



HAL
open science

Caractérisation hydrodynamique des sols en vue d'une recherche des conditions de reconstitution de parcelles d'infiltration

Khaoula Mahmoud

► **To cite this version:**

Khaoula Mahmoud. Caractérisation hydrodynamique des sols en vue d'une recherche des conditions de reconstitution de parcelles d'infiltration. Hydrologie. 2010. dumas-00600194

HAL Id: dumas-00600194

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00600194>

Submitted on 14 Jun 2011

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

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

EN-CAPE 10-108 R – V0

**Caractérisation hydrodynamique des sols en vue
d'une recherche des conditions de
reconstitution de parcelles d'infiltration**

Khaoula MAHMOUD

Département Climatologie – Aérodynamique – Pollution – Epuration

Tuteur CSTB : **Abdel LAKEL**

15/03/10-10/109/10

EN-CAPE 10.108 R – V0

Caractérisation hydrodynamique des sols en vue d'une recherche des conditions de reconstitution de parcelles d'infiltration

Khaoula MAHMOUD

**Département Climatologie – Aérodynamique
Pollution – Epuration**

*Cette étude a été réalisée
dans le cadre du stage de master de recherche en sciences et
techniques des environnements urbains (Ecole Centrale de Nantes)*

Nantes, le 30/09/2010

*Mots clés : Milieu poreux insaturé, infiltration, capacité de rétention,
teneur en eau*

Nbre de pages : 97



CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT
11 RUE HENRI PICHERIT, BP 82341, 44323 NANTES CEDEX 3
Tél : 02.40.37.20.00 Fax : 02.40.37.20.60
Site Web : <http://aerodynamique.cstb.fr>

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au Centre Scientifique et Technique du bâtiment, au sein du département CAPE. Que Monsieur **Jean Michel AXES**, chef du département soit remercié pour m'avoir accueilli pendant 6 mois afin d'effectuer mon stage de recherche.

Je tiens à remercier et à témoigner toute ma reconnaissance à mon responsable de stage Monsieur **Abdel LAKEL**, Coresponsable du domaine Pollution Épuration Santé Eau/Air du Département CAPE, pour sa patience, son soutien et son aide tout au long de ce travail. Il m'a su me guider dans mes réflexions et questionnement et a su m'encadrer tout en me laissant libre de mes choix. J'espère qu'il trouvera ici le témoignage de ma reconnaissance.

Je remercie Madame **Béatrice BECHET**, enseignante à l'Ecole Centrale de Nantes et Chargée de recherche au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, qui n'a jamais épargné son temps pour répondre à mes interrogations et m'entourer de ses conseils, j'adresse ma profonde reconnaissance.

J'aimerais exprimer toute ma gratitude envers Mademoiselle **BULTEAU Gaëlle**, Ingénieur Étude & Recherche au Département CAPE, assistance à la coordination des Hommes et des Moyens Techniques (Plateforme d'assainissement), pour les marques de sympathie qu'elle m'a témoignées et pour avoir relu mon travail et corrigé les fautes de français n'étant pas spécialiste. Ainsi que tous les ingénieurs et les techniciens et le personnel administratif du CSTB qui m'ont aidé, par leur disponibilité et leurs compétences, à effectuer ce stage.

Je ne saurais oublier le responsable de master STEU à l'Ecole Centrale de Nantes Monsieur **Jean-François SINI** qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance ainsi que tous mes enseignants de master.

Au titre personnel, je remercie toute ma famille, et en particulier mes parents, mes frères et sœurs ainsi que mon fiancé, qui m'ont toujours soutenu durant cette année de master.

Merci à tous mes amis et mes collègues pour tous les moments qu'ont partagés durant ces 6 mois de stage.

RESUME

Cette étude concerne la caractérisation des sols en vue d'une recherche des conditions de reconstitution de parcelles d'infiltration. Des essais d'infiltration d'eau claire en condition insaturée dans la colonne de laboratoire sont effectués en utilisant deux matériaux non remaniés (terre du CSTB et sable) et quatre matériaux reconstitués. La capacité de rétention ainsi que le temps de passage de chaque matériau sont déterminés à partir des courbes de suivi du débit de sortie et des volumes de rétention dynamique et statique. L'interprétation de ces courbes montre que ces paramètres évoluent avec la hauteur de la colonne, le débit d'alimentation et le type du matériau. Il est aussi constaté que, pour la terre prélevée sur le site du CSTB, la capacité de rétention d'eau est la plus importante par rapport aux autres matériaux.

ABSTRACT

We study in this paper the characterization of soils for a search of conditions for the recovery of a parcel of infiltration. Some clear water infiltration tests in unsaturated media were performed in a laboratory column with two undisturbed materials (CSTB soil and sand) and four reconstituted materials. The capacity of retention and the space time of each material were determined from the curves of monitoring output flow and the dynamic and static volume retention. The interpretation of these curves shows that these parameters vary with the column height, the feed rate and type of materials. We also observe that for the soil taken from CSTB, the capacity of water retention is most important in relation to other materials.

Les mots clés: Milieu poreux insaturé, infiltration, capacité de rétention, teneur en eau

Keywords: Unsaturated porous media, infiltration, retention capacity, water content.

Liste des figures

Figure 1.1 : Implantations de CSTB.....	9
Figure 1.2 : photographie aérienne du site de Nantes.....	10
Figure 1.3 : photographie du bâtiment Aquasim.....	11
Figure 2.1 : les deux premiers triangles.....	21
Figure 2.2 : diagramme des textures de GEPPA(1963).....	23
Figure 2.3 : triangle de Malterre.....	22
Figure 2.4 : triangle de Tuvernier ey Maréchal.....	22
Figure 2.5 : triangle de Hénin.....	23
Figure 2.6 : triangle de Duchaufour.....	23
Figure 2.7 : triangle de Demolen.....	23
Figure 2.8 : triangle de texture de GEPPA (17 classes) 1963.....	24
Figure 2.9 : triangle de texture de GEPPA (17 classes) transformation en triangle equilateral.....	24
Figure 2.10 : triangle de texture de GEPPA (16 classes).....	24
Figure 2.11 : triangle de texture de GEPPA (6 classes).....	24
Figure 2.12 : Schéma d'organisation hiérarchique de la structure des sols.....	26
Figure 2.13 : présentation des zone saturée et non saturée.....	36
Figure 2.14 : différentes formes de l'eau dans le sol.....	38
Figure 2.15 : représentation d'une courbe de rétention	43
Figure 2.16 : courbes de rétention de certains sols	44
Figure 2.17 : la conductivité hydraulique des différents types de sol.....	45
Figure 2.18 : <i>Représentation schématique des écoulements hydriques dans les sols à l'échelle du pore</i>	46
Figure 2.19 : transport advectif sans dispersion	49
Figure 2.20 : transport advectif avec dispersion	50
Figure 2.21 : Transfert de molécules d'eau (a) à l'échelle porale pour un écoulement à vitesse constante et unidirectionnelle (convection-diffusion), (b) à l'échelle multiporale et (c) à l'échelle macroscopique (advection-diffusion)	52
Figure 2.22 : Principe de calcul de la quantité de contaminant adsorbé puis désorbé en réacteur agité à flux ouvert à partir des courbes de percée du contaminant et d'un traceur agité à flux ouvert	54
Figure 2.23 : Courbes de percée d'un traceur inerte et d'un soluté réactif (ici: rétention du contaminant par le sol) en sortie de colonnes de sol, obtenues à partir d'une injection instantanée et simultanée du traceur inerte et du soluté réactif en entrée de colonne.....	55
Figure 2.24 : Schéma d'instrumentation d'un tube lysimétrique contenant une carotte de sol.....	56
Figure 2.25 : principe de mesure indirecte de la conductivité hydraulique à saturation par la méthode de « beerkan ».....	57
Figure 2.26 : Schéma d'un infiltromètre à succion contrôlée.....	57
Figure 3.1 : préparation du terrain.....	64.
Figure 3.2 : Schéma de l'appareil mis au point par l'ORSTOM.....	65
Figure 3.3 : Courbe de type $I = f(t)$ pour la détermination de la valeur de vitesse d'infiltration en régime permanent.....	66
Figure 3.4 : préparation du trou à l'aide d'une tarière.....	67
Figure 3.5 : photo de dispositif de test de Porchet.....	67

Figure 3.6 : variation de vitesse d'infiltration d'eau en fonction du temps selon la méthode de Porchet.....	68
Figure 3.7 : photo de banc d'essais réalisé en fonctionnement.....	70
Figure 3.8 : Schéma explicatif caractérisant les volumes d'eau mis en jeu dans les massifs de colonne.....	71
Figure 3.9 : représentation d'une courbe de drainage en régime permanent.....	72
Figure 4.1 : suivi de débit de sortie en fonction du temps dans le cas de la terre.....	74
Figure 4.2 : suivi de débit de sortie en fonction du temps dans le cas du sable.....	75
Figure 4.3 : suivi de débit de sortie en fonction du temps dans le cas de sol 1.....	76
Figure 4.4 : suivi de débit de sortie en fonction du temps dans le cas de sol 2.....	76
Figure 4.5 : suivi de débit de sortie en fonction du temps dans le cas de sol 3.....	77
Figure 4.6 : suivi de débit de sortie en fonction du temps dans le cas de sol 4.....	77
Figure 4.7 : résultats expérimentaux de débit de sortie en fonction du temps pour les quatre sols.....	78
Figure 4.8 : détermination des différents volumes de rétention dynamique en fonction des hauteurs de colonne des différents matériaux....	79
Figure 4.9 : détermination des différents volumes de rétention statique en fonction des hauteurs de colonne des différents matériaux	80
Figure 4.10 : teneur massique en humidité (rétention statique) des massifs des matériaux en fonction des hauteurs des colonnes.....	80
Figure 4.11 : représentation des temps de passage en fonction des matériaux correspondants et la hauteur de colonnes.....	81
Figure 4.12 : classement des matériaux selon la teneur en eau massique.....	83
Figure 4. : classement des matériaux selon la teneur en eau volumique.....	83
Figure 4.14 : résultats expérimentaux de débit de sortie pour les différents matériaux en fonction de débit d'alimentation.....	85
Figure 4.15 : détermination des différents volumes de rétention dynamique en fonction des différents matériaux et de débit d'alimentation.....	86
Figure 4.16 : détermination des différents volumes de rétention statique en fonction des différents matériaux et de débit d'alimentation	87
Figure 4.17 : résultats expérimentaux de volume total retenu dans les dans les différents matériaux en fonction de débit d'alimentation.....	87
Figure 4.18 : représentation des temps de passage en fonction des matériaux correspondants et de débit d'alimentation.....	88

