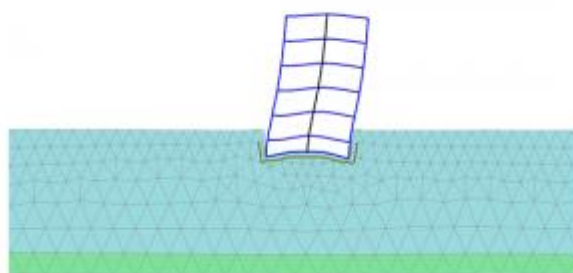


Figure 25: Dynamics

**Dynamics** : le sol et les structures sont souvent soumis à des chargements dynamiques, qui peuvent causer des dommages lorsqu'ils sont importants, comme lors de séismes par exemples. En milieu urbain, ces vibrations sont par exemples générées lors du battage de pieux, du déplacement de véhicules ou de machines lourdes. Le module Dynamics permet d'analyser les effets de ces vibrations directement dans votre modèle Plaxis 2D.



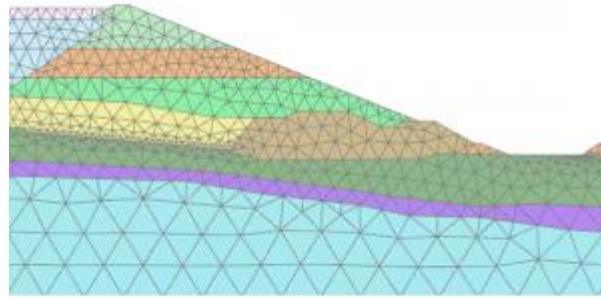


Figure 26:Plaxflow

**Plaxflow** : l'utilisateur peut définir des conditions variables dans le temps de flux ou de niveaux d'eau de manière à modéliser des situations hydrogéologiques complexes. Les données temporelles sont basées sur des harmoniques, linéaires ou tabulées. Parmi les applications de ce module : la modélisation des variations saisonnières des cours d'eau derrière au barrage et l'analyse de l'effet sur la stabilité globale, la prise en compte des précipitation, la définition de puits et de drains etc.... permettant par exemple de modéliser des essais de pompage ou d'autres problématiques hydrogéologiques.

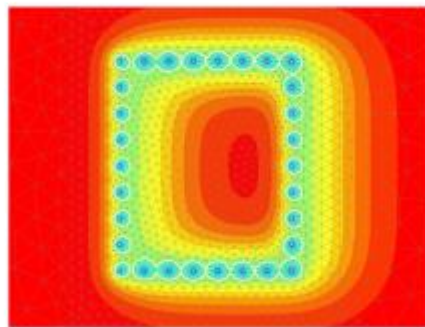


Figure 27:Thermal

**Thermal** : ce module est indispensable lorsque les effets des flux de chaleurs sur le comportement hydraulique et mécanique des sols doivent être pris en compte dans votre modèle. Son utilisation est recommandée avec les autres modules complémentaires pour en exploiter tout le potentiel

(terrasol, 2017)

### 2.3. Les sous-programmes de Plaxis :

L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous programmes (Input, Calculations, Output et Curves) :

#### 2.3.1. Le programme d'entrée de données (Input)



---

Le programme contient tout ce qui est nécessaire pour créer et modifier un modèle géométrique, pour générer le maillage d'éléments finis correspondant et pour générer les conditions initiales.



### 2.3.2 Le programme de calcul (Calculassions)

Ce programme contient tous les éléments pour définir et amorcer un calcul par la méthode des éléments finis. Au début du programme de calcul, l'utilisateur doit choisir le projet pour lequel les calculs vont être définis.



### 2.3.3 Le programme de résultats (Output)

Ce programme contient tous les éléments qui permettent de voir les résultats des données générées et des calculs d'éléments finis. Au début du programme de résultats, l'utilisateur doit choisir le modèle et la phase de calcul appropriée ou le numéro du pas pour lequel les résultats seront affichés.



### 2.3.4 Le programme courbes (Curves)

Ce programme contient tout le nécessaire pour générer des courbes charges-déplacements, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations.

La réalisation d'une modélisation avec Plaxis se traduit en général, par l'enchaînement des étapes suivantes :

1. Utilisation du préprocesseur « Plaxis Input », pour la génération des données (maillage, jeu des données et contraintes initiales).
2. Lancement du code de calcul éléments finis « PlaxisCalculate», pour effectuer la résolution numérique du problème étudié.
3. Utilisation de post-processeur « Plaxis Output », pour l'interprétation des résultats sur écran graphique.
4. Utilisation de post-processeur « Plaxiscurve», pour l'interprétation des courbes (courbe de consolidation, chemin des contraintes,...etc.).
5. La démarche de modélisation avec Plaxis

Nous présenterons ici le cheminement et principales étapes d'un calcul sous Plaxis :

#### *a. Géométrie*

La première étape sous Plaxis est la définition de la géométrie. Un certain nombre de propriétés sont disponibles :

- 
- Les lignes géométriques qui sont là pour dessiner l'organisation du sol;
  - L'outil plat permet de dessiner et de définir des structures élancées qui possèdent une résistance en traction compression et une résistance en flexion, Cet outil est principalement utilisé pour modéliser des murs, des poutres des coquilles, des plaques pour modéliser les murs et les zones rigides. (Principalement les éléments ayant une forte extension selon l'axe perpendiculaire au plan de modélisation ;
  - Anchor qui sert à modéliser les liaisons entre les éléments. Ce sont des ressorts, qu'on utilise pour modéliser les batardeaux ou plus exactement la liaison entre les différents éléments d'un batardeau;
  - L'outil Georgi, sert à dessiner des structures élancées avec une résistance en compression ou traction mais qui ne possèdent aucune résistance de flexion. Cet outil est généralement utilisé pour modéliser les géogrilles et ancrages.

Sur Plaxis, il y a également un outil tunnel qui permet de modéliser un tunnel prenant en compte les facteurs qui concernent ce type d'ouvrage.

#### *b. Conditions aux limites*

Une fois la géométrie définie, il faut entrer les conditions limites, c'est-à-dire les déplacements et les contraintes imposées aux limites extérieures de la géométrie.

Si aucune condition limite n'est fixée sur un tronçon, par défaut le logiciel considère que l'élément n'est soumis à aucune force extérieure et est libre de se déplacer dans toutes les directions.

Les conditions limites pouvant être imposées sont celles qui imposent un déplacement dans une direction donnée ou celle qui impose une force dans une direction donnée. Plusieurs outils permettent de créer une large gamme de conditions limites (force répartie, force ponctuelle, encastrement, glissement, etc..).

#### *c. Définition des paramètres des matériaux*

Ensuite, il convient de définir les différentes propriétés des différents matériaux selon son type (sol et interface, plaque, ancrage, géogrille, etc....), le modèle de comportement et les différents paramètres permettant de le définir. Pour les sols, en plus de la définition des caractéristiques mécaniques, leurs interfaces avec les autres types d'éléments peuvent être paramétrés, il faut également définir le comportement hydraulique du sol (drainer, non-drainer ou non-poreux).

#### *d. Maillage :*

Le maillage est généré automatiquement, ce qui est un point fort de Plaxis. L'opérateur peut paramétrer la finesse du maillage entre différentes options (très grossier, grossier, moyen, fin, très fin), l'opérateur peut également décider de mailler plus finement une certaine région du sol ou/et le voisinage d'un élément grâce aux options *refined* dans le *mesh* menu.

Une fois le maillage effectué, il convient de paramétrer les conditions initiales du sol, cette procédure passe généralement par la définition d'un coefficient des terres au repos.

#### *e. Les conditions initiales :*

---

La définition des conditions initiales se fait en deux étapes distinctes : Tout d'abord, lorsque la fenêtre des conditions initiales s'ouvre, seul le sol est activé. L'opérateur active les éléments constructifs (déplacements et/ou contraintes impose(e)s, ancrage, plaque) qui correspondent à l'instant initial. Il désactive les éléments de sol qui ne correspondent pas à cet instant initial.

Un switch bouton permet d'accéder à deux fenêtres différentes chacune représentant la géométrie de la modélisation :

- La première qui s'appelle "*initiale pore pressure*" permet de définir un niveau de nappe phréatique initial (si besoin), et de générer les pressions interstitielles correspondantes;
- La deuxième fenêtre permet de générer les contraintes initiales à l'intérieur du massif (poids propre et souspression).

#### *f. Phase de calcul :*

Après avoir effectué l'ensemble de ces paramétrages on peut accéder aux calculs par le bouton poussoir "*calculation*". L'interface "*input*" de *Plaxis* ferme et laisse la place à une nouvelle interface : "*calculation*". Une phase 0 est déjà calculée, cette phase correspond à l'état initial de la structure. Cette interface permet de définir le phasage de la modélisation de la construction.

De nouvelles phases de calcul peuvent être créées basées sur une phase existante. Pour chaque phase on peut modifier la géométrie par l'intermédiaire de la même interface qui a servi à définir les conditions initiales. On peut donc effectuer des changements uniquement en activant ou désactivant des éléments. Le niveau de la nappe phréatique peut être modifié, ainsi que certaines propriétés des matériaux, des éléments autres que le sol (modification des paramètres entrés en input, imperméabilité et/ou la non-consolidation de certains parois). Le niveau d'intensité et la position des conditions limites des chargements en déplacement et en contrainte peuvent également être modifiés.

Cependant, aucun nouvel élément ne peut être créé à ce niveau que ce soit une charge, un déplacement, une condition aux limites ou une plaque un ancrage etc....

D'autres types de phases peuvent être créés autre que la simple activation ou désactivation d'élément (phase de consolidation par exemple). Un certain nombre de types de calcul peut être simulé (consolidation, détermination du facteur de sécurité, déformation plastique, étude dynamique).

Une fois le phasage de l'étude terminé, des points caractéristiques peuvent être placés. Les courbes de résultats de *Plaxis* seront calculées en ces points. Après avoir appuyé sur calculate les calculs se lancent. Une fois terminée, les résultats sont visionnables grâce à la touche output.

#### *g. Visualisation des Résultats*

Le code plaxis contient plusieurs outils pour visualiser et analyser les résultats concernant le sol soit en déformations (maillage déformé, déplacements et déformations totaux) soit en contraintes (contraintes effectives, totales, les points plastiques, les pressions interstitielles).

(Ali, 2013)

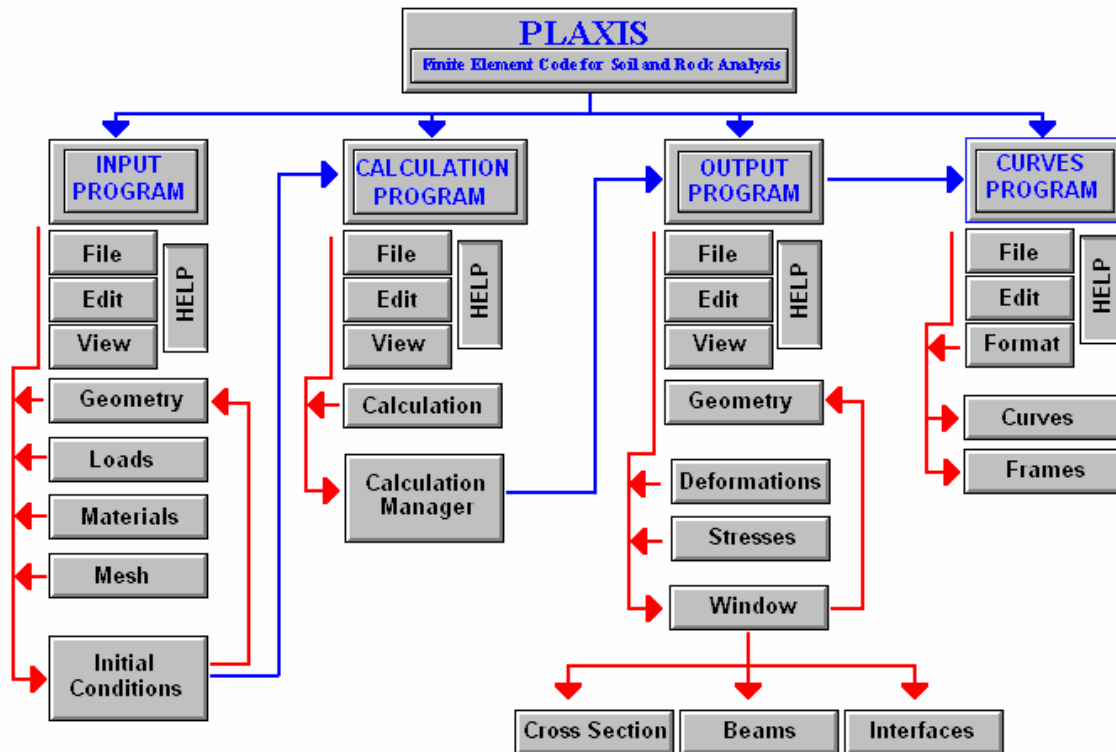


Figure 28:organigramme de la structure du plaxis code (Ahmed, 2005)

