

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعيدة - د. مولاي الطاهر



UNIVERSITÉ DE SAÏDA - Dr. MOULAY TAHAR

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil et d'Hydraulique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER en Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

Déchets ménagers : Gestion et risques environnementaux sur les milieux poreux

Présenté par :

BOUROUMI Fatima Zahra

BELGHAZALI Mohamed

Soutenu en Octobre 2020, devant le jury composé de :

M. Touil Brahim	MCB	Président
M. Derfouf Feth-Ellah Mounir	MCA	Encadreur
M. Belouadi Larbi	MCB	Examineur

Année universitaire 2019/2020

Avant propos

Notre mémoire à l'origine « Etude du transfert hydrique dans les sols fin compacté » était un mémoire de type expérimental dans lequel nous allons étudier l'infiltration de l'eau et du lixiviat dans des échantillons d'argile de la ville de Saïda.

Malheureusement, et suite à la pandémie covid 19, nous avons réorienté notre travail en une étude bibliographique concernant les mécanismes de transports de l'eau et des solutés dans le sol ainsi que la gestion des déchets managers notamment dans la ville de Saïda.

Remerciement

Toute louange à Allah qui nous a fourni le courage, la capacité et la patience pour réaliser ce modeste travail avec toutes ses difficultés et ses obstacles.

Nos vifs remerciements à notre encadreur, monsieur ***Derfouf Feth-Ellah Mounir*** pour lui avoir consacré son temps, ses conseils, ses suggestions, ses paroles bien pensées et pour toute son aide, ses suggestions, et surtout sa bonne humeur et sa patience depuis le début à la fin de cette recherche.

Nous adressons nos sincères remerciements à nos enseignants de la spécialité Génie civil (Géotechnique).

Dédicace

J'ai l'honneur de dédier ce travail de master à mes proches:

Mes parents qui ont grandi, m'ont éduqué et m'ont aidé à chaque étape de ma vie et ont reçu mes décisions avec respect et un cœur ouvert, alors merci les parents d'être les meilleurs au monde.

À ma seule sœur et toute la famille en général.

À Tous mes chères amies sans exception.

À l'architecte Yahiaoui Abir d'Etablissement Public de wilaya de Gestion des centres d'enfouissement techniques Saïda

À tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail de près ou de loin.

BOUROUMI Fatima Zahra

Dédicace

Je tiens en premier lieu à dédier ce travail à mes parents, qui sont la lumière de ma vie et je prie Allah à les protéger et me les garder je suis reconnaissant pour vos sacrifices et soutient moral.

À mes frères et mes sœurs

À mon chère binôme pour tout ce qu'elle a fait pour la réussite de ce travail

À tous les personnes que je n'ais pas nommées ici et à tous ce qui mon aidée et courgée

Belghazali Mohamed

ملخص

أدى النمو السريع لسكان العالم والسعي لتحقيق الازدهار المادي إلى توسع هائل في الإنتاج الصناعي والزراعي في العقود الأخيرة. أثرت الزيادة المرتبطة في استهلاك الطاقة وتوليد النفايات سلبيًا على جودة التربة والمياه مما أثر على صحة الناس والبيئة ونوعية حياتهم. تقترح هذه المذكرة شرح العمليات الفيزيائية والكيميائية التي تحكم نقل المياه والملوثات عبر التربة والترتبات المطبقة لإدارة النفايات من خلال مراكز الردم التقني. تم تسليط الضوء على مدينة سعيدة من خلال الوسائل المستخدمة والصعوبات التي تواجه نظام جمع وإدارة النفايات المنزلية بالكامل.

كلمات البحث: تربة غير مشبعة , النفاذية, امتصاص التربة, رشح الماء , التلوث, مركز الردم التقني(المكب التقني), عصارة النفايات, تسيير النفايات .

Résumé

La croissance rapide de la population mondiale et la recherche de la prospérité matérielle ont généré une expansion massive de la production industrielle et agricole au cours des dernières décennies. L'augmentation associée de la consommation d'énergie et la production de déchets ont considérablement ont eu des effets néfastes sur la qualité des sols et de l'eau, ce qui a eu un impact sur la santé et la qualité de vie des populations et sur l'environnement. Ce mémoire propose d'expliquer les processus physiques et chimiques qui régissent le transfert des eaux et des polluants à travers le sol et les dispositions mises en œuvre pour la gestion des déchets managers à travers les centres d'enfouissement techniques. Le cas de la ville de Saïda est mis en lumière via les moyens déployés et les difficultés concernant l'ensemble du système de collecte et de gestion des déchets ménagers.

Mots clés : Sol non saturé, écoulement, conductivité hydraulique, succion de sol, infiltration, pollution, Centre d'enfouissement technique(CET), lixiviats, gestion des déchets.

Abstract

Rapid growth of the world population and the pursuit of material prosperity have generated a massive expansion in industrial and agricultural production in recent decades. The associated increase in energy consumption and the generation of waste have adversely affected soil and water quality, impacting on people's health and quality of life and on the environment. This master thesis sets out to explain the physical, chemical, processes that govern the transfer of water and pollutants through the soil and the measures for the management of waste managers through technical landfills. The case of the city of Saïda is highlighted through the means deployed and the difficulties concerning the entire system of collection and management of household waste disposal.

Keywords: Unsaturated soil, flow, conductivity, soil suction, infiltration, pollution Center, of Technical Landfill, Leachate, Management of Wastes.

SOMMAIRE

Avant propos

Remerciement

Dédicaces

Résumé

Sommaire

Liste des symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

Chapitre I : L'eau dans les sols non saturés

Introduction général	1
I.1.Introduction	2
I.2.Potentiel de l'eau dans le sol	2
I.2.1.Déférents type d'eau	2
I.3.Paramètres et variables caractérisant les sols non saturés	3
I.3.1.Variables	3
I.3.1.1Teneur en eau	3
I.3.1.2.Succion	4
I.3.2.Paramètre relative (Hydrodynamique) d'un sol non saturé	10
I.3.2.1.La conductivité Hydraulique	10
I.3.2.2.La diffusivité hydraulique	12
I.3.2.3.Coefficient d'emménagement.....	12
I.3.2.4.Sorptivité capillaire	12
I.4.Equations générales de l'écoulement	13
I.4.1 .L'équation de continuité (Équation de Richards)	13
I.4.2. Equation cinématique.....	13
I.4.3.Equation d'écoulement	14
I.5.Formes particulières de l'équation d'écoulement.....	15
I.5.1Infiltration horizontale (Cas de l'absorption).....	15
I.5.2.Infiltration verticale.....	15
I.6.Propriétés hydrodynamiques d'un sol non saturé.....	16
I.6.1.Relation teneur en eau et succion du sol	16
I.6.2.Relation entre la conductivité hydraulique et la succion du sol.....	17
I.7. Conclusion	19

Chapitre II : Infiltration de l'eau et des solutés dans les sols non saturés

II.1. Introduction	20
II.2. Le cycle hydrologique	20
II.2.1. Les précipitations	21
II.2.2. L'évaporation/l'évapotranspiration	21
II.2.3. L'interception et le stockage dans les dépressions	22
II.2.4. L'infiltration et la percolation	22
II.2.5. Les écoulements	22
II.3. L'infiltration	22
II.3.1. Description du Processus d'infiltration	22
II.3.2. Facteurs influençant l'infiltration	24
II.4. Les modèles d'infiltration	25
II.4.1. Modèle empirique	25
II.4.1.1. Modèle de Horton 1940 (03 paramètres)	25
II.4.1.2. Formule de l'institut d'aménagement des terres et des eaux de l'EPFL	26
II.4.2. Modèles basés sur des approches physiques	27
II.4.2.1. Modèle de Green & Ampt 1911	27
II.4.2.2. Modèle de Philip 1957	28
II.5. Paramètre influençant le phénomène d'infiltration	28
II.5.1. Influence de la teneur en eau volumique initiale	28
II.5.2. Influence de la charge hydrique	29
II.6. Les polluants liés à l'infiltration des eaux pluviales	30
II.6.2. Les Substances inorganiques	30
II.6.2.1. Les éléments traces	30
II.6.2.2. Les nutriments (azote, phosphore) et les sels	31
II.7. Les processus liés à l'infiltration des eaux pluviales et au transfert des polluants associés	34
II.7.2. Processus physiques	34
II.7.2.1. Percolation	34
II.7.2.2. Lixiviation	34
II.7.2.3. Diffusion	34
II.7.2.4. Lessivage	34
II.7.2.5. Filtration mécanique	35

II.7.3.Processus chimiques	35
II.7.3.1. Photolyse.....	35
II.7.3.2. Hydrolyse.....	35
II.8.Modes de transport	35
II.8.1.Convection.....	35
II.8.2. Dispersion cinématique et diffusion moléculaire	36
II.8.2.1.La diffusion moléculaires.....	36
II.8.2.2.La dispersion cinématique	37
II.8.3. Modèles de transfert	38
II.8.3.1. Transport conservatif : équation de convection-dispersion	38
II.8.3.2.Transport non conservatif	39
II.8.3.3. L'équation générale de transports	39
II.9.Conclusion.....	40

Chapitre III: Les Centres d'Enfouissements Techniques

III.1. Introduction.....	41
III.2.Généralités sur les déchets	41
III.2.1.Définition des déchets	41
III.2.2. La typologie des déchets	42
III.2.3.Gestion et traitement des déchets.....	42
III.3. Centre d'enfouissement technique (CET).....	43
III.3.1.Définition de CET	43
III.3.2.Les différents type de CET.....	44
III.3.3.Conception d'un centre d'enfouissement technique	44
III.3.4.Choix du site.....	46
III.4. Les règles et les normes d'un C.E.T	47
III.4.1. L'aménagement du casier.....	47
III.4.1.1.Les Géosynthétiques	48
III.5. Flux polluant générés par le stockage des déchets.....	50
III.5.1.Lixiviats.....	50
III.5.1.2.Traitement de lixiviats	51
III.5.2. Biogaz.....	53
III.5.2.1.Traitement des biogaz.....	53
III.5.2.2.Système de récupération de biogaz.....	54
III.9. Conclusion	57

Chapitre IV : Gestion des déchets ménagers à la ville de Saida

IV.1. Introduction.....	58
IV.2. Les CET de la ville de Saida.....	58
IV.2.1. Situation géographique.....	58
IV.2.2. Situation démographique	59
IV.2.3.Le climat.....	59
IV.3.Aperçus sur les centres d'enfouissement techniques à Saïda	60
IV.3.1.Description des sites.....	60
IV.4.Collecte des déchets à la ville de Saida	66
IV.4.1.La situation actuelle de collecte	66
IV.4.2.Organisation du service chargé de la gestion des déchets.....	70
IV.5. Sectorisation des collectes ménagères de la ville de Saïda.....	72
IV.5.1.Les lacunes en terme de gestion des déchets ménagers à la ville de Saida.....	73
IV.5.2. Les solutions proposées.....	74
IV.6.Conclusions.....	78
Conclusion générale	79

Références bibliographique

Liste de notation

ϕ : La teneur en eau pondérale

θ : La teneur en eau volumétrique

ρ_d : masse volumique sec

ρ_w : masse volumique de l'eau (kg/m^3)

Ψ_m : Succion matricielle

U_a : Pression de l'air

U_w : Pression de l'eau

T_s : Tension de surface

r : Rayon de courbure

α : Angle de contact

π : La succion osmotique

R : La constante des gaz parfaits

T : La température absolue ($^{\circ}\text{K}$)

ω_w : La masse molaire de la vapeur d'eau

X_w : La fraction molaire d'eau dans la solution

Ψ : succion totale

U_a : La pression de l'air

U_w : La pression de l'eau

h : L'humidité relative

T : la température thermodynamique

M : la masse molaire de l'eau

g : l'accélération due à la pesanteur

R : la constante molaire des gaz

$K(\theta)$: la teneur volumique

K_{int} : perméabilité intrinsèque (m^2)

F_w : fluidité de l'eau

μ_w : est le coefficient de viscosité de l'eau.

ρ_w : La masse volumique de l'eau et g l'accélération de la pesanteur.

$K_r(\theta)$: perméabilité relative de l'eau

$D(\theta)$: La diffusivité hydraulique

S : Coefficient d'emmagasinement

e : épaisseur de l'aquifère (m)

S_s : Le volume d'eau
I : L'infiltration cumulative
 ρ_w : Masse volumique du fluide (kg/m^3)
 θ : teneur en eau volumique du milieu (m^3/m^3)
q : flux (m/s)
 $K(\theta)$: Conductivité hydraulique (m/s)
 Φ : Potentiel de l'eau (m)
 $I(t)$: Infiltration cumulative au temps t (mm)
i(t): régime ou taux d'infiltration au temps t (mm/h)
 $i(t)$: capacité d'infiltration au temps t (mm/h)
 i_0 : capacité d'infiltration max ou initiale (mm/h)
 i_f : capacité d'infiltration du sol saturé ou finale (mm/h)
t : temps écoulé depuis le début de l'averse (min)
 γ : constante empirique (min^{-1})
b : coefficients d'ajustement
a: coefficients d'ajustement
 K_s : conductivité hydraulique à saturation (mm/h)
 h_0 : charge de pression en surface (mm)
 h_f : charge de pression au front d'humidification (mm)
 z_f : profondeur atteinte par le front d'humidification (mm)
S: sorptivité ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-0.5}$)
A: composante gravitaire fonction de la conductivité hydraulique à saturation (cm/s)
 D_{mol} : coefficient de diffusion (m^2/s)
C : concentration massique (kg/m^3)
 D_{cin} : La dispersion cinématique
V : la vitesse interstitielle (m/s)
 λ : Coefficient déterminé de manière empirique
 D_d : coefficient de dispersion hydrodynamique (m^2/s)
D: coefficient de dispersion axial apparent
 Φ_d : proportionnel au gradient de concentration du soluté
 ρ : masse volumique apparente sèche (kg/m^3)
Cs: fraction massique du soluté adsorbé
q: est le débit unitaire de Darcy (m/s)
 ε : Le volume relatif de solution (porosité en milieu saturé)

C: la concentration volumique en soluté en phase liquide

C_s: la concentration volumique en soluté en phase solide

Liste des figures

Chapitre 01

Figure I-1: Différents états de l'eau dans le sol (Delage P., 2000).....	3
Figure I-2: Méthode du papier-filtre (Delage & Cui, 2000).....	7
Figure I-3: Courbes d'étalonnage du papier-filtre Whatman no 42 sec et humide (Delage & Cui, 2000)	8
Figure I-4: Schéma de principe d'une sonde psychrométrique (Fredlund and Rehadjo,1993).....	9
Figure I-5: Principe de la mesure de la succion par tensiomètre (Delage & Cui, 2000).....	10
Figure I-6: Courbes de séchage de différents sols (Delage et Cui, 2000).	16
Figure I-7: Allure des relations entre la conductivité hydraulique et la succion de deux sols (Vadose/w, 2002).....	18
Figure I-8: Courbe de rétention d'un sol argileux (illustration de phénomène d'hystérésis) (Delage et Cui, 2000).....	18

Chapitre 02

Figure II-1: Représentation du cycle de l'eau (Makhlouf, 2015).....	20
Figure II-2: Evolution générale du régime d'infiltration et de l'infiltration cumulative au cours du temps Musy et Soutter, 199, citer dans (Zadjaoui, 2009)	23
Figure II-3: Régime d'infiltration en fonction du temps pour différents types de sol (Musy, Soutter, 1991).	24
Figure II-4: Influence de teneur en eau volumique initiale.(Philip, 1957).....	29
Figure II-5: Influence de la charge d'eau.(a) : vitesse d'infiltration v_0 (Philip, 1969). (b) : infiltration cumulée I (Philip, 1957 f)	30
Figure II-6: Schéma des transformations possibles de l'azote (Martinelli, 1999)	33

Chapitre 03

Figure III-1: Centre d'Enfouissement Technique (Un casier de stockage de déchets). (Kehila, Mezouar (CET) en Algérie, 2011)	46
Figure III-2: Schéma de l'aménagement du fond de casier. (Jean-Frédéric, 2015).....	48
Figure III-3: la disposition du géotextile et de la géomembrane sur les flancs d'un casier, (Bouarfa, 2018)	49

Figure III-4: Fossette de drainage en PEHD avec géotextile	49
Figure III-5 : drainage en PEHD avec géotextile	50
Figure III-6: Le traitement de lixiviats. (Unité de traitement de Lixiviats, Traitement Biologique)	52
Figure III-7: Résultats du traitement du Lixiviats (Sictoba.La.station d'épuration)	52
Figure III-8: schéma de valorisation du biogaz (La valorisation en biocarburant, 2006).....	54
Figure III-9: puits vertical monté à l'avancement sans tube de formage. (Ademe, 2007).....	55
Figure III-10 : Mise en place des drains horizontaux connectés à un puits vertical, (Ademe, 2007)	56
Figure III-11 : Tranchées drainantes. (Ademe, 2007).....	56
Figure III-12 : Raccordement des tranchées drainants en surface. (Ademe, 2007).....	57

Chapitre 04

Figure IV-1: Situation géographique de la wilaya de Saïda (DPSB (ex DPAT de Saïda, 2012).	58
Figure IV-2 : Carte administrative de la wilaya de Saida (DPSB (ex DPAT de Saïda).....	59
Figure IV-3 : Vue satellitaire du CET de BenAdouane, (www.google/mape.fr)	61
Figure IV-4: Déversement des déchets à l'extérieure du casier de stockage.	62
Figure IV-5 : Bassin de récolte de lixiviats de CET BenAdouane a Saïda	62
Figure IV-6 : Le casier de CET de Sidi Boubekeur.....	64
Figure IV-7 : Casier en service (CET Tircine)	65
Figure IV-8 : Bassin de lixiviats de CET de Tircine -Saïda-.....	66
Figure IV-9 : Camion de collecte à benne tasseuse.	67
Figure IV-10: Nettoyage des voiries à côté du stade des frères Braci à Saida.	67
Figure IV-11: Pesée d'un camion sur le pont bascule	68
Figure IV-12 : Emballage du plastique trié	68
Figure IV-13 : Bull de terrassement à la CET de BenAdouane	69
Figure IV-14 : Bull de terrassement à pied de mouton.....	69
Figure IV-15 : Plan de Sectorisation de collecte des déchets ménagers de la ville de Saïda.	72
Figure IV-16 : les camions dans la zone industrielle.....	73
Figure IV-17 : Exemple du non-respect des endroits de collecte des déchets.....	74
Figure IV-18 : Bacs pour isoler chaque type de déchets.	75
Figure IV-19: Corbeille spécial pour le plastique à Saida.	75
Figure IV-20 : concours entre quartiers à la ville de saïda pour un environnement plus propre. en 2018.....	76

Liste des tableaux

Chapitre 02

Tableau II-1: Principales fonctions d'infiltration utilisées (D'après Jaton, 1982). 27

Tableau II-2: Evolution des principaux sels dissous lors du processus d'infiltration dans le sol d'après Toups cité dans (Detay, 1997). 32

Chapitre 03

Tableau III.1: Réglementations pour les installations de stockage des déchets (Van Impe et Bouazza, 1996 ; Cazeaux, 2001, cité dans Gueddouda, 2011) 45

Tableau III-2: Les différents systèmes de captage du biogaz. (Ademe, 2007)..... 55

Chapitre 04

Tableau IV-1 : Résultats d'analyse des lixiviats du CET de BenAdouane en janvier 2018. 63

Tableau IV-2 : L'organisation générale de la collecte des déchets ménagers et de nettoyage (APC Saïda, 2012) 71

Tableau IV-3 : Répartition des quartiers par secteur 72

Tableau IV-4 : Les différentes classes et catégories des déchets entrants pour caractérisation des déchets entrants, ADEME, 2005 cité dans Mezouari-Sandjakdine, 2011. 77

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'accroissement des activités industrielles, agricoles, et ménagers de l'homme a engendré une pollution étendue à tous les milieux naturels (l'air, l'eau et sol).

La quantité des déchets ménagers a connu au cours des dernières décennies un accroissement rapide en raison de l'urbanisation accélérée qui a caractérisé les siècles derniers. Ce phénomène est plus critique dans les pays en développement qui n'ont pas toujours les moyens nécessaires pour les gérer convenablement. La durée de vie des déchets dans la nature dépend de leur nature. Les éléments biodégradables, c'est-à-dire à base de matière organique (verts, papiers...) disparaissent en moins d'un an. En revanche, il faut des centaines d'années pour les déchets inorganiques comme le plastique. Devant l'insuffisance des moyens financiers et matériels mobilisés et l'absence de filière pour le traitement des déchets, seule la mise en décharge demeure l'unique moyen de gestion des déchets adopté par ces pays. Cependant, ces sites de décharges constituent une source potentielle de contamination des eaux souterraines et de surface par percolation ou lixiviation des matériaux qui y sont déposés. Les lixiviats apparaissent comme des vecteurs importants de la pollution dont l'étude se justifie dans l'évaluation des risques que présentent les décharges pour l'environnement en général et pour le sol et l'eau en cas particulier. C'est dans ce contexte que ce mémoire a été réalisé. Ainsi, il sera organisé en quatre chapitres :

Le chapitre I, Généralité de l'eau dans le sol dans lequel on définit les variables et les paramètres caractérisant les sols non saturés, et l'équation générale de l'écoulement.

Le chapitre II, Infiltration de l'eau et des solutés dans les sols non saturés. Dans ce chapitre on définit les principaux facteurs influençant le comportement des contaminants, les caractéristiques physico-chimiques influant sur le comportement des contaminants ensuite on décrit les différents modes de transfert des polluants dans les milieux poreux et les équations qui les gèrent.

Le chapitre III, les centres d'enfouissement techniques (CET). Dans ce chapitre on décrit les différents types de CET et les exigences techniques de leur réalisation.

Le chapitre IV, les centres d'enfouissement techniques à Saïda. Comme cas d'étude, la ville de Saïda est étudiée via les moyens de la gestion des déchets ainsi que les difficultés rencontrées et les solutions proposées.