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : classification granulométrique (ASTM.....	13
Tableau 2.2 : classification de la société internationale des sciences du sol.....	17
Tableau 2.3 : les différentes classes texturales des sols.....	18
Tableau 2.4 : propriétés biologique, chimique et physique influencées par la structure du sol.....	28
Tableau 2.5 : caractéristiques de quelques sols en place.....	30
Tableau 2.6 : les différentes classes des sols selon la classification LPC.....	32
Tableau 2.7 : les différentes classes des sols selon GTR.....	33
Tableau 2.8 : Correspondance entre les diverses catégories d'eau et leurs états énergétiques.....	39
Tableau 3.1 : caractéristiques des matériaux étudiés.....	60
Tableau 3.2 : valeurs du coefficient d'uniformité et du diamètre effectif pour les différents matériaux.....	61
Tableau 3.3 : valeurs des diamètres moyens.....	61
Tableau 3.4 : Valeurs des densités relatives des différents matériaux.....	62
Tableau 3.5 :caractéristiques des matériaux étudiés.....	62
Tableau 3.6 : les matériels nécessaires pour la méthode de Muntz.....	65
Tableau 3.7 : Tableau récapitulatif de protocole expérimental.....	69
Tableau 3.8 : les fractions massiques de différents cas des matériaux reconstitués.....	71
Tableau 4.1 : volume d'eau totale mise en jeu dans les différents matériaux.....	81
Tableau 4.2 teneurs massiques et volumiques en eau totale des différents matériaux.....	83

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION	8
1.1 Contexte du projet d'étude	8
1.2 Présentation du CSTB	9
1.2.1 L'établissement	9
1.2.2 Les compétences du CSTB	9
1.2.3 Le CSTB de Nantes	10
2. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	12
2.1 Caractérisation des sols	12
2.1.1 Définitions	12
2.1.2 Constituants des sols	13
2.1.3 Les horizons des Sols	16
2.1.4 Texture	16
2.1.5 Structure	24
2.1.6 Les propriétés des sols	28
2.1.7 Classifications du sol et critères de classification :	31
2.2 Hydrodynamique des milieux poreux	33
2.2.1 Le transfert hydrique en milieu poreux	33
2.2.2 Le sol, un milieu poreux	35
2.2.3 État de l'eau dans le sol	37
2.2.4 Milieu saturé	39
2.2.5 Écoulement de l'eau dans les sols non saturés	41
2.3 Transferts des polluants dans le sol: mécanismes de transfert	45
2.3.1 Généralités sur la pollution	45
2.3.2 Le devenir des polluants dans les sols:	48
2.4 État de l'expérimentation in situ et en cases lysimétrique	53
2.4.1 Méthodes de caractérisation des sols	53
2.5 Méthodes géophysiques de caractérisation des sols	58

2.5.1	Géoradar	58
2.5.2	Le résistivimètre	59
3.	MATERIELS ET METHODES	60
3.1	Introduction.....	60
3.2	Matériaux étudiés	60
3.2.1	Nature des matériaux étudiés.....	60
3.2.2	Caractéristiques physiques des matériaux	61
3.3	Caractérisation hydrodynamique	63
3.3.1	Le protocole expérimental.....	63
3.3.2	Mesures in situ	64
3.3.3	Prélèvement des échantillons.....	68
3.3.4	Études en colonnes de laboratoire en conditions non saturées	68
3.3.5	Rétention d'eau	71
4.	RESULTATS ET DISCUSSION	74
4.1	Rétention de l'eau	74
4.2	Caractérisation de la capacité de rétention d'eau	74
4.2.1	Méthode de mise en régime permanent	74
4.2.2	Méthode de ressuyage.....	78
4.2.3	Le temps de passage.....	81
4.2.4	Comparaison des matériaux	82
4.2.5	L'influence du débit d'alimentation	83
4.3	Conclusions et discussion	88
5.	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	91
6.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE.....	93
7.	ANNEXES.....	98

1. INTRODUCTION

Ce rapport présente les travaux effectués dans le cadre du stage du master de recherche en sciences et techniques des environnements urbains qui se déroule au sein du département Climatologie-Aérodynamique-Pollution-Epuration (CAPE) au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) à Nantes. Ce stage, encadré par ABDEL LAKEL, coresponsable du domaine thématique Eau, a été planifié du 15 Mars 2010 au 10 Septembre 2010.

1.1 Contexte du projet d'étude

Dans le cadre de la Loi sur l'Eau du 3 janvier 1992, l'épuration des eaux usées fait l'objet d'une attention renforcée de la part des collectivités territoriales, notamment par la mise en place de services publics dédiés au contrôle de la conception, la réalisation, l'entretien et le fonctionnement des installations d'assainissement autonome. En France, 12 à 15 millions de personnes sont concernées par ce mode d'assainissement. Sur le plan technique, les systèmes d'épandages des effluents septiques de l'assainissement autonome sont dimensionnés de manière complètement empirique (sans aucune relation physiquement établie entre la constance d'infiltration (déterminée à l'eau claire) d'un sol et ses performances épuratoires.

Le sol d'une parcelle est défini dans ce cadre comme un lieu de transfert, d'échange et de transformation de polluants. Ces polluants issus des activités humaines variées peuvent venir contaminer accidentellement un sol et les milieux hydrauliques souterrains associés ou bien être épurés volontairement dans des zones dédiées à cela (ex. épandage des eaux usées). La connaissance scientifique de ces processus est très lacunaire et les règles de dimensionnement qui en découlent sont trop souvent empiriques.

Ce stage s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche doctoral, qui débutera ultérieurement au CSTB, dont les objectifs sont d'installer une parcelle d'infiltration afin d'étudier le comportement des sols vis-à-vis des eaux contenant des polluants d'origine minérale ou organique, tout en caractérisant et reproduisant des sols dans des conditions maîtrisées et en restant à une échelle significative et réaliste.

En préambule de cette thèse, la présente étude a pour objectif de définir, les conditions de reconstitution d'une parcelle d'infiltration dans des conditions réalistes à travers une caractérisation hydrodynamique des sols.

Six matériaux (sols) ont été choisis afin de rendre compte de la caractérisation hydrodynamique à travers l'étude de phénomène d'infiltration et de la rétention d'eau en condition insaturée.

Ce travail se divise en trois principaux axes:

- Afin de positionner le problème, la première partie est une synthèse bibliographique à travers laquelle nous aborderons tout d'abord la caractérisation des sols (définition, composition, classification,..), nous nous intéresserons ensuite aux différents processus d'écoulement en milieux poreux (saturé et insaturé) alors que la dernière partie sera consacrée à la description des mécanismes de transferts des polluants à travers le sol
- Dans une seconde partie, les matériels et méthodes utilisés seront détaillés

- La dernière partie sera consacrée aux résultats expérimentaux. Nous présenterons une comparaison des matériaux suivant leur caractérisation hydrodynamique qui repose sur la détermination d'une part des capacités des matériaux à retenir l'eau et d'autre part de la distribution des temps de passage

1.2 Présentation du CSTB

1.2.1 L'établissement

Créé en 1947, le CSTB est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), placé sous la tutelle conjointe du ministre du Logement et de la Ville et du ministre de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables et de la Direction Générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction.

L'effectif total de son personnel, au 31 décembre 2009, est de 867 personnes. Ces salariés sont répartis dans différents pôles, présents sur cinq sites en France (2009) :

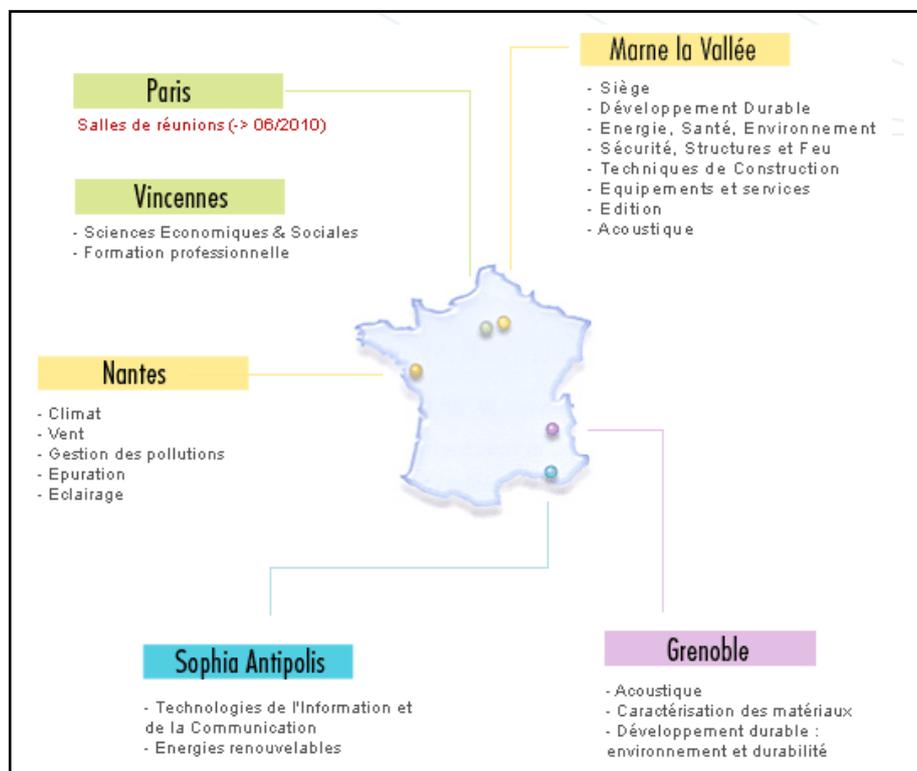


Figure 1.1: Implantations du CSTB en France.