## 2.4. La méthode d'homogénéisation :

Des modèles d'homogénéisation (ou lois de mélange) permettent de relier les propriétés d'un matériau hétérogène considéré dans sa globalité, dites effectives, ou encore homogènes équivalentes, avec, d'une part, des propriétés individuelles de chacun de ses composants et, d'autre part, leurs proportions relatives. Connaissant les deux premiers éléments (par des mesures), on est capable, dans le cas d'un matériau biphasique, de calculer la proportion de chacun des deux constituants du milieu hétérogène grâce à un modèle d'homogénéisation adapté. (Rey, 2005)

### 2.4.1. Fondements généraux d'une méthode d'homogénéisation appliquée aux sols renforcés

#### - Les sols renforcés vus sous l'angle de milieux homogènes anisotropes :

L'idée d'employer une méthode d'homogénéisation pour l'étude des sols renforcés n'est à vrai dire pas tout à fait nouvelle. On la trouve présente par exemple chez GERRARD - 1982, et elle constitue même le fil directeur des travaux de SAWICKI sur la terre armée depuis

---

plusieurs années d'après SAWICKI - 1979, 1983. La possibilité d'homogénéiser un sol renforcé, c'est-à-dire de l'assimiler d'une certaine façon à un matériau homogène « équivalent », suppose en fait remplies trois conditions.

a) Il convient de souligner en tout premier lieu, que le concept d'homogénéisation d'un sol renforcé ne revêt de sens que dans la mesure où l'on s'intéresse non pas à ce qui peut se passer *localement* en tel ou tel point de l'ouvrage, mais à l'évaluation de grandeurs *globales* qui se rattachent à celui-ci. Tel est précisément le cas des analyses de stabilité qui visent à estimer par le calcul les chargements pour lesquels la ruine d'un ouvrage dans son ensemble risque de se produire.

b) Il importe ensuite que les inclusions de renforcement soient réparties dans le sol de façon à peu près régulière, de sorte que l'on puisse alors modéliser le sol renforcé comme un *matériau composite à structure périodique*. Cette condition de périodicité apparaît le plus souvent vérifiée, exception faite par exemple pour des sols renforcés de manière aléatoire .

c) Il est essentiel enfin que la période caractéristique du renforcement (l'espacement vertical entre deux nappes horizontales successives d'armatures par exemple dans un ouvrage en terre armée) puisse être considérée comme petite vis-à-vis des dimensions d'ensemble de l'ouvrage. Cette dernière condition est en pratique plus difficilement satisfaite, en raison du nombre parfois assez peu significatif des inclusions incorporées dans le sol.

Dans ces conditions, il apparaît clairement que la structure géométrique particulière du sol renforcé et notamment l'existence d'orientations privilégiées liée aux inclusions de renforcement, confèrera au matériau «sol renforcé» un caractère anisotrope. (SALENÇON)

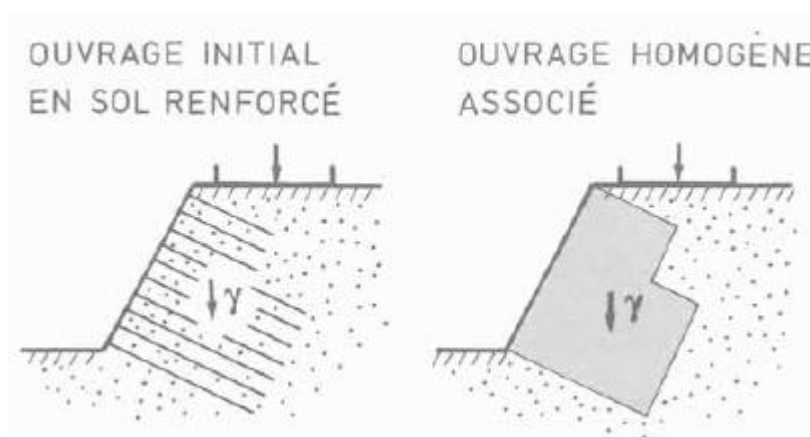


Figure 29: Principe de la méthode d'homogénéisation (SALENÇON)

#### 2.4.2. Approximation de Voigt et Reuss :

Les méthodes les plus rudimentaire sont la méthode de Voigt (1889) pour l'approche en déformation et sa duale en contrainte : la méthode de Reuss (1929). Pour la première, l'hypothèse faite consiste à considérer une déformation constante dans tout le composite c'est à dire que dans toute phase I, on a  $\epsilon^I = E$ . Le tenseur est donc partout réduit au tenseur identité, et l'estimation correspondante pour le tenseur de rigidité du composite est la moyenne arithmétique des tenseurs de rigidité de chaque phase:

$$C_v^{\text{eff}} = C^M + \sum_{i=1}^N f_i (C^I - C^M)$$

Pour la méthode de Reuss, l'hypothèse faite est  $\Sigma = \sigma^I$  partout et on obtient alors:

$$S_R^{\text{eff}} = S^M \sum_{i=1}^N f_i (S^I - S^M)$$

Ces deux modèles simples ne font intervenir que le taux de remplissage des renforts dans la matrice et leur comportement élastique respectif. Ils fournissent des bornes supérieure et inférieure pour les constantes élastiques effectives. (Mouden, 1995)

#### 2.4.3. VER et fraction volumique :

Une manière de résoudre des problèmes d'homogénéisation est d'employer des techniques de simulation numérique sur des échantillons de microstructures. Dans ce cas, la notion de VER est d'importance primordiale. Un concept commun à toutes les théories d'homogénéisation est celui de volume élémentaire représentatif (V.E.R) (figure 34) le Volume minimum à prendre en considération pour qu'une fois appliquée la théorie d'homogénéisation. Habituellement considéré comme un volume de matériel hétérogène incluant efficacement un prélèvement de toutes les hétérogénéités, le VER doit inclure un grand nombre d'hétérogénéités micro (grains, inclusions, vides, fibres, etc...). Il doit cependant rester assez petit pour être considéré comme un volume élémentaire. De plus la réponse du VER doit être indépendante du type de conditions aux limites prescrites sur son bord (contrainte moyenne ou effort moyen donnée), ceci plaide en faveur d'un VER de grande taille. Les résultats obtenus soient représentatifs du comportement macroscopique du milieu hétérogène (Lazizi.A, 2014).

Soit  $\eta_j$  la fraction volumique de la phase j. est  $\eta_r$  la fraction volumique de la phase renforcement.

$$\text{Posons : } \omega = \frac{R^2_{int}}{R^2_{ext}} ; t = \frac{ha}{hm} ; \text{ et } \eta^r = \frac{S_{ref}}{S_{ver}} = \frac{A'}{e^2}$$

$S_{ref}$ : La section de renforcement,

$S_{ver}$ : La section transverse de VER,

e : Espacement entre deux inclusions voisines.

Avec  $R_{int}$  et  $R_{ext}$  les rayons intérieurs et extérieurs de l'armature, et  $h_a$  hauteur de l'armature et  $h_m$  hauteur de la matrice.

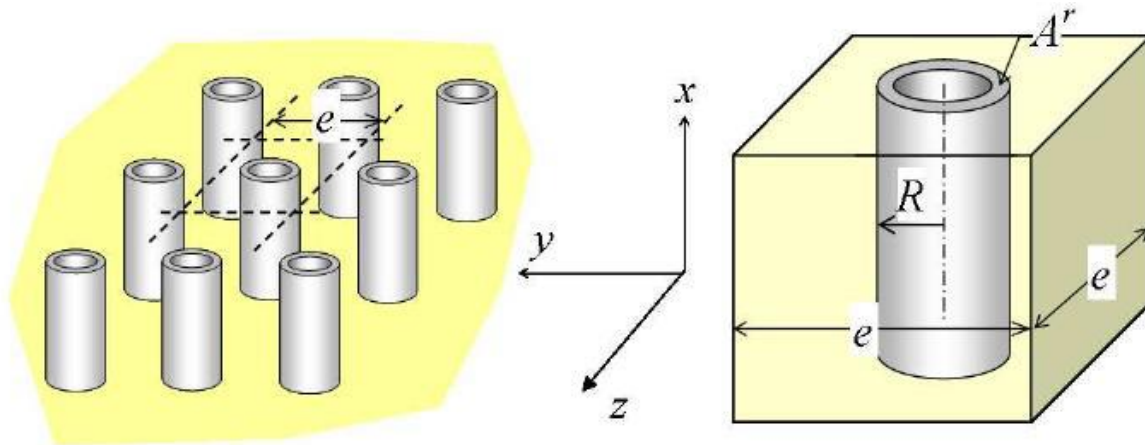


Figure 30 : Volume élémentaire représentatif V.E.R d'un sol renforcé (Lazizi.A, 2014)

- **Position du problème**

Il s'agit d'homogénéiser analytiquement un sable renforcé par des nappes de Pneusol puis de modéliser numériquement sous plaxis un mur de soutènement retenant un sable puis un composite pneus usés sable dans le cas statique (Lazizi.A, 2014)

- **Géométrie, matériaux et méthodes :**

Géométriquement, le mur de soutènement de type cantilever en béton armé, dont la hauteur est de 5.80 m et de largeur de 0.5m, la figure représente les détails géométriques du mur. Mécaniquement, le mur de soutènement a un module de Young  $E = 3.107 \text{ kN/m}^2$ , un coefficient de poisson de 0.3 et une masse volumique qui vaut  $26.43 \text{ kN/m}^3$ .

Le comportement étudié est élastique. Le milieu est considéré comme sableux, avec des dimensions semi infini de longueur de 22.5 m.



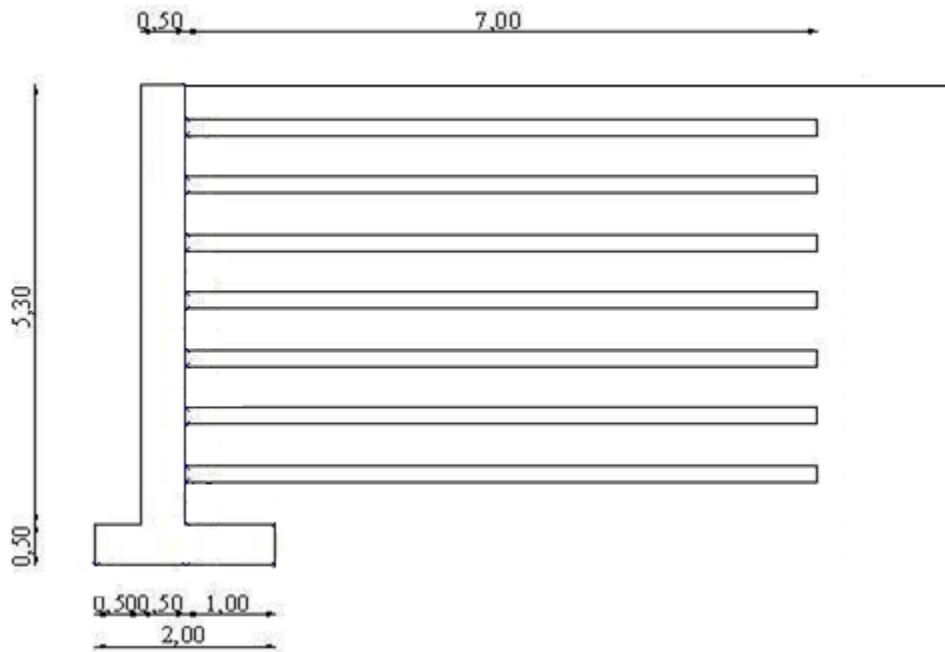


Figure 31: Détails géométriques du mur (Lazizi.A, 2014)

## 2.5. Notre modèle réduit :

### 2.5.1. Mur de soutènement derrière un remblai du sable :

Le sable étudié est un sable humide, ayant un diamètre moyen de 0/10 mm, un coefficient de courbure  $C_c$  de 0.119 à 0.136, selon la classification unifiée (USCS), le sol est un sable propre mal gradué. Géotechniquement, la cohésion est nulle, et l'angle du frottement interne vaut  $30^\circ$ . Mécaniquement, le module de Young  $E$  vaut  $1.105 \text{ kN/m}^2$ , un coefficient de poisson de 0.25 et une densité qui vaut  $18.4 \text{ kN/m}^3$ . Le coefficient de poussée  $K_a$  est déterminé par la méthode de Rankine qui vaut 0.333. La paroi du mur est considérée comme glissante avec un coefficient du frottement de 0.4. Le comportement du sable est aussi considéré comme élastique.