Chapitre I :

L'eau dans les sols non saturés

I.1.Introduction

La zone non saturée est la zone du sous-sol comprise entre la surface du sol et la zone saturée. C'est également un milieu poreux constitué d'une composante solide formée par des éléments minéraux et d'une composante poreuse caractérisée par des petits espaces vides délimités par la matrice solide et formant un réseau. La composante poreuse est remplie par une phase liquide et une phase gazeuse ; elle est perméable à un écoulement de fluide (gaz ou liquide). L'interaction entre ces trois phases rend le comportement des sols plus complexe.

L'écoulement en milieu non saturé est le type d'écoulement le plus fréquemment rencontré dans les couches de sol à la surface du sol, identifiées comme la zone vadose.

L'écoulement de l'eau dans le milieu poreux du sol est conditionné par les variations du potentiel hydrique total. L'eau est déplacée des points où ce potentiel est élevé vers ceux où il est le plus bas. La différence de potentiel, appelée le gradient de charge hydraulique, est la somme du gradient de potentiel capillaire et du gradient gravitationnel.

I.2.Potentiel de l'eau dans le sol

L'eau du sol, ou plus correctement « la solution du sol », est un terme qui représente la phase liquide dans le milieu poreux. Elle est composée d'eau et d'éléments dissous.

L'eau joue un rôle majeur dans le comportement des sols non saturés. Sa répartition dans l'espace poral, avec la phase de gazeuse, ses interactions avec les minéraux des particules du sol, la concentration de ses sels dissous et les phénomènes de capillarité influencent les mouvements des molécules d'eau dans les pores du sol.

I.2.1.Déférents type d'eau

L'eau a un effet considérable sur le comportement mécanique des sols et elle peut se trouver dans plusieurs états à l'intérieur d'un sol, suivant l'intensité des forces liant ses molécules aux particules solides, et ces différents états de l'eau dans le sol et ses mouvements permettent de définir différents types:

- **L'eau de constitution:** Elle entre dans la composition chimique des minéraux dont les particules de sol sont formées. En général, ce type d'eau influence peu le comportement du sol, sauf lorsqu'il est soumis à une température très élevée et a besoin d'une température de 550 °C pour être éliminée.

Chapitre I: L'eau dans les sols non saturé

- **L'eau liée:** Elle est présente sur la surface des particules fines de sol, grâce aux propriétés colloïdales des particules argileuses, et a une viscosité élevée et ne transmet pas les pressions. Elle a besoin d'une température élevée de 200 °C pour être évacuée.
- **L'eau libre:** Celle qui s'écoule librement, dans des macroporosités du sol sous l'effet des forces de pesanteur. Elle peut être éliminée par séchage à l'étuve à une température de 105°C, (Azzuz, 2006)
- **L'eau capillaire ou de rétention:** Elle se rencontre dans les sols non saturés et qui se maintient au contact des particules solides sous l'action des tensions superficielles et prennent naissance à l'interface eau-air. Cette eau, remplit des pores capillaires, si petits qu'ils ont la taille d'un cheveu et malgré la pesanteur, ne peut s'écouler librement.

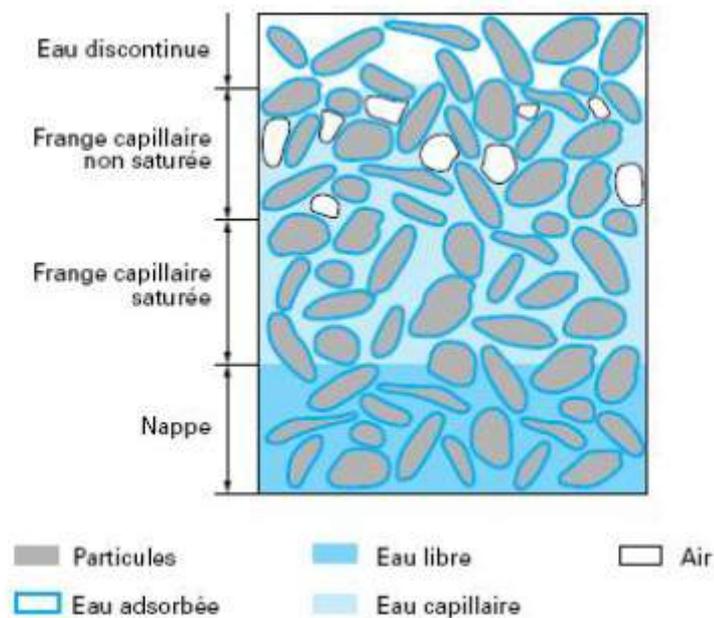


Figure I-1: Différents états de l'eau dans le sol (Delage P., 2000)

I.3. Paramètres et variables caractérisant les sols non saturés

I.3.1. Variables

I.3.1.1 Teneur en eau

La teneur en eau du sol se définit par le pourcentage d'eau contenue dans un sol rapporté au poids du sol sec ou au volume. Cette teneur-analytique mesure l'humidité d'eau contenue dans un sol mesurée sur la base d'une analyse volumétrique ou gravimétrique.

On peut définir deux teneurs en eau:

- La **teneur en eau pondérale**, ω , est classiquement utilisée en sols, le rapport des masses de fluide et de solide:

$$\omega = \frac{M_{fluide}}{M_{sec}} \quad (I.1)$$

- La **teneur en eau volumétrique**, θ est classiquement utilisée en physique des milieux poreux, rapport des volumes de fluide et de total:

$$\theta = \frac{V_{fluide}}{V_{totale}} \quad (I.2)$$

- La relation entre θ et ω :

$$\theta = \frac{\rho_d}{\rho_w} \omega \quad (I.3)$$

ρ_d : masse volumique sec

ρ_w : masse volumique de l'eau

1.3.1.2. Succion

La succion représente la force d'attraction exercée du sol sur l'eau (cette succion est considérée comme une pression, ainsi que le potentiel hydrique).

La succion est une pression plus faible que celle de l'air qui s'exerce sur l'eau à l'intérieur des grains, conduit à des mouvements de l'eau donc c'est une pression négative de l'eau des pores (Silvai, 1966).

La succion est une mesure de l'attraction entre le sol et l'eau. Ce phénomène permet à l'eau de s'élever à une hauteur supérieure à celle de l'état naturel. La succion est le paramètre le plus important du comportement hydraulique et mécanique des sols non saturés. (Bakkari, 2007)

La succion du sol peut varier dans un très large éventail, de 0 pour un sol saturé à 10^6 kPa pour un sol séché à l'étuve. (Arsenie, 2009)

a. Composantes de la succion

Dans les sols non saturés on a trois composantes de succion, à savoir, la succion matricielle, adsorption dans le cas des minéraux argileux, et la succion osmotique. (Richards, 1974, Cité dans (Ghanem, 2011))

a.1.Succion matricielle

La succion matricielle exprime la capacité de rétention d'eau de composants du sol, elle est dépendante des propriétés capillaires du milieu et des propriétés d'adsorption développées par les particules d'un sol. Elle est généralement considérée comme la composante dominante de la succion totale dans le cas des sols non-plastique. (Ghanem, 2011) Elle est la somme de deux composantes:

a.1.1.Succion capillaire

Plus généralement, Lorsqu'un liquide et un gaz sont en contact, l'interface entre les deux phases est le siège d'une tension de surface T_s . Cette propriété permet d'expliquer le phénomène d'ascension capillaire.

Elle est définie comme étant la différence entre les pressions de l'air et de l'eau. La pression capillaire, est le paramètre déterminant des mouvements de fluides dans les milieux poreux. Cette différence de pression se traduit par l'existence d'un ménisque entre l'air et l'eau. Elle est caractérisée par la loi de Jurin. On a :

$$\psi_m = U_a - U_w = \frac{2T_s \cos \alpha}{r} \quad (I.4)$$

ψ_m : Succion matricielle

U_a : Pression de l'air

U_w : Pression de l'eau

T_s : Tension de surface

r : Rayon de courbure

α : Angle de contact

a.1.2.Succion d'adsorption

Dans les sols fins non saturés, contrairement aux sols grenus, l'action d'attraction de l'eau par le sol n'est pas seulement dues à la capillarité, mais aussi aux actions d'adsorption physicochimique car les argiles sont des particules chargées négativement, et de ce fait, ont tendance à adsorber de l'eau à leur surface. Selon Masekanya J-P. 2008, les forces mises en jeu sont :

- ✓ La liaison hydrogène entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène.
- ✓ Les hydroxydes situés à la surface des feuillets argileux.

- ✓ L'eau nécessaire à l'hydratation des cations attirés par les défauts de charge du feuillet.
- ✓ L'eau attirée par l'attraction osmotique créée par la concentration de cations au voisinage du feuillet.
- ✓ L'attraction électrique du pôle positif du dipôle que forme la molécule d'eau.
- ✓ les forces d'attraction de Van der Waals.

a.2.Succion osmotique

La succion osmotique ou pression osmotique est la capacité de rétention d'eau par les sels présents sous forme dissoute dans l'eau interstitielle. Elle existe lorsque l'eau est une solution saline. Si la concentration de sel est faible, ou dans le cas de sable qui ne contient généralement pas de sels cette composante peut être négligée et la succion totale se réduit à la succion matricielle. La succion osmotique π est identique à la pression osmotique. Elle est créée par la force liée à la répulsion osmotique lorsque des sels solubles sont présents dans l'eau. Elle dépend de leur concentration. On a : π

$$\pi = - \frac{\rho_w R T}{\omega_w} \ln x_w \quad (I.5)$$

Avec :

R : La constante des gaz parfaits ($R = 8.31432 \text{ J/ (mol K)}$)

T : La température absolue ($^{\circ}\text{K}$)

ρ_w : La masse volumique de l'eau (kg/m^3)

ω_w : La masse molaire de la vapeur d'eau (18.016 kg/mol)

x_w : La fraction molaire d'eau dans la solution.

On Confirme que la succion osmotique diminue quand le degré de saturation augmente. En géotechnique elle n'est en général pas prise en compte, car son influence serait négligeable. ((Houston et al. 1994) cité dans (Alshihabi O, 2002))

a.3.Succion totale

La succion totale du sol peut être vue comme la somme de deux composantes principales : la succion matricielle et la succion osmotique (Aitchison, 1965, cité par Mekki, 2009)

- la succion matricielle ψ_m qui est liée au phénomène de capillarité et d'adsorption.

- La succion osmotique π .

$$\psi = \psi_m + \pi \quad (I.6)$$

ψ : succion totale

b. Méthode de mesure de la succion

b.1. Méthode du papier-filtre

La méthode du papier-filtre est une méthode indirecte, simple et pratique de mesure de succion, utilisable dans n'importe quel laboratoire disposant d'un système de pesée précis au 1/10 000^e de gramme. (Delage P., Cui Y. J., 2000).

Son principe est représenté sur **la figure I-2**:

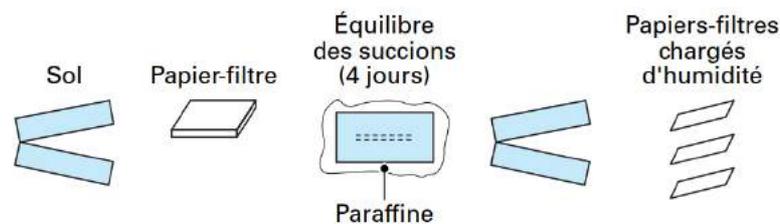


Figure I-2: Méthode du papier-filtre (Delage & Cui, 2000)

D'après Gardner cette méthode peut être utilisée pour mesurer des pressions interstitielles allant de 30KPa à 100000 KPa.

Elle consiste à insérer une triple épaisseur de papier-filtre dans l'éprouvette dont on veut déterminer la succion et à attendre (au moins 24 h) l'équilibre des succions entre le sol et le papier-filtre, en évitant toute évaporation : on peut paraffiner l'éprouvette ou l'envelopper soigneusement d'un sac plastique. On extrait ensuite les papiers-filtres de l'éprouvette et l'on détermine la teneur en eau de la feuille centrale, non polluée, par une pesée au 1/10 000^e. La connaissance de la teneur en eau et du courbe détalonnage du papier filtre d'eau permet d'accéder à la succion du papier-filtre et donc du sol. (Ghanem, 2011)

La figure I-3 présente des courbes obtenues en chemin de séchage [41] et de remouillage [24] sur le papier Whatman no 42, très fréquemment utilisé. Si l'on utilise la courbe de Parcevaux [41], il conviendra d'insérer un papier-filtre initialement humide dans le sol. (Delage & Cui, 2000).

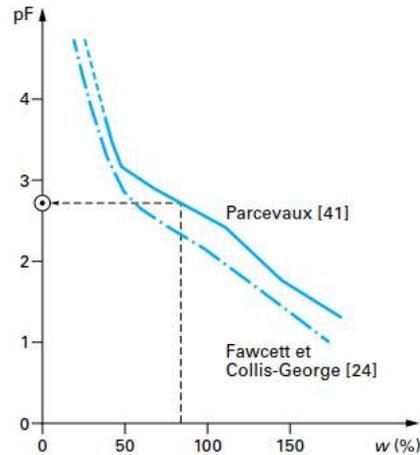


Figure I-3: Courbes d'étalonnage du papier-filtre Whatman no 42 sec et humide (Delage & Cui, 2000)

b.2. Mesure psychrométrique de la succion

Dans les techniques psychrométriques (**Figure II-4**), on mesure l'humidité relative à proximité de l'eau interstitielle du sol non saturé, et on en déduit la succion par la loi de Kelvin (Equation I.6) (Delage & Cui, 2000)

$$U_a - U_w = \frac{RT}{gM} \ln h \quad (I.7)$$

Avec:

U_a : La pression de l'air,

U_w : La pression de l'eau,

h : L'humidité relative, égale donc au rapport de la pression partielle de la vapeur d'eau P dans l'atmosphère considérée, à la pression de vapeur saturante P_0 qui dépend de la température

T ($P_0 = 0,92$ cm Hg à $T = 10$ °C ; $P_0 = 1,75$ cm Hg à $T = 20$ °C ; $P_0 = 9,25$ cm Hg à $T = 50$ °C),

M : la masse molaire de l'eau ($M = 18,016$ g · mol⁻¹),

g : l'accélération due à la pesanteur ($g = 9,81$ m · s⁻²),

R : la constante molaire des gaz ($R = 8,314$ J mol⁻¹ K⁻¹),

T : la température thermodynamique.

Chapitre I: L'eau dans les sols non saturé

La psychrométrie permet grâce à la mesure de la température, de déterminer l'humidité relative d'une enceinte fermée. Il s'agit d'une méthode assez sophistiquée dont les applications pratiques en mécanique des sols sont encore assez rares, limitée à une succion maximale de 7 MPa (95 % d'humidité relative), au-delà de laquelle les molécules de vapeur d'eau sont trop rares pour parvenir à la condensation. Cette limitation est repoussée dans le cas du psychromètre à miroir, dans lequel la détection de la condensation est réalisée sur un miroir à température contrôlée, sur lequel est projeté un rayon optique dont on analyse la réflexion. Un système électronique complet gère le refroidissement du miroir et identifie l'instant où des gouttes microscopiques perturbent le rayon optique. Des succions de plusieurs dizaines de méga-pascals peuvent être ainsi mesurées (Ghanem, 2011)

Le psychromètre à thermocouple fonctionne de la façon suivante : dans un premier temps, la jonction (chrome-constantan) du thermocouple est refroidie par effet Peltier en dessous du point de rosée, et il y a condensation d'une goutte d'eau liquide ; on laisse ensuite l'évaporation se produire, ce qui entraîne un abaissement de la température au niveau de la jonction et une force électromotrice due à l'effet Seebeck qui permet d'accéder à la valeur de l'humidité relative. (Ghanem, 2011).

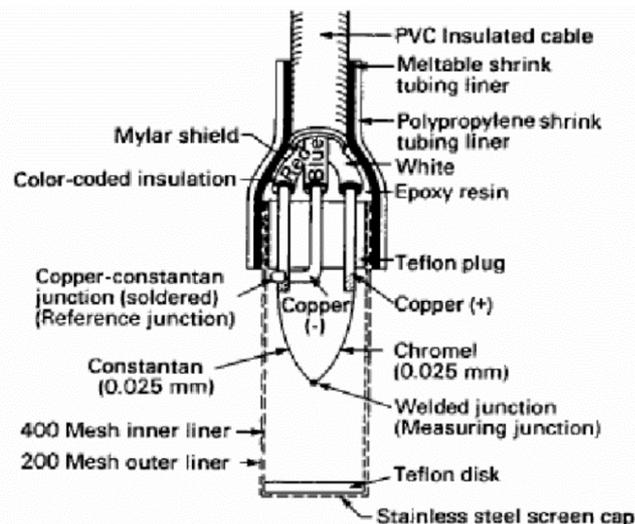


Figure I-4: Schéma de principe d'une sonde psychrométrique. (Fredlund and Rahadjo, 1993)

b.3. Mesure tensiométrique de la succion

Le tensiomètre est destiné à mesurer cette succion de l'eau dans le sol in situ. Le tensiomètre est constitué par un petit réservoir d'eau désaérée (**figure I-5**) dont une extrémité est recouverte par une couche de céramique poreuse imperméable à l'air, mais perméable à l'eau, afin d'empêcher le passage d'air. Il est connecté à un manomètre via un tube rempli d'eau désaérée. Pour mesurer la succion du sol, on introduit le tensiomètre dans un trou foré préalablement dans le sol ou l'échantillon. Lorsque l'eau du réservoir est en équilibre avec celle du sol, la succion du tensiomètre, mesurée par le manomètre, fournit directement la succion de l'eau du sol.

Cette méthode est limitée à une succion maximale de l'ordre de 90 kPa à cause de la cavitation. En pratique, le tensiomètre doit être placé dans une éprouvette ou dans le sol préalablement foré. Donc, il est nécessaire d'assurer à tout moment un bon contact entre le sol et le réservoir d'eau, au travers de la céramique poreuse, afin d'assurer une continuité de la phase d'eau entre le réservoir et le sol, et cela malgré le retrait éventuel du sol. (Ghanem, 2011).

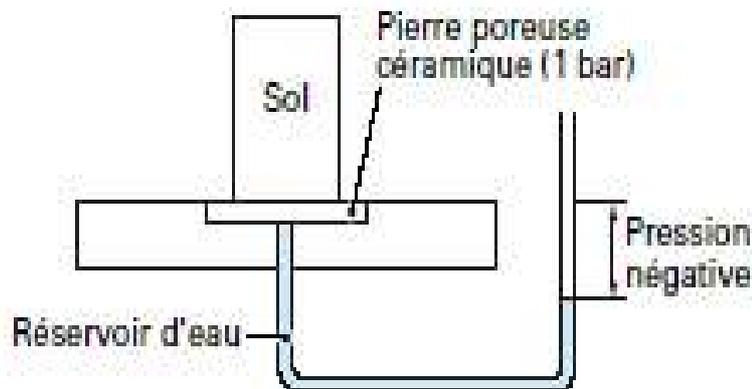


Figure I-5: Principe de la mesure de la succion par tensiomètre (Delage & Cui, 2000)

I.3.2. Paramètre relative (Hydrodynamique) d'un sol non saturé

I.3.2.1. La conductivité Hydraulique $K(\theta)$

La conductivité hydraulique K représente la capacité du milieu à conduire de l'eau. Elle dépend de la teneur volumique en eau ($K=K(\theta)$). En général, la conductivité est nulle au dessous d'un certain seuil et croit de façon exponentielle jusqu'à la valeur maximale à saturation. Cependant, l'allure de la courbe $K(\theta)$ dépend fortement de la structure et de la texture du milieu. Lorsque le milieu est saturé, la conductivité hydraulique est appelée la conductivité hydraulique à saturation (K

Chapitre I: L'eau dans les sols non saturé

$(\theta_s)=K_s)$ dont la valeur pour les sables non argileux et des graviers varie entre 10^{-2} et 10^{-5} m s⁻¹ (De Marsily, 1981, Cité dans (Bien, 2013)).

En milieu saturé, la conductivité hydraulique correspond au coefficient de proportionnalité entre la vitesse de filtration de Darcy et le gradient de pression. En milieu non saturé la conductivité hydraulique dépend aussi de la charge de pression et de la teneur en eau.

On a longtemps appelé ce paramètre «coefficient de perméabilité»; on lui préfère aujourd'hui le terme de conductivité hydraulique qui permet de ne pas la confondre avec la perméabilité intrinsèque d'un sol. En hydrologie urbaine, on s'intéresse particulièrement à la conductivité hydraulique des sols qui conditionne de façon déterminante leur comportement vis à vis du phénomène d'infiltration dans les sols (phénomènes de pertes au ruissellement et infiltration aux travers des ouvrages d'assainissement pluvial).

$$K(\theta) = - \frac{q}{\text{grad}(\phi)} \quad (\text{I.8})$$

Dans le cas du mouvement de l'eau en absence de l'effet thermique et osmotique, le potentiel hydraulique dans le sol non saturé se réduit à la somme de deux termes à savoir: le potentiel matriciel et le potentiel gravitaire (Zadjaoui, 2009), soit :

$$\phi = \psi_m - z \quad (\text{I.9})$$

Si l'effet gravitaire devient négligeable par rapport aux effets capillaires, le potentiel de l'eau sera égal au potentiel matriciel :

$$\phi = \psi_m \quad (\text{I.10})$$

Du point de vue théorique, $k(\theta)$ peut être exprimé sous forme (Vauclin, 1984) :

$$K(\theta) = K_{\text{int}} \cdot f_w \cdot K_r(\theta) \quad (\text{I.11})$$

k_{int} : perméabilité intrinsèque (m²)

f_w : fluidité de l'eau définie par $f_w = \rho_w \cdot g / \mu_w$: Ou μ_w : est le coefficient de viscosité de l'eau.