1.2.2 Les compétences du CSTB

Trois métiers complémentaires structurent l'activité du CSTB: la recherche et la consultance, l'évaluation et la diffusion du savoir.

- ☞ La recherche et la consultance, appliquées à tous les domaines de la construction, y compris l'environnement urbain, la santé, les sciences de la communication, de l'économie et du social. L'expertise du CSTB vise à résoudre des problèmes d'intérêt public, favoriser les dynamiques d'innovation industrielle, architecturale et sociologique.
- ☞ L'évaluation, les essais et la certification sur les produits et les ouvrages : évaluation des risques ; évaluation qualitative de produits et de procédés de

**Caractérisation hydrodynamique des sols en vue
D'une recherche des conditions de reconstitution
De parcelles d'infiltration**

construction innovants ; essais acoustiques thermiques mécaniques, test de résistance au feu ; certification pour les produits traditionnels et innovants

- ☞ La diffusion du savoir. Impliquée dans de nombreux programmes de recherche nationaux et européens, le CSTB occupe une position de leader dans le développement des nouvelles technologies de l'information et de la communication appliquées au secteur de la construction. Il propose à l'ensemble des professionnels du bâtiment une gamme complète de nouveaux services et produits d'information.

1.2.3 Le CSTB de Nantes

Le site de Nantes est un EPIC de plus de 80 personnes. Son activité est structurée autour de deux unités opérationnelles: le département Climatologie-Aérodynamique-Pollution- Epuraton (CAPE) et le département Acoustique et Eclairage.



Figure 1.2 : Photographie aérienne du site de Nantes

1.2.3.1 Le département CAPE

Le Département Climatologie-Aérodynamique-Pollution-Epuraton s'inscrit dans la pluridisciplinarité de compétence et la complémentarité Scientifique et Technique des Départements du CSTB.

Ce département développe des activités de consultance et de recherche autour des pôles de compétence suivants :

- ☞ Ambiances – Confort - sollicitations climatiques
- ☞ Transports
- ☞ Pollution, Epuration, Santé (eau/ Air)
- ☞ Climatologie
- ☞ Vent / Ouvrages

Face à la prise de conscience collective de la problématique de la gestion durable de la ressource eau, le CSTB accélère son implication scientifique et sa contribution stratégique à la gestion de l'eau. L'ensemble de ses recherches est structuré autour de

**Caractérisation hydrodynamique des sols en vue
D'une recherche des conditions de reconstitution
De parcelles d'infiltration**

la "plate-forme de l'eau", regroupant les travaux et les équipements des centres de Nantes, Grenoble et Marne-la-Vallée. Les équipes de la plate-forme ont identifié le besoin de disposer d'un Grand Équipement Eau. Ainsi est né Aquasim, dédié à la simulation réaliste et accélérée des événements physiques et chimiques intervenant dans la chaîne de l'eau au sein du système bâtiment-parcelle-environnement. Ce nouvel équipement est opérationnel depuis novembre 2009 et traite notamment de :

- ☞ Qualité de l'eau potable dans le bâtiment
- ☞ Durabilité des réseaux intérieurs
- ☞ Épuration des eaux usées
- ☞ Récupération et utilisation de l'eau pluviale
- ☞ Recyclage des eaux grises
- ☞ Réponse hydraulique de la parcelle à un événement climatique
- ☞ Comportement des systèmes d'évacuation par temps de pluie
- ☞ Protection contre la pollution de l'air via les tours aérorefrigérantes



Figure 1.3: Photographie du bâtiment Aquasim

Aquasim permet également de valider d'autres types d'approche: échelle pilote, simulation numérique, etc. Aquasim représente en outre un cadre privilégié pour la pédagogie, la démonstration et la formation.

1.2.3.2 Le département Acoustique et éclairage

Le département Acoustique et éclairage comporte les pôles «Éclairage, Electricité et Electromagnétisme». Les études menées à Nantes concernent les thèmes de l'éclairage naturel et artificiel, l'ergonomie de la vision, les systèmes de gestion technique de l'éclairage et la photo-simulation de l'éclairage (approche physique et interactive de la lumière et de ses caractéristiques dans l'architecture)

2. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Caractérisation des sols

2.1.1 Définitions

Les sols peuvent être définis de manière générale comme le produit remanié et organisé, de l'altération de la couche superficielle de la croûte terrestre, essentiellement sous l'action d'agents climatiques et biologiques [68].

Cette formation naturelle est ainsi un milieu qui est loin d'être homogène variant en fonction de sa topographie, sa pédologie et son occupation, un système d'échange et des relations dynamiques intégrant les différents éléments de son environnement et toutes les actions directes et indirectes de l'homme [46].

Dans le langage courant, selon [42], le sol peut être définie comme une surface: «plan d'occupation des sols», ou l'interface entre l'atmosphère et la biosphère: «étude du sol» mais aussi ce qui est au dessus du plancher: «revêtement de sol»

Au sens large, les sciences du sol englobent des lors d'une part les disciplines centrées sur les sols, leur évolution et les processus qui s'y déroulent, à savoir pédologie, physique du sol, chimie du sol et biologie du sol [68]. Plusieurs définitions du sol sont donc possibles en fonction de l'usage que l'on en fait et du rôle qu'on lui assigne, dans ce cadre, [24] affirme que «le mot «sol» est un mot banal que chacun utilise très fréquemment, sans être nécessairement conscient de sa signification. Il faut dire qu'elle peut être très différente selon les préoccupations, les cultures, les connaissances, les époques» «c'est pourquoi la science du sol relève en fait d'un ensemble de plusieurs disciplines séparées bien qu'interdépendantes» [48].

2.1.1.1 Définition agronomique

Le sol est la partie arable explorée par les racines et les plantes cultivées ou non, zone d'échanges entre la biosphère et la lithosphère, son potentiel de production se traduit par la notion de fertilité [25].

2.1.1.2 Définition pédologique

Le sol est une couche mince formant la partie superficielle de la croûte terrestre résultant des différents processus de l'altération physique, mécanique ou chimique [25], comme il a défini, le pédologue Albert Demolon, le sol est comme étant «la formation naturelle de surface, à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers processus, physiques, chimiques et biologiques, au contact de l'atmosphère et des êtres vivants.

2.1.1.3 Définition écologique

Écologiquement le sol est une matrice poreuse, complexe et multiphasique dont ses phases: phase solide, minérale et organique constituent «l'architecture» du sol tout en assurant des échanges dynamiques de matière et d'énergie qui lui donnent ses caractéristiques physiques, chimiques et biologiques [16] et grâce au pouvoir adsorbant et les capacités d'échanges, le sol demeure un milieu réactif et nutritif essentiel des écosystèmes terrestres [25].

2.1.1.4 Définition fonctionnel

Du point fonctionnel, et selon [42], le sol est conçue comme un échantillon de la couche supérieure de la croûte terrestre formée à partir de l'altération et de transformation sous l'action combinée du climat, de la biologie (la vie animale, la vie végétale, les microorganismes et l'homme) et de la géomorphologie sur une roche mère ou un matériau original, selon la norme ISO 11074, les différentes fonctions du sol peuvent être résumées en: « contrôle des cycles des éléments; support des plantes, des animaux et de l'homme; base des constructions et des immeubles; production agricole; rétention de l'eau et des dépôts; constitution d'une réserve génétique; conservation en tant que mémoire de l'histoire et de la nature; protection en tant qu'archive archéologique et paléoécologique» .

Les sols sont, avec les milieux aquatiques et l'atmosphère, une de trois composantes majeures de la biosphère. A ce titre ils ont joué et jouent en permanence un rôle déterminant dans l'apparition et le maintien de l'activité biologique et de la biodiversité à la surface de la planète.

2.1.2 Constituants des sols

Le sol est un milieu poreux dont la phase solide, constituée par des minéraux et des composés organiques, forme des assemblages plus ou moins volumineux et donne au sol sa structure. Cette phase solide n'est pas continue et délimite un espace poral de dimensions variés et de géométrie complexe. Cette caractéristique explique la présence de phases fluides, liquide et gazeuse, susceptibles de se déplacer et donner lieu à des flux de matières [46].

De part sa composition et sa structure, le sol peut influencer de façon considérable la rétention des polluants. Pour ce qui est de la composition du sol, on distingue dans un premier temps, les constituants minéraux et les constituants organiques:

2.1.2.1 La matière minérale du sol

Les constituants inorganiques de la phase solide des sols sont des minéraux; ils sont nombreux et leur nature dépend à la fois des roches sur lesquelles les sols sont formés et des conditions de cette formation. Ils constituent l'essentielle de la masse de la majorité des sols à l'exception des sols très organiques [19].