### 2.5.2. Mur de soutènement derrière un remblai du sable avec couches de Pneusol :

Il s'agit d'un remblai léger constitué par un sable de même caractéristique que le précédent, est renforcé par des nappes de pneus types véhicules légers sans flancs, c'est des bandes de roulement sur chant. La hauteur du pneu est de 20 cm, avec une couche de sable de 50 cm. Les renforts sont considérés comme linéaires avec un comportement élastique, modélisés comme une superposition de couche du sable et caoutchoucs. L'interaction caoutchouc- sable est considérée comme glissante avec un coefficient du frottement qui vaut 0.6, pour le frottement caoutchouc- mur le coefficient du frottement est égal à 0.65. La poussée des terres est calculée par la méthode de Rankine de la même manière que celle du sable seul. Le composite pneu- sable (Pneusol) est considéré comme multi couches, son

module de Young et le coefficient du poisson sont calculés, en utilisant le modèle combiné Voigt Reuss (Lazizi.A, 2014) :

$$Ec_{vr} = \frac{Em\beta}{\gamma}$$

$$\beta = (Em) + (Va^{2/3})(Ea - Em)$$

$$\gamma = \beta(1 - Va^{1/3}) + Em Va^{1/3}$$

$Ec_{vr}$ : Module de Young equivalent

$Em, Ea$ : Modules de Young du sable et pneu.

$$Va = \frac{Vc}{Vc + Vs}$$

$Vc, Vs$ : Volume du sable et pneu

- **Résultats :**

Les murs de soutènement sont généralement conçus à partir de l'évaluation de forces agissantes sur ces structures. Cette évaluation est basée sur les théories classiques de la poussée des terres proposées par Rankine (1820-1872) et Coulomb (1736-1806). La magnitude de la pression latérale agissant sur un mur de soutènement dépend dans une large mesure du degré de confinement procuré par le mur. La majorité des codes de conception, assument une simple distribution hydrostatique des contraintes verticales sur la base des théories de Rankine et Coulomb. (Rouili.Ahmed, 2005)

- Le coefficient de poussée des terres:

$$Ka = \tan^2\left(45 - \frac{\phi}{2}\right)$$

- La poussée des terres active:

$$Pa = \frac{1}{2} Ka \gamma t H^2$$

- Le calcul de la résistance au glissement et le coefficient de sécurité contre le glissement.

La résistance au glissement est assurée par le frottement entre le béton et le sol trouvant sous le mur. Calculant la force de frottement par les équations suivantes:

$$Ff = Rv \tan \theta$$

La force opposante au glissement ( $Fr$ ) est égale:

$$Fr = Ff$$

---

$$Rv = W_{total}$$

$Rv$  : La composante verticale de la force résultante.

$W$  : Le poids résultant du mur.

Le facteur de sécurité contre le glissement ( $Fs$ ) vaut:

$$Fs = \frac{Fr}{Pa} < 1,5$$

- le calcul des contraintes en Aval et en Amont sous le mur et le coefficient de sécurité contre le renversement:

$$q_{av} = \frac{Rv}{B} \left( 1 + \frac{6erc}{B} \right)$$

$q_{av}$  : La contrainte sous la semelle en aval.

$B$  : La largeur de la semelle.

$erc$  : L'excentricité de la force résultante par rapport au centre de la semelle.

$$erc = \frac{B}{2} - er_0$$

$er_0$  : L'excentricité de la force résultante par rapport au point 0.

$$er_0 = \frac{Mrn}{Rv}$$

$Mrn$  : Le moment résultant.

$$Mrn = Mst - Mr$$

$Mst$  : Le moment stabilisant.

$Mr$  : Le moment renversant.

La capacité portante admissible du sol doit être supérieure à sinon on devra élargir la base du mur.

$$qam = \frac{Rv}{B} \left( 1 - \frac{6erc}{B} \right)$$

$qam$  : La contrainte sous la semelle en amont.

$$Fst = \frac{Mst}{Mr} < 1,5$$

	<b>glissement</b>	<b>Renversement</b>
<b>Sable seul</b>	0,63	0,3
<b>Pneusol</b>	0 ,639	0,3

Tableau 12: Résultats de coefficients de sécurité

## 2.6. Création de la géométrie du modèle :

- **modèle 1 : (Mur de soutènement derrière un remblai du sable)**

La fenêtre du PLAXIS-Input programme est utilisée pour la création de la géométrie du modèle numérique, qui est une combinaison de points, des lignes et des clusters, considérés dans le PLAXIS-Input programme comme suit :

- **Points:** les points constitue la limite physique des lignes (début - fin). Ils peuvent aussi être utilisés pour le positionnement des forces, des fixités et pour le raffinement du maillage des éléments finis.
- **Lignes :** une ligne peut servir plusieurs fonction ou propriétés, ils sont utilisés pour définir les limites physiques de la géométrie et de sa discontinuité, à définir les limites du modèle dans la géométrie et à la séparation des couches de sols distinctes ou des phases de construction.
- **Clusters:** c'est les espaces complètement entouré par des lignes, dans lesquels les propriétés du matériau sont uniques et homogènes (Rouili.Ahmed, 2005)

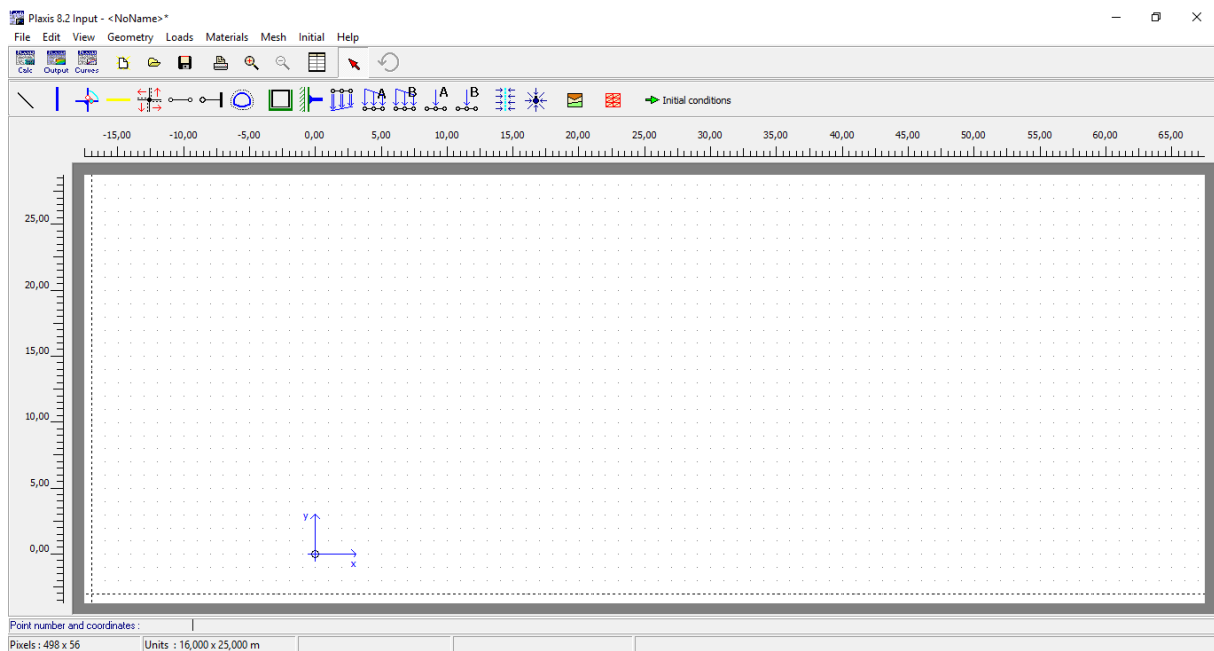


Figure 32: la fenêtre plaxis input

Sur la base de ces tris types de composants, la géométrie du modèle numérique est créée dans la fenêtre PLAXIS –Input, la Figure montre le graphique final de la géométrie du modèle numérique et de ces conditions aux limites. La géométrie du modèle s’étend 7m horizontalement et 22,5 m verticalement, afin de modéliser le conteneur de la centrifugeuse

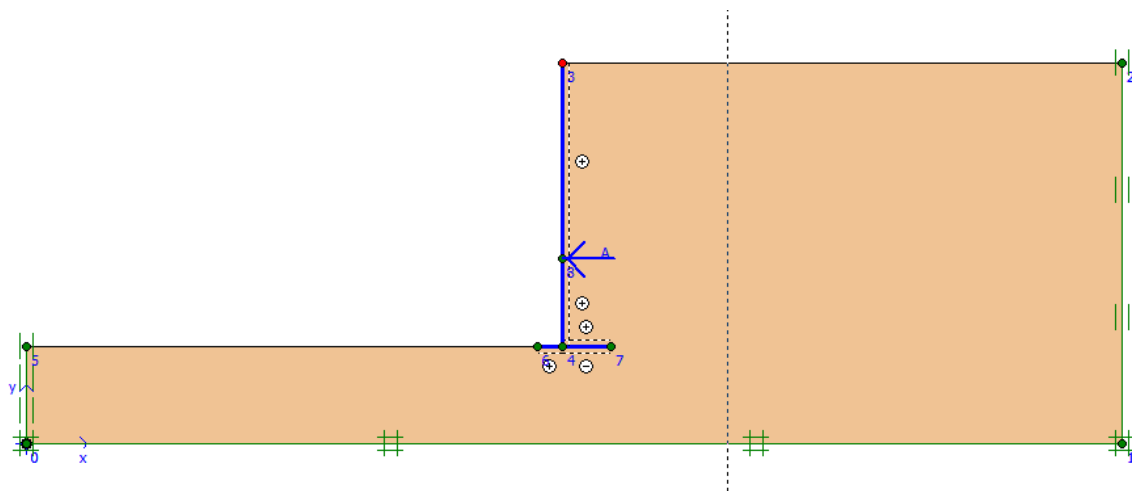


Figure 33: modelé numérique ( plaxis input )

## 2.7. Production du maillage des éléments :

Après la création du modèle géométrique, le programme PLAXIS-Input est utilisé pour générer le modèle d'éléments finis (maille) suivant une procédure totalement automatique, dans laquelle (Figure34). La géométrie est divisée en éléments type de l'élément fini de base. La production du maillage prend en considération la position des points et lignes dans la géométrie du model, de manière que, la position exacte de la couche du sol et de la structure (le mur) soit modélisée proprement. Le procédé de maillage est basé sur un principe robuste de triangulation qui cherche les triangles optimisés, qui résulte assez souvent en une forme désordonnée du maillage. A ce stade d'analyse, la transformation des Input-Data (propriétés, conditions aux limites, matériaux, etc.. est faite ; du modèle géométrique (points, lignes et clusters) au modèle numérique à base d'éléments finis (éléments, noeuds et points de contraintes).