ρ_w : la masse volumique de l'eau et g l'accélération de la pesanteur.

$K_r(\theta)$: perméabilité relative de l'eau. Elle varie de zéro pour un sol complètement sec, à un pour un sol ayant un degré de saturation égal à 100%. (Zadjaoui, 2009).

I.3.2.2. La diffusivité hydraulique $D(\theta)$

Le paramètre de diffusivité $D(\theta)$ est défini par ((Childs et Collis-George, 1950) cité dans (Zadjaoui, 2009)) selon la forme suivante :

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \quad (\text{I.12})$$

Il est important de noter (Didier et al. 1996) que le terme de la diffusivité n'implique pas un déplacement d'eau par diffusion moléculaire dans les pores, et qu'il n'y a analogie formelle entre la première loi de Fick et l'équation de l'écoulement que lorsqu'on reste dans un plan horizontal. (Zadjaoui, 2009)

I.3.2.3. Coefficient d'emmagasinement

Il est défini pour un milieu aquifère saturé comme le rapport du volume d'eau qui est libéré, par unité de surface d'un aquifère pour une perte de charge hydraulique donnée.

Il représente la quantité d'eau libéré sous une variation unitaire de la charge hydraulique, c'est-à-dire sous l'effet d'une baisse du niveau d'eau.

$$S = eS_s \quad (\text{I.13})$$

Avec:

e : épaisseur de l'aquifère (m)

S_s : Le volume d'eau par unité de volume aquifère que l'on obtient sous une baisse de pression de 1 unité.

La dimension est (L^{-1})

I.3.2.4. Sorptivité capillaire

Le terme **Sorptivité** est défini comme une mesure de la capacité du milieu à absorber ou désorber liquide par capillarité.

Le Sorptivité exprime la tendance d'un matériau à absorber et transmettre l'eau et d'autres liquides par capillarité.

Le sorptivité est largement utilisée pour caractériser les sols et les matériaux de construction poreux, tels que la brique, la pierre et du béton.

$$I = S\sqrt{t} \quad (\text{I.14})$$

S: sorptivité $m^{s-1/2}$

I: L'infiltration cumulative à l'instant t

I.4. Equations générales de l'écoulement

Les équations régissant les transferts d'eau en milieu non saturé ont été initialement définies dans le cas de sols non saturés indéformables, avec continuité de la phase gazeuse, ce qui permet de considérer qu'à tout instant la pression d'air est égale à la pression atmosphérique. Ces hypothèses sont valables dans les sables, pour lesquels la pression d'entrée d'air correspond à de faibles succions. Les premiers calculs sont dus à Richards.

I.4.1. L'équation de continuité (Équation de Richards)

Pour tenir compte, lors d'un écoulement de fluide compressible dans un milieu poreux non saturé, aussi bien des processus d'écoulement transitoire que permanent, l'équation de continuité s'écrit sous la forme générale suivante : (Zadjaoui, 2009)

$$\frac{\partial(\rho_w \theta)}{\partial t} = -\text{div}(\rho_w \mathbf{q}) \quad (\text{I.15})$$

ρ_w : Masse volumique du fluide [kg/m^3]

θ : teneur en eau volumique du milieu [m^3/m^3]

\mathbf{q} : flux [$\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s} = \text{m}/\text{s}$].

Si on suppose le fluide incompressible (cas de l'eau), l'équation (I.15) devient :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\text{div}(\mathbf{q}) \quad (\text{I.16})$$

I.4.2. Equation cinématique

Cette équation exprime la proportionnalité entre le flux de transfert et le gradient du potentiel qui le provoque. Par analogie avec la loi de Darcy énoncée pour l'écoulement en milieu poreux saturé, cette relation fut nommée équation de Darcy généralisée. (Buckingham, 1907 ; Richards, 1931 ; Childs et Collis-George, 1950) Cité dans (Zadjaoui, 2009).

Elle est représentée sous sa forme générale par :

$$\mathbf{q} = -K(\theta)\text{grad}\phi \quad (\text{I.17})$$

$K(\theta)$: Conductivité hydraulique [m/s]

ϕ : Potentiel de l'eau [m]

\mathbf{q} : flux [m/s].

I.4.3. Equation d'écoulement

Elle résulte de la combinaison de l'équation de continuité et de l'équation cinématique Elle s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \text{div}(K(\theta)\text{grad}\phi) \quad (\text{I.18})$$

Ou en fonction de la succion ψ :

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \text{div}(K(\theta)\text{grad}(\psi(\theta) - z)) \quad (\text{I.19})$$

I.4.3.1. Equation en θ :

En introduisant la diffusivité $D(\theta)$ (équation I.12) dans l'équation générale de l'écoulement(I.18) on obtient:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \text{div}(D(\theta)\text{grad}(\theta)) - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (\text{I.20})$$

Avec: $D(\theta) = K(\theta) \frac{\partial\psi}{\partial\theta}$

I.4.3.2. Equation en ψ :

L'introduction de la capacité capillaire du sol :

$$C(\psi) = \frac{\partial\theta}{\partial\psi} \quad (\text{I.21})$$

L'équation(I.18) s'écrit sous la forme:

$$C(\psi) \frac{\partial\psi}{\partial t} = \text{div}(K(\psi)\text{grad}(\psi)) - \frac{\partial k(\psi)}{\partial z} \quad (\text{I.22})$$

I.5. Formes particulières de l'équation d'écoulement

En considérant le phénomène d'infiltration, on peut utiliser des formes particulières de l'équation d'écoulement (I.18).

Deux cas de figure peuvent être distingués, l'eau est entraînée dans le sol par les seules forces matricielles, c'est le cas d'une absorption (une infiltration horizontale), ou alors aux forces matricielles s'ajoute le potentiel gravitaire, c'est le cas d'une infiltration verticale. (Zadjaoui, 2009).

I.5.1 Infiltration horizontale (Cas de l'absorption)

Pour une infiltration unidimensionnelle à l'intérieur d'une colonne horizontale de sol uniforme et de longueur infinie, l'équation d'écoulement (I.18) s'écrit sous la forme (Philip, 1957a; b et Swartzendruber, 1969):

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) \quad (I.23)$$

Où x est l'ordonnée horizontale. En termes de diffusivité, cette équation devient :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (I.24)$$

I.5.2. Infiltration verticale

L'équation de l'écoulement de l'eau dans une colonne verticale de sol est donnée par (l'axe référence z est orienté positivement vers le haut):

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) \pm \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (I.25)$$

Le signe (-) est utilisé dans l'équation (I.25) pour une infiltration verticale descendante alors que le signe (+) est utilisé pour une remontée capillaire. (Zadjaoui, 2009).

En termes de diffusivité, l'équation (I.25) devient:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \pm \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (I.26)$$

I.6. Propriétés hydrodynamiques d'un sol non saturé

I.6.1. Relation teneur en eau et succion du sol

Considérons un sol initialement saturé en eau. Si on lui applique une pression d'air, à partir d'une valeur de pression critique appelée d'entrée d'air du sol, les larges pores commencent à se vider. La loi de Jurin ($s=U_a-U_w = 2\sigma\cos\theta/r$) permet d'affirmer qu'une augmentation de la pression d'air appliquée au sol entraînera un drainage de pores de taille de plus en plus réduite jusqu'à ce que pour de fortes succions, seuls les pores de très petites dimensions retiennent l'eau. La succion du sol est donc reliée à la qualité d'eau qui y est présente à cause des interactions de type capillaire ou d'adsorption entre l'eau et les particules du sol. Cette relation est une caractéristique spécifique d'un type de sol et peut être déterminée expérimentalement par les méthodes de mesure et d'imposition de succion citées précédemment. Elle est représentée graphiquement par une courbe appelée «courbe de rétention d'humidité dans le sol $\psi(\theta)$ » (**figure I-6**) dont l'analyse s'avère délicate (Zadjaoui, 2009).

La **figure I-6** représente un exemple de la courbe de rétention en chemin de séchage pour différents sols (sable de rivière, sable fin et une argile).

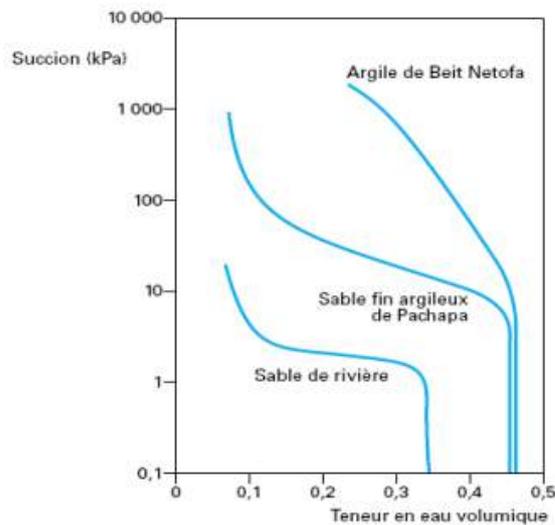


Figure I-6: Courbes de séchage de différents sols (Delage et Cui, 2000).

I.6.2. Relation entre la conductivité hydraulique et la succion du sol

En conditions saturées, le potentiel matriciel est nul et la teneur en eau est maximale, la conductivité est alors constante et sa valeur est maximale. Au fur et à mesure que le sol se désature, sa teneur en eau diminue et sa succion augmente. Ceci entraîne une augmentation de la tortuosité des chemins d'écoulement, une diminution des débits d'écoulement et un changement des propriétés de l'eau dans le sol. De ce fait, la conductivité hydraulique diminue rapidement. La relation entre la conductivité hydraulique et la succion du sol est complexe et dépend du type de sol considéré. La figure I.7 montre l'allure générale de la dépendance entre la conductivité et la succion pour deux sols de textures différentes. Par rapport aux sols argileux, les sols sableux montrent une conductivité nettement élevée à la saturation et qui diminue rapidement avec l'augmentation de la succion jusqu'à des valeurs inférieures à celles du sol argileux. Ceci s'explique par le fait que dans un sol à petits pores, un grand nombre d'entre eux restent pleins et conduisent l'eau, bien que la teneur en eau diminue. D'un autre côté, la relation $k(\theta)$ peut être exprimée en fonction de la perméabilité intrinsèque K_{int} (m^2) comme le montre l'équation (I.10). (Zadjaoui, 2009)

Il est important de souligner que la relation entre la conductivité et la succion dépend de l'hystérésis (figure I.8) et diffère si le sol est en voie de dessèchement ou en voie d'humidification. La raison est que pour une même succion, un sol qui se dessèche contient plus d'eau qu'un sol qui s'humecte; en revanche, la relation conductivité hydraulique-teneur en eau semble moins affectée par ce phénomène. (Cazaux, 1998)

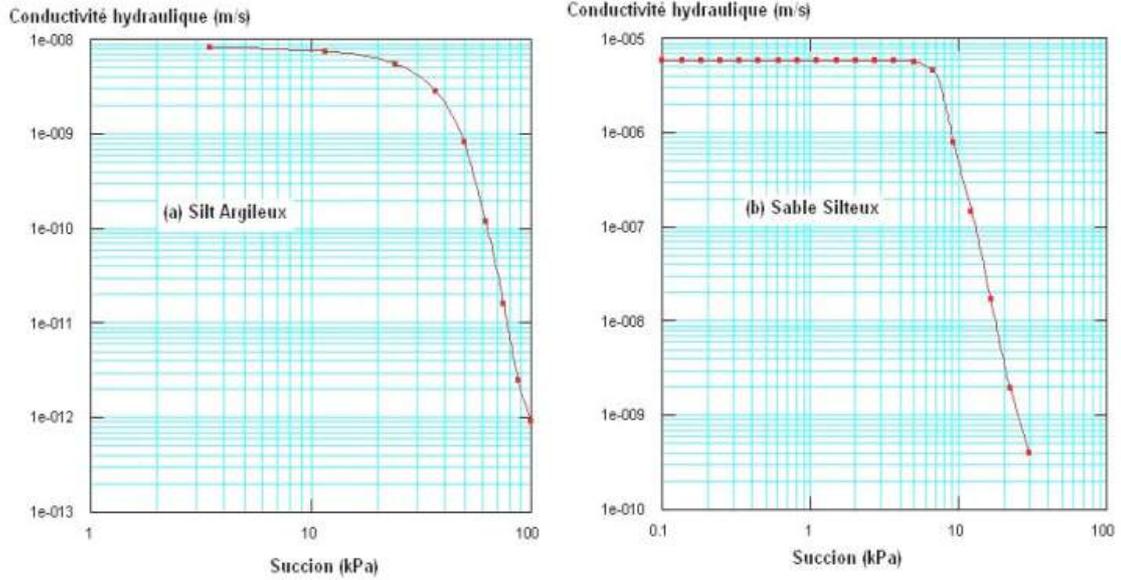


Figure I-7: Allure des relations entre la conductivité hydraulique et la suction de deux sols
(Vadose/w, 2002)

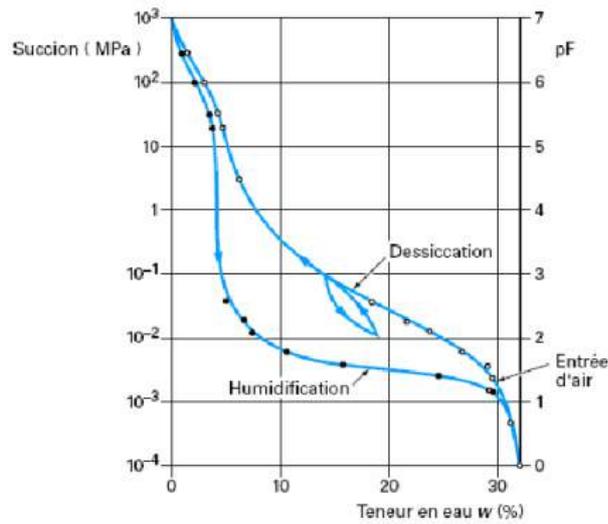


Figure I-8: Courbe de rétention d'un sol argileux (illustration de phénomène d'hystérésis)
(Delage et Cui, 2000).

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini les paramètres et les variables caractérisant les sols non saturés. Le paramètre succion constitue un paramètre essentiel pour la description du mouvement de l'eau (écoulement et infiltration) dans la zone non saturé.

Chapitre II :

**L'infiltration de l'eau et des solutés dans
les sols non saturés**

II.1. Introduction

Les écoulements représentent une partie essentielle du cycle hydrologique. L'eau précipitée sur un bassin versant va se répartir en eau interceptée, évaporée, infiltrée et écoulee. La quantité d'eau collectée puis transportée par la rivière résultera des précipitations directes à la surface même du cours d'eau et des écoulements de surface et souterrain parvenant à son exutoire. La proportion entre ces deux types d'écoulements est définie par la quantité d'eau infiltrée dans le sol. (Talatizi, 2014)

Les différents processus d'infiltration et d'écoulements participant à la génération de crue sont représentés de manière schématique dans la **figure II-1**.

II.2. Le cycle hydrologique

Le cycle hydrologique est un concept qui englobe les phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur la terre. C'est une succession des phases par lesquelles l'eau passe de l'atmosphère à la terre et retourne à l'atmosphère : évaporation à partir des terres, des mers ou des nappes d'eau continentales, condensation en nuages, précipitations, accumulation dans le sol ou à sa surface et réévaporations (Makhlouf, 2015).

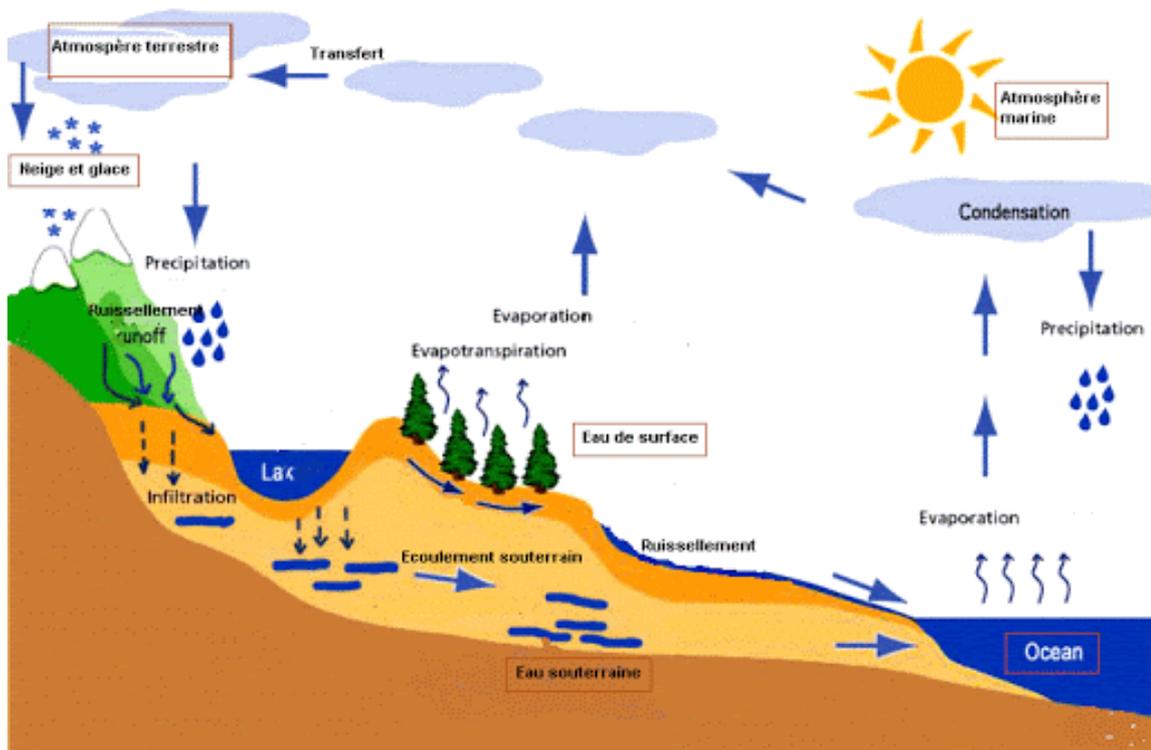


Figure I-1: Représentation du cycle de l'eau (Makhlouf, 2015)

II.2.1. Les précipitations

Sont dénommées précipitations toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre....). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression.

La vapeur d'eau de l'atmosphère se transforme en liquide lorsqu'elle atteint le point de rosée par refroidissement ou augmentation de pression.

Les précipitations sont exprimées en intensité (mm/h) ou en lame d'eau précipitée (mm) (rapport de la quantité d'eau précipitée uniformément répartie sur une surface), (Musy et al, 2004).

II.2.2. L'évaporation/l'évapotranspiration

L'évaporation se définit comme étant le passage de la phase liquide à la phase vapeur. Il s'agit de l'évaporation physique. Les plans d'eau et la couverture végétale sont les principaux solides (glace) en vapeur. Le principal facteur régissant l'évaporation est la radiation solaire.

Le terme évapotranspiration englobe l'évaporation et la transpiration des plantes (Makhlouf, 2015). On distingue :

L'évapotranspiration réelle (ETR) : somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et par les plantes quand le sol est à une certaine humidité et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire spécifique.

L'évapotranspiration de référence (ET₀) (anciennement évapotranspiration potentielle) : quantité maximale d'eau susceptible d'être perdue en phase vapeur, sous un climat donné, par un couvert végétal continu spécifié (gazon) bien alimenté en eau et pour un végétal sain en pleine croissance. Elle comprend donc l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration du couvert végétal pendant le temps considéré pour un terrain donné.

II.2.3.L'interception et le stockage dans les dépressions

La quantité d'eau susceptible d'être interceptée varie considérablement. Si la végétation offre une grande surface basale ou foliaire, donc un important degré de couverture, la rétention d'eau peut atteindre jusqu'à 30% de la précipitation totale pour une forêt mixte, 25% pour les prairies et 15% pour les cultures. (Musy, Higy., 2003)

II.2.4.L'infiltration et la percolation

L'infiltration est nécessaire pour renouveler le stock d'eau du sol, alimenter les eaux souterraines et reconstituer les réserves aquifères. De plus, en absorbant une partie des eaux de précipitation, l'infiltration peut réduire les débits de ruissellement (Makhlouf, 2015).

La percolation représente plutôt l'infiltration profonde dans le sol, en direction de la nappe phréatique. Le taux d'infiltration est donné par la tranche ou le volume d'eau qui s'infiltrer par unité de temps (mm/h ou m³/s). La capacité d'infiltration ou l'infiltrabilité est la tranche d'eau maximale qui peut s'infiltrer par unité de temps dans le sol et dans des conditions données. (Makhlouf, 2015).

II.2.5.Les écoulements

Les écoulements souterrains et en rivière font explicitement référence à la notion de débit, à savoir à un volume d'eau traversant une section par unité de temps (L^3/T), (Musy et al, 2004).

II.3. L'infiltration

L'estimation de l'importance du processus d'infiltration permet de déterminer quelle fraction de la pluie va participer à l'écoulement de surface, et quelle fraction va alimenter les écoulements souterrains et donc aussi participer à la recharge des nappes souterraines (Musy et Higy, 2003).

II.3.1. Description du Processus d'infiltration

L'**infiltration** qualifie le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol, lorsque celui-ci reçoit une averse ou s'il est exposé à une submersion (Zadjaoui, 2009) . L'eau d'infiltration remplit en premier lieu les interstices du sol en surface et pénètre par la suite dans le sol sous l'action de la gravité et des forces de succion. L'infiltration influence de nombreux aspects de l'hydrologie, du génie rural ou de l'hydrogéologie. (Musy et Soutter, 1991) Afin d'appréhender le processus d'infiltration, on peut définir:

- Le **régime d'infiltration $i(t)$** , nommé aussi taux d'infiltration, qui désigne le flux d'eau pénétrant dans le sol en surface (Zadjaoui, 2009) (Il est généralement exprimé en mm/h. Le régime d'infiltration dépend avant tout du régime d'alimentation (irrigation, pluie), de l'état d'humidité et des propriétés du sol.
- L'**infiltration cumulative, notée $I(t)$** , est le volume total d'eau infiltrée pendant une période donnée (Zadjaoui, 2009). Elle est égale à l'intégrale dans le temps du régime d'infiltration (**Figure II-2**).

$$I(t) = \int_{t=t_0}^t i(t) \cdot dt \quad (\text{II.1})$$

Avec:

$I(t)$: infiltration cumulative au temps t [mm]

$i(t)$: régime ou taux d'infiltration au temps t [mm/h].