En général les sols sont classés par rapport à la distribution de la taille des particules qu'ils renferment. La société américaine ASTM (American Society for Testing and Materials) a développé un système unifié pour la classification des sols basés sur la taille des particules (cf. tableau 2.1). Dans la mesure où la plupart des sols naturels sont hétérogènes, plusieurs types de sols peuvent être mélangés ensemble. Les pourcentages relatifs de chaque fraction du sol peuvent être déterminés et un caractère du sol peut être déduit en utilisant le triangle de texture du sol.

Tableau 2.1 Classification granulométrique (ASTM)

Désignation	Diamètre des grains (mm)
Blocs erratiques	>200
Cailloux	200-60
Graviers grossiers	60-20
Graviers moyen	20-6
Graviers fins	6-2

Caractérisation hydrodynamique des sols en vue
D'une recherche des conditions de reconstitution
De parcelles d'infiltration

Sables grossiers	2-0,6
Sables moyens	0,6-0,2
Sables fins	0,2-0,06
Silts grossiers	0,06-0,02
Silts moyens	0, .02-0,006
Silts fins	0,006-0,002
Argiles	<0,002

2.1.2.1.1 Les argiles

Les argiles sont des substances naturelles complexes composées essentiellement de silicates plus ou moins hydratés, d'aluminium généralement, mais également de magnésium, de fer ou même de nickel qui les colorent différemment. D'après les fractions adoptées par l'Association Internationale de ma Science du Sol, la dimension des particules est inférieure à 0,002 à 2mm de diamètre [19].

Ces aluminosilicates sont caractérisés par leur grande surface spécifique qui leur donne une forte capacité de rétention d'eau [18].

Comme les sables et les limons présentent le squelette du sol, les argileuse sont considérés comme la chair du sol, du fait la fraction argileuse colloïdale détermine le comportement physique du sol puisqu'elle a la surface spécifique la plus grande et une activité physico-chimique importante présentant essentiellement dans la capacité d'échange ionique(phénomène très important pour la science du sol du fait qu'il affecte les processus de rétention et la libération des éléments nutritifs et des sels ainsi que la floculation et la dispersion des colloïdes du sol),la capacité d'absorption d'eau et la forte sensibilité aux différents changements du milieu ou des conditions d'équilibre [48].

2.1.2.1.2 Les sable et les limons

Ils présentent une granulométrie plus grossière que les argiles (diamètre des grains variant de 0,002 à 2mm). Les sables et les limons jouent un rôle important dans l'édification de la structure des sols dont ils constituent le «squelette». Les sols riches en sable et en limon sont caractérisés par leur perméabilité à l'eau et à l'air. L'adsorption des composés organiques sur du sable de quartz peut être considérée comme négligeable dans des conditions humides d'adsorption [45].

2.1.2.1.3 Les graviers et les cailloux

Les graviers sont l'ensemble de particules d'un diamètre compris entre 2 et 20mm provenant de l'érosion mécanique et de la fragmentation des roches ou des minéraux par les agents naturels. Les cailloux sont les éléments du sol dont le diamètre est supérieur à 20mm.

2.1.2.2 La matière organique du sol

La matière organique du sol est défini comme le produit de l'altération biologique provenant du métabolisme d'êtres vivants végétaux, animaux et microbiens, cette matière carbonée est composée d'éléments principaux (C, H, O, N) et d'éléments secondaires (S, P, K, Ca, Mg) [14].

La fraction organique se repartie en 4 groupes:

- ✓ La matière organique vivante, animale et végétale, qui englobe la totalité de la biomasse en activité
- ✓ Les débris d'origine végétale (résidus végétaux, exsudats) et animale (déjections cadavres) regroupés sous le nom de "matière organique fraîche"
- ✓ Des composés organiques intermédiaires, appelés matière organique transitoire, provenant de l'évolution de la matière fraîche
- ✓ Des composés organiques stabilisés, les matières humiques, provenant de l'évolution des matières précédentes

Les matières organiques non vivantes qui proviennent de la décomposition et transformation des matériaux végétaux par des processus biotiques et abiotiques ne constituent pas un compartiment majeur de cycle terrestre du carbone [42], mais ils jouent dans les sols un rôle majeur :

- Comme source et réserve d'énergie et d'éléments minéraux majeurs et en traces, qui font partie de la structure biochimique de la matière organique, pour les microorganismes, les plantes
- Dans les phénomènes d'échange, de complexation et de réduction grâce en particulier à ses propriétés électrochimiques, physicochimiques et hydrauliques.
- Dans les cycles des éléments et des composés organiques et minéraux : C, N, P, S, K [35].

2.1.2.3 La phase gazeuse

C'est l'air qui est le plus généralement en contact avec le sol. Il y pénètre dans la mesure où l'eau ne remplit pas tous les vides. Sa composition peut alors être notablement affectée, car l'oxygène est consommé par les racines et les microorganismes alors que le gaz carbonique est rejeté [21]. La composition de cette phase est déterminée donc par:

- ✓ Les échanges avec l'atmosphère par diffusion moléculaire couplée à la volatilisation et à sa dissolution,
- ✓ La respiration des organismes vivants,
- ✓ Les échanges avec la solution du sol,
- ✓ Les apports de diverses substances organiques volatiles, qu'ils soient volontairement (les traitements avec des pesticides gazeux) ou accidentels (dépôts de déchets industriels incontrôlés).

2.1.2.4 L'eau

L'eau est retenue principalement dans les pores ou par interaction avec les minéraux argileux. La quantité d'eau retenue dépend de plusieurs facteurs: la nature des constituants du sol, sa structure et des conditions climatiques (température, humidité, etc.). Elle est donc très variable, à la fois dans l'espace et dans le temps. Cet aspect quantitatif de rétention est complété par un aspect énergétique lié à l'intensité avec laquelle l'eau retenue à diverses contraintes (pression, gravité) qui déterminent sa mobilité et par conséquent son transport et sa biodisponibilité [21].

L'eau joue un rôle très important dans tous les phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui se produisent dans le sol. La disponibilité de l'eau dans le sol peut être divisée en quatre niveaux:

- Le niveau de saturation en eau,
- La capacité de champ,
- Le point de flétrissement,
- Le niveau extra sec.

2.1.3 Les horizons des Sols

Le sol, appelé «couverture pédologique» dans le Référentiel Pédologique (Baize et Girard, 1995) est généralement divisé en plusieurs strates, appelés «horizons». La couverture pédologique résulte de l'action combinée de facteurs climatiques, de l'activité biologique, du relief, de l'eau et du substrat à travers le temps [10].

Ces horizons ont des caractéristiques distinctes induites par les processus de formation du sol. Les horizons majeurs sont notés O, A, E, B et C. Chaque sol ne contient pas chaque horizon, c'est fonction de son niveau de développement. L'épaisseur des horizons varie selon les sols.

On distingue généralement cinq types d'horizons :

- Horizon A: est un horizon de surface, constitué surtout de matières organiques et soumis un fort lessivage qui l'appauvrit en éléments fins et en fer.
- Horizon B: est un horizon enrichi par illuvion en éléments fins et amorphes: argiles, oxydes de fer et d'aluminium, humus. Cet horizon est souvent appelé horizon «structural» ou d'altération différant de la roche mère par son plus fort degré d'altération (présence de Fe_2O_3 libre) [39].
- L'horizon C: est un horizon correspondant au matériau originel à partir duquel se forment les horizons A et B supérieurs. Il est peu différent de l'horizon RM désignant la roche mère non altérée.
- L'horizon G: est un horizon de couleur gris verdâtre, caractéristique des sols hydromorphes, riche en fer ferreux, avec des taches de couleur rouille (fer ferrique) se formant au contact de l'oxygène encore présent dans la zone de battance de la nappe phréatique [42].
- L'horizon G: roche dure sous jacente

2.1.4 Texture

Selon [42], la texture du sol dérive du mot tissu, tissage du latin «textum» et concerne uniquement la phase solide, exprime le mode d'arrangement des constituants des roches et renseigne sur la gamme de tailles des particules élémentaires du sol d'une manière qualitative (matériau sol grossier et rugueux ou fin et moelleux) et quantitative (proportion des divers tailles des particules) [45]. Selon la texture du sol, deux catégories sont respectivement désignés : un sol à texture fine ou légère si les particules sont petites ($<2\mu m$) possédant des propriétés colloïdales, et à texture grossière ou lourd comportant des particules suffisamment grandes [48] comprises entre 2 et $50\mu m$ [45].

En fait, la connaissance de la texture du sol est très importante car cette dernière conditionne le comportement du sol et détermine les propriétés physiques et chimiques ainsi qu'hydrauliques (propriétés de rétention en eau, la conductivité hydraulique) [54].

Tableau 2.2. Classification de la Société Internationale de Sciences du Sol

DENOMINATIONS DES CLASSES GRANULOMETRIQUES AGRONOMIQUES ET LIMITES					
DENOMINATIONS EN 5 CLASSES	ARGILE	LIMONS FINS	LIMONS GROSSIERS	SABLES FINS	SABLES GROSSIERS
LIMITES DE TAILLE EN μm	< 2	2 à 20	20 à 50	50 à 200	200 à 2000
DENOMINATIONS EN 3 CLASSES	ARGILE	LIMONS totaux		SABLES totaux	
LIMITES DE TAILLE EN μm	< 2	2 à 50		50 à 2000	

En sciences du sol, la notion de texture s'apparait assez vague et ambigu [45]. Selon [10], elle est liée à la notion de composition granulométrique qui peut être exprimée en utilisant un diagramme triangulaire, et prend aussi en compte la répartition pondérale des particules organisées par leurs dimensions même qu'elle reste beaucoup moins étendue que le terme texture [45].