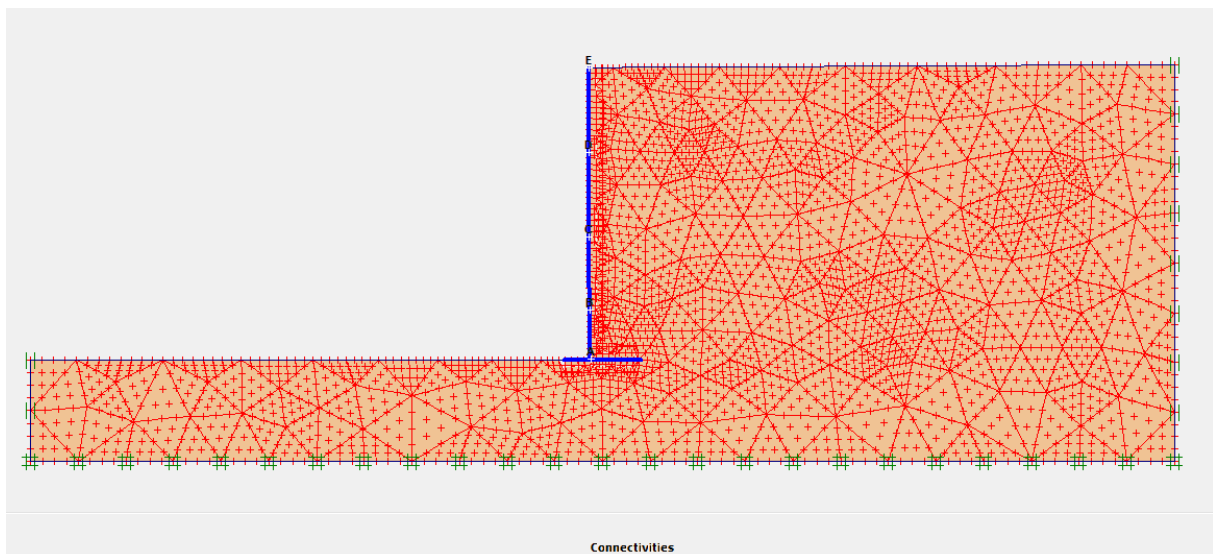


Figure 34:maille d'élément finis typique et les conditions limites de déplacement

## 2.8. Identification et exécution des phases :

Dans le Phase box du PLAXIS– Calculation programme, chaque phase de calcul est identifiée par un string <phase # >, ou (#) est le numéro de la phase. En plus, le Start from phase, du Phase box se réfère à la phase à partir de laquelle le calcul doit débuter. Par défaut, quand une phase de calcul est définie, elle sera automatiquement sélectionnée pour l'exécution et sera marquée par une flèche bleue. Lors de la définition de la phase de calcul monophasique, il est évident que le calcul doit commencer par partir la situation comme défini dans les conditions initiales dans le PLAXIS-Input programme. (Rouili.Ahmed, 2005)

La fenêtre d'identification et de commande d'exécution de la phase de calcul du modèle numérique est illustrée dans de la Figure 39

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 ...	0
→ Construction wall	1	0	Plastic (UM)	Staged construction	0,00 ...	1

Figure 35:fenêtre de calcul d'une phase

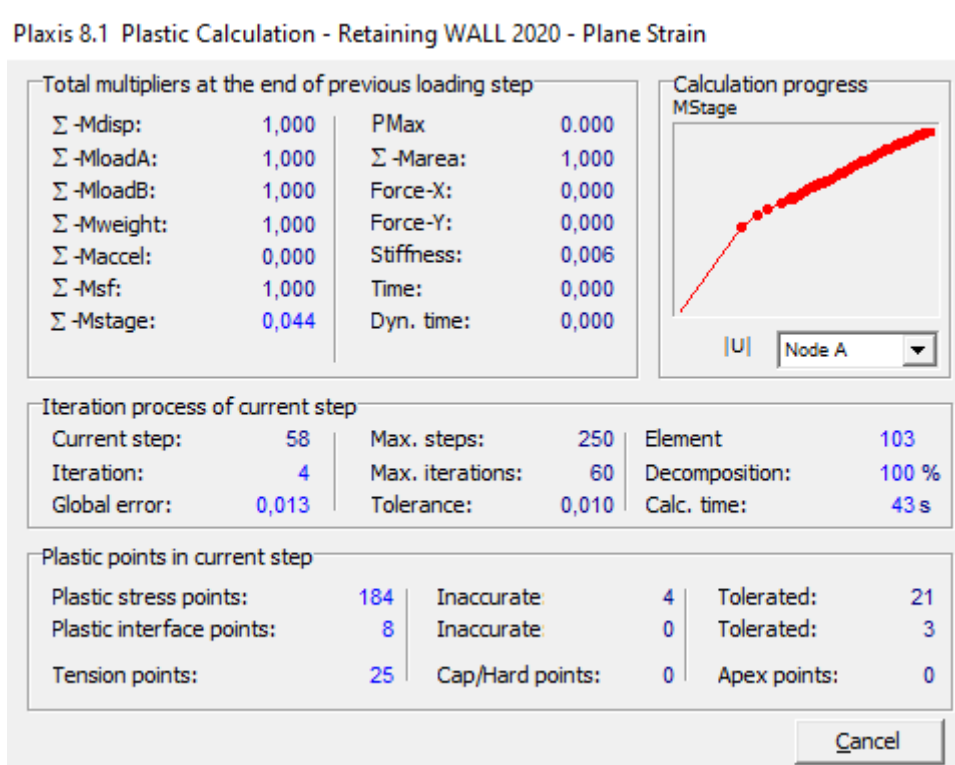


Figure 36:fenêtre typique de la progression des calculs.

## 2.9. Résultats :

Après finalisation du calcul numérique, le PLAXIS-Output programme (post-processing) est automatiquement chargé, ce programme contient une multitude de facilités qui peuvent être utilisées pour l'affichage des résultats des calculs numériques. Les résultats principaux de l'analyse numérique sont les déplacements et les contraintes. Les déplacements sont calculés aux nœuds des éléments finis et les contraintes aux points de contraintes. En plus, quand le modèle numérique contient des éléments structuraux, les forces structurales sont calculées dans ces éléments.

En utilisant les options du PLAXIS-Output programme, tous les types des résultats (output) peuvent être visionner sous forme graphique ou tabulaire. En plus, le post processing numérique peut être aussi exploiter en utilisant les facilités du PLAXIS-Curve programme pour créer les différents types de courbes contraintes / déplacements , chemins de contraintes et les différents diagrammes. (Rouili.Ahmed, 2005)

Identification	Phase no.	Start from	Calculation	Loading input	Time	Water
Initial phase	0	0	N/A	N/A	0,00 ...	0
✓ Construction wall	1	0	Plastic (JM)	Staged construction	0,00 ...	0

Figure 37:Fenêtre de calcul réussi d'une phase

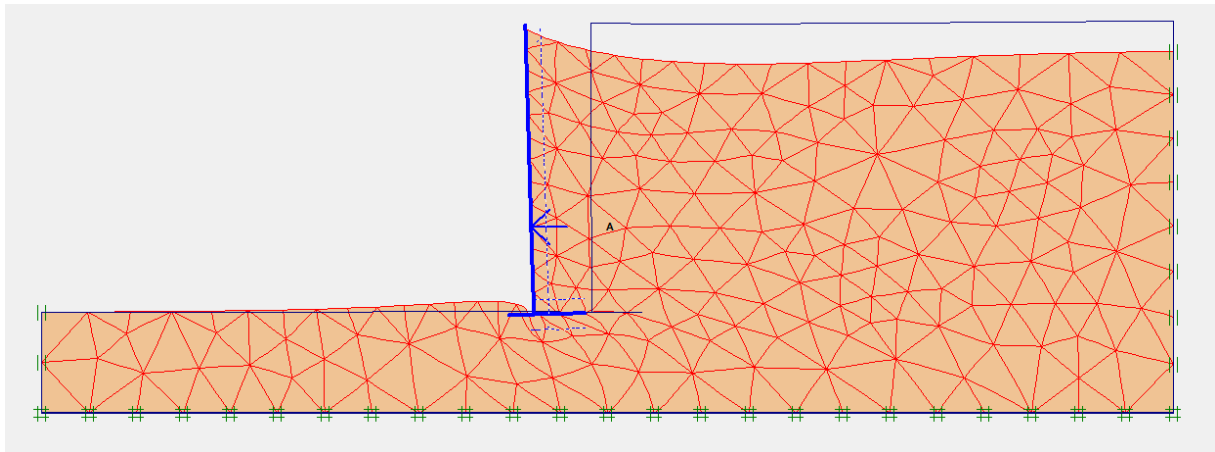


Figure 38:maille déformée du modèle d'éléments finis

### 2.9.1. LES DEFORMATIONS :

- Déplacements :

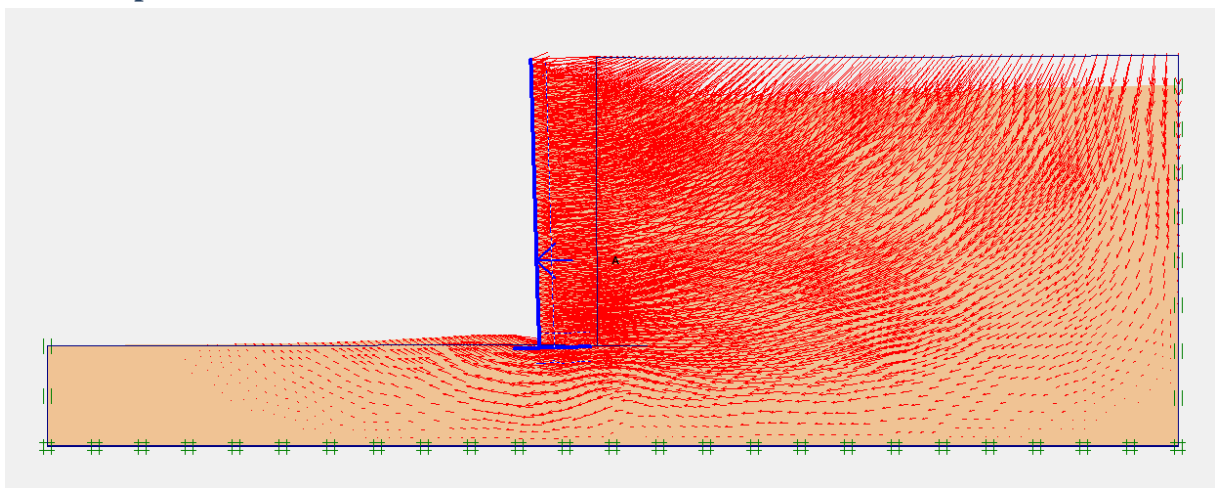


Figure 39:déplacements totaux



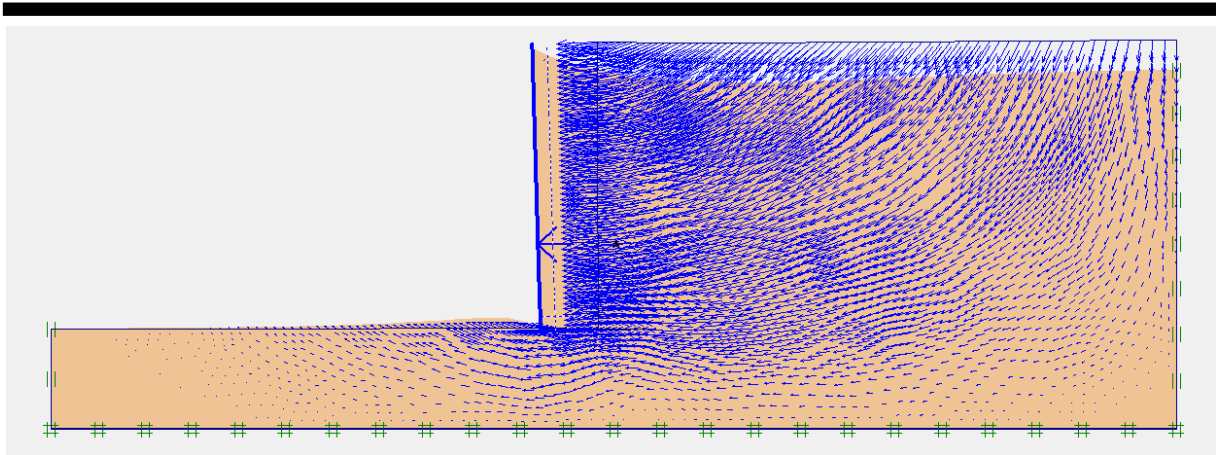


Figure 40:déplacements incrémentaux

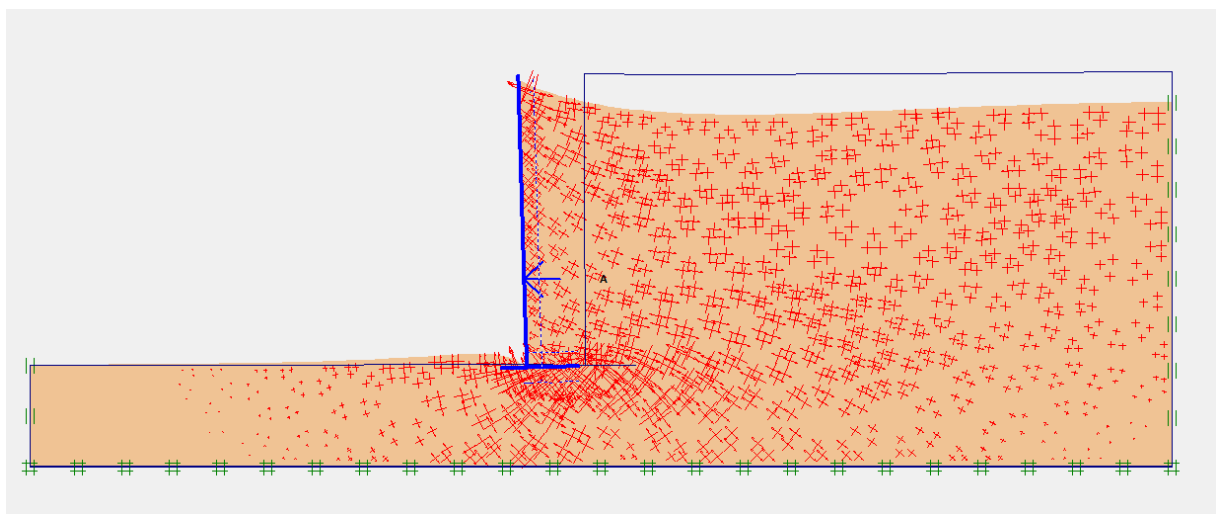


Figure 41:total strian

- **Déplacements du mur de soutènement**

Le PLAXIS-Output programme affiche les déformations et les forces des éléments structuraux et de l'interface. Les déplacements concernés sont : le déplacement total, le déplacement vertical et horizontal, pour les forces on trouve : les forces axiales, les forces de cisaillement et les moments fléchissant. (Brinkgreve, 2003)