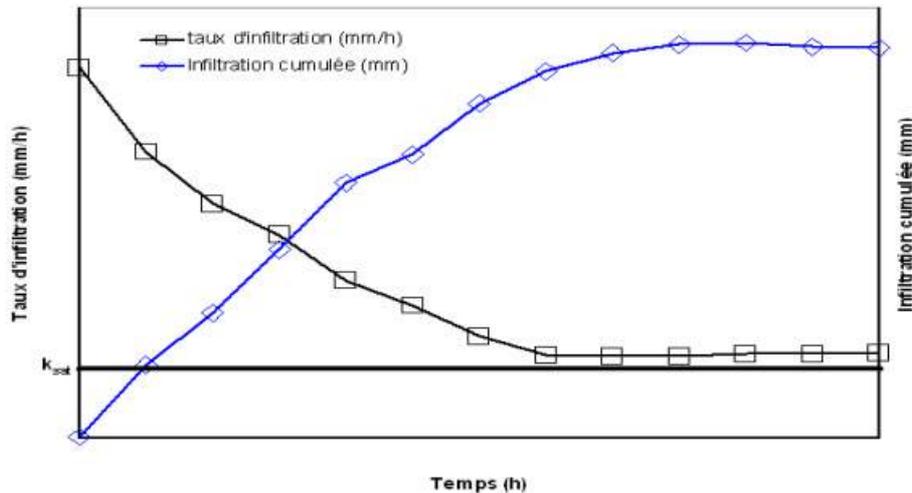


Figure II-2: Evolution générale du régime d'infiltration et de l'infiltration cumulative au cours du temps Musy et Soutter, 199, citer dans (Zadjaoui, 2009)

- La **conductivité hydraulique à saturation K_s** est un paramètre essentiel de l'infiltration. Il représente la valeur limite du taux d'infiltration si le sol est saturé et homogène (Zadjaoui, 2009). Ce paramètre entre dans de nombreuses équations pour le calcul de l'infiltration.
- La **capacité d'infiltration** ou capacité d'absorption (ou encore infiltrabilité) représente le flux d'eau maximal que le sol est capable d'absorber à travers sa surface, lorsqu'il reçoit une pluie efficace ou s'il est recouvert d'eau. Elle dépend, de la conductivité hydraulique, de la texture et de la structure du sol, mais également des conditions aux limites, c'est à dire, la teneur en eau initiale du profil et la teneur en eau imposée en surface. (Zadjaoui, 2009)

- **La percolation** désigne l'écoulement plutôt vertical de l'eau dans le sol (milieu poreux non saturé) en direction de la nappe phréatique, sous la seule influence de la gravité. Ce processus suit l'infiltration et conditionne directement l'alimentation en eau des nappes souterraines (Zadjaoui, 2009).
- **La pluie nette** représente la quantité de pluie qui ruisselle strictement sur la surface du terrain lors d'une averse. La pluie nette est déduite de la pluie totale, diminuée des fractions interceptées par la végétation et stockée dans les dépressions du terrain.

II.3.2. Facteurs influençant l'infiltration

L'infiltration est conditionnée par les principaux facteurs ci-dessous :

- **Le type de sol** (structure, texture, porosité) : Les caractéristiques de la matrice du sol influencent les forces de capillarité et d'adsorption dont résultent les forces de succion, qui elles-mêmes, régissent en partie l'infiltration. (Musy et Soutter, 1991)
- **La compaction de la surface du sol** due à l'impact des gouttes de pluie (battance) ou à d'autres effets (thermiques et anthropiques) ou au passage d'engins lourds comme les machines agricoles dans les champs peut par exemple avoir pour conséquence la dégradation de la structure de la couche de surface du sol et la formation d'une croûte dense et imperméable à une certaine profondeur (sensible au labour). **La figure II-3** montre à titre d'exemple les différentes évolutions du régime d'infiltration au cours du temps selon le type de sol.

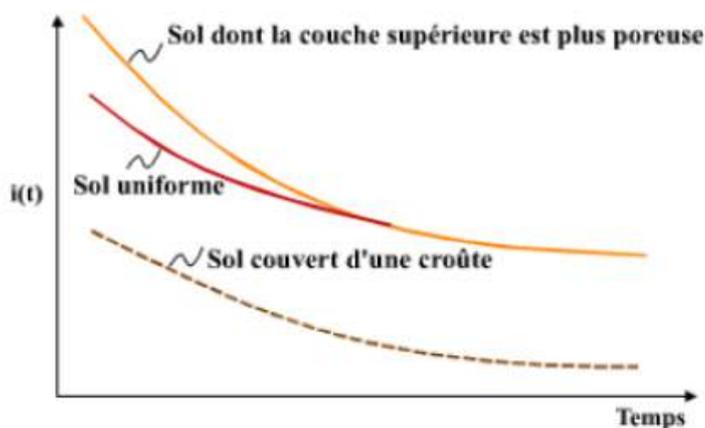


Figure II-9:Régime d'infiltration en fonction du temps pour différents types de sol (Musy, Soutter, 1991).

- **La couverture du sol** : La végétation influence positivement l'infiltration en ralentissant l'écoulement de l'eau à la surface, lui donnant ainsi plus de temps pour pénétrer dans le sol. D'autre part, le système racinaire améliore la perméabilité du sol. Enfin, le feuillage protège le sol de l'impact de la pluie et diminue par voie de conséquence le phénomène de battance. (Talatizi, 2014)
- **La topographie et la morphologie** : La pente par exemple agit à l'opposé de la végétation. En effet, une forte pente favorise les écoulements au dépend de l'infiltration. (**Musy et Soutter, 1991**)
- **Le débit d'alimentation** (intensité de la précipitation, débit d'irrigation). (Talatizi, 2014)
- **La teneur en eau initiale du sol** (conditions antécédentes d'humidité) : L'humidité du sol est un facteur essentiel du régime d'infiltration, car les forces de succion sont aussi fonction du taux d'humidité du sol. (Musy et Soutter, 1991)

Finalement, les facteurs les plus influents, pour une même topographie, sont le type de sol, sa couverture et son taux initial d'humidité.

II.4. Les modèles d'infiltration

Le processus physique de l'infiltration concerne le mouvement de l'eau dans le sol. Plusieurs modèles ont été proposés pour décrire le phénomène d'infiltration. La plus part de ces modèles visent l'estimation de la valeur de la perméabilité du sol.

L'ensemble de ces modèles sont d'édécuit de la résolution d'Equation de l'écoulement (I.17)

II.4.1. Modèle empirique

Les formulations empiriques ont été développées pour analyser les résultats des essais d'infiltromètre. Les équations qui en résultent sont utilisées pour décrire l'évolution de l'infiltration cumulée et de la vitesse d'infiltration en fonction du temps.

II.4.1.1. Modèle de Horton 1940 (03 paramètres)

Horton proposa l'équation suivante pour décrire le processus d'infiltration :

$$i(t) = i_f + (i_0 - i_f) \cdot e^{-\gamma \cdot t} \quad (\text{II.2})$$

Avec:

$i(t)$: capacité d'infiltration au temps t [mm/h]

i_o : capacité d'infiltration max ou initiale [mm/h]

i_f : capacité d'infiltration du sol saturé ou finale [mm/h]

t : temps écoulé depuis le début de l'averse [min]

γ : constante empirique, fonction de la nature du sol >0 [min^{-1}].

L'utilisation de ce type d'équation, quoique répandue, reste limitée, car la détermination des paramètres, i_o , i_f , et γ présente certaines difficultés pratiques.

II.4.1.2. Formule de l'institut d'aménagement des terres et des eaux de l'EPFL

La relation est légèrement différente de celle de Horton (seulement deux paramètres). Elle est du type :

$$i(t) = i_f + a \cdot e^{-bt} \quad (\text{II.3})$$

Avec:

$i(t)$: capacité d'infiltration au temps t [mm/h],

i_f : Capacité d'infiltration finale [mm/h],

a et b : coefficients d'ajustement.

Cette relation a l'avantage de permettre la recherche de relations fonctionnelles, d'une part entre la capacité limite (ou finale) d'infiltration et la texture du sol, d'autre part entre le paramètre a et l'humidité volumique. On lève ainsi l'indétermination sur certains paramètres par l'intervention de caractéristiques objectives.

D'autres formules peuvent être utilisées pour déterminer le régime d'infiltration de l'eau du sol (**tableau II-1**). Elles font tous appels à des coefficients empiriques à évaluer en fonction du type de sol rencontré.

Tableau II-1: Principales fonctions d'infiltration utilisées (D'après Jaton, 1982).

Auteur	Fonction	Légende
Horton(1940)	$i(t) = i_f + (i_0 - i_f). e^{-\gamma t}$	$i(t)$: capacité d'infiltration au cours du temps (cm/s) i_0 : capacité d'infiltration initiale (cm/s) i_f : capacité d'infiltration finale (cm/s) γ : constante fonction de la nature du sol (min^{-1})
Kostiakov (1932)	$i(t) = i_0. t^{-a}$	a: paramètre fonction des conditions du sol
Holtan 1965	$i(t) = i_f + c. w. ((IMD) - F)^n$	c: facteur variant de 0,25 à 0,8 w: facteur d'échelle de l'équation de Holtan n: exposant expérimental proche de 1,4
Dooge 1974	$i(t) = a. (F_{max} - F_t)$	a: constante F_{max} : capacité de rétention maximale F_t : teneur en eau au temps
Morel-seytoux 1974	$\frac{(\theta_s - \theta_i)hc + \alpha w}{\beta w}$	θ_s :teneur en eau a saturation θ_i :teneur en eau à l' instant t hc : poussée capillaire mm w : lame d'eau infiltrée cumulée mm α, β :paramètre correctifs

II.4.2. Modèles basés sur des approches physiques

Les modèles physiques sont basés sur des approximations à partir de l'équation d'écoulement dans un sol non saturé. Certains d'entre eux sont basés sur des hypothèses simplificatrices telles que le modèle de Green et Ampt (1911) et ne sont applicables que pour des sols à texture grossière dans des conditions bien précises (R. Chérifl, J.-L. Robert1 et R 2004). . D'autres modèles tel que celui de Philip (1957) sont basés sur des solutions analytiques de l'équation d'écoulement (Green et Ampt 1911). Ces modèles ont fait preuve de leur validité pour de nombreux sols étudiés.

II.4.2.1. Modèle de Green & Ampt 1911

$$i(t) = K_s \left[1 + \frac{h_0 - h_f}{Z_f(t)} \right] \quad (\text{II.4})$$

K_s : conductivité hydraulique à saturation [mm/h]

h_0 : charge de pression en surface [mm]

h_f : charge de pression au front d'humidification [mm]

z_f : profondeur atteinte par le front d'humidification [mm]

Le modèle de Green et Ampt est essentiellement semi-empirique car la valeur de la pression effective au niveau du front d'humidification doit être trouvée expérimentalement.

II.4.2.2. Modèle de Philip 1957

$$i(t) = \frac{1}{2} \cdot S \cdot t^{-0.5} + A \quad (\text{II.5})$$

S: sorptivité [$\text{cm} \cdot \text{s}^{-0.5}$]

A: composante gravitaire fonction de la conductivité hydraulique à saturation [cm/s]

II.5. Paramètre influençant le phénomène d'infiltration

II.5.1. Influence de la teneur en eau volumique initiale

L'augmentation de teneur en eau volumique initiale θ_i du sol provoque, au cours d'une infiltration, une diminution de la vitesse d'infiltration d'eau v_0 dans le sol. Cet effet s'atténue quand le temps d'infiltration augmente, et par conséquent la vitesse d'infiltration finale n'est pas influencée (Philip, 1957 e), ce qui donne avec l'augmentation du temps, le parallélisme des courbes d'infiltration correspondantes (figure II-4 a). En plus, l'augmentation de θ_i induit un accroissement de la vitesse d'avancement du front d'humidification dans le profil du sol (figure II-4 b). Ceci est dû au fait que, quand θ_i augmente, la capacité de stockage du sol diminue.

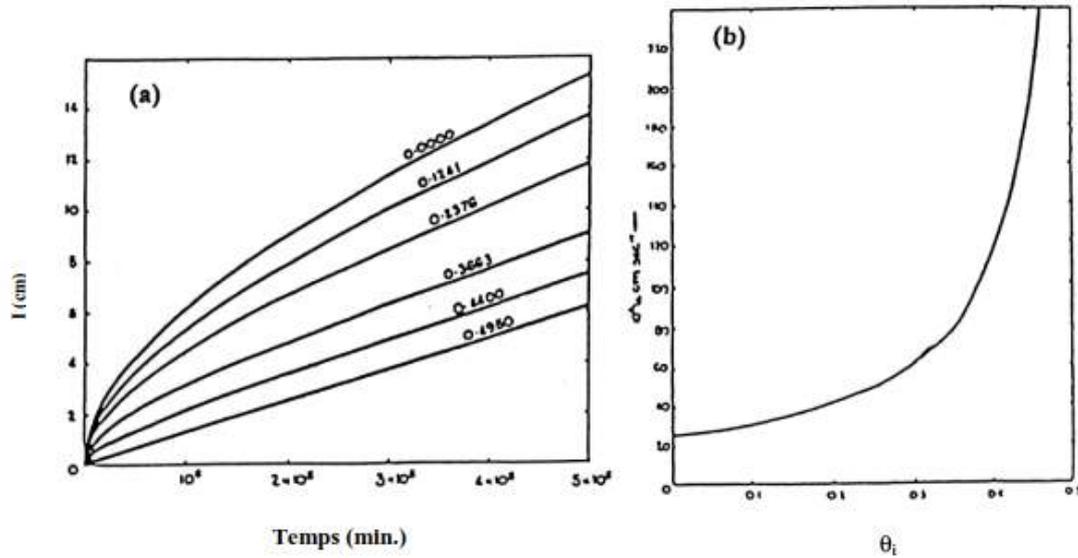


Figure II-4: influence de teneur en eau volumique initiale. (Philip, 1957)

(a) : infiltration cumulée I ,

(b) : vitesse d'avancement du front d'humidification.

Cité dans (Gaidi, 2001)

II.5.2. Influence de la charge hydrique

L'augmentation de la charge d'eau, appliquée à la surface d'un sol au cours d'une infiltration, provoque un accroissement de la vitesse de pénétration de l'eau v_0 au début de l'infiltration. Cet accroissement devient de moins en moins important quand le temps d'infiltration tend vers l'infini (figure II-5 a) (Philip, 1969). On peut observer le même phénomène sur la vitesse d'avancement du front d'humidification dans le sol. Lorsque le temps important, les pentes des courbes d'infiltration tendent graduellement vers la vitesse infiltration finale (figure II-5 b).

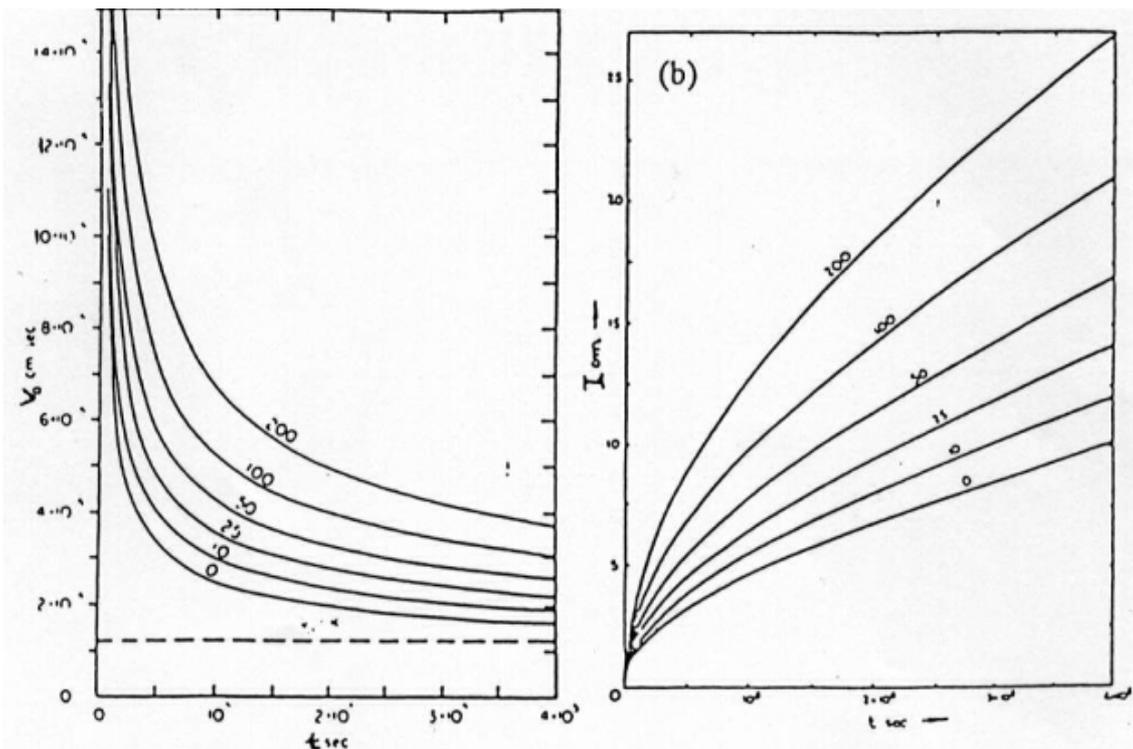


Figure II-5: Influence de la charge d'eau.(a) : vitesse d'infiltration v_0 (Philip, 1969). (b) : infiltration cumulée I (Philip, 1957 f)

II.6. Les polluants liés à l'infiltration des eaux pluviales

II.6.2. Les Substances inorganiques

Cette catégorie de polluants regroupe les composés métalliques, les nitrates, les phosphates et les sels. Néanmoins, ils ont aussi la particularité commune de pouvoir être présents dans le sol sous forme organique et inorganique, ce qui leur confère un comportement différent d'une forme à l'autre (Yaron et al., 1996). Ils peuvent alors être considérés comme des produits organiques.

II.6.2.1. Les éléments traces

Les éléments traces ont un comportement différent selon leur forme chimique. La spéciation est la distinction entre les liaisons chimiques, elle permet ainsi la différenciation entre les espèces.

La forme chimique d'une substance, et notamment d'un métal détermine son comportement dans un milieu aqueux ainsi que sa toxicité pour les organismes vivants. A l'état ionisé, ils peuvent être absorbés par les plantes ou être retenus par le sol par échange d'ions. Sous forme d'oxydes, et selon un pH et un taux d'oxygène favorables, ils peuvent être adsorbés par les particules d'argile, la matière organique, les hydroxydes de fer ou les oxydes de manganèse (Martinelli, 1999)

Chapitre II : l'infiltration de l'eau et des solutés dans les sols non saturés

Les métaux peuvent aussi former des complexes avec des ligands organiques, et être alors solubles. Ils sont alors à la fois plus mobiles et plus biodisponibles. (Martinelli, 1999)

Le zinc et le cadmium restent relativement mobiles dans le sol, alors que le plomb et le cuivre sont plus fortement retenus. A pH et Eh constants (ou subissant de très faibles variations), une forte oxygénation permet d'éviter ou de limiter le relargage des métaux lourds. (Le Roch, 1990-91).

a. Plomb

Le plomb est un élément chimique toxique, cumulatif pour l'homme, la faune et la flore (Chassard-Bouchaud, 1995). Sa présence dans les eaux ou le sol ne peut être que néfaste. De plus, il est particulièrement connu pour ses capacités de bioaccumulation et de bioamplification tout au long de la chaîne alimentaire, ainsi que pour sa très forte rémanence. Le cycle du plomb est un cycle ouvert, il y a une constante accumulation, notamment dans les sédiments marins (Ramade, 1992).

b. Cadmium

Le cadmium est un élément non essentiel (Chassard-Bouchaud, 1995), toxique pour l'homme à très faible dose (100 µg/jour). Sa toxicité est aggravée par ses capacités de bioaccumulation, c'est dire qu'il ne peut pas ou quasiment ne pas être éliminé après avoir été absorbé. (Cazenave et al., 1993)

c. Zinc

Le zinc a lui aussi une origine principalement anthropique. A titre d'illustration, citons que 96% des émissions atmosphériques de zinc sont d'origine anthropique (Colandini, 1997). Dans les eaux de ruissellement, il provient surtout du lessivage des toitures, de la corrosion des canalisations et des matériaux galvanisés ainsi que de l'usure des pneumatiques (Chocat, 1997).

d. Cuivre

Les émissions atmosphériques de cuivre d'origine anthropique représentent 93% des quantités totales émises (Colandini, 1997). Le cuivre contenu dans les eaux de ruissellement pluvial provient également de la corrosion des toitures et des gouttières. L'industrie céramique, textile, photographique, ou les tanneries sont aussi de gros producteurs de cuivre, de même que l'agriculture lorsqu'elle utilise des insecticides contenant des sels de cuivre (Chocat, 1997).

II.6.2.2. Les nutriments (azote, phosphore) et les sels

L'évolution de différents paramètres en fonction de la distance de filtration dans le sol est donnée par le tableau II-2 d'après J.M. Toups cité dans (Detay, 1997). Ce tableau dresse le bilan de l'évolution des principaux sels dissous dans l'eau de recharge lors du processus d'infiltration dans le sol.

Tableau II-2: Evolution des principaux sels dissous lors du processus d'infiltration dans le sol d'après Toups cité dans (Detay, 1997).