[10] font intervenir la notion de comportement, de jugement global comme une analyse granulométrique du terrain, formulé par des sensations tactiles (pétrissage des doigts), ainsi que optiques et auditives, en l'absence de toute analyse.

Le concept de la granulométrie implique que chaque sol soit constitué des particules d'un grand nombre des particules élémentaires agrégées et associées les unes aux autres par des forces, ces particules peuvent être des petites dimensions ou grandes (cailloux provenant de roche de l'écorce terrestre). Les matériaux du sol peuvent être de nature organique ou minérale selon le type de l'altération qui a subi [45].

En fait, chaque matériau est désigné par sa classe texturale déterminée sur la base des rapports de masse de trois fractions : sable, limon et argile [42], la notion «argile», «limon», «sable» n'ont pas la même définition, selon les différentes études qu'ont été faites dans le cadre de la texture du sol, ce qui induit à un vocabulaire assez différent [54].

La texture du sol permet aussi de donner une estimation précise tout en se basant sur des termes d'appellations réservés aux personnes expérimentées qui font référence explicitement à une classe texturale du tel ou tel diagramme triangulaire [9] dont quatre classes fondamentales permettent de définir les propriétés du sol [35]:

2.1.4.1 *Texture sableuse:*

Pauvre en matières organiques (horizons jaunes clairs), léger, très filtrant, bien aéré.les sols sablonneux sont bien drainés et très séchant (nécessité d'irrigation). Ils ne retiennent pas l'eau et les sels minéraux, les plantes ont donc peine à s'y développer. En pente, ils sont très sensibles à l'érosion. Ils ont une faible capacité d'échange anionique et cationique [35]. Généralement le terme «sable» correspond aux particules

ayant une taille variant entre une limite inférieure (20-63 μ m). Dans le langage courant, on désigne à tort par sable les graviers extraits dans les vallées [9].

2.1.4.2 *Texture limoneuse:*

Sol riche, facile à travailler, moyennement aéré, l'excès de limon et l'insuffisance d'argile peuvent provoquer la formation d'une structure massive, accompagné de mauvaises propriétés physiques. Ils retiennent bien l'eau et les sels minéraux mais ils peuvent se compacter très vite après de fortes pluies créant des structures très fragiles qui se désagrègent dans l'eau avec une porosité faible d'où très forte sensibilité à l'érosion (ravines, coulées de boue, ...). Leur activité biologique est fortement dépendante des conditions d'aération du sol [35]. Pour la fraction « limon », la gamme de diamètre varie d'une limite inférieure (1-5 μ m) jusqu'à une limite supérieure (20-63 μ m) [54].

2.1.4.3 *Texture argileuse:*

Sol chimiquement riche, mais à pauvres propriétés physiques et difficile à travailler; milieu imperméable et mal aéré, formant obstacle à la pénétration des racines. L'argile peut stocker de très importantes quantités d'eau (gonflement), mais l'assèchement des horizons argileux provoque des retraits et des fentes, pour cette raison les horizons très argileux sont difficiles à travailler (lourds et collants). Ils peuvent être asphyxiants (eau stagnante) et pénaliser l'activité biologique du sol (micro-organismes mais aussi racines des végétaux cultivés). Leur activité biologique est fortement pénalisée par la saturation en eau (horizons gorgés d'eau). La porosité est ainsi très améliorée (respiration biologique, circulation de l'air et de l'eau). Tous les sols ne sont pas que argileux ou limoneux mais plutôt un mélange d'argile, de limon et de sable; seul une analyse granulométrique peut donner les pourcentages exacts de ce mélange. La fraction granulométrique de l'argile correspond à une gamme des particules dont le diamètre varie de 1 à 5 μ m [54].

Des différentes classes texturales sont regroupées dans le tableau ci-après ainsi que leurs propriétés et les caractéristiques de leurs catégories.

Tableau 2.3. Les différentes classes texturales des sols [41].

Classe texturale	Propriétés	Catégories	Caractéristiques
<i>Sable</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Matériau du sol contenant 85% et plus de sable - le pourcentage du limon plus de 1,5 fois - le pourcentage d'argile et n'excède pas 15% 	Sable grossier	<ul style="list-style-type: none"> - 25% ou plus de sable très grossier et grossier - moins de 50% de toute autre catégorie de sable
		Sable	<ul style="list-style-type: none"> - 25% ou plus de sable très grossier, grossier à moyen - moins de 50% de sable fin ou très fin
		Sable fin	<ul style="list-style-type: none"> - 50% ou plus de sable fin - moins de 25% de sable très grossier, grossier à

			<p>moyen</p> <ul style="list-style-type: none"> - moins de 50% de sable très fin.
		Sable très fin	<ul style="list-style-type: none"> - 50% ou plus de sable très fin
<i>Sable loameux</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Matériau du sol contenant au plus 85 à 90% de sable et un pourcentage de limon, plus de 1,5 fois - le pourcentage d'argile égal ou supérieur à 15%; - ce matériau ne contient pas moins de 70 à 85% de sable et le pourcentage de limon plus le double du pourcentage d'argile n'excède pas 30% 	Sable grossier loameux	<ul style="list-style-type: none"> - 25% ou plus de sable grossier et très grossier - moins de 50% de toute autre catégorie de sable
		Sable loameux	<ul style="list-style-type: none"> - 25% ou plus de sable très grossier, grossier à moyen, - moins de 50% de sable fin ou très fin
		Sable fin loameux	<ul style="list-style-type: none"> - 50% ou plus de sable fin ou moins de 25% de sable très grossier, grossier à moyen - moins de 50% de sable très fin
<i>loam sableux</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Matériau du sol contenant soit: - 20% ou moins d'argile avec un pourcentage de limon plus deux fois celui de l'argile supérieur à 30 et 52% ou plus de sable - moins de 7% d'argile, moins de 50% de limon et entre 43 et 52% de sable. 	Loam sableux grossier	<ul style="list-style-type: none"> - 25% ou plus de sable grossier et très grossier et moins de 50% de toute autre catégorie de sable
		Loam sableux	<ul style="list-style-type: none"> - 30% ou plus de sable très grossier, grossier à moyen, - moins de 25% de sable très grossier e - moins de 30% de sable fin ou très fin
		Loam sableux très fin	<ul style="list-style-type: none"> - 30% ou plus de sable très fin ou plus de 40% de sable fin à très fin dont au moins la moitié est du sable très fin et moins de 15% de sable très grossier, grossier et moyen

Loam	- Matériau du sol contenant de 7 à 27% d'argile, de 28 à 50% de limon et moins de 52% de sable
Loam limoneux	- Matériau du sol contenant 50% ou plus de limon et de 12 à 27% d'argile, ou bien 50 à 80% de limon et moins de 12% d'argile
Limon	- Matériau du sol contenant 80% ou plus de limon et moins de 12% d'argile
Loam sableux argileux	- Matériau du sol contenant de 20 à 35% d'argile, moins de 28% de limon et 45 % ou plus de sable
Loam argileux	- Matériau du sol contenant de 27 à 40% d'argile et de 20 à 45% de sable
Loam limono-argileux	- Matériau du sol contenant de 27 à 40% d'argile et moins de 20% de sable.
Argile sableuse	- Matériau du sol contenant 35% ou plus d'argile et 45 % ou plus de sable.
Argile limoneuse	- Matériau du sol contenant 40% ou plus d'argile et 40% ou plus de limon
Argile	- Matériau du sol contenant 40% ou plus d'argile, moins de 45% de sable et moins de 40% de limon
Argile lourde	- Matériau du sol contenant plus de 60% d'argile

2.1.4.3.1 Histoire des analyses granulométriques et des triangles de texture.

2.1.4.3.1.1 Les analyses granulométriques :

Il semble, selon [79]: que la première «analyse mécanique» était une simple séparation des «sables» par tamisage, cette analyse qui ait été faite par M. Houghton en Angleterre en 1681.

En 1772, une procédure de lavage induisant à une séparation de sable d'argile ait été pratiquée par Johannes Baptiste de Beunie, alors que Rozier dans son article «sable» du cours complet d'agriculture (cité par [79]) a décrit une méthode de séparation des «sables» permettant la distinction des sables siliceux des sables calcaires par une attaque d'acide.

Dans la moitié de XIXe siècle, des diverses méthodes quantitatives ont été proposées telles que la sédimentation et la lévigation de Masure (citées par [39] et [79]). Mais la méthode qui sera la plus couramment utilisée et même recommandée par le «comité consultatif des stations agronomiques et des laboratoires agricoles» (1891,1898), sera celle de Schläesing (aux environs de 1875) basée sur des séparations par tamisages, attaque nitrique pour dissoudre les carbonates, dispersion par l'ammoniaque et sédimentation [39].

Les compositions granulométriques sont pratiquement toujours réduites à trois fractions: argile, limon et sable. La somme de ces trois fractions est égale à 100%. Les limites entre

les différentes classes varient, la plupart des auteurs utilisent la norme internationale pour la limite supérieure de la fraction argile à $2\mu\text{m}$ car elle correspond à l'apparition des propriétés colloïdales alors que certains la fixent à $5\mu\text{m}$ et d'autres à $1\mu\text{m}$ [79]. L'analyse granulométrique fournit les données permettant de tracer les courbes reliant la proportion de particules présentes dans le système à leur diamètre.

2.1.4.3.1.2 Triangle des textures :

C'est à l'aide de ces triangles qu'apparaît la notion de texture.

En effet, il existe de nombreux modèles de représentation triangulaire mais le principe est toujours le même, que le triangle soit équilatéral ou rectangle [8]. On positionne la granulométrie selon deux des trois fractions. La troisième fraction est égale au complément à 100% et se trouve ainsi fixée. Chaque point du triangle correspond donc à une répartition granulométrique bien définie des constituants du sol.