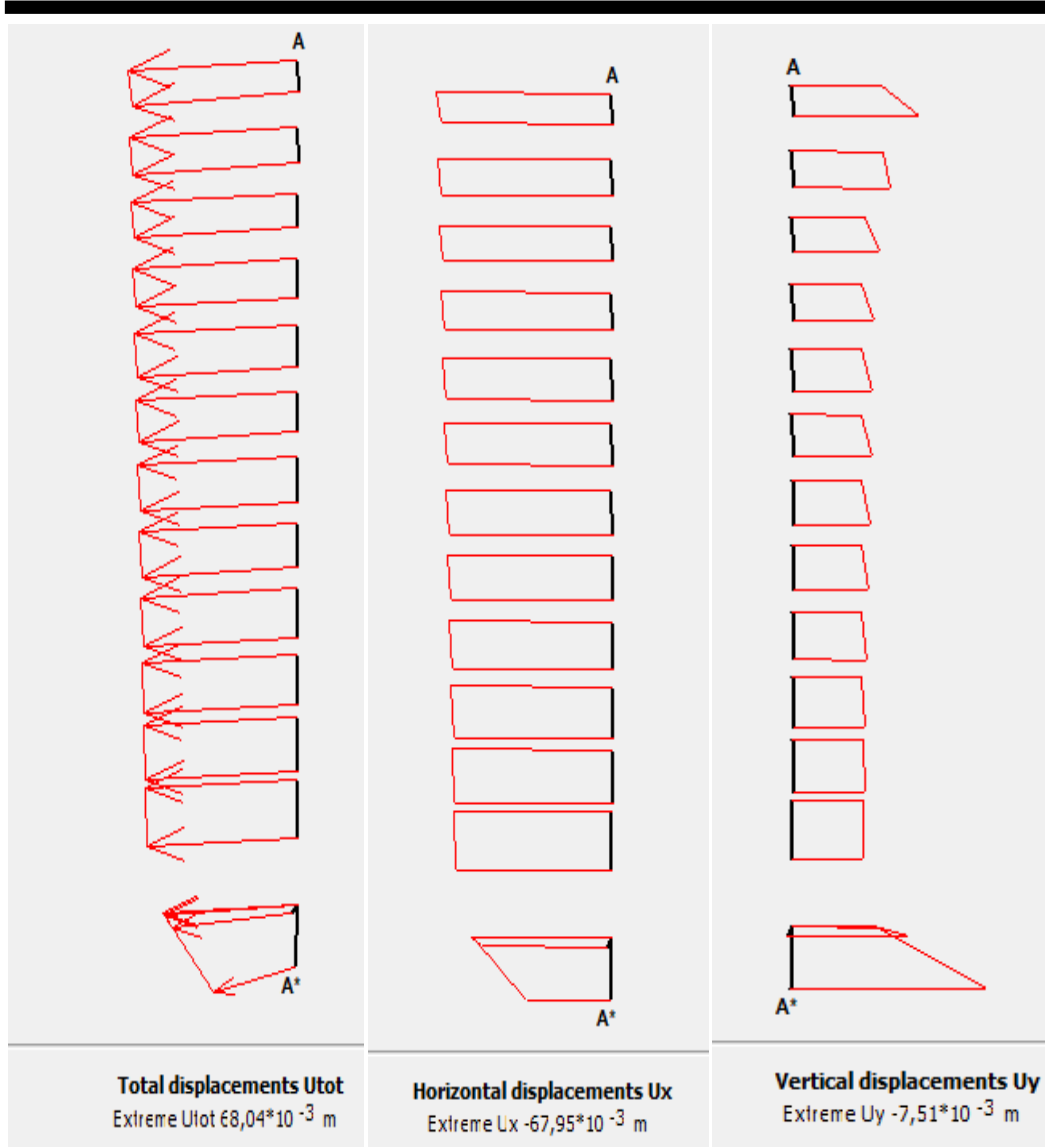


Figure 42:déplacements calculés du mur.

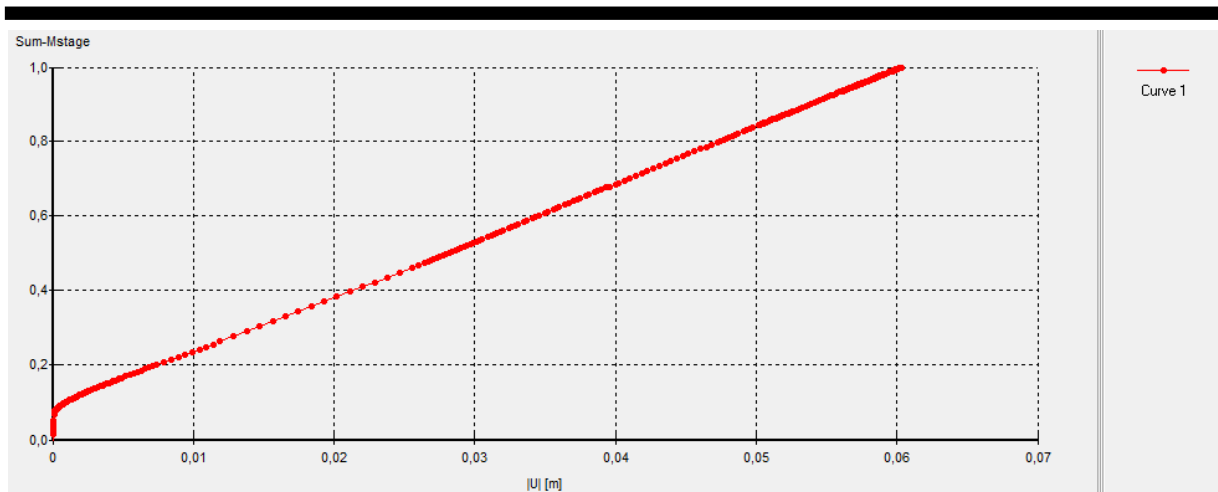


Figure 43:chemin de déplacements dans différents points.

Node	X [m]	Y [m]	Ux [10 <sup>-3</sup> m]	Uy [10 <sup>-3</sup> m]	ΔUx [10 <sup>-6</sup> m]	ΔUy [10 <sup>-6</sup> m]
1	0,681	2,000	-0,060	0,065	-0,223	0,213
2	0,454	2,000	-0,034	0,043	-0,148	0,151
3	0,227	2,000	-0,015	0,030	-0,074	0,109
4	0,000	2,000	0,000	0,026	0,000	0,095
5	0,000	1,750	0,000	0,014	0,000	0,031
6	0,000	1,500	0,000	0,009	0,000	0,004
7	0,000	1,250	0,000	0,006	0,000	0,003
8	0,454	1,750	-0,018	0,024	-0,087	0,082
9	0,227	1,750	-0,008	0,016	-0,041	0,045
10	0,227	1,500	-0,003	0,010	-0,012	0,014
11	0,782	1,286	-0,014	0,012	-0,051	0,039
12	0,731	1,518	-0,022	0,021	-0,096	0,080
13	0,504	1,268	-0,006	0,007	-0,014	0,013
14	0,227	1,250	-0,002	0,006	0,000	0,003
15	0,454	1,500	-0,009	0,013	-0,036	0,037
16	0,681	1,750	-0,035	0,036	-0,146	0,134
17	0,958	1,768	-0,070	0,065	-0,246	0,217
18	1,009	1,536	-0,047	0,039	-0,184	0,148
19	1,059	1,304	-0,029	0,021	-0,118	0,086
20	1,346	1,554	-0,100	0,080	-0,310	0,242
21	1,152	1,661	-0,085	0,073	-0,279	0,231
22	1,203	1,429	-0,057	0,044	-0,211	0,162
23	1,557	2,000	-0,255	0,231	-0,519	0,450

Figure 44:déplacement totaux des nœuds.

## 2.9.2. LES CONTRAINTES :

### 2.9.2.1. Les contraintes dans le sol :

- **Contraintes totales :**

Les contraintes totaux  $\sigma_{ij}$  sont les contraintes effectives plus la pression interstitielle, pour la présente recherche. (Brinkgreve, 2003)