Elément dosé	surface	0,6m	1,2m	1,8m	2,5m
Eléments inchangé					
sodium(Na) en mg/1	152	120	142	140	138
Sulfates(SO ₄) en mg/1	164	160	164	161	168
Chlorures(Cl) en mg/1	126	134	131	130	126
Ph	8,02	7,69	7,87	7,84	7,78
Eléments qui augmentent					
Calcium (ca) en mg/1	60,8	132	127	139	138
Magnésium(Mg) en mg/1	19,9	20,9	19,4	17,9	30,1
Bicarbonates(HCO ₂) en mg/1	38,5	369	336	395	487
total substances dissoutes	1011	994	1050	1080	1200
Dureté totale(CaCo ₃)	234	411	398	422	520

D'après le tableau on constate que la disparition de l'ion ammonium parvient dans les 60 premiers centimètres de sol. Ceci pourrait être expliqué par le fait que cette zone correspond à l'activité biologique maximale, donc à l'assimilation et à l'oxydation maximale de cet ion (Martinelli, 1999)

On associe très souvent la présence de nutriments au milieu rural, et pourtant les sources urbaines ne sont pas négligeables (Martinelli, 1999). Effectivement, les deux tiers des apports d'azote aux eaux superficielle incombent à l'agriculture (Dubois de la Sablonière, 1998). Le tiers restant est donc supposé d'origine urbaine.

a. Produits azotés

L'origine, le comportement et la toxicité de l'azote (N) dépendent de la forme sous laquelle il se trouve.

La figure suivante schématise les transformations et formes chimiques de l'azote.

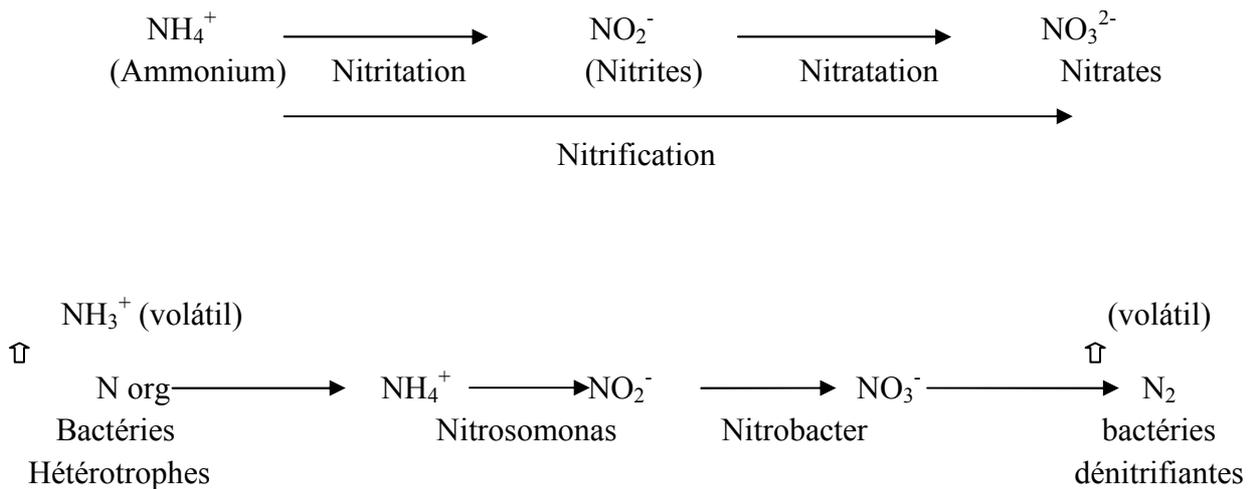


Figure II-6: Schéma des transformations possibles de l'azote (Martinelli, 1999)

b. Produits phosphatés

Le phosphore est un élément essentiel à la croissance des êtres vivants (végétaux et animaux). Les phosphates sont les formes minérales du phosphore, formés à partir des ions PO_4^{3-} (ils sont généralement peu solubles dans l'eau). Les formes hydrogénées (H_2PO_4^- et HPO_4^{2-}) sont beaucoup plus solubles (Chocat, 1997). La forme sous laquelle se trouve le phosphore (PO_4^{3-} , PO_5 , H_2PO_4^- et HPO_4^{2-}) dépend du pH. Dans les eaux naturelles (pH compris entre 5 et 8), on trouve essentiellement : H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} . (Martinelli, 1999)

Les phosphates sont généralement rapidement dégradés, et puisque leurs concentrations ne sont pas très élevées dans les eaux de ruissellement urbain, ils ne sont pas considérés comme un polluant majeur dans ce contexte (Martinelli, 1999). La pollution des eaux superficielles par les phosphates est parfois préoccupant, mais en ce qui concerne le sol, ce type d'apport ne semble pas constituer un cas critique. Par contre, la présence de phosphates dans les eaux souterraines est généralement le témoin d'une pollution par d'autres substances. On peut dire que si une nappe d'eau souterraine est polluée par des phosphates, c'est qu'elle l'est aussi par beaucoup d'autres éléments (Potelon, 1993).

c. Les sels

Les sels que l'on trouve dans les eaux de ruissellement sont régis par un équilibre entre la phase dissoute et la phase particulaire. On trouve alors les cations Na^+ , Ca^{2+} , K^+ et les anions Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^{2-} et CO_3^{2-} . (Martinelli, 1999)

II.7. Les processus liés à l'infiltration des eaux pluviales et au transfert des polluants associés

II.7.2. Processus physiques

II.7.2.1. Percolation

La percolation est le mouvement de l'eau dans un milieu poreux sous le seul effet de la gravité. (Musy et al., 1991).

II.7.2.2. Lixiviation

La lixiviation est le transport convectif des particules dissoutes dans l'eau ou dans la solution de sol. La fraction dissoute des polluants est supposée migrer dans le sol à la même vitesse que l'eau. La représentation de ce phénomène est déduite de la représentation de l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux. Puisque cette dernière n'est effective qu'à partir de l'échelle macroscopique, il en sera de même pour le transport convectif (ou diffusif) des polluants (Rivière, 1998), (Musy et al., 1991),

Comme pour la percolation, l'échelle privilégiée de représentation de la lixiviation est l'échelle macroscopique.

II.7.2.3. Diffusion

Pour les mêmes raisons que précédemment, la diffusion moléculaire n'est représentée qu'à partir de l'échelle macroscopique (la colonne de laboratoire, de quelques cm^3 au dm^3). (Yaron et al., 1996)

Lorsque le solvant est immobile, le transport de soluté peut se faire par diffusion. Le taux de diffusion est alors proportionnel au gradient de potentiel chimique, (Musy et al., 1991), (Gautier, 1998)

II.7.2.4. Lessivage

C'est le transport convectif des particules ou des colloïdes en suspension, par l'eau ou par la solution de sol. Le terme « colloïde » est utilisé pour caractériser des composés de petite taille, entre la molécule et la particule, c'est à dire d'une taille comprise entre 1 nm et 1 μm . Leur solubilité est très faible mais elles possèdent des propriétés chimiques qui leur confèrent une forte capacité d'adsorption (notamment grâce à leur grande surface spécifique). Elles jouent donc le rôle de transporteur de polluants. (Martinelli, 1999).

II.7.2.5. Filtration mécanique

Le sol est un milieu poreux qui joue le rôle de filtre mécanique vis à vis des particules en suspension dans l'eau. De par sa porosité et donc la taille de ses pores, il ne permet le passage que des particules d'une taille beaucoup plus petite.

Il est admis que la filtration mécanique, même par les minéraux argileux formant des pores de très petite taille, n'a lieu que pour les ions de taille importante ou les grandes molécules formant des complexes entre plusieurs ions (De Marsily, 1994).

II.7.3. Processus chimiques

II.7.3.1. Photolyse

Sur une profondeur d'environ 5 mm, le sol peut avoir un comportement très différent du sol plus profond et subir notamment les effets des radiations solaires. Ceci implique qu'il peut y avoir dans cette zone ou en surface, une photo dégradation des polluants. Mis à part pour un composé particulièrement sensible au rayonnement solaire ou dans ce cas l'étude fine de ce processus à l'échelle microscopique (peut-être macroscopique), la photolyse est rarement prise en compte dans l'étude des transferts de polluants dans le sol, elle peut pourtant être importante à la surface du sol. (Martinelli, 1999).

II.7.3.2. Hydrolyse

L'hydrolyse est la rupture d'une liaison chimique sous l'action de l'eau. Elle est principalement associée aux minéraux constitutifs de la matrice solide. Elle y provoque en effet un réarrangement du réseau cristallin. Elle dépend des conditions climatiques et est accentuée par une température et une humidité élevées. Le pH a lui aussi une influence sur l'hydrolyse.

L'activité des micro-organismes a tendance à catalyser ce processus. L'hydrolyse peut être acide ou basique (Gobat et al., 1998).

II.8. Modes de transport

Les mécanismes de transport fondamentaux sont la convection et la dispersion. (Destribats, 1994)

II.8.1. Convection

Lois de Darcy décrit le transport de soluté (phase homogène liquide contenant plusieurs espèces chimiques, Wikipedia.com) par le mouvement général de l'eau en zone saturée à la vitesse

constante q . Le flux massique convectif du soluté (au travers d'une surface unitaire perpendiculaire au sens de l'écoulement) est donné par :

$$\vec{\Phi} = \vec{q}C \quad (\text{II.6})$$

Où C est la concentration du soluté en solution.

II.8.2. Dispersion cinématique et diffusion moléculaire

La **dispersion** recouvre l'ensemble des mécanismes mécanique et physicochimique provoquant l'éloignement dans le temps et dans l'espace de particules initialement voisines.

On distingue dans la dispersion:

II.8.2.1. La diffusion moléculaire:

La diffusion est le mécanisme qui stocke, réversiblement, dans des compartiments où l'eau est immobile et piégée, des ions, qui, par ailleurs, circulent rapidement dans des pores continus.

La loi de Fick exprime le fait que le flux de matière transporté par unité de surface, J_n (kg/m²s)

$$\vec{J}_n = -D \cdot \vec{\text{grad}}C \quad (\text{II.7})$$

Où

$D = D_{\text{mol}}$: coefficient de diffusion, m² /s

C : concentration massique, kg/m³

Le signe négatif montre que la diffusion a lieu dans la direction opposée au gradient de la concentration

Dans le cas d'un déplacement monodimensionnel, en tenant compte de la loi de conservation de la matière, il est possible d'énoncer la seconde loi de FICK, dite équation de diffusion

$$\frac{\partial y}{\partial x} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (\text{II.8})$$

Les solutions analytiques obtenues dépendent des systèmes étudiés, c'est-à-dire des conditions aux limites et initiales.

Chapitre II : l'infiltration de l'eau et des solutés dans les sols non saturés

Si le solide considéré a une profondeur infinie ($x > 0$) et si la concentration initiale est uniforme et égale à C_0 :

$$t=0 \quad c(x, 0) = C_0$$

Et la condition limite :

$$t > 0 \quad c(0, t) = C_i$$

La solution analytique de l'équation existe :

$$C(x, t) = C_i \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) + C_0 \cdot \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (\text{II.9})$$

Ou

$$\operatorname{erfz} = 2 \frac{z}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du \quad (\text{II.10})$$

Dans le cas de la diffusion dans le solide des ions solubles, on peut admettre que pour $t > 0$, $C_i > 0$ et donc approximer la relation précédente par :

$$C(x, t) = C_0 \cdot \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (\text{II.11})$$

Dans ce cas, le flux de diffusion à la surface située à $x=0$ est donné par l'expression suivante :

$$J(t) = -D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} = (C_0 - C_i) \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{\pi t}} = C_0 \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{\pi t}} \quad (\text{II.12})$$

C_0 : Concentration initiale rapportée à l'unité de volume poreux M/L^3

C_i : Concentration à l'interface M/L^3

Et la masse diffusée par la surface extérieure S :

$$M(t) = 2(C_0 - C_i)S \cdot \frac{\sqrt{Dt}}{\sqrt{\pi}} = 2C_0 S \frac{\sqrt{Dt}}{\sqrt{\pi}} \quad (\text{II.13})$$

II.8.2.2. La dispersion cinématique

On admet généralement que D_{cin} est proportionnel à la vitesse interstitielle de l'eau :

$$D_{cin} = \lambda |V| \quad (\text{II.14})$$

V (en m/s) est la vitesse interstitielle ou vitesse de pores définie par:

$$\vec{V} = \frac{\vec{q}}{\theta} \quad (\text{II.15})$$

λ : est la dispersivité (en m), coefficient déterminé de manière empirique.

Il est possible de modéliser la dispersion totale en exprimant (loi de Fick) que le flux dispersif

Φ_d : est proportionnel au gradient de concentration du soluté :

$$\vec{\Phi}_D = -\theta D_d \overrightarrow{\text{grad}}(C) \quad (\text{II.16})$$

D_d : coefficient de dispersion hydrodynamique (m² /s) avec $D_d = D_{\text{cin}} + D_{\text{mol}}$

II.8.3. Modèles de transfert

II.8.3.1. Transport conservatif : équation de convection-dispersion

Pour résumer, le flux total (Φ_T) du soluté dû aux mécanismes physiques de transport conservatif (Φ_c) (ou non réactif) et dispersif (Φ_d). S'écrit sous la forme :

$$\vec{\Phi}_T = \vec{\Phi}_c + \vec{\Phi}_d = \vec{q} \cdot C - \theta \left(D_{\text{mol}}(\theta) + \frac{\lambda}{\theta} q \right) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(C) \quad (\text{II.17})$$

Le principe de continuité exprime :

$$\frac{\partial(C)}{\partial t} + \text{div}(\vec{\Phi}_T) = 0 \quad (\text{II.18})$$

L'équation de transport du soluté en milieu poreux non saturé s'écrit alors

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta \cdot C) = \text{div}(\theta \cdot D(\theta, q) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(C) - \vec{q} \cdot C) \quad (\text{II.19})$$

Équation (II.19) est dite équation de convection-dispersion.

II.8.3.2 Transport non conservatif

Les mécanismes d'interactions entre la phase immobile (matrice solide et eau liée) et les éléments transportés peuvent rendre la migration des solutés au sein du milieu poreux non conservative (De Marsily, 1981 cité dans Blanchard, 2000) ou réactive. Il convient alors d'introduire un terme source/puits dans la loi de conservation de la matière au cours du transport (Blanchard, 2000).

Le terme source/puits traduit l'effet des mécanismes d'interaction en exprimant de manière globale les phénomènes de sorption. On pose :

$$Q = -\rho \frac{\partial C_s}{\partial t} \quad (\text{II.20})$$

Où

ρ : masse volumique apparente sèche (kg/m^3)

C_s : fraction massique du soluté adsorbé (kg/kg sol sec)

L'équation de transport du soluté devient, en considérant un flux unidirectionnel dans la direction x :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta \cdot C) = \frac{\partial}{\partial x} \left((\theta \cdot D(\theta; q)) \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (C \cdot q) + Q \quad (\text{II.21})$$

II.8.3.3. L'équation générale de transports

Le bilan total s'écrit :

(Transport convectif) + (transport par dispersion) = (variation du stock).

En milieu poreux saturé, la porosité ε est égale au volume relatif de solution θ . L'équation de propagation devient :

$$-q \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{\partial c}{\partial t} + (1 - \varepsilon) \frac{\partial c_s}{\partial t} \quad (\text{II.22})$$

Où

q : est le débit unitaire de Darcy en m/s

ε : est le volume relatif de solution (porosité en milieu saturé)

C : la concentration volumique en soluté en phase liquide

C_s : la concentration volumique en soluté en phase solide

D : coefficient de dispersion axial apparent

II.9.Conclusion

A travers ce chapitre, une bibliographie concernant les mécanismes permettant l'infiltration de l'eau et des solutés dans les sols non saturés a été présentée. Ces mécanismes ont fait l'objet d'études très approfondis, dont l'aboutissement a été la mise en place d'équations et modèles permettant la description plus au moins précise de processus d'infiltration selon les hypothèses de base de chaque approche.

Chapitre III :

Les Centres d'Enfouissements Techniques

III.1. Introduction

Les décharges sont des zones sur lesquelles on dépose des déchets domestiques et des déchets industriels. Ces vingt dernières années, on est passé de la décharge sauvage à la décharge contrôlée. Maintenant, on ne dit plus décharge, on dit centre d'enfouissement technique de classe « n=I, II ou III et IV), selon les déchets enfouillés.

L'Algérie génère chaque année 10 à 12 millions de tonnes de déchets ménagers. Elle compte 3000 décharges sauvages dont 88 % de décharges sauvages, 9 % de décharges semi contrôlées et 3 % de décharges contrôlées respectant les règles environnementales. Aussi, l'Algérie dispose de 177 (en 2018) centres d'**enfouissement technique** opérationnels dont 73 ont atteint un taux de saturation qui dépasse 90%. C'est ce qu'a indiqué la directrice de la gestion des déchets de l'Agence nationale des déchets (Ministère de l'environnement et des énergies renouvelables, zerouati.F, 2018). Tandis que 13 millions de tonnes de déchets sont générés quotidiennement, le taux de recyclage, lui, est de moins de 7%. (Agence Nationale des Déchets (en 2020) (Organisme gouvernemental)).

Malheureusement, ces décharges sont souvent dans des zones agricoles ou naturelles et peuvent être sources de pollution de l'environnement notamment par les lixiviats générés si ces derniers ne sont pas contrôlés et traités avant leur mise à la nature.

III.2.Généralités sur les déchets

III.2.1.Définition des déchets

Les déchets sont des matières normalement solides ou semi-solides résultant des activités humaines et animales qui sont indésirables ou dangereuses.

La Loi N°01-19 du 12/12/2001(article 03) relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets arrête (officiellement) les définitions des différents types de déchets comme suit :

-« **Déchets** : 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 de l'éliminer. » (**PNUD-MATE, 2008**).

III.2.2. La typologie des déchets

La loi N 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et élimination des déchets arrête les définitions de ces grandes familles de déchets qui sont :

- **Les déchets ménagers et assimilés:** tout déchet provenant des activités économiques, commerciales ou artisanales et qui par leur nature, leur composition et leurs caractéristiques, sont similaires aux déchets ménagers.
- **Les déchets industriels:** tout déchet résultant d'une activité industrielle agroindustrielle, artisanale ou d'une activité similaire.
- **Les déchets médicaux et pharmaceutiques:** curatif dans les domaines de la médecine humaine ou vétérinaire et tous les déchets résultant des activités des hôpitaux publics, des cliniques, des établissements de la recherche scientifique, des laboratoires d'analyses opérant dans ces domaines et de tous établissements similaires.
- **Déchets dangereux :** inflammable, biologique ou bactériens, constituent un danger pour l'équilibre écologique tel que fixé par les normes internationales dans ce domaine.
- **Déchets inertes :** tout déchet qui ne produit pas de réaction physique ou chimique tels les déchets provenant de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation et qui ne sont pas constitués ou contaminés par des substances dangereuses ou par d'autres éléments générateurs de nuisances.
- **Déchets agricoles :** tout déchet organique généré directement par des activités agricoles ou par des activités d'élevage ou de jardinage.
- **Déchets ultimes :** tout résidu résultant de déchets traités ou ceux qui ne sont pas traités selon les conditions techniques et économiques actuelles.
- **Déchets biodégradables :** tout déchet pouvant subir une décomposition biologique naturelle, anaérobique ou aérobie, comme les déchets alimentaires, les déchets de jardins, de papiers et de cartons ainsi que les cadavres d'animaux.

III.2.3. Gestion et traitement des déchets

La gestion des déchets consiste en toute opération relative à la collecte, au tri, au transport, au stockage, à la valorisation et à l'élimination des déchets, y compris le contrôle de ces opérations. À partir de cette définition, plusieurs opérations se distinguent dans le mode de gestion des déchets existant en Algérie. (Djamaci, 2012)

Chapitre III : Les Centres d'Enfouissements Techniques

La collecte des déchets : c'est l'ensemble des opérations qui consistent à enlever les déchets chez le producteur ou aux points de regroupement et à les acheminer vers un quai de transfert, un centre de tri, de traitement ou un centre d'enfouissement technique C.E.T. (Addou, 2009)

Le tri des déchets : c'est la séparation des déchets selon leur nature en vue de leur traitement, par exemple le papier, plastique...etc. (Djamaci, 2012)

La valorisation des déchets : c'est la réutilisation, le recyclage ou le compostage des déchets. Le recyclage consiste à valoriser des produits usés ou des déchets. Le compostage est un processus biologique dans lequel les déchets organiques sont transformés par les microorganismes du sol en un produit stable et hygiénique appelé compost. (Djamaci, 2012)

L'élimination des déchets : comprend les opérations de traitement thermique, physico-chimique et biologique, de mise en décharge, d'enfouissement, d'immersion et de stockage des déchets, ainsi que toutes les autres opérations ne débouchant pas sur une possibilité de valorisation ou autre utilisation du déchet. (Djamaci, 2012) Cité dans (Belghali N., Dries, H. 2017)

L'enfouissement technique: Les déchets spéciaux ultimes sont ceux qui ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par l'extraction de la part valorisable ou par réduction de leur caractère dangereux et polluant. Les déchets admis en centre d'enfouissement technique (CET) sont des déchets essentiellement solides, minéraux avec un potentiel polluant constitué de métaux lourds peu mobilisables. Ils sont très peu réactifs, très peu évolutifs, et très peu solubles. (Djamaci, 2012) Cité dans (Belghali N., Dries, H. 2017).

III.3. Centre d'enfouissement technique (CET)

III.3.1. Définition de CET

Un centre d'enfouissement technique (CET) ou centre de stockage des déchets (CSD) est un ensemble de « casiers » divisés en alvéoles, dépendants sur le plan hydraulique et entourés de digues étanches. Les lixiviats (voir III-5.1) sont récupérées, traités par lagunage et envoyés en stations d'épuration. ((JEAN, 2005) Cité dans (Belghali N., Dries, H. 2017))

III.3.2. Les différents type de CET

Le centre d'enfouissement technique reçoit les déchets ménagers pour les enfouir dans des fosses. Selon la nature des déchets admis et en fonction de leur perméabilité les centres de stockage de déchets sont répartis en quatre classes.