En fait, le triangle de texture est apparu en France et aux USA entre 1906 et 1911, sous la forme de rectangle (figure 2.1), la paternité de la découverte revenant à Lagatu (1905). Mais cette notion ne se développera réellement qu'au mieux à partir de 1930, et sera classique de 1950 sous forme de triangle équilatéral. La majorité des triangles utilisent une séparation à $50\mu\text{m}$ [36]. Ainsi, parmi les triangles les plus utilisés actuellement en France, le triangle de GEPPA (groupe d'études des problèmes de pédologie appliquée), sa représentation la plus courante en triangle rectangle (figure 2.2) est d'un usage extrêmement simple aussi bien pour situer une composition granulométrique que pour sa lecture ou sa fabrication rapide. Le taux de sable ne se lit pas directement, mais on le déduit facilement par différence [9].

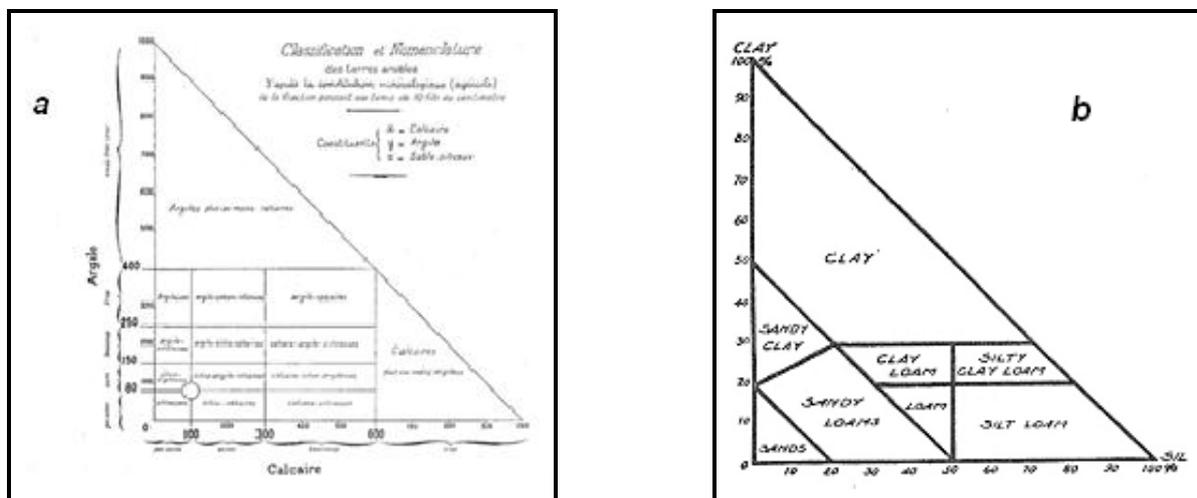


Figure 2.1. Les deux premiers triangles : celui de Lagatu (a) et des USA (b) [71].

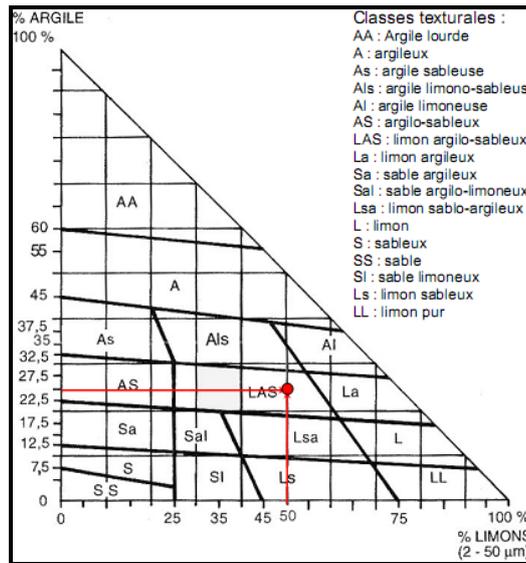


Figure 2.2. Diagramme des textures du GEPPA(1963) [9].

Positionnons dans ce triangle un point dont l'analyse granulométrique nous a donné la répartition suivante : 25% d'argile, 50% de limons et 25% de sable.

On repère tout d'abord la graduation 25 sur l'axe des argiles et on trace une droite perpendiculaire à cet axe et passant par ce point 25. On fait de même avec l'axe des limons en traçant une droite perpendiculaire à cet axe et passant par la graduation 50. L'intersection entre ces droites nous donne l'emplacement du point recherché dans le triangle de texture. Ce point se trouve dans la classe LAS, c'est-à-dire qu'il représente un échantillon de sol dont la texture est limono-argilo-sableuse. Dix-sept classes sont identifiées dans le triangle des textures GEPPA [8].

2.1.4.3.1.3 Les triangles anciens ou peu utilisés en France :

De nombreux triangles ont été définies, mais sont actuellement peu utilisés [triangles de Demolon (figure 2.7) et de Duchaufour (figure 2.6), (cités par [79]; diagramme de Hénin(1976) (figure 2.5); diagramme de Tavernier et Maréchal(1958) (figure 2.4) ; diagramme de Chamley(1987)]. Ainsi que le triangle de Malterre (fig 2.3), a été défini par Malterre en 1961, ce triangle présente les textures des échantillons analysés provenant de la France entière et il «présente des zones en hachuré dans les argiles et les limons dont la légende est «textures non encore signalées»» [79].

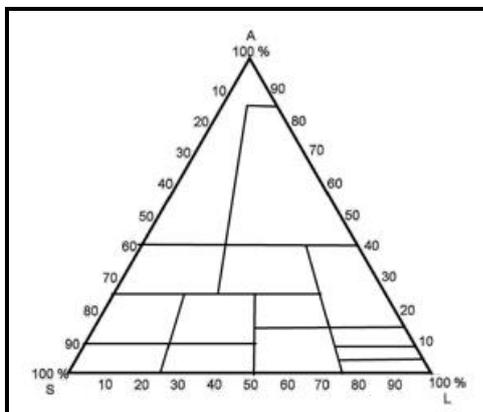


Figure 2.3. Triangle de Malterre

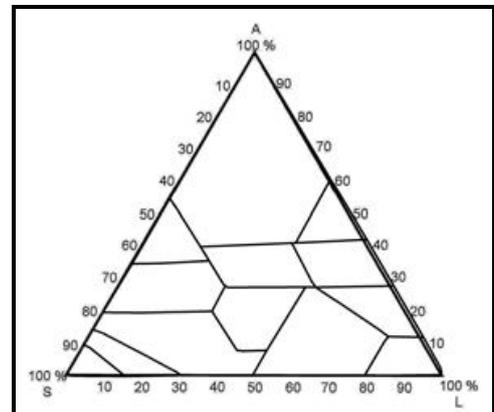


Figure 2.4. Triangle de Tavernier et Maréchal

**Caractérisation hydrodynamique des sols en vue
D'une recherche des conditions de reconstitution
De parcelles d'infiltration**

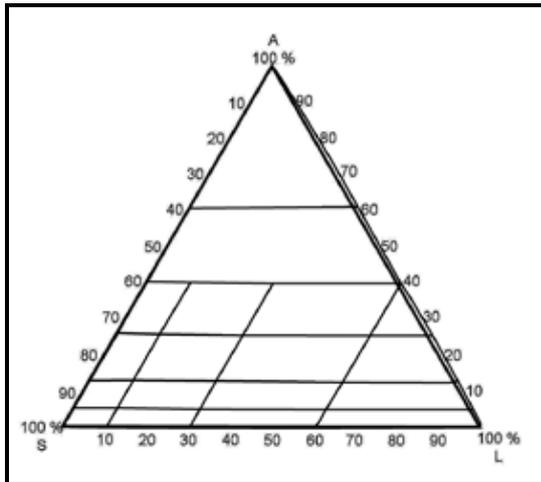


Figure 2.5. Triangle de Hénin

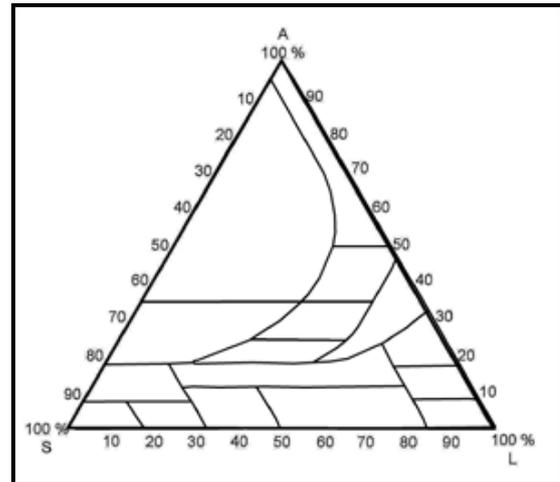


Figure 2.6. Triangle de Duchaufour

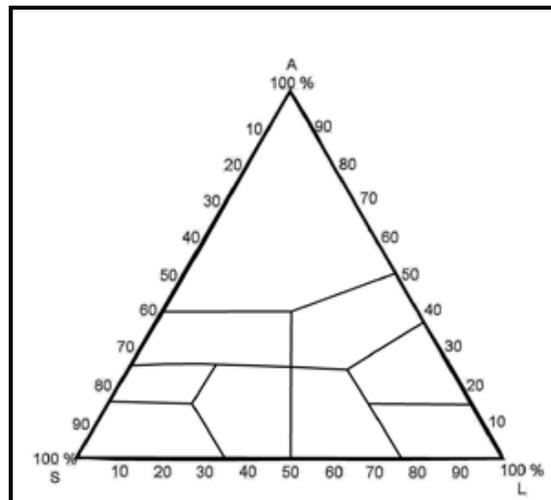


Figure 2.7. Triangle de Demolon

2.1.4.3.1.4 Les triangles utilisés actuellement en France

Publié en 1963 et élaboré par un groupe de pédologue et comportant 17 classes, le triangle GEPPA (Groupe d'Études des Problèmes de Pédologie Appliquée) [79], se présente sous la forme d'un triangle rectangle isocèle dont les côtés représentent les teneurs en argile (axe vertical), limons (axe horizontal) et sable (axe oblique), chaque axe étant gradué de 0 à 100%. Sa représentation la plus courante en triangle rectangle (figures 2.10; 2.11; 2.12 et 2.13) est d'un usage extrêmement simple aussi bien pour situer une composition granulométrique que pour sa lecture ou sa fabrication rapide. Le taux de sable ne se lit pas directement, mais on le déduit facilement par différence [9].