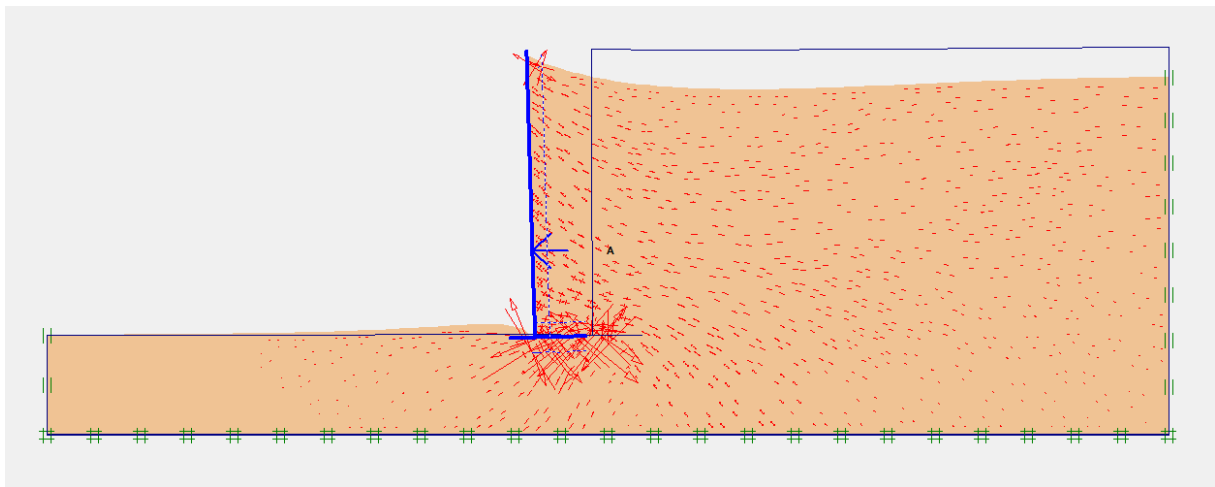


Figure 45: les contraintes totales

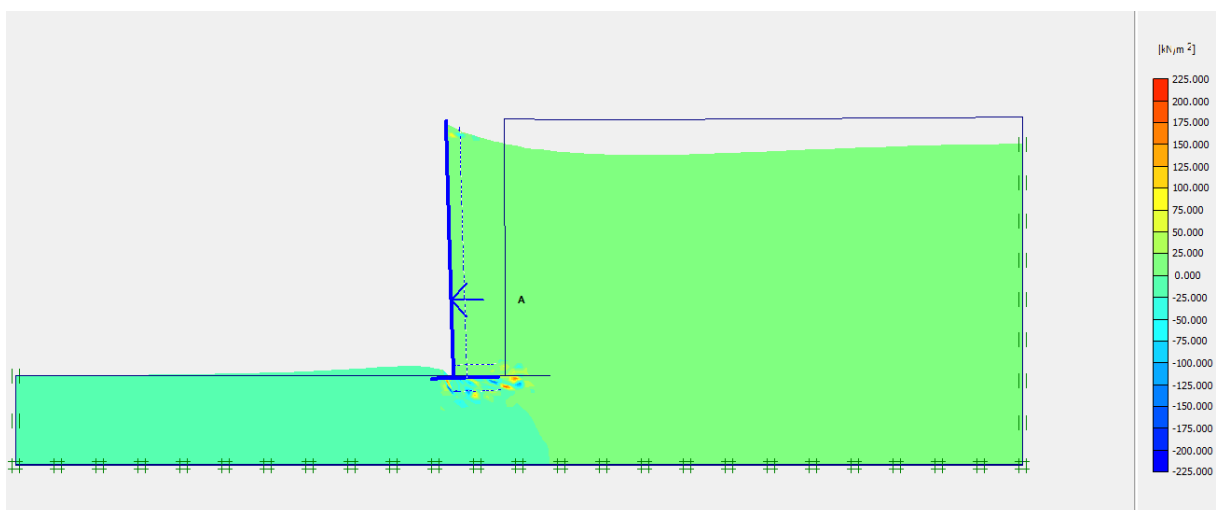


Figure 46 : les contraintes totales

Cluster	Soil Element	Stress Point	X [m]	Y [m]	$\sigma_{xx}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{yy}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{xy}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{zz}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Status
1	1 Sand	1	11,414	3,268	-4,042	-6,789	-2,631	-2,708	PLASTIC
		2	11,023	3,681	-6,113	-6,318	-3,366	-3,108	PLASTIC
		3	11,024	3,328	-5,148	-5,397	-2,893	-2,636	PLASTIC
		4	11,235	3,377	-4,404	-5,982	-2,745	-2,596	PLASTIC
		5	11,113	3,505	-5,189	-5,879	-3,007	-2,767	PLASTIC
		6	11,114	3,395	-4,860	-5,632	-2,857	-2,623	PLASTIC
		7	11,300	3,393	-4,350	-6,262	-2,751	-2,653	PLASTIC
		8	11,142	3,559	-5,210	-6,023	-3,041	-2,808	PLASTIC
		9	11,019	3,578	-5,909	-6,101	-3,261	-3,002	PLASTIC
		10	11,019	3,436	-5,527	-5,734	-3,073	-2,815	PLASTIC
		11	11,143	3,305	-4,443	-5,509	-2,695	-2,488	PLASTIC
		12	11,300	3,281	-4,056	-6,245	-2,615	-2,575	PLASTIC
	2 Sand	13	11,415	3,213	-3,922	-6,847	-2,564	-2,692	PLASTIC
		14	11,025	3,273	-4,952	-5,214	-2,798	-2,541	PLASTIC
		15	11,026	2,920	-3,298	-3,642	-1,987	-1,735	PLASTIC
		16	11,236	3,160	-3,755	-5,811	-2,444	-2,391	PLASTIC
		17	11,115	3,178	-4,098	-5,104	-2,511	-2,301	PLASTIC
		18	11,115	3,069	-3,649	-4,800	-2,301	-2,112	PLASTIC
		19	11,301	3,235	-3,942	-6,248	-2,559	-2,547	PLASTIC
		20	11,144	3,259	-4,291	-5,418	-2,627	-2,427	PLASTIC
		21	11,020	3,166	-4,554	-4,810	-2,598	-2,341	PLASTIC
		22	11,021	3,024	-3,886	-4,169	-2,269	-2,014	PLASTIC
		23	11,145	3,005	-3,309	-4,860	-2,167	-2,042	PLASTIC

Figure 47: tableau des contraintes

### Modélé 2 : (Mur de soutènement derrière un remblai du sable avec couches de Pneuol )

Passant par les mêmes procédures, les mêmes étapes de modélisation avec un Mur de soutènement derrière un remblai du sable renforcée par pneuol

On obtient les résultats suivants :

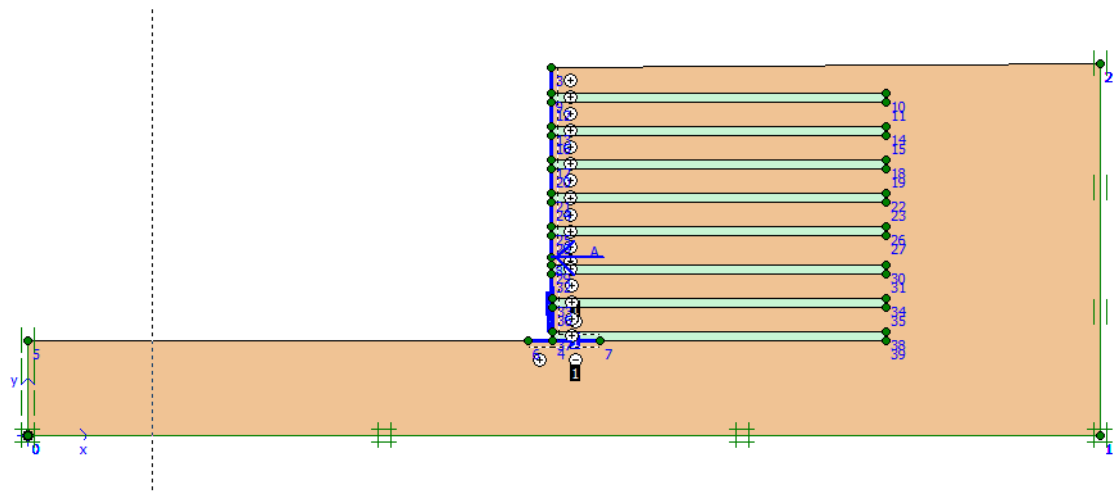


Figure 48:modèle numérique (pneusol)

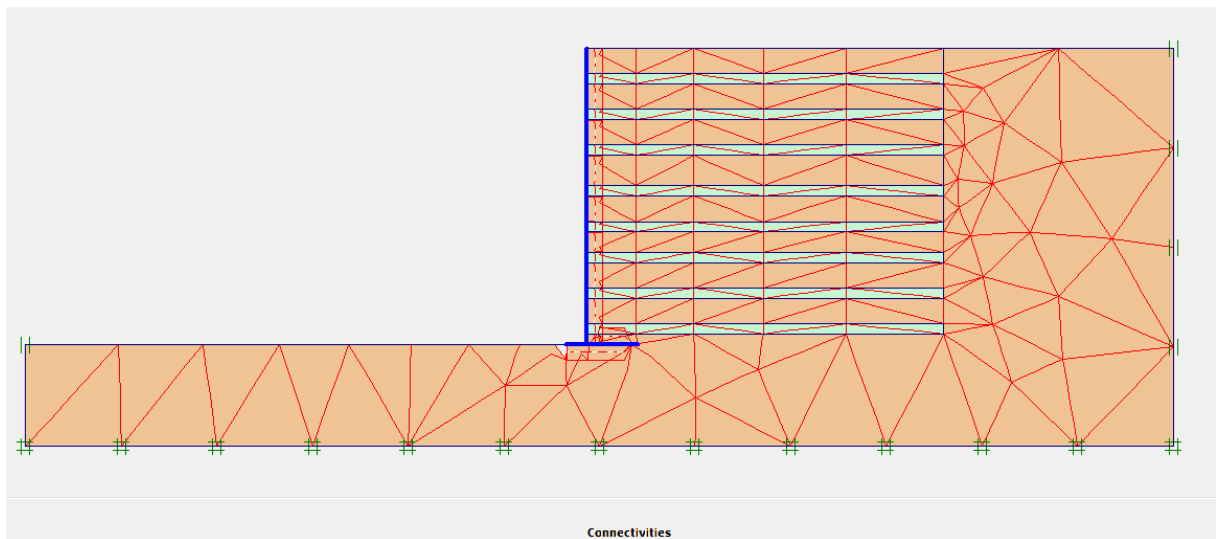


Figure 49:maille d'élément finis typique

- Déformations :

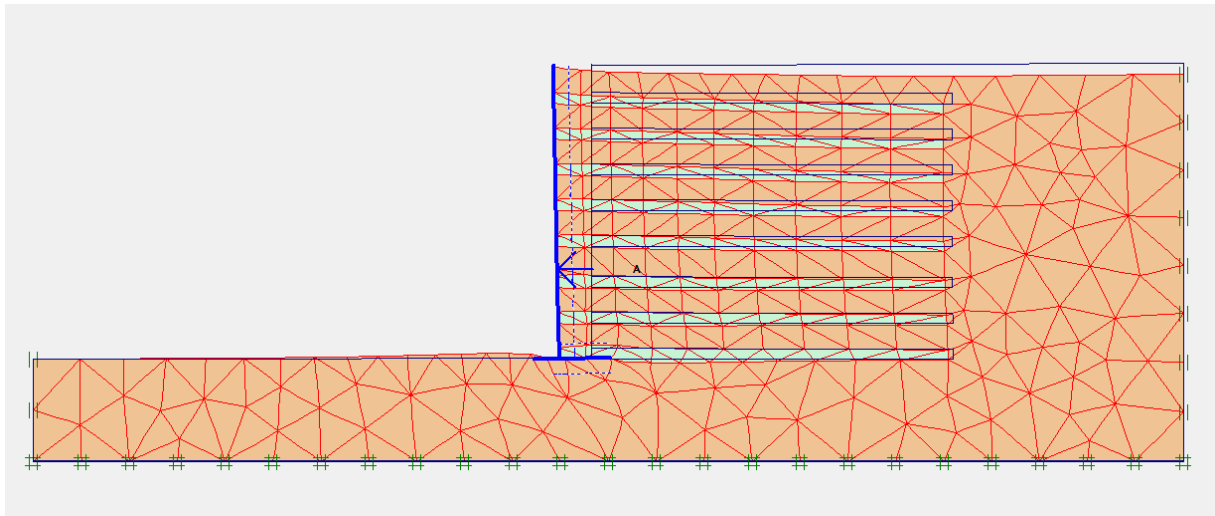


Figure 50: maille d'élément finis typique

• Les Déplacements :

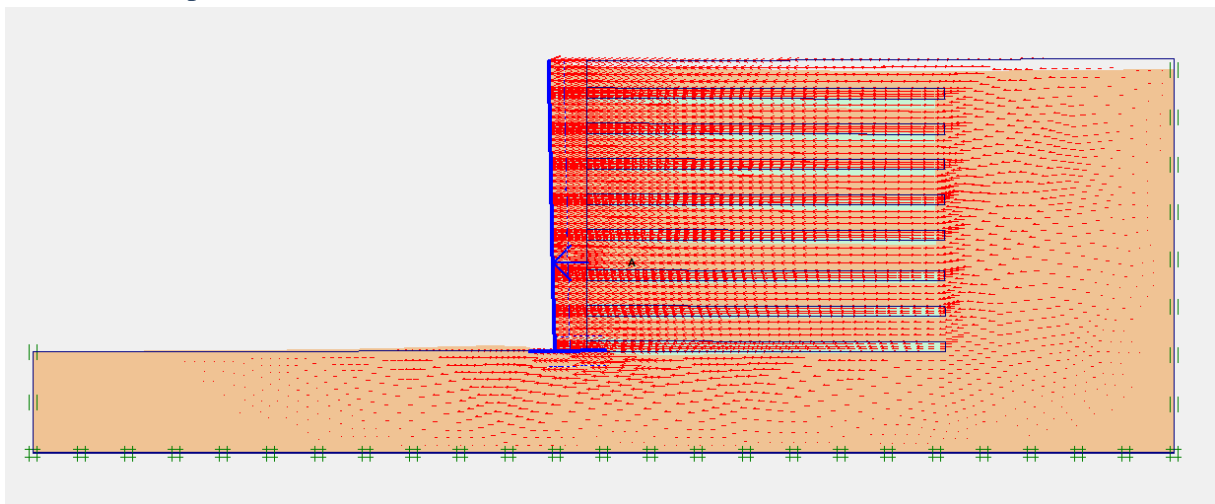


Figure 51: déplacements horizontal

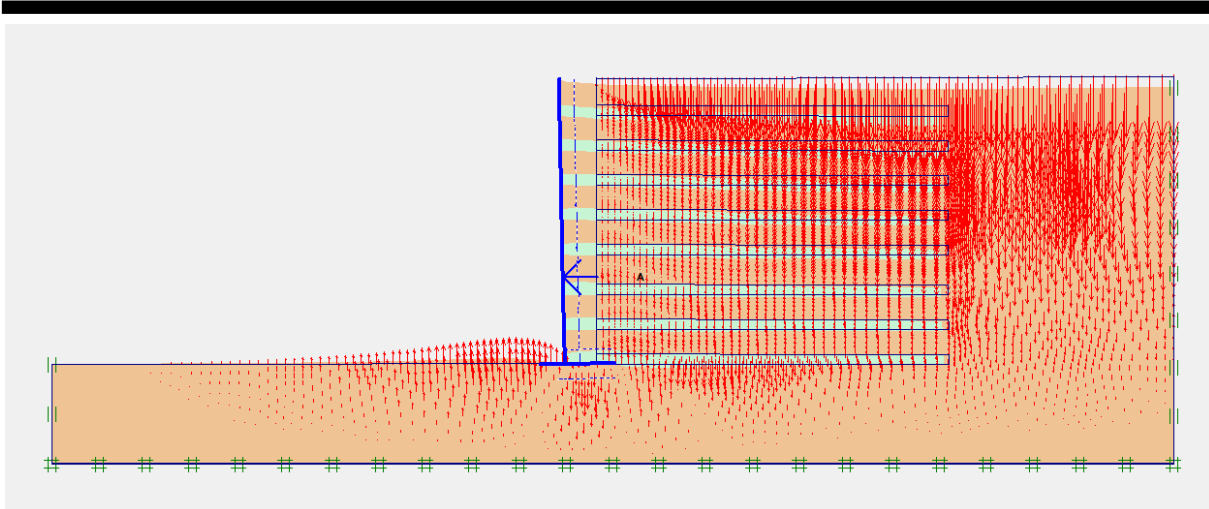


Figure 52: les Déplacements vertical

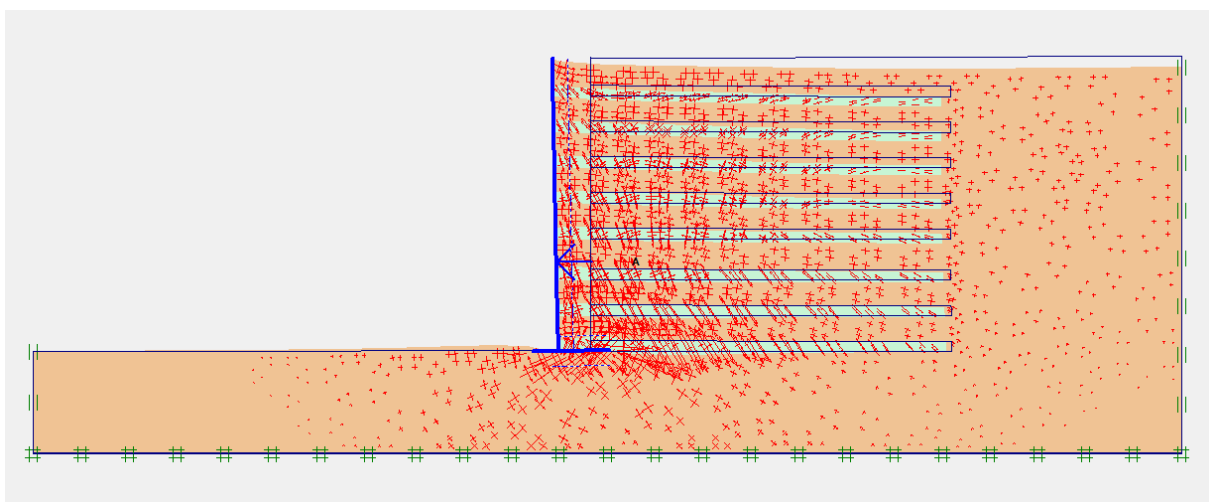


Figure 53: total strain .

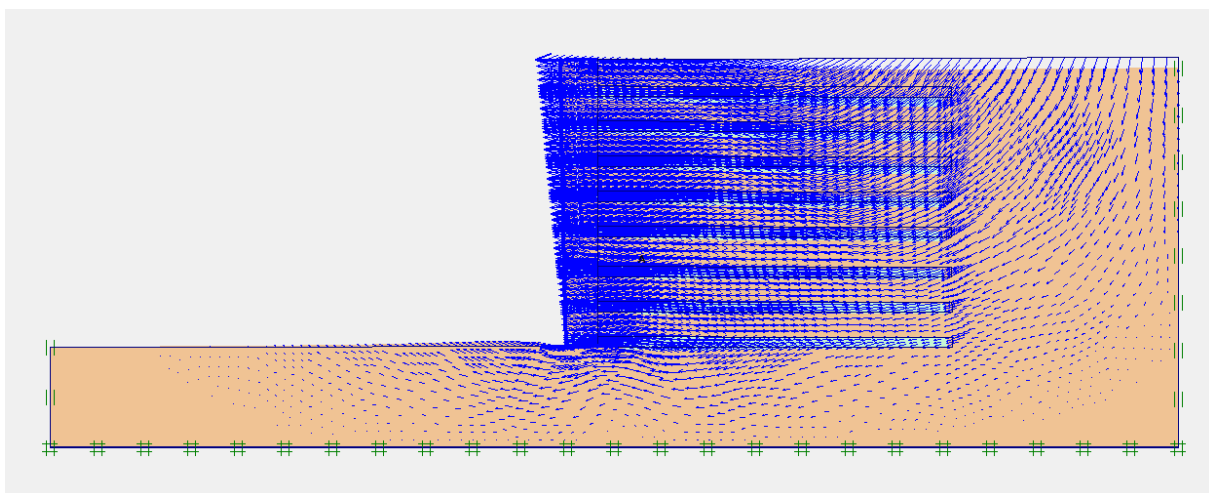


Figure 54: total incompressamnet



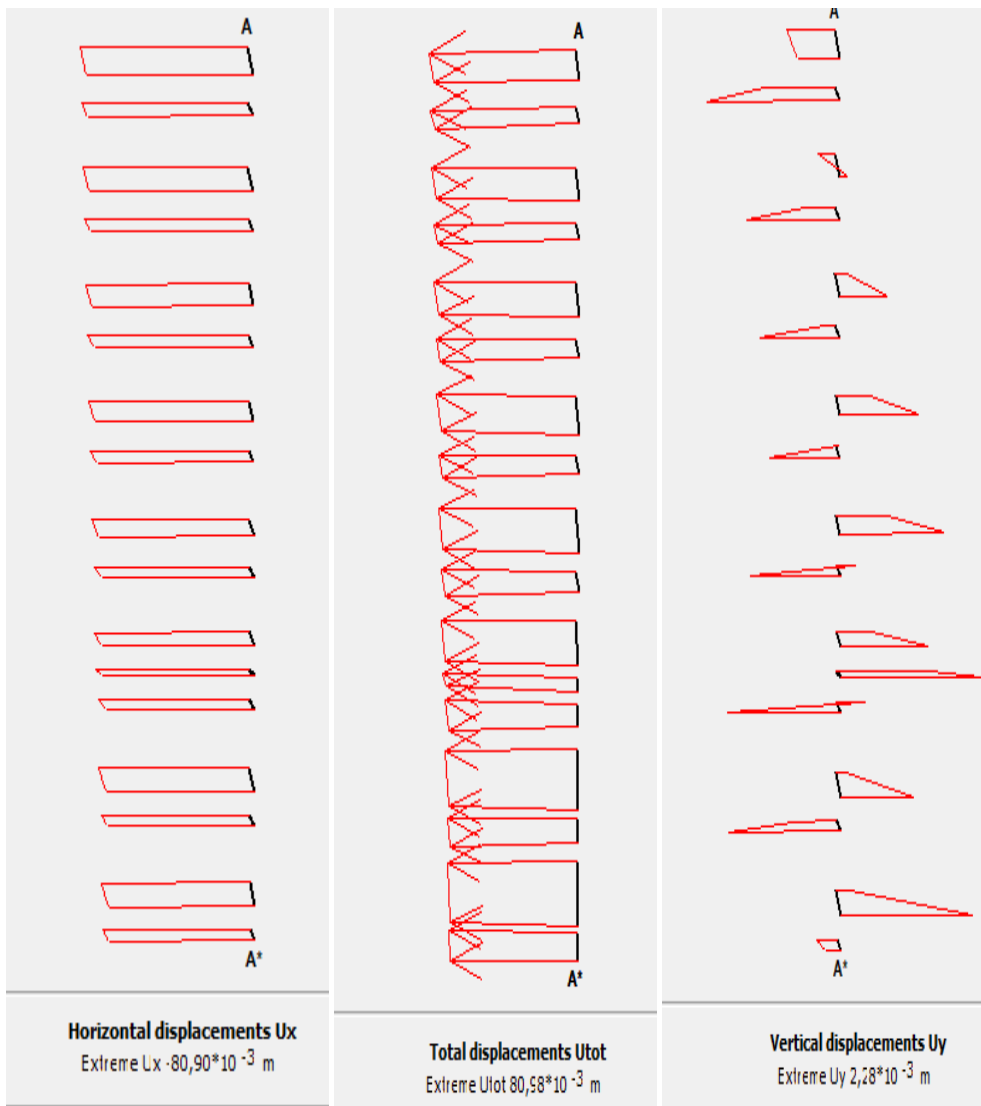


Figure 55: les déplacements

Figure 56: chemin des déplacements

Node	X [m]	Y [m]	Ux [10 <sup>-3</sup> m]	Uy [10 <sup>-3</sup> m]	ΔUx [10 <sup>-6</sup> m]	ΔUy [10 <sup>-6</sup> m]
1	0,681	2,000	-0,072	0,076	-0,174	0,166
2	0,454	2,000	-0,041	0,050	-0,121	0,124
3	0,227	2,000	-0,019	0,035	-0,062	0,095
4	0,000	2,000	0,000	0,030	0,000	0,084
5	0,000	1,750	0,000	0,015	0,000	0,029
6	0,000	1,500	0,000	0,009	0,000	0,004
7	0,000	1,250	0,000	0,007	0,000	0,002
8	0,454	1,750	-0,023	0,028	-0,075	0,070
9	0,227	1,750	-0,010	0,019	-0,036	0,040
10	0,227	1,500	-0,004	0,010	-0,011	0,013
11	0,455	1,178	-0,004	0,006	-0,005	0,006
12	0,683	1,107	-0,007	0,006	-0,013	0,010
13	0,682	1,428	-0,018	0,018	-0,054	0,046
14	0,227	1,250	-0,002	0,006	0,000	0,003
15	0,454	1,500	-0,011	0,014	-0,033	0,032
16	0,681	1,750	-0,042	0,043	-0,121	0,109
17	0,228	0,928	-0,002	0,004	-0,001	0,002
18	0,457	0,857	-0,003	0,003	-0,002	0,001
19	0,685	0,785	-0,005	0,003	-0,003	0,001
20	0,000	0,750	0,000	0,002	0,000	0,001
21	0,000	0,500	0,000	0,001	0,000	0,000
22	0,000	0,250	0,000	0,000	0,000	0,000
23	0,228	0,678	-0,001	0,002	-0,001	0,001

Figure 57: déplacements des nœuds

- Les contraintes :