- **Les C.E.T. de classe I** : pour les déchets industriels dangereux, non toxiques.
- **Les C.E.T. de classe II** : pour les déchets industriels non toxiques et non dangereux et assimilés et pour les déchets ménagers et assimilés.
- **Les C.E.T. de classe III** : pour les déchets inertes ; Ce sont les installations de stockage recevant essentiellement des déchets inertes. Ces décharges de la classe III, ne reçoivent que les déchets inertes d'origine domestique comme les déchets issus du bricolage familial.
- **Les C.E.T. de classe IV** : les déchets industriels non toxiques destinés à l'usage exclusif du producteur de déchets.

III.3.3. Conception d'un centre d'enfouissement technique

Le confinement des déchets dans des CET a été établi en réponse à certaines préoccupations liées à l'expérience du passé sur les décharges. Chaque site est spécifique, la réponse géotechnique est à adapter en conséquence (Ademe, 2006). Il existe un risque de pollution des eaux souterraines, lorsque les eaux percolant à travers les déchets sont susceptibles d'atteindre la nappe phréatique. En d'autres termes, à l'heure de choisir un site pour y enfouir les déchets, le degré d'isolement de ce site vis à-vis d'un aquifère constituera un élément de première importance. Le choix entre une barrière géologique unique de type argileuse et l'étanchéification du casier par des membranes imperméables peut se poser en termes d'efficacité technique et de priorité économique. (Ademe, 2006) (Kehila, Matejka, 2006)

Un CET est un ensemble de casiers, qui sont des unités hydrauliquement indépendantes. En pratique, les casiers ont en général, des surfaces allant de 5000 m² à 1,5 ha.

Le confinement des déchets et des lixiviats formés est assuré par l'étanchéité du site réalisée par une structure multicouche constituée d'une barrière de sécurité passive et d'une barrière de sécurité active.

Sur le terrain, la réalisation d'un CET se traduit comme suit (**figure III-1**):

En bas, la sécurité passive constituée d'un terrain naturel argileux : Les réglementations européenne et américaine intègrent des seuils de perméabilité pour les différentes installations de

Chapitre III : Les Centres d'Enfouissements Techniques

stockage de déchets ménagers et spéciaux. Le tableau III.1 présente les grandes lignes de ces réglementations et montre la diversité qui existe entre les différents pays (Gueddouda, 2011).

Tableau III-1: Réglementations pour les installations de stockage des déchets (Van Impe et Bouazza, 1996 ; Cazeaux, 2001, cité dans Gueddouda, 2011)

Pays	Déchets ménagers				Déchets spéciaux			
	Fond		Couverture		Fond		Couverture	
	e (m)	k (m/s)	e (m)	k (m/s)	e (m)	k (m/s)	e (m)	k (m/s)
C.E	1	1.10^{-9}	nd	nd	5	1.10^{-9}		
Allemagne	0.75	5.10^{-10}	0.5	5.10^{-9}	1.5 3	5.10^{-10} 1.10^{-7}	0.5	5.10^{-10}
Autriche	0.5 Ou 0.75	5.10^{-10} Ou 1.10^{-9}	0.4	1.10^{-9}	0.5	5.10^{-10}	0.5	1.10^{-9}
Belgique (a. Flandres, b.Wallonie)	a : 3 b : nd	a : 1.10^{-9} b : nd	nd	nd	1	nd		
Danemark	0.5ou LCS	1.10^{-10}	0.5	1.10^{-10}				
France	1 5	1.10^{-9} 1.10^{-6}	1	1.10^{-9}	5	1.10^{-9}	1	1.10^{-9}
Portugal	1	nd			1	nd		
Suisse	0.8 10	1.10^{-9} 1.10^{-7}	nd	nd				
USA	0.6	1.10^{-9}	nd	nd	0.9	1.10^{-9}	0.45	1.10^{-9}

C.E : Communauté Européenne

e : épaisseur en mètre / nd : non défini

- Au-dessus, une géomembrane placée directement sur la couche d'argile.
- Puis un géotextile pour protéger le système d'étanchéité du poinçonnement que pourrait exercer le massif drainant se situant au dessus. Dans celui-ci, un drain est inséré pour collecter les eaux polluées (les lixiviats) qui percolent à travers la masse des déchets.

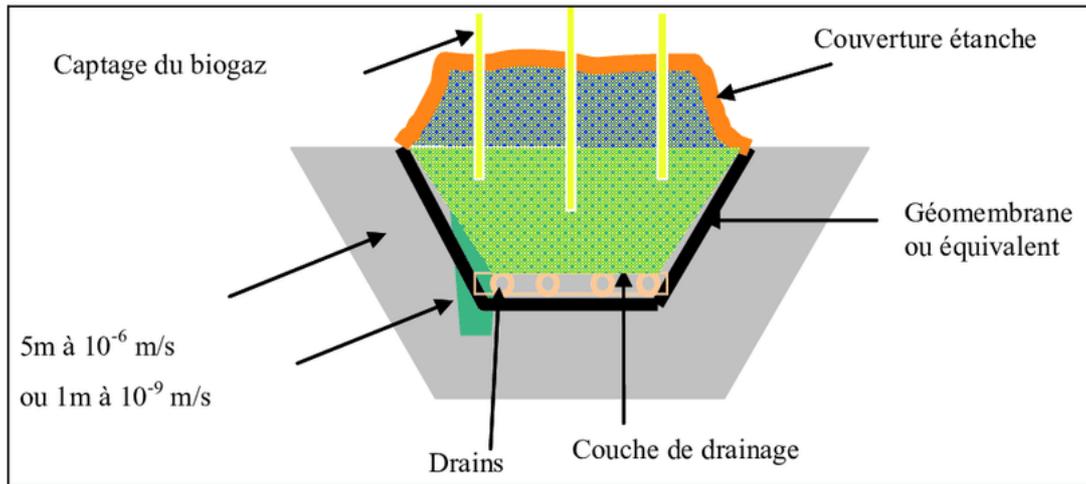


Figure III-1: Centre d'Enfouissement Technique (Un casier de stockage de déchets). (Kehila, Mezouar (CET) en Algérie, 2011)

III.3.4.Choix du site

Les sites d'enfouissement doivent être choisis de telle façon à éviter toute nuisance à l'environnement et l'être humain. Le sol sous jacents doivent être nécessairement étanches et présentent une grande capacité de confinement des contaminants. Il s'agit en avant tout de la protection des eaux souterraines des molécules solubles issues des déchets appelées lixiviat, ceci a suscité l'émergence de nouveaux matériaux geosynthetique (géotextiles, géomembrane, et produit associés).

Selon le guide Algérien pour la conception de CET des déchets ménagers 2005, un choix du site inapproprié peut causer des dépenses excessives, des risques environnementaux additionnels et des problèmes sociaux et culturels. Le choix du site d'un CET est une des plus importantes décisions pour la mise en œuvre du schéma directeur de gestion de déchets. Généralement, les zones suivantes sont considérées a priori comme absolument inappropriées : (Gueddouda, 2011)

- parc national
- zones militaires
- zones avec une distance entre les limites du site et les zones d'habitation le plus proche inférieure à 200 m
- zones avec mines souterraines
- zones avec une distance à un aéroport inférieure à 5 km.

En plus la détermination du site d'un C.E.T doit tenir compte de la possibilité d'exploitation sur une période de 15 ans au minimum. (Gueddouda, 2011)

III.4. Les règles et les normes d'un CET

En règle générale, le centre d'enfouissement technique (CET) est réalisé pour une population de 100 000 habitants et plus. (Bouarfa, 2018)

La durée de vie d'un centre d'enfouissement technique est au moins 20 ans. Il est donc impératif de disposer de la surface de terrain nécessaire et de planifier l'exploitation du site sur la durée de vie minimale sus citée.

III.4.1. L'aménagement du casier

Pour assurer un bon drainage du casier et permettre ainsi une bonne évacuation des lixiviats et surtout des eaux pluviales, il y a lieu de réaliser :

- **Une pente** de 3 à 5%.
- **Le fond du casier** est constitué de différentes couches qui sont de bas en haut ; pour éviter de polluer le sol et la nappe phréatique (**figure III-2**) :

Une couche drainante sous-étanchéité constituée de granulat 20-40 mm surmontée

Une couche drainante sous-étanchéité constituée de granulat 20-40 mm surmontée

Une couche drainante sous-étanchéité constituée de granulat 20-40 mm surmontée

- * Une couche drainante sous-étanchéité constituée de granulat 20/40 mm surmontée d'un géotextile anti contaminant
- * Une étanchéité minérale d'argile compactée constituée de 4 couches de 25 cm d'épaisseur +/- 5 cm plus 5 mm minimum de bentonite
- * Une géomembrane de 2 mm d'épaisseur ; ou 700 gramme par mètre carré.
- * Un géotextile anti perforation pour protéger la géomembrane de 1400 gramme par mètre carré.
- * Une couche drainante de 50 cm de granulats de grès parcourus par des collecteurs à lixiviat pour les cellules exploitées ou eaux pluviales pour les cellules non exploitées.
- * Une couche anticontaminante (géotextile ou géogrille) pour éviter que les déchets ne colmatent la couche drainante.
- * Pierres roulants d'Oued émoussés 16/32 ou gravies – géo grille-, non calcaire pour protéger le PEHD de drainage.
- * Un caniveau (tuyaux perforé) en PEHD DN 315 \varnothing 50 cm. (ou PEHD de drainage de 40 cm de diamètre).

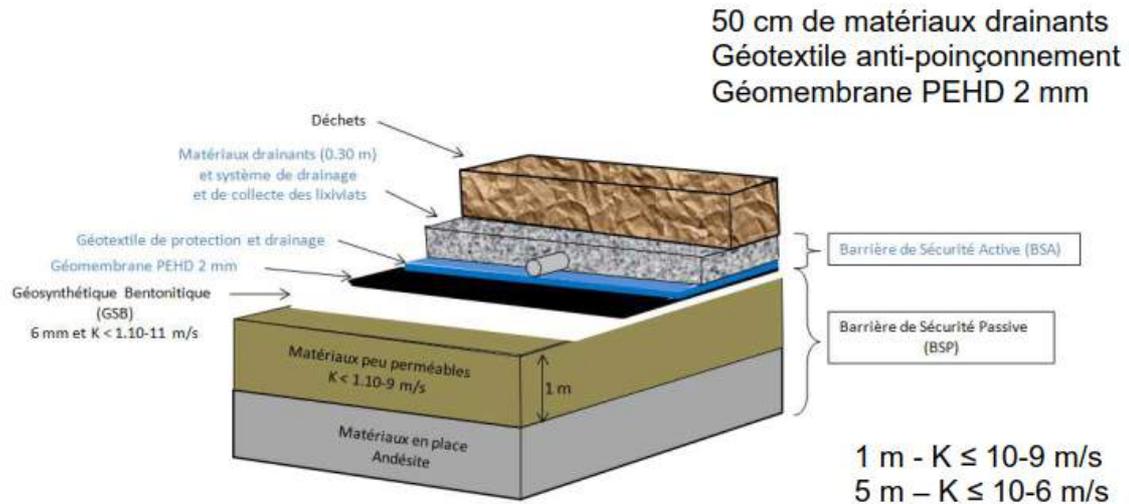


Figure III-2: Schéma de l'aménagement du fond de casier. (Jean-Frédéric, 2015)

III.4.1.1. Les Géosynthétiques

a) *Les Géotextiles* : qui sont des produits perméables ; Les géotextiles et produits apparentés peuvent remplir, dans les domaines de la géotechnique et du génie civil où ils sont utilisés, différentes fonctions:

- **La séparation** : prévention du mélange de deux sols ou de matériaux de remblais adjacents de natures différentes.
- **La filtration** : rétention du sol, ou d'autres particules soumises à des forces hydrodynamiques, tout en permettant le passage de fluides à travers ou dans un géotextile, ou un produit apparenté aux géotextiles. Le géotextile permet de créer une auto filtrée dans le sol en amont.
- **Le drainage** : collecte et transport des eaux, souterraines et/ou d'autres fluides dans le plan d'un géotextile ou d'un produit apparenté aux géotextiles.
- **La protection** : prévention ou limitation des endommagements localisés d'un élément ou d'un matériau donné, en utilisant un géotextile ou un produit apparenté.

b) *Les Géomembrane:*

L'utilisation de la géomembrane (**Figure III-3**) de la construction des casiers assure une imperméabilité, évitant ainsi toute contamination possible de sol ainsi que des eaux superficielle et souterraines. Au fond de la décharge, elle doit jouer le rôle de barrière étanche et favorise de

Chapitre III : Les Centres d'Enfouissements Techniques

drainage des lixiviats. Seules les géo membranes en PEHD seraient chimiquement résistant aux lixiviats, elles sont moins facile à manipuler que celle une PVC, en éthylène propylène diène monomère(EPDM) ou en bitume. Une intention particulière doit être prise en compte dans l'assemblage des géomembranes (CFG, Fascicule 12, 1998).



Figure III-3: la disposition du géotextile et de la géomembrane sur les flancs d'un casier, (Bouarfa, 2018)



Figure III-4: Fossette de drainage en PEHD avec géotextile.

III.5. Flux polluant générés par le stockage des déchets

III.5.1. Lixiviats

Le lixiviat est le liquide résiduel engendré par la percolation de l'eau et des liquides à travers une zone de stockage de déchets, de produits chimiques ou tout simplement un sol contaminé par des polluants.

Ce produit de la dissolution des matières organiques et des éléments traces (métaux lourds, polluants organiques et chimiques, radionucléides...) est une source de pollution des sols et des eaux, y compris souterraines.

Les lixiviat doivent donc faire l'objet de mesures de contrôle, de collecte et de dépollution. Des dispositifs d'imperméabilisation réduisent le risque de lixiviation et les quantités de lixiviat, tandis qu'un réseau drainant collecte les liquides de percolation (**Figure III-5**). Les lixiviat sont ensuite recyclés (cas du compostage) ou retraités, localement ou dans une station d'épuration (www.futura-sciences.com)



Figure III-5: drainage en PEHD avec géotextile

III.5.1.2. Traitement de lixiviats

Les lixiviats doivent être drainés, récupérés et traités ou acheminés vers une station d'épuration avant rejet dans le milieu naturel.

Les lixiviats peuvent être soit traités sur place s'il existe une structure adaptée (généralement une station d'épuration dédiée), soit exportés vers une station d'épuration ou une installation industrielle de traitement de produits chimiques (TRISTA, 2013).

L'opération de traitement passe généralement par les étapes suivantes (**Figure III-6**) :

1. Les lixiviats sont pompés dans le bassin de stockage par une pompe immergée.
2. une dégradation de la pollution des lixiviats. Généralement, les techniques utilisées sont directement inspirées de celles adoptées pour l'épuration des eaux usées. La traitabilité des lixiviats dépend de leur composition et de la nature de la matière organique qu'ils contiennent. Il existe deux grandes catégories de techniques : les traitements biologiques et les traitements physico-chimiques. Ces deux types de techniques et les résultats obtenus sur différentes catégories de lixiviats ont fait l'objet de nombreuses études, que ce soit sur des pilotes de laboratoire ou sur des sites de décharges. (Bencherif, Kerkeb, 2014) Les lixiviats ainsi débarrassés d'une partie de la pollution sont ensuite filtrés par un mécanisme d'ultrafiltration (UF).
3. L'UF est une filtration d'une semi-membrane grâce à une différence de pression.
4. Les particules en solution ou en suspension de haut poids moléculaire sont retenues tandis que l'eau et les molécules de faible poids moléculaire passent à travers la membrane.
5. Le traitement final s'effectue via une filtration avec des charbons actifs. Le charbon actif est un matériau très poreux qui va fixer la pollution. Son action est complémentaire de l'ultrafiltration.
6. Au final, l'effluent traité peut rejoindre, après contrôle, le milieu naturel. (Sictoba.La.station d'épuration)

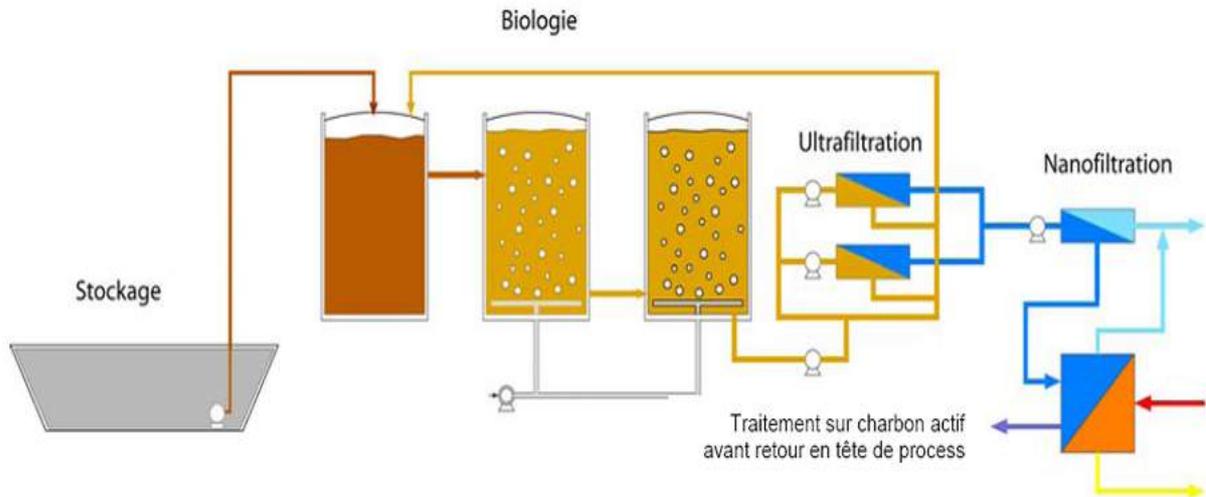


Figure III-6: Le traitement de lixiviats. (Unité de traitement de Lixiviats, Traitement Biologique).



Lixiviats à travers
un casier

Sortie après
ultrafiltration

Rejet dans le milieu naturel
Après passage sur
les charbons actif

Figure III-7: Résultats du traitement du Lixiviats (Sictoba.La.station d'épuration)

En Algérie actuellement le traitement des lixiviats fait toujours défaut par manque des stations de traitement dans la totalité des wilayas. (Bencherif Y, Kerkeb ,2014)

III.5.2. Biogaz

Le **biogaz** est un mélange composé essentiellement de méthane et de dioxyde de carbone (le rapport CH₄/CO₂ est d'environ 60/40 en phase de méthanogènes).

Le biogaz est un mélange hétérogène, les origines de ces substances sont les dégradations biologiques et chimiques des déchets. Son captage et son traitement sont imposés pour réduire les nuisances olfactives et limiter l'effet de serre. Les risques liés au biogaz sont nombreux : Risques pour les humains (asphyxie, explosion, incendie) et Toxicité des substances et risques de pollution de l'atmosphère (effet de serre).

III.5.2.1. Traitement des biogaz

Le biogaz, gaz de décharge est défini comme étant " tous les gaz produits par les déchets mis en décharge ". La captation du biogaz de CET est nécessaire afin de combiner l'intérêt de récupérer une énergie et celui de limiter l'émission d'un puissant gaz à effet de serre. Il existe 03 principaux modes de valorisation du biogaz (Addou, 2009) :

1. La valorisation électrique : le biogaz est transformé en électricité à condition qu'il renferme 40% de méthane et une production à un débit de 400 m³ /h,
2. La valorisation en biocarburant : le biogaz est destiné à alimenter les véhicules de collectivités locales, il doit être très riche en méthane (de l'ordre 95%), avoir une teneur en eau inférieure à 15mg/m³ et avoir moins de 100mg/m³ en H₂S.
3. La valorisation thermique reste la voie la plus ancienne et la mieux maîtrisée. La combustion de 1 m³ de méthane libère 8750 Kcal, qui équivalent d'énergie donne un litre de gazoil, 0.94m³ de gaz naturel et 9.7 KW/h d'électricité comme illustré dans le schéma (Figure III-8). (Addou, 2009) Cité dans (Belghali, Dries, 2017)

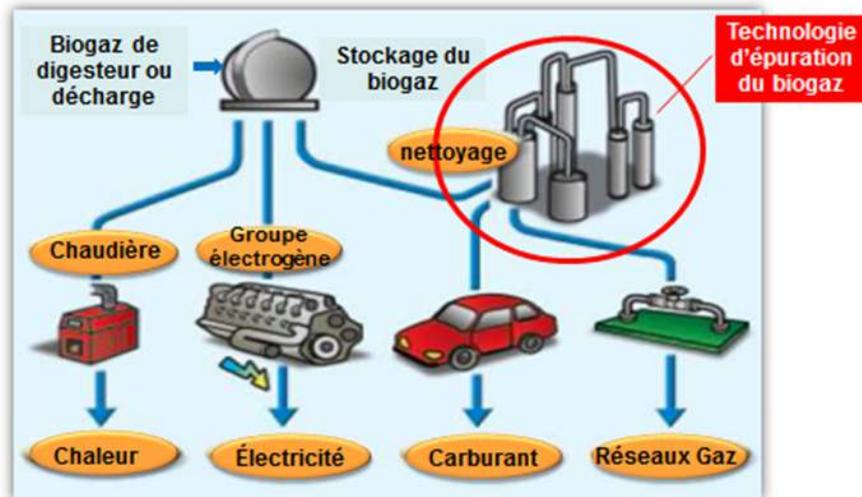


Figure III-8: schéma de valorisation du biogaz (La valorisation en biocarburant, 2006)

En Algérie, le biogaz reste pratiquement non exploité suite à dépendance totale du pays aux énergies fossiles comme le pétrole et le gaz naturel. Le système de récupération des biogaz dans les CET algérienne joue généralement le rôle d'une purge après saturation du casier et son revêtement.