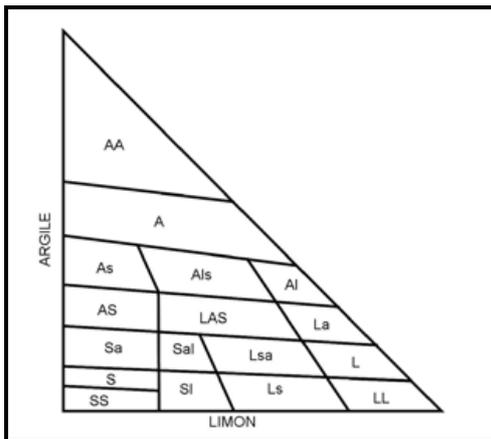


Figure 2.8. Triangle de texture du GEPPA (17 classes) 1963

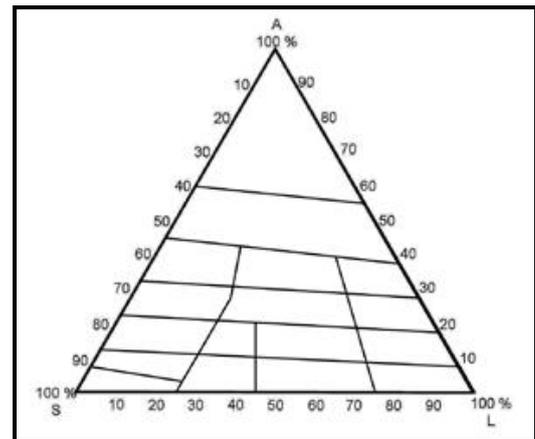


Figure 2.9. Triangle de texture du GEPPA (17 classes) 1963, transformé en triangle équilatéral

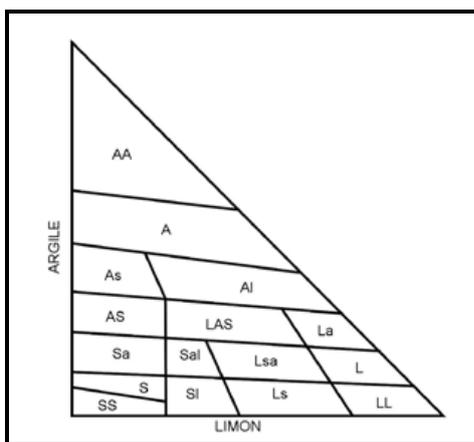


Figure 2.10. Triangle de texture du GEPPA (16 classes)

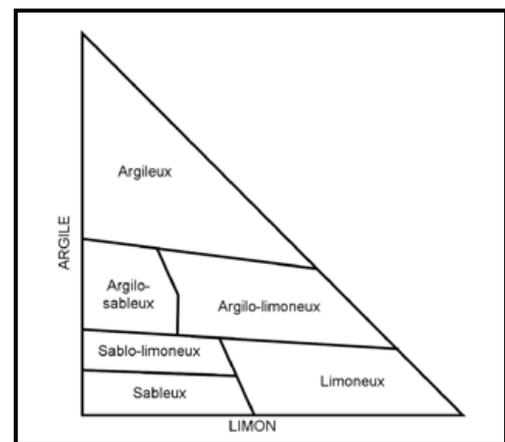


Figure 2.11. Triangle de texture du GEPPA (6 classes)

2.1.5 Structure

La reconnaissance de la structure demeure une étape pertinente dans chaque étude du sol, en effet, plusieurs définitions sont adoptées dans la littérature scientifique, pour [9], ce terme désigne la façon selon laquelle s'arrangent géométriquement et durablement les éléments solides élémentaires (sables, limons, argiles, matières organiques) dans le sol en formant ou non des volumes élémentaires macroscopiques appelés agrégats. [5], affirme que même si le concept de structure du sol soit universel, il fait l'objet de plusieurs définitions, et il est possible de classer ces définitions selon trois tendances, une définition simplifiée de la structure comme étant la manière d'assemblage les divers constituants du sol, une deuxième définition fait intervenir les liaisons établies entre les particules constitutives du sol et enfin une conception plus générale intégrant les propriétés déterminantes de la structure. Ceci induit

éventuellement selon [46] à deux grandes subdivisions. La première concerne la forme et la dimension des particules, la seconde les conséquences de leur assemblage.

Toutes ces définitions de la notion de la structure du sol peuvent s'appliquer selon [6] aux assemblages des particules élémentaires d'argile (quelques micromètres) aux éléments structuraux (de quelques micromètres à quelques centimètres) jusqu'aux unités pédologiques.

Alors que pour [10], la structure est une propriété qui s'exprime plus ou moins et différemment au cours du temps, selon des cycles saisonniers ou même plus courts, selon les accidents météorologiques. [48] note à ce propos que la structure du sol est l'arrangement géométrique de ses éléments solides dans le sol en place.

Selon [68], la définition de la structure peut se faire selon deux approches complémentaires: la première se base essentiellement sur le mode d'arrangement des éléments constitutifs de la phase solide du sol, alors que la seconde s'oriente vers la description du réseau des agrégats générée par la structuration du sol. Pour les deux approches, l'analyse se base essentiellement sur des critères géométriques dont leur évaluation se fait par des méthodes non destructives.

Pour avoir une approche complète et globale, la structure du sol devait être décrite par l'association des ses particules constitutives à différentes échelles [48]. Mais pour de multiples raisons, historiques, techniques et scientifiques, on limite souvent l'étude de la structure du sol aux échelles des assemblages des particules élémentaires appelées agrégats [24]. [53] définit les agrégats comme des assemblages de particules primaires liées entre elles d'une manière plus intense qu'avec les particules qui les entourent. Les agrégats sont donc délimités par des surfaces de moindre résistance qui prennent naissance sous l'action de perturbations mécaniques d'origine naturelle (pédogenèse) ou anthropique (travail du sol) [24]. Ces agrégats assemblés donneraient naissance à des volumes de taille de plus en plus importante : ce sont les agglomérats ou les mottes que l'on peut observer en étudiant morphologiquement la forme et la taille ; des éléments structuraux visibles sur le terrain [46]. De ce fait on distingue une microstructure caractérisée par la distribution des agrégats en fonction de leurs tailles, et une macrostructure correspondant à la distribution des mottes.

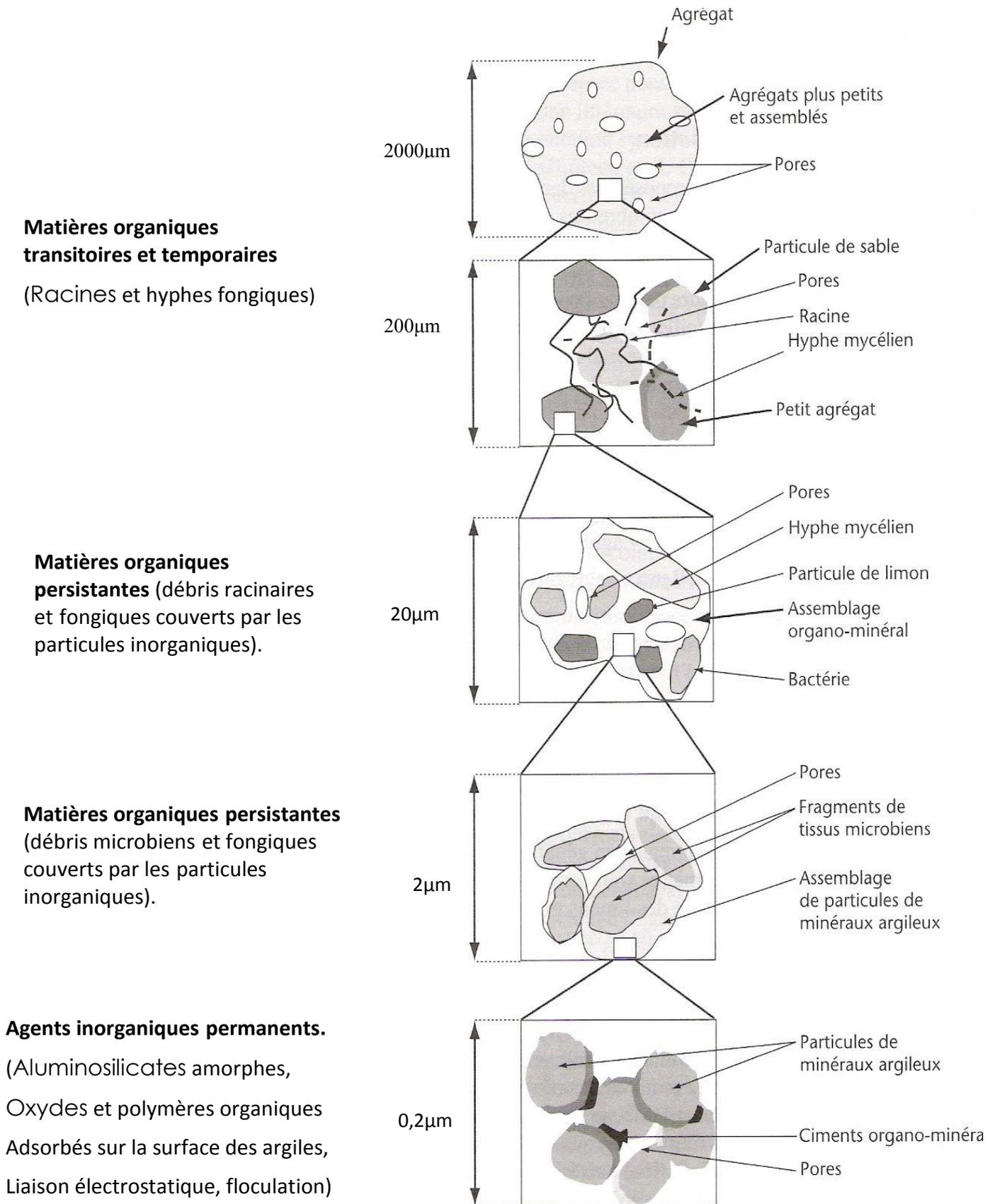


Figure 2.12. Schéma d'organisation hiérarchique de la structure des sols (adapté par [24]). A chaque taille d'agrégats, est associé un type spécifique de matière organique du sol qui stabilise la structure

2.1.5.1 Description morphologique de la structure: microstructure et macrostructure

La structure du sol correspond essentiellement d'une part de l'aspect granulométrique de ses éléments solides et d'autre part des forces électrostatiques dues à la présence des minéraux argileux et de l'humus. Ces forces donnent aux éléments structuraux du sol une telle cohésion conduisant à une approche quantitative de la structure reposant sur le taux d'agrégation spécifique [68].

L'observation et la description morphologique de la structure peuvent être réalisées sur deux échelles adoptées soit, de façon très simple, à l'œil nu, soit sur une échelle plus réduite à l'aide d'une technologie plus élaborée, technique de microscopie [24] ce qui induit à définir arbitrairement deux niveaux d'organisation, selon l'échelle d'observation, soit la microstructure déterminée par une observation microscopique et la macrostructure observée à l'œil nu sur le terrain [68]. En effet, dans le premier cas, l'observation sur le terrain permet d'avoir accès à des informations macroscopiques sur la forme et la taille des éléments structuraux visibles, c'est-à-dire des gros agrégats et des mottes; dans ce cas on parlera de macromorphologie de la structure. Alors que, la technique microscopique permet d'accéder à des caractéristiques plus détaillées des objets de dimensions élémentaires, cette technique qui ne peut être effectuée qu'au laboratoire [24].

La notion de microstructure se réfère ainsi à la dimension, la forme et l'arrangement des unités élémentaires solides et des vides [68], elle concerne la description de ces constituants à des échelles du point de vue de la pédogenèse [24]. La base technique de la micromorphologie est l'observation au microscope de coupes minces de sols dont l'interprétation fait usage d'un ensemble de termes [46], dont les définitions sont comme suit:

- ✓ **Le squelette** est l'assemblage de particules cristallines ou amorphes [24] indépendantes ou constitués par une association très stable dont la taille est supérieure à 2µm. la notion de squelette se réfère ainsi aux fractions granulométriques du site et du sable [46],
- ✓ **Le plasma** est constitué par une masse plus au moins homogène des particules dont la taille est si petite que la forme ne peut être distinguée à l'œil nu ou au microscope [68], Pratiquement, le plasma est constitué par la fraction inférieure à 2 µm incluant les colloïdes organiques ainsi que la fraction argileuse[46],
- ✓ **Les cutanes** sont des couches de plasma différenciés et orientés [46], situés autour des éléments du squelette ou au bord des fissures, ainsi qu'à la périphérie des galeries formés par des animaux tels que les vers de terre [68].
- ✓ **Les pores** sont des cavités non occupées par la matière solide [46].

La structure est l'arrangement géométrique de ses éléments solides (argiles, limons, sables) dans le sol en place [9]. [47] Note à Ce propos "since soil particles differ in shape, size and orientation, and can be variously associated and interlinked, the mass of them can form complex and irregular configurations which are general exceedingly difficult if not impossible to characterize in exact geometric terms". Il distingue, tout comme [46], trois grandes catégories de structures, les structures à éléments particulières, les structures massives(ou continues) et les structures agrégées (ou fragmentaires):

- ✓ Une structure "**particulaire**" correspond à un assemblage lâche de particules totalement séparées les unes des autres, et l'on parle parfois abusivement de sols sans structure. C'est le cas par exemple des sables purs.
- ✓ La structure est "**massive**" ou "continue" lorsque les particules sont fortement liées en blocs cohésifs de grandes dimensions. C'est le cas par exemple d'une argile très sèche qui forme des blocs rigides que l'on peut considérer comme des fragments à une échelle supérieure. Entre aussi dans ce cadre le cas d'une argile très humide dont la structure "continue" devient boueuse ou "fondue".
- ✓ Entre ces deux extrêmes se trouve le type de sol jugé le plus favorable pour la croissance des plantes: sa structure "**fragmentaire**" se caractérise par la présence de regroupements plus au moins stables de particules en agrégats de différentes formes et tailles. C'est le cas pour de nombreux sols, des qu'une certaine quantité d'argiles est présente.

La structure du sol est une propriété fondamentale dans un sol puisqu'elle conditionne plusieurs autres propriétés (Tableau 2.4).

Tableau 2.4. Propriétés biologique, chimique et physique influencées par la structure du sol (adapté de [5]).

Propriétés	Action de la structure du sol
Biologique	<ul style="list-style-type: none"> - Protection de la faune et la microflore du sol - Cycles biogéochimiques - Croissance des plantes
Chimique	<ul style="list-style-type: none"> - Sorption-désorption des composés organiques et inorganiques
Physique	<ul style="list-style-type: none"> - Érosion par l'eau et le vent - Infiltration et mouvement de l'eau et de solutés - Circulation des gaz, aération

2.1.6 Les propriétés des sols

2.1.6.1 Propriétés physiques

Pour [46], il est évident qu'une connaissance cohérente de l'état physique du sol implique que l'on puisse rattacher entre elles les notions de texture, d'assemblage élémentaires et même de structure".

Les propriétés physiques des sols sont reliées aux réactions mécaniques de la matière et de l'énergie qui s'y manifestent. Ces caractéristiques sont utilisées sur le terrain et en laboratoire par les pédologues pour classer les sols. Ces derniers arrivent de la sorte à dégager rapidement la proportion des fractions les plus actives du sol par rapport à celles qui sont les plus inertes. L'étude physique des sols a aussi trait à la connaissance des interfaces de la fraction solide avec les vides, et des interfaces de la fraction gazeuse et de l'eau à l'intérieur de ces mêmes vides. Ce chapitre va donc couvrir plusieurs aspects de la physique des sols que nous pouvons énumérer rapidement de

la manière suivante : la texture, la structure, la consistance, la cimentation, la couleur, la température, l'aération, les affleurements rocheux, la porosité et la topographie.

2.1.6.1.1 *Granulométrie*

Elle se fait par tamisage au travers d'une colonne de tamis normalisée. On distingue plusieurs classes granulométriques: cailloux, graviers, sables grossiers, sables fins, limons, argiles.

2.1.6.1.2 *Densité apparente du sol*

Un sol est constitué de grains solides baignant dans de l'eau et/ou de l'air. La masse volumique apparente, ou densité, est la masse d'un volume unité de sol (grains+eau+air). La masse volumique sèche ne comprend que les grains.

2.1.6.1.3 *Porosité et perméabilité du sol*

On appelle porosité d'un échantillon le rapport du volume non occupé par la matière solide au volume total, qui est un volume apparent c'est-à-dire qu'il correspond à l'enveloppe externe de l'échantillon considéré.

Une autre façon de s'exprimer, utilisé par les mécaniciens et physiciens du sol, est l'indice des vides qui présente l'avantage de se rapporter à quelques choses qui restent constant, quel que soit l'état structural ou hydrique du système étudié. Ce n'est pas le cas de la porosité qui se rapporte au volume apparent, lequel est susceptible de modifications (gonflement, retrait, tassements). La porosité du sol est d'importance primordiale pour la circulation de l'eau et de l'air, influençant les possibilités d'activités biologiques (racines, microflore, faune). On distingue les pores capillaires et des pores non capillaires. Alors que la Perméabilité désigne circulation de l'eau libre autour des grains (l'eau pelliculaire autour des grains est immobile). On détermine un coefficient de perméabilité k qui varie selon la granulométrie du sol:

- ☞ Graver: 10 cm/s
- ☞ Sable: 10^{-2} cm/s
- ☞ Argyle: 10^{-9} cm/s

Le coefficient de perméabilité est mesuré en laboratoire (expérience de DARCY) ou sur le terrain par des tests d'infiltration.

2.1.6.1.3.1 Les différentes porosités

Englobés dans cette porosité totale, il existe toutes sortes de vides très différentes quant à :

- ☞ Leurs formes (tubules, cavités, fissures planaires, chambres, vésicules)
- ☞ Leurs origines (entassement, retrait, activités faunique ou racinaire),
- ☞ Leurs dimensions

Tout aussi schématiquement, on peut aussi distinguer:

- ☞ Les vides de plus de 3mm de diamètre dans lesquels l'ascension capillaire devient négligeable

- ☞ La macroporosité