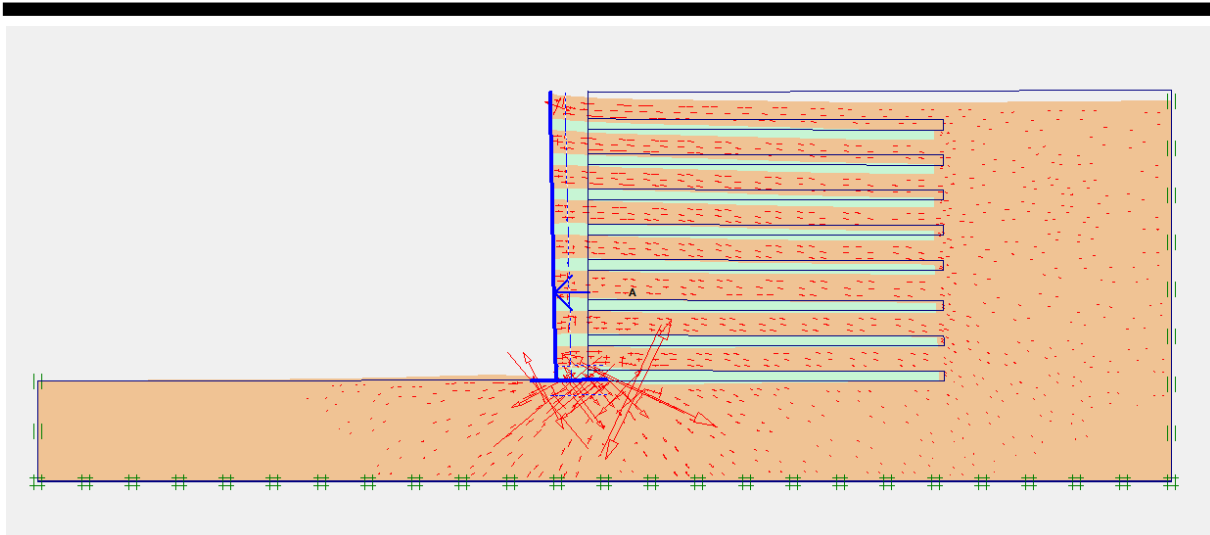


Figure 58: les contraintes totales

Cluster	Soil Element	Stress Point	X [m]	Y [m]	$\sigma_{xx}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{yy}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{xy}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\sigma_{zz}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	Status
1	1 Sand	1	11,415	3,609	-5,319	-16,438	1,253	-5,439	PLASTIC
		2	11,023	3,723	-4,314	-11,386	2,238	-3,925	PLASTIC
		3	11,023	3,609	-2,163	-7,077	0,752	-2,310	PLASTIC
		4	11,235	3,635	-4,153	-12,938	1,118	-4,273	PLASTIC
		5	11,113	3,670	-3,963	-12,021	1,371	-3,996	PLASTIC
		6	11,113	3,635	-3,705	-11,182	1,369	-3,722	PLASTIC
		7	11,300	3,644	-4,561	-14,214	1,115	-4,694	PLASTIC
		8	11,143	3,689	-4,113	-12,869	1,062	-4,246	PLASTIC
		9	11,018	3,689	-4,508	-12,068	2,259	-4,144	PLASTIC
		10	11,018	3,644	-3,987	-11,444	1,748	-3,858	PLASTIC
		11	11,143	3,607	-3,340	-10,124	1,281	-3,366	PLASTIC
		12	11,301	3,607	-4,107	-12,692	1,210	-4,200	PLASTIC
	2 Sand	13	18,281	5,148	-2,665	-8,247	-1,066	-2,728	PLASTIC
		14	18,020	5,092	-4,762	-9,375	-3,012	-3,534	PLASTIC
		15	18,020	4,930	-2,542	-3,092	1,645	-1,408	PLASTIC
		16	18,161	5,085	-2,873	-7,249	-1,731	-2,530	PLASTIC
		17	18,080	5,067	-3,061	-5,972	-2,055	-2,258	PLASTIC
		18	18,080	5,017	-2,263	-4,578	-1,594	-1,710	PLASTIC
		19	18,205	5,133	-2,821	-8,390	-1,275	-2,803	PLASTIC
		20	18,100	5,111	-3,304	-8,117	-1,978	-2,855	PLASTIC
		21	18,017	5,042	-3,376	-4,814	-2,192	-2,047	PLASTIC
		22	18,017	4,976	-0,954	-3,214	-0,646	-1,042	PLASTIC
		23	18,100	4,994	-1,508	-4,114	-1,037	-1,405	PLASTIC

Figure 59: tableau des contraintes4

---

### 3. Traitement des résultats :

L'analyse analytique se fait pour comparer les résultats de mur de soutènement type cantilever supportant un sable renforcé par des pneus usagés avec les résultats de même mur supportant seulement le sable, Les conclusions suivantes sont tirées sur la base de l'analyse:

- Pour obtenir ce résultats on a choisi des différents points A,B ,C,D,et E dans le mur de soutènement ;

D'après les tableaux des déplacements et de contraintes on voit que les déplacements diminuent on ajoutant le pneu sol ainsi que les contraintes .

- Pour les déplacements :

Pour un mur de soutènement soutenant un sable : Les plus basses valeurs de déplacement de Von Mises est d'environ 0.060m lorsque la valeur la plus élevée est d'environ 0,068 m

- Les déplacements horizontal  $U_x$  entre  $\{-0.060$  et  $-0.068\}$  m
- Les déplacements vertical  $U_y$  entre  $\{-0,003$  et  $-0.005\}$  m

Pour un mur de soutènement de supportant un sable renforcé par les déchets pneumatiques , les déplacements est d'environ 0,081 m ;

- Les déplacements horizontal  $U_x$  entre  $\{-0,047$  et  $-0,082\}$  m
- Les déplacements vertical  $U_y$  entre  $\{-0.001$  et  $-0.002\}$  m

On observe donc que les déplacements dans le cas -sol renforcé par des déchets de pneu- : est inférieur à cela de deuxièmes cas .

- Pour les contraintes :

Pour un mur de soutènement soutenant un sable : Les plus basses valeurs de contraintes de Von Mises est  $\sigma_{xx \min} = -9,37 \text{ kn/m}^2$ ,  $\sigma_{yy \min} = -1,21 \text{ kn/m}^2$ .

lorsque la valeur la plus élevée est  $\sigma_{xx \max} = -9,38 \text{ kn/m}^2$ ,  $\sigma_{yy \max} = 28,17 \text{ kn/m}^2$

Pour un mur de soutènement de supportant un sable renforcé par les déchets pneumatiques sous un chargement statique, les valeurs les plus faibles est  $\sigma_{xx \min} = -46,31 \text{ kn/m}^2$ ;  $\sigma_{yy \min} = -18,84 \text{ kn/m}^2$ , Sous Von Mises les plus élevés soulignent  $\sigma_{xx \max} = 22,41 \text{ kn/m}^2$  et  $\sigma_{yy \max} = 18,07 \text{ kn/m}^2$ .

Les contraintes normales :  $\sigma^N \max = 22,46 \text{ kn/m}^2$ ,  $\sigma^N \min = -46,14 \text{ kn/m}^2$

On voit donc on ajoutant le pneu sol ; les contraintes diminuent .

### 3. Conclusions :

La technique pneu sol réduit l'effet de glissement de terrain, diminue les déplacements ainsi que les contraintes ;

De manière générale, le PNEUSOL présente l'avantage de pouvoir améliorer les propriétés mécaniques du sol.

---

## 6. Conclusion générale :

Cette mémoire et s'inscrit dans le cadre d'obtenir le diplôme en master deux génie civil, dont la spécialité est Structure.

Notre recherche sert à utiliser les déchets pneumatiques au développement durable et la valorisation des déchets dans le secteur du bâtiment, travaux publics et hydrauliques (BTPH).

- La partie bibliographique consacrée aux déchets pneumatiques et les différentes techniques de valorisation de ces déchets en génie civil, la réglementation concernant ces déchets et leur utilisation dans le domaine du BTPH.

- Le comportement statique et dynamique des sols renforcés et les différents essais effectués : en vraie grandeur, sur modèle réduit ou simulations.

- Les notions de la méthode d'homogénéisation et présente les modèles étudiés analytiquement : mur de soutènement derrière un sable seul et derrière un sable avec couches des pneus.

- une modélisation par éléments finis en utilisant le logiciel de calcul PLAXIS, des modèles sont étudiés dans le cas d'un chargement statique

En peut dire donc :

- L'utilisation du technique pneusol permet à améliorer des sols et ses propriétés physique vis-à-vis la résistance, le cisaillement et limiter les déformations sous les ouvrages.

## Bibliographie :

---

## Bibliographie :

---

### Bibliographie

- Abdelhalim, A. i. (2017, octobre 23/25). VALORISATION ÉNERGÉTIQUE DES PNEUMATIQUES USAGÉS NON RÉUTILISABLES. oran, algerie.
- Ahmed, R. (2005, 12 15). Modélisation Numérique d'une Structure de soutènement en forme de L supportant du sable. annaba, algerie.
- Akkouch.naim. (2017). Optimisation de la valorisation énergétique des gaz de pyrolyse des pneus hors d'usage. BOUMERDASE, genie mecanique, Algerie.
- Ali, R. (2013, 11 13). ANALYSE NUMÉRIQUE DES DÉFORMATIONS DES CULÉES DE PONT EN SOL RENFORCÉ. biskra, algerie.
- Brinkgreve, B. (2003). plaxis version 8 manual de reference .
- C. Coulet, J. (1989). Réemploi de pneumatiques usagés en technique routière – Procédé PNEUTEX , Aigue blanche (73) – RN 90 – Merlon de protection contre les chutes de bloc. Région Rhône-Alpes/ADEME.
- C. Coulet, J. P. (1992). Soutènement avec parement en pneus usagés – Procédé ARMAPNEUSOL ”, Bretelle – Déviation autoroutière de St-Chamond (42). Fiche Région Rhône-Alpes/ADEME.
- caoutchouc.com/nos-compétences/propriétés., h. (s.d.). le caoutchouc .
- D. N.HUMPHREY. (2006). Civil engineering applications of tire derived aggregate. CIWMB California Integrated Waste Management Board, Waste Tire Forum.
- ETRMA. (2014, december 16). *European tyre and rubber industry – Statistics*. Récupéré sur <http://www.etrma.org/statistics-2>
- ETRMA. (2011). *End of Life Tyres: A Valuable Resource with Growing Potential* .
- European tyre and rubberindustry statistics*. (2015, december 16). Récupéré sur <http://www.etrma.org/statistics-2>
- H.Trouzine, A. (2008, 08 27/28/29). Pneus usés et sols gonflants" Actes Orgagec'08 Organic Materials for Construction: Technical and Environmental Performances. paris.
- idir.abdelhalim, A. (2017, octobre 25). VALORISATION ÉNERGÉTIQUE DES PNEUMATIQUES USAGÉS NON RÉUTILISABLES. oran, ERA, algerie: sonatrach.
- J. G. Zorenberg, B. C. (2005). Tires bales in highway applications: feasibility and properties evaluation. *Research Branch* . Colorado Department of Transportation: Report No. CDOT-DTD-R-2005-2.

## Bibliographie :

---

K. Ab-Malek, a. A. (1986). The effect of 42 years immersion in sea water on natural rubber. *Journal of Materials Sciences* .

lazizi.A. (2014, juin 30). Approche par changement d'échelle du comportement dynamique des sols renforcés par des pneus usagés. SBA, genie civil, Algérie.

LONG, N. T. (1993, 12 22). Le Pneusol : Recherches – Réalisations - Perspectives. LYON.

Martinez, J. P. (2013). Waste tyre pyrolysis - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,.

Merzoug.karima. (2016). CARACTERISATION D'UN SOL SABLEUX CONTENANT DES FIBRES CAOUTCHOUTEUSES. genie civil, algerie.

Mouden, M. E. (1995). Une nouvelle méthode d'homogénéisation des matériaux composites élastiques. france: Université Paul Verlaine - Metz.

*pneumatiques-usages*. (2018, mars 15). Récupéré sur Ministère de la transition écologique et solidaire: <https://www.ecologie-solidaire.gouv.fr/pneumatiques-usages>

QUOTIDIEN EL WATAN . (2004). *Quotidien El Watan* .

Rey, E. (2005). Caractérisation de sols hétérogènes par des méthodes géophysiques. france.

Rouili.Ahmed. (2005, 12 15). Modélisation Numérique d'une Structure de soutènement de forme de L supportant du sable . *these de doctorat* . constantine, genie civil, algerie.

SALENÇON, P. d. (s.d.). analyse de la stabilité des ouvrages en sols renforcés par une méthode d'homogénéisation. paris, france: Laboratoire de Mécanique des Solides \*.

Sukontasukkul, P. (2006). Properties of concret pedestrian block mixed with crum rubber. *Construction and building materials* .

T. Coupez, J.-L. C. (1992). Large deformation and automatic remeshing. In D.J.R.Owen and E. Onate, . editors, *Computational Plasticity*. Pineridge Press,.

*terrasol*. (2017). Récupéré sur setec: <https://www.terrasol.fr/catalogue/plaxis-2d>

trouzine, H., & al., e. (2011). Problématique des pneumatiques usagés en Algérie. SBA, genie civil, Algerie.

tumers, m. (s.d.). Récupéré sur Beta analytic (testing laboratory ): <https://www.betalabservices.com/renewable-carbon/tire-derived-fuels.html>

Williams, P. (2013). Pyrolysis of waste tyres - A review', *Waste Management*, vol 33.

Y.W. Yoon, S. H. (2006). Bearing capacity and settlement of tire reinforced sands. *Geotextile and Geomembranes* .



## **Bibliographie :**

---

### LES SITES WEB :

[www.aliapur.fr](http://www.aliapur.fr). (s.d.).

(s.d.). Récupéré sur [www.michelin.fr](http://www.michelin.fr).

(s.d.). Récupéré sur <http://www.aliapur.fr/>.

<http://www.le-caoutchouc.com/nos-compétences/propriétés>. (s.d.).

(2007, juin 14). *Quotidien Liberté* .

(2008, mai 03). *Quotidien El Watan* .