III.5.2.2. Système de récupération de biogaz

Du fait de sa teneur en méthane, le gaz de décharge est un gaz combustible, susceptible de générer une explosion. Selon le guide pour la gestion des CET en Algérie Les mélanges explosifs peuvent également se former en dehors du massif de déchets, parfois à des distances fort éloignées, du fait de :

- fuites de gaz dans des locaux mal ventilés;
- migration du gaz dans le sol;
- migration non contrôlée du gaz au travers des équipements du site, par exemple les conduites ou les drains;

On distingue deux grandes options en matière de captage des biogaz (Ademe, 2007): le captage à l'avancement et/ou le captage après le remplissage du casier. Il en découle différentes techniques et moyens pour drainer le gaz (**Tableau III-2**).

Chapitre III : Les Centres d'Enfouissements Techniques

Tableau III-2: Les différents systèmes de captage du biogaz. (Ademe, 2007)

Drainage	Captage à l'avancement		Captage sur alvéole terminée
Vertical (Figure III-9)	Puits gaz constitué de buses béton empilées (Figure III-9)	Colonne drainante gaz en galet, montée avec ou sans tube de formage	Puits gaz foré
Horizontal (Figure III-10)	Tranchée drainante indépendante		Tranchée drainante indépendante
Vertical + horizontal	Tranchée drainante ou drain connecté à un puits vertical		
Périphérique (Figure III-11 et III-12)	Drain ou tranchée drainante indépendante aux parois latérales		Tranchée drainante indépendante en surface



Figure III-9: Puits vertical monté à l'avancement sans tube de formage. (Ademe, 2007)

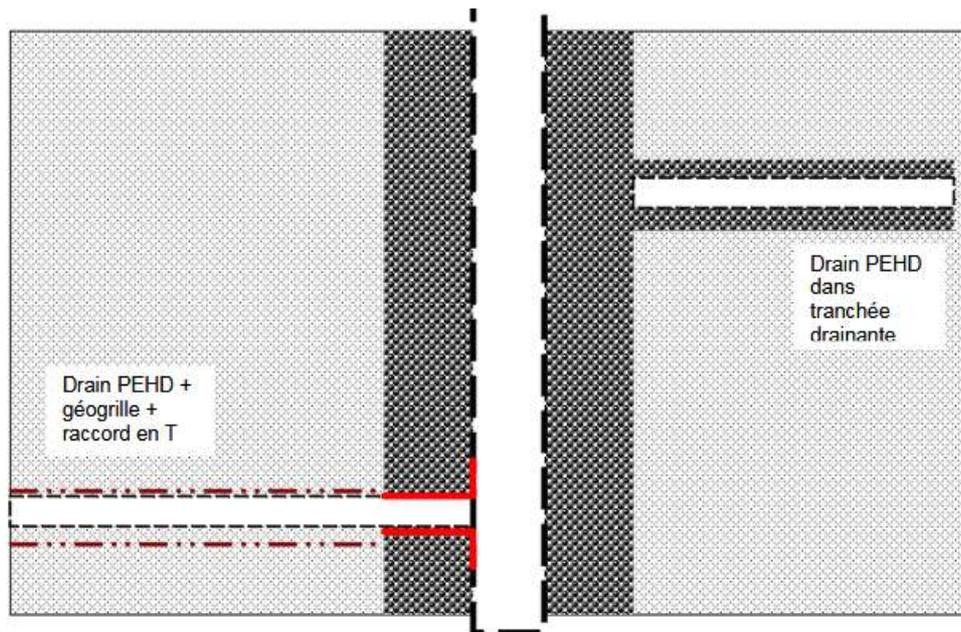


Figure III-10: Mise en place des drains horizontaux connectés à un puits vertical, (Ademe, 2007).



Figure III-11: Tranchées drainantes. (Ademe, 2007) .



Figure III-12: raccordement des tranchés drainants en surface. (Ademe, 2007) .

III.9. Conclusion

Les centres d'enfouissement technique classe II, par ses aspects techniques permet la disposition finale des déchets ménagers solides de façon sécuritaire minimisant les impacts sur l'environnement.

Le rejet direct des lixiviats constitue un grand risque sur toutes les composantes du milieu naturel par la charge organique polluante et par la teneur excessive en métaux lourds. Un plus grand soin doit donc être apporté afin que les pollutions susceptibles d'être générées dans le milieu environnant soient évitées.

En Algérie, cette technique mise en place, à certes évoluée mais il n'en demeure pas moins un manque de recul sur leur comportement à long terme. La notion de contrôle est donc primordiale dans ces environnements sévères où la moindre négligence ou erreur peut avoir des conséquences graves tant sur le plan environnemental que sur le plan économique.

Chapitre IV :

Gestion des déchets ménagers à la ville de
Saida

IV.1. Introduction

L'enfouissement de déchets ménagers et assimilés reste la méthode la plus privilégiée en Algérie à cause du taux excessif d'humidité qu'ils recèlent d'une part, et d'autre part, le non maitrisé d'autre filière comme l'incinération ou le compostage. Il peut s'ajouter le faible cout que celui des autres filières d'élimination.

IV.2. Les CET de la ville de Saïda

Saïda est une ville d'Algérie et chef-lieu de la wilaya de Saïda, située dans le nord-ouest de l'Algérie. Elle est surnommée la ville des eaux, à cause de ses sources. La wilaya est située dans l'ouest algérien et elle s'étend sur une superficie de 6 613 km². La wilaya de Saïda est divisée en 6 daïras regroupant 16 communes.

IV.2.1. Situation géographique

Saïda occupe une place importante et jouit d'une position stratégique au niveau des hauts plateaux ouest. La wilaya de Saïda est délimitée depuis le découpage administratif de 1985, comme suit (Figure IV-1):

- Au nord par la wilaya de Mascara
- À l'ouest par la wilaya de Sidi-Bel Abbés
- Au sud par la wilaya d'EL-Bayadh
- À l'est par la wilaya de Tiaret



Figure IV-1: Situation géographique de la wilaya de Saïda (DPSB (ex DPAT de Saïda, 2012).

Chapitre IV : Gestion des déchets ménagers à la ville de Saïda

Elle est administrativement limitée (Figure IV-2):

- Au Nord par la commune d'Ouled Khaled
- A l'Est par la commune d'El Hassasna
- A l'Ouest par la commune Doui Thabet
- Au Sud par la commune d'Ain El Hadjar

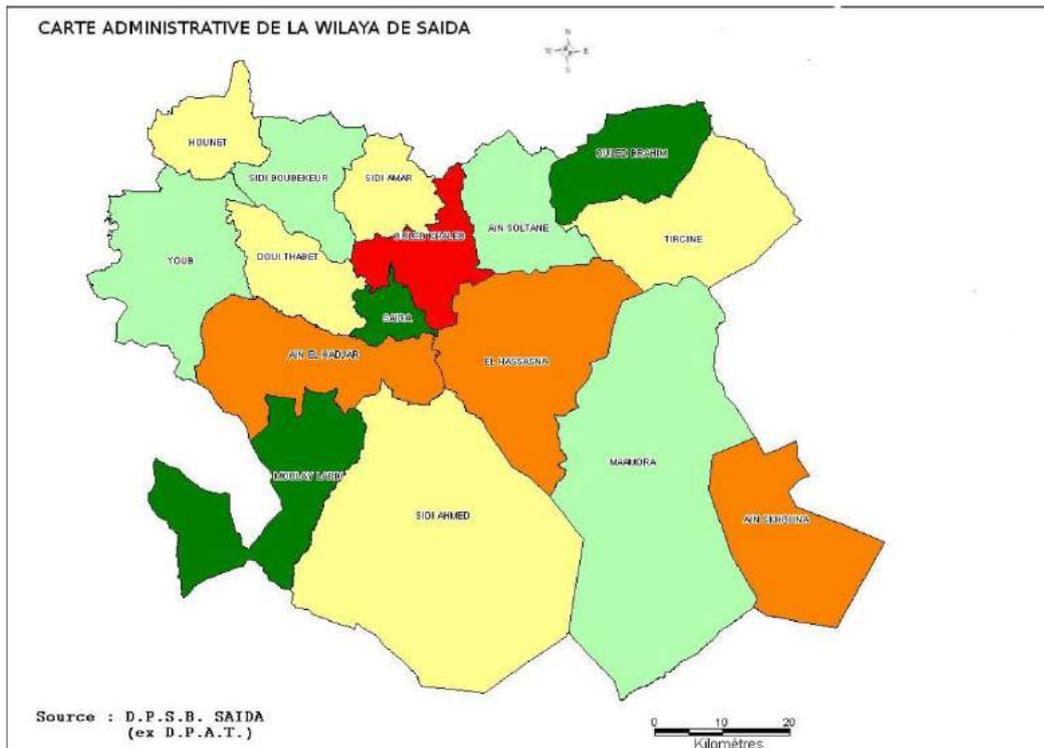


Figure IV-2 : Carte administrative de la wilaya de Saïda (DPSB (ex DPAT de Saïda))

IV.2.2. Situation démographique

La population totale de la wilaya est estimée à 406 893 habitants, soit une densité de 200 habitants par Km² en 2019.(Gestion des CET Saïda)

IV.2.3.Le climat

Le climat dans la région de Saïda est Semi-aride. La moyenne pluviométrique dans la wilaya est d'environ 348 mm/an. La température varie de -7° C au mois de décembre à 46° C au mois de juillet. (Andi-wilaya de Saïda)

IV.3. Aperçus sur les centres d'enfouissement techniques à Saïda

La direction de l'Environnement s'attelle à doter les 16 communes que compte la wilaya d'un schéma directeur pour la gestion et la collecte des déchets urbains. Il existe trois centres pour l'enfouissement des déchets:

1. Le CET de BenAdouane : c'est le premier centre au niveau de wilaya de Saida en 2008, il maintenant saturé.
2. Le deuxième de Sidi Boubekeur : opérationnel depuis septembre 2016.
3. Le troisième CET à Tircine : opérationnel depuis avril 2017

Et deux 02 centres de transferts : Sidi-Ahmed et Maamoura.

La quantité de déchets ménagers générés par les communes de Sidi Ahmed et Moulay Larbi sont déposées au niveau du centre de transfert d'Ouled Djelloul (commune de Sidi Ahmed), et celle des communes de Maamoura et Ain Skhouna au niveau du centre de transfert de Maamoura. Qui sont à leur tour transférés au niveau des CET de Saïda.

IV.3.1. Description des sites

- **CET 1 à BenAdouane :**

Le CET de BenAdouane (Figure IV-3) qui est opérationnel depuis le mois d'avril 2008, est d'une superficie de 25 ha. Il se situe à l'ouest du chef-lieu de wilaya, et prend en charge les communes d'Aïn El Hadjar et Rebahia (Ouled khaled) et Moulay Larbi et Sidi Ahmed. Son cout de réalisation s'élève 21 milliards de cts. La quantité de déchets enfouis s'élève à 43 299,600 t/an.

Ce CET est un centre de classe II où seuls les déchets ménager assimilés sont autorisés à être diversifié au niveau du site. Tout autre déchets (toxique, septiques, d'abattoir...) sont strictement interdit.

Ce CET reçoit des ordures ménagères considérés comme âgées car son âge remonte à plus de 20 ans à l'extérieur du casier (Figure IV-4). Les lixiviats s'écoulent gravitairement au travers un tuyau jusqu'à le bassin de récolte (Figure IV-5). Cette décharge se trouve à l'état actuelle en état de saturation d'où la nécessité de la réalisation d'un deuxième casier.



Figure IV-3: Vue satellitaire du CET de BenAdouane, (www.google/mape.fr)



Figure IV-4: Déversement des déchets à l'extérieur du casier de stockage.



Figure IV-5: Bassin de récolte de lixiviats de CET BenAdouane a Saïda

Chapitre IV : Gestion des déchets ménagers à la ville de Saïda

Les résultats de prélèvement des échantillons de lixiviat durant l'année 2018 (**Tableau IV-1**) par l'organisme gestionnaire de la CET (EPWG de Saïda) ont montré que l'ensemble des paramètres analysés dépassent les valeurs limites préconisées par le décret 06-141 du 19 avril 2006 définissant les valeurs d'affluents liquide industriels. Les excès sont enregistrés notamment dans les indicateurs de pollution à savoir la valeur DCO (La demande chimique en oxygène) et DBO5 (La demande biochimique en oxygène pendant cinq jours) et les MES (Les matières en suspension totales), d'où la nécessité d'un traitement spécifique avant rejet, ce qui n'est pas le cas.

Tableau IV-1: Résultats d'analyse des lixiviats du CET de BenAdouane en janvier 2018.

Echantillons	Unités	Valeurs limites*	Résultats	Normes D'Analyses
Température	C ⁰	30	14.6	Multi paramètres
Ph	-	5.5 -8.5	8	Multi paramètres
Conductivité spécifique	Ms/cm	-	31.5	Multi paramètres
DCO	Mg/1	700	11136	ISO 6060 :1989
DBO ₅	Mg/1	200	1000	Oxitop Box
MES	Mg/1	150	2154	ISO 11923 :1997
Matières décantables	MI/1	0.5	1	Méthode Rodier
Huiles et graisses	Mg/1	20	200	Méthode Rodier

- **CET 2 à Sidi Boubekour :**

Le CET de Sidi Boubekour été réceptionné au mois d'avril 2017, avec une superficie de 14 ha comportant un casier (Figure IV-6), et prendra en charge les déchets des communes de Sidi Boubekour, Sidi Amar, Youb, Hounet et Doui Thabet. CET de classe II. Le centre de Sidi Boubekour est situé a **Zeraouen** entre Sidi Boubekour et Youb. L'accès au site se fait par le chemin de wilaya CW 06, à environ 12 Km du village de Sidi Boubekour. La quantité de déchets enfouis par ce CET s'élève à 6 170,88t/an. Le CET comporte un casier dont les caractéristiques sont comme suite :

Chapitre IV : Gestion des déchets ménagers à la ville de Saïda

- Superficie haut de casier = 14000 m².
- Superficie bas de casier = 7875 m².
- Périmètre haut de casier = 480 m.
- Périmètre bas de casier = 357, 50 m.
- Hauteur = 07 m.
- Volume (avec rampe) = 76562, 50 m³.

Concernant le bassin de récolte de lixiviats, il a les caractéristiques suivantes :

- Superficie haut bassin = 3600 m².
- Superficie bas bassin = 1600 m².
- Périmètre haut bassin = 240 m.
- Périmètre bas bassin = 160 m.
- Hauteur = 04 m.
- Volume = 10400 m³.



Figure IV-6 : Le casier de CET de Sidi Boubekeur

- **CET 3 a Tircine :**

Le CET de Tircine été réceptionné au mois de septembre 2016, avec une superficie de 25 ha, comportant un casier et bassin de stockage du lixiviat (Figure IV-7 et IV-8). Il s'occupe du traitement des déchets des communes de Maamoura, Ain Skhouna, EL Hassasna, Ouled Brahim, Aïn Sultan et Tircine. La quantité de déchets enfouis par ce CET s'élève à 8 810,660 t/an



Figure IV-7: Casier en service (CET Tircine)



Figure IV-8: Bassin de lixiviats de CET de Tircine -Saïda-

IV.4.Collecte des déchets à la ville de Saïda

IV.4.1.La situation actuelle de collecte

La ville de Saïda présente principalement deux modes de collecte des déchets ménagers:

- 1- La collecte de porte à porte,
- 2- le ramassage : par le moyen d'ouvriers qui passent à travers les ruelles ou les camions n'entrent pas, et collecte les déchets dans une cuisson de 01 :00 à 02 :00

Trois méthodes de ramassage sont utilisées:

- la benne tasseuse (figure IV-9)
- cuisson
- tracteur

La collecte des déchets commence à partir de 4h du matin et se fait généralement durant toute la semaine. Une permanence est assurée à partir de 16h (Figure IV-10).



Figure IV-9 : Camion de collecte à benne tasseuse.



Figure IV-10: Nettoyage des voiries à côté du stade des frères Braci à Saïda.

Chapitre IV : Gestion des déchets ménagers à la ville de Saïda

La gestion des déchets ménagers générés passe par plusieurs étapes au niveau du centre d'enfouissement technique à savoir :

1ère étape : l'arrivée du camion au centre.

2ème étape : Le camion est dirigé vers le pont bascule afin d'évaluer (pesée) la quantité des déchets à décharger. (Figure IV-11)



Figure IV-11: Pesée d'un camion sur le pont bascule

3ème étape : une fois la quantité déchargée, le personnel chargé du tri procèdent au tri manuel à l'aide des gants des dits déchets faute d'inexistence d'une chaîne de tri mécanisée.

Le tri sélectif au CET de BenAdouane, des personnels d'une entreprise privée assurent le tri de plastique : PET, PEHD (figure IV-12), et métaux comme le Fer, l'aluminium (Boîtes de conserve).



Figure IV-12 : Emballage du plastique trié

4ème étape : cette opération consiste au terrassement et au nivellement des déchets au niveau du casier par le biais d'un bull (opération mécanisée) (Figure IV-13).



Figure IV-13 : Bull de terrassement à la CET de BenAdouane

5ème étape : cette opération consiste au compactage par le biais d'un compacteur appelé à Pied de mouton (Figure IV-14).



Figure IV-14: Bull de terrassement à pied de mouton

IV.4.2.Organisation du service chargé de la gestion des déchets

L'organisation générale de la collecte des déchets ménagers et de nettoyage des voies publiques de la ville de Saïda est chapotée par une direction de la maintenance, des moyens généraux et de l'environnement et gérée par un service de nettoyage et de l'environnement. Le tableau ci-dessous nous indique l'organisation de cette structure.

Chapitre IV : Gestion des déchets ménagers à la ville de Saïda

Tableau IV-2: L'organisation générale de la collecte des déchets ménagers et de nettoyage
(APC Saïda, 2012)

Services	Caractéristiques	Descriptions
Service administration	Personnel	- 01 Chef de service - 02 Chefs de section - 01 secrétaire
	Infrastructures	- 01 structure administrative - 01 garage Abri - 01 station de service - 01 magasin
Service collecte des déchets	Nombre de secteurs	13 secteurs (Figure IV-15)
	Mode de collecte	- Système porte à porte (environ 80 %) - Système apport volontaire (environ 20 %)
	Moyens matériels de pré collecte	- 06 caissons métalliques - Important nombre de bacs à ordures ménagères (Acquisition de 1500 bacs en cours)
	Moyens matériels de collecte	- 20 camions dont 15 à bennes tasse usées et 03 basculantes * 08 camions de 6 T * 06 camions de 3,5 T * 03 camions de 3 T - 04 camions dont 02 à bennes tasseuses et 01 à benne basculante de 6 T - 01 camion ampli roll de 6 T pour transport des caissons métalliques
	Rotation de collecte	01 rotation par jour pour les 13 secteurs
	Temps et horaires de collecte	07 H de travail continu par jour soit : - en été : de 04 H à 11 H - au printemps : de 05 H à 12 H - en hiver et en automne : de 06 H à 13 H
	Temps de la rotation	04 à 05 H
	Moyens humains de collecte	105 personnes dont 20 chauffeurs et 85 éboueurs. Soit 01 chauffeur et 04 éboueurs par secteur
	Collecte hors circuit	Selon nécessité
balayage	Moyens matériels	Équipement pour 01 balayeur composé de : 01 brouette + 01 balai cantonnier + 01 pelle
	Moyens humains	168 personnes (éboueurs et balayeurs) dont 124 titulaires, 44 filets sociaux
	Temps et horaires de travail du balayage	- Agents titulaires: 07 ^h soit de 06 h à 13h - Agents filets social : 04h soit de 06h à 10h

IV.5. Sectorisation des collectes ménagères de la ville de Saïda

Le plan ci-dessous représente les limitations des 13 secteurs de la ville de Saïda (Figure IV-15). Ce mode de sectorisation facilite les circuits de collecte parcouru et réduit le nombre de rotations et la consommation carburant lors de la collecte, ainsi que la distance de l'agglomération vers le lieu de traitement (CET). La répartition des quartiers par secteur et les moyens mis à leur disposition sont donnés dans le tableau IV-3.

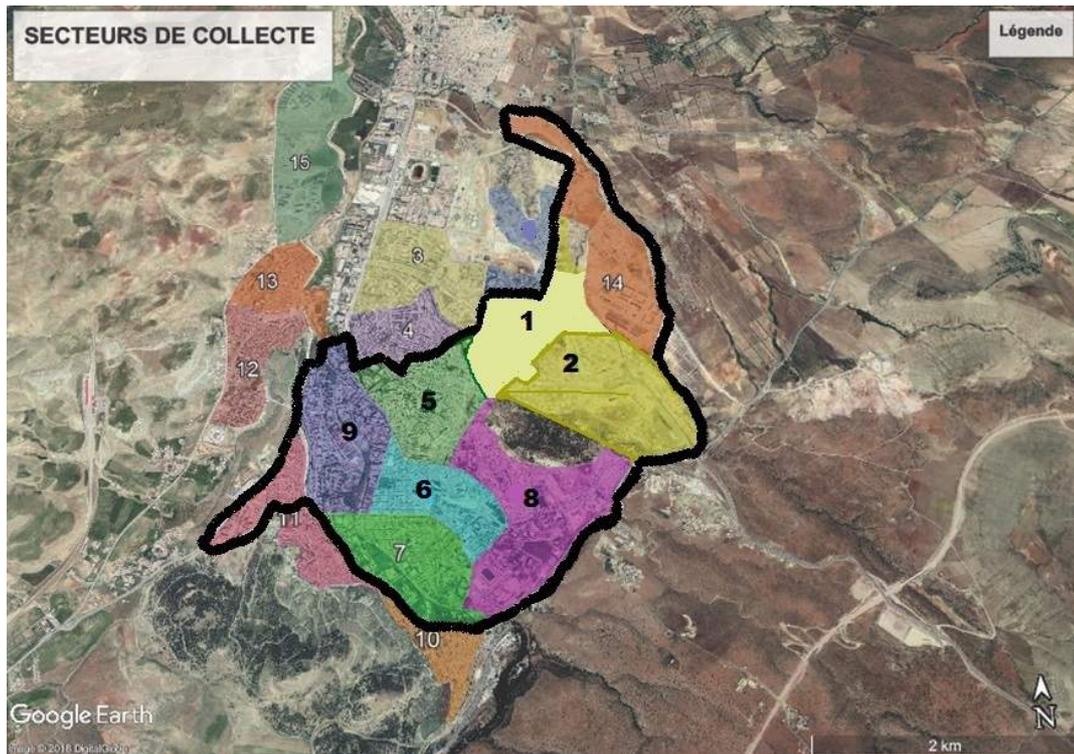


Figure IV-15 : Plan de Sectorisation de collecte des déchets ménagers de la ville de Saïda.

Tableau IV-3: Répartition des quartiers par secteur

Secteur	Camion	Capacité de camion (m ³)	Quantité de déchets (t/jr)
El-Badr (1)	Daewoo (figure IV-16)	15	6,8
Salam 2 (2)	Daewoo	15	6,2
Sid Chikh (8)	Daewoo	15	5,5
400 (5)	Isuzu	07	2,8
Boukadda (9)	Foton	15	2,8
Centre-ville 1(6)	Hyundai	9	3,5
Moyenne humain : 01 chauffeur et 04 agents, pour chacun camion. (7j/7j)			



Figure IV-16 : les camions dans la zone industrielle

IV.5.1. Les lacunes en terme de gestion des déchets ménager à la ville de Saïda

Après une investigation concernant l'ensemble du système de collecte et de gestion des déchets ménagers de la ville de Saïda, un nombre de lacunes ont été enregistrées.

- Concernant l'opération de la collecte des déchets :

- L'absence de la culture de tri

Le non-respect des citoyens des endroits de la collecte des déchets et aussi les horaires du ramassage. (Figure IV-17)

- Le manque des moyens humains et matériels.

- Concernant la gestion des déchets au niveau des CET :

- Saturation du centre d'enfouissement de BenAdouane. Cependant, les déchets des communes d'Aïn El Hadjar et Rebahia (Ouled khaled), Moulay Larbi et Sidi Ahmed sont toujours orientés vers ce lieu. De ce fait, les flancs des casiers ont été surélevés par des remblais non compactés à l'aide des Bulldozers.

- Aussi dans le cas du CET de BenAdouane, le bassin de récolte se trouve aussi dans un état de saturation complète (Figure IV-4).

- Absence totale des systèmes de traitement des lixiviat au niveau des trois CET (notamment dans le cas du CET de BenAdouane, Figure IV-5), ce qui constitue un vrai problème environnemental. Dans le cas du CET de BenAdouane, le bassin de récolte du lixiviat et

Chapitre IV : Gestion des déchets ménagers à la ville de Saïda

complètement saturé. L'excès en lixiviat constitue une source de pollution pour le sol et aussi un risque de contamination de la nappe karstique de Saïda.

-Le système de tri au niveau des CET peut être qualifié de précaire, suite à l'absence d'entreprises spécialisées dans le domaine.



Figure IV-17 : Exemple du non-respect des endroits de collecte des déchets.

IV.5.2. Les solutions proposées

Pour l'ensemble des problèmes cités, on propose un nombre de solutions pour la ville de Saïda pour une bonne gestion de la collecte des déchets au niveau de la ville et des CET

Concernant l'opération de collecte au niveau de la ville

- Instaurer la culture du tri sélectif. Le tri sélectif consiste à traiter les déchets suivant leur nature pour faciliter leur traitement (recyclage, compostage, valorisation...).on peut distinguer plusieurs étapes de tri sélectif : le tri à la source, lorsque les producteurs de déchets effectuent eux-mêmes le tri avant la collecte, et le tri par apport volontaire : lorsqu'ils apportent les déchets à des conteneurs spécifiques sur la voie publique ou en déchèterie et le tri en déchetterie effectué par des employés ou des machines lors du procédé de recyclage.
- Formation et éducation citoyenne à la pratique du tri sélectif des déchets ménagers.

Chapitre IV : Gestion des déchets ménagers à la ville de Saïda

- Installation des bacs pour le tri sélectif au niveau des quartiers pour faciliter leur collecte (Figure IV-18) et dans les lieux publics (Figure IV-19).



Figure IV-18: Bacs pour isoler chaque type de déchets.



Figure IV-19: Corbeille spécial pour le plastique à Saïda.

- Organisation de concours pour les meilleurs quartiers en termes de propretés comme celle organisé en 2018 et en 2019 (Figure IV-20).



Figure IV-20 : concours entre quartiers à la ville de saïda pour un environnement plus propre.
en 2018

- L'activité de gestion des déchets (collecte, tri et recyclage) devrait être transformée en une filière économique génératrice de richesse et pourvoyeuse d'emploi. Ainsi, l'état doit favoriser la création de micro-entreprises spécialisé dans la collecte, le tri et le recyclage des déchets.

Au niveau des CET, on propose les points suivants :

- Au niveau de la CET de Benadouane, il est très important de procéder à la réalisation d'un deuxième casier en plus d'un bassin de collecte de lixiviat.
- Installation au niveau des CET des centres de tri.
- Etablir un protocole de tri au niveau de chaque CET. La connaissance de la composition ordures ménagères est indispensable pour la bonne gestion. Elle éclaire les choix techniques et d'organisation, permet des gains d'efficacité et une meilleure maîtrise de coûts au niveau local. L'objectif principal du protocole est de caractériser les déchets entrants. (Mezouari-Sandjakdine, 2011). Le tableau IV-4 résume les différentes classes et catégories des déchets entrants pour la caractérisation dans les CET.

Chapitre IV : Gestion des déchets ménagers à la ville de Saïda

Tableau IV-4 : Les différentes classes et catégories des déchets entrants pour caractérisation des déchets entrants, ADEME, 2005 cité dans Mezouari-Sandjakdine, 2011.

Classes	Catégories minimales	Catégories correspondantes
Déchets non dangereux	Déchets facilement biodégradables	Déchets putrescibles
		Textiles sanitaires
	Papiers et cartons	Papiers
		Cartons
	Autres déchets de nature organique difficilement biodégradables	Composites
		Textiles
		Plastiques
	Autres déchets de nature minérale	Combustibles non classés
Incombustibles non classés		
Eléments fins < 20 mm	Métaux	
	Fines	
Déchets dangereux	Déchets dangereux des ménages	Séparer selon les différents types de déchets rencontrés : piles (bâton, bouton, rechargeables), batteries, thermomètres, lampes au mercure, peintures, solvants, pesticides, seringues, médicaments, ...)
	Déchets d'activités de soins	
	Déchets de l'artisanat et du commerce	
	Déchets industriels	

- Dans l'urgence, il faut prévoir des centres de traitement des lixiviats. Une autre alternative consiste à implanter une station de traitement permettant le traitement des lixiviats de l'ensemble des CET. Dans ce cas, le lixiviat doit être transporté de chaque CET à la station par le moyen d'engins adéquats.
- Implantations de puits d'observation couvrant l'ensemble du terrain de la CET pour le contrôle des eaux souterraines est recommandé et leur installation doit s'effectuer dans l'unité stratigraphique saturée la plus proche de la surface. Environnement Québec, 2003 cité dans Mezouari-Sandjakdine, 2011.
- Les réseaux de collecte des effluents doivent être séparés des eaux pluviales. Ils doivent être conçus à l'extérieur de la zone d'exploitation, avec un fossé périphérique au tour des casiers et sur l'ensemble du site du CET (Zahrani, 2006). Cela permettra le suivi et la qualité des eaux souterraines et la vérification de l'absence d'impact sur le milieu.

IV.6. Conclusions

La Wilaya de Saïda éprouve de grandes difficultés dans la gestion des déchets, que ce soit au niveau de la collecte et du transport ou sur le plan du traitement et ceci malgré les moyens mis œuvre et les centres d'enfouissement réalisés.

- D'après les investigations faites, les points suivants sont nécessaires pour la bonne gestion des déchets à la ville de Saïda :
- Instauration de la culture de tri sélectif à travers l'éducation dans les écoles et l'implication des divers secteurs de la société civile.
- Favoriser la création de micro-entreprises d'aspect environnemental (collecte, nettoyage, recyclage, traitement des lixiviats etc.).
- Construction de nouvelles centres d'enfouissement techniques dotés de système de tri et de traitement de lixiviats.
- Les communes doivent aussi prendre en charge des déchets ayant les mêmes caractéristiques (non dangereux) mais provenant des activités de son territoire : déchets des établissements publics, des sociétés, etc. Ces déchets assimilés aux ordures ménagères sont le plus souvent traités de la même façon.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

L'enfouissement de déchets ménagers et assimilés reste la méthode la plus privilégiée en Algérie à cause du taux excessif d'humidité qu'ils recèlent d'une part, et d'autre part, le non maitrisé d'autres filières comme l'incinération ou le compostage. Les ordures ménagères contiennent d'importantes quantités de substances organiques dont la décomposition provoque une pollution qui constitue un danger sur l'environnement et sur la santé. Le lixiviat qui se constitue par l'infiltration de l'eau à travers les ordures, contient des substances à forte toxicité qui nuisent au sol et à la nappe phréatique. A travers ce mémoire, nous avons mis en évidence les différents processus physiques et chimiques mis en jeu pour le transport de l'eau et des polluants à travers le sol, ainsi que les exigences techniques à être satisfaite dans les centres d'enfouissement techniques pour éviter toutes sources de pollution.

La ville de Saida a été pris comme cas d'étude via les dispositions de la collectivité locale pour la collecte et la gestion des déchets ménagères. Malgré les dispositions prises en compte, des lacunes importantes ont été remarquées notamment l'absence complète du traitement des lixiviats dans les centres d'enfouissement techniques. Des solutions, jugées indispensables, ont été proposées et qui peuvent se résumer dans les points suivants :

- Instauration de la culture de tri sélectif à travers l'éducation dans les écoles et l'implication des divers secteurs de la société civile.
- Favoriser la création de micro-entreprises d'aspect environnemental (collecte, nettoyage, recyclage, traitement des lixiviats etc.).
- Construction de nouvelles centres d'enfouissement techniques dotés de système de tri et de traitement de lixiviats.
- Les communes doivent aussi prendre en charge des déchets ayant les mêmes caractéristiques (non dangereux) mais provenant des activités de son territoire : déchets des établissements publics, des sociétés, etc. Ces déchets assimilés aux ordures ménagères sont le plus souvent traités de la même façon.

Références Bibliographiques

- Addou, A. (2009).** Développement durable. Traitement des déchets. Valorisation .élimination .ellipses, marketing S.A. paris. 283p.
- Ademe. (2007).** Biogaz issu de la mise en décharge: comment optimiser son captage. Agence de l'environnement et de maîtrise de l'énergie-ADEME -Éditions, Angers 2007. ISBN 978-2-86817-870-7 .
- Ademe, G. (2006).** d'Expertise des décharges dans les pays en développement.
- Alshihabi O. (2002).** Étude en laboratoire du comportement d'un sol compact non saturé, influence des cycles de séchage et d'humidification ; thèse de doctorat de l'université des sciences et technologies de Lille (France).
- André MUSY., C. H. (2004).** . Hydrologie 1. 2^{ém} édition Lausanne. .
- Arsenie, M. I. (2009).** Interprétation en contraintes effectives du comportement réversible des matériaux granulaires compactés non-saturés sous sollicitations triaxiales cycliques ; projet de fin d'étude ; Le Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvr .
- Azzuz, F.-Z. (2006).** information. Contribution a l'étude de la stabilisation chimique de quelques argiles gonflantes de la région de Tlemcen ; mémoire de magister de Université Aboubekr Belkaid – Tlemcen, Algérie .
- Bakkari, A. (2007).** Observation et modélisation d'ouvrages en terre soumis à des processus de séchage et d'humidification ; thèse doctorat l'école nationale des ponts et chaussées.
- Belaidi, S. (2013).** Contribution a l'étude théorique et numérique des mécanismes de transfert dans les sols saturés, Université Aboubekr Belkaid.
- Belghali, N. D. (2017).** Impact du centre d'enfouissement technique de Ras Bouira sur la diversité floristique (Doctoral dissertation, Université de Bouira).
- Bencherif Y., K. N. (2014).** Etude de l'efficacité du chitosane/ bentonite comme adjuvants de coagulation-floculation pour le traitement des lixiviats de la décharge de Saida.
- Bien, L. B. (2013).** Transferts d'eau et de soluté en milieu non saturé hétérogène à l'échelle d'un pilote de laboratoire: expériences et modélisations (Doctoral dissertation, Lyon, INSA).
- Blanchar, c. (2000).** thèse de doctorat, Caractérisation de mobilisation potentielle des Polluants inorganiques dans les sols pollués, Ingénieur en Génie Energétique INSA LYON,P44.48 .
- Blatz J. A., C. Y. (2008).** Vapor Equilibrium and Osmotic Technique for Suction Control; Geotech Geol Eng 26:661–673 .
- Bouarfafas, s. (2018).** Le centre d'enfouissement technique. Présentation au centre Réalisation et fonctionnement Le Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides CRSTRA).

- CFG. (s.d.).** Comité Français de Géosynthétiques. "Recommandations générales pour la réalisation d'étanchéité par géosynthétiques bentonitiques." Guide de recommandation, fascicule n 12 (1998): 60.
- Chassard-Bouchaud, C. (1995).** L'écotoxicologie. Que sais-je ? Paris : PUF. 128 p.
- Childs, E. C.-G. (1948).** Interaction of water and porous materials. Soil geometry and soil water equilibria: Proceedings of the Faraday Society, 3, 78-85.
- Childs, E. C.-G. (1950).** The permeability of porous materials. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 201(1066), 392-405.
- Chocat, B. (1997).** Eurydice 92 Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Paris : Tec et Doc Lavoisier. 1136 p.
- Colandini, V. (1997).** Effets des structures réservoirs à revêtement poreux sur les eaux de ruissellement pluviales : qualité des eaux et devenir des métaux lourds. Thèse de doctorat. Pau. Université de Pau et des pays de l'Adour. 161 p. + annexes .
- Delage P., C. Y. (2000).** L'eau dans les sols non saturés. Editions Techniques de l'ingénieur, Paris, vol C2, article C 301, Traité Construction .
- Delage, P. (2000).** L'eau dans les sols non saturés. Techniques de l'ingénieur-Construction, (C 301).
- Destribats, J. P. (1994).** La dépollution des sols en place. Techniques et exemple. collection Etude et recherches des LPC. Série environnement. génie urbain.120 p.
- Detay, M. (1997).** Gestion active des aquifères. Paris : Masson. 416 p.
- Djamaci, B. (2012).** La gestion des déchets municipaux en Algérie : Analyse prospective et éléments d'efficacité. Thèse de doctorat. Univ Rouen.392p.
- Dubois de la Sablonière, F. (1998).** Nitrates - origine et impact sur le milieu. Agriculture et environnement. Paris. SHF. pp. 95-104 .
- Fredlund D.G, X. A. (1994).** Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve; Journal géotechnique canadien, 31 (3): 521-532.
- Fredlund, D. G. (1993).** Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons.
- Gaidi, I. (2001).** Transfert par infiltration de l'eau et du soluté dans les sols non saturés utilisation de la méthode TDR (Time Domain Reflectometry), thèse de doctorat l'Université de MASCARA – Algérie.
- Gautier, A. (1998).** Contribution à la connaissance du fonctionnement d'ouvrage d'infiltration d'eau de ruissellement pluvial. Thèse de Doctorat. Villeurbanne. INSA de Lyon. 207 p.
- Ghanem, f. (2011).** Etude de la corrélation entre la perméabilité et la succion, Mémoire de magister université Mouloud Mammeri de Tizi ouzou .
- Gobat, J. A. (1998).** Collection gérer l'environnement. Lausanne : Presses Polytechniques et universitaires romandes. 519 p.

- Gueddouda, K. M. (2011).** Thèse doctorat, Comportement hydromécanique des sols compactés : Application à la conception d'une barrière ouvragée « sable de dune –bentonite ».
- Jean-Frédéric OUVRY** (Antea Group). (s.d.). Journée technique CFMS-CFG « Les Géosynthétiques et leurs applications ».
- Kehila Youcef, M. F. (2011).** Intérêt des matériaux géo-synthétiques dans la conception des Centres d'Enfouissement Technique (CET) en Algérie, 2011.
- Kehila, Y., G., M., & Gourc, J. (2006).** Apport des géomembrane dans l'étanchéification des Installations de Stockage de Déchets (I.S.D) en Algérie, 6ème Rencontre Géosynthétiques, 12/14 juin 2006, Montpellier, France.
- Le Roch, F. (1990-91).** Risque de contamination des nappes souterraines par infiltration des eaux pluviales urbaines. Mémoire de fin d'études. Rennes. ENSP-LCPC. 73 p.
- Les déchets collectés. Traitement. Tri. Recyclage .dunod, paris, 214p (2013).
- Makhlouf, N. (2015).** Cours cycle hydrologique. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire.
- Manuel d'utilisation pour la compréhension de vadose analyse, version 1 by GEO-SLOPE International Ltd. Calgary, Alberta, Canada. (2002).
- Maréchal, A. (1996).** Transport colloïdal dans les sols. LTHE INPG. Grenoble. Rapport de DEA. 60 p. .
- Marsily, D. (1981).** Hydrogéologie quantitative, Paris: Masson.
- Marsily, D. (1994).** Hydrogéologie, comprendre et estimer les écoulements souterrains et le transport des polluants, Paris : Ecole des mines de Paris, 237 p.
- Martinelli, I. (1999).** Thèse de doctorat , Infiltration des eux de ruissellement pluvial et transfert de polluants associés dans le sol – Vers une approche globale et pluridisciplinaire. .
- Masekanya J-P. (2008).** Stabilité des pentes et saturation partielle, Etude expérimentale et modélisation numérique. Thèse doctorat université de Liege, faculté des sciences appliquées, .
- Mekki, L. (2009).** Méthodologie d'étude et techniques d'identification des paramètres de comportement des sols fins soumis à des cycles de sécheresse prolongée (application aux argiles expansives de m'sila) ; thèse de magister, université Mohamed Boudiaf d .
- Mesure et contrôle in-situ de la perméabilité des matériaux utilisés dans les dispositifs d'étanchéité pour la protection de l'environnement état de l'art et développements. DEA Génie Civil. INSA Lyon. (1998).
- Mezouari-Sandjakdine, F. (2011).** Conception et exploitation des centres de stockage des déchets en Algérie et limitation des impacts environnementaux. Diss. Limoges, 2011.

- Musy, A. e. (1991).** Physique du sol. Collection Gérer l'environnement. Lausanne. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. 337 p.
- Musy, H. (2003).** Hydrologie, 1ere édition. Lausanne .
- Philip, J. R. ((1957 a)),**. " The theory of infiltration : 1 . the infiltration equation and its solution", Soil Sci., Vol. 83, p. 345-357.
- Philip, J. R. ((1957 b)),**. " The theory of infiltration : 2. the profile of infinity ". Soil Sci., Vol. 83,p. 435-48.
- Philip, J. R. ((1957 e)),**. " The theory of infiltration : 5. the influence of the initial moisture content ", Soil Sci., Vol. 84, p. 329-339.
- Philip, J. R. (1969).** "The theory of infiltration", Advances in hydro sciences, Vol. 5, p. 215-296.
- Potelon, J. (1993).** La qualité des eaux destinées à la consommation humaine : Guide de lecture et d'interprétation des analyses. La lettre du cadre territorial. Voiron. 156 p. .
- Ramade, F. (1992).** Précis d'écotoxicologie. collection d'écologie. Paris. Masson. 304 p.
- Rivière, J. (1998).** Evaluation du risque écologique des sols pollués. Association RE.CO.R.D. Paris : Tec et Doc Lavoisier. 230 p.
- Talatizi, I. A. (2014).** Etude des infiltrations à travers une digue de barrage en terre Cas d'un barrage algérien. Université mouloud mammeri tizi ouzou. 190 p.
- Yang H., R. H. (2004).** A study of infiltration on three sand capillary barriers ; Can. Geotech. J. 41: 629–643.
- Yaron, B. C. (1996).** Soil pollution. processus and dynamics. New York : Springer. 313 p.
- Zadjaoui, A. (. (2009).** Étude du transfert hydrique dans les sols non saturés: Échange sol-atmosphère (Doctoral dissertation, Ph. D. Dissertation, Tlemcen (Algeria)).
- Zahrani, F. (.2006).** Contribution à l'élaboration et validation d'un protocole d'audit destiné à comprendre le dysfonctionnement des centres de stockage de déchets (CSD) dans les pays en développement. Application à deux (CSD). NKOL FOULOU (Cameroun) et Essaouira. Thèse de doctorat. Institut INSA Lyon.

Sites Internet :

Agence Nationale des Déchets (14.08.2020). <https://www.and.dz/> (organisme gouvernemental))

Le Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides

(www.futura-sciences.com)

<http://www.sictoba.fr/La-station-d-epuration.html>

<http://fr.ru-waterproofing.com/waterproofing-membrane/hdpe-waterproofing-membrane/hdpe-geomembrane-anti-uv-fish-pond-liner-tank.html>

https://fr.made-in-china.com/co_trustworthy-supplier/product_HDPE-Geomembrane-for-Construction-Material_egoehsnyy.html

<http://www.blanctextil.com/fr/>

(Unité de traitement de Lixiviats, Traitement Biologique) <https://www.etares.fr/>

<http://www.heracleantech.com/images/logo-hera-cleantech.png>

<http://www.andi.dz/PDF/monographies/SAIDA.pdf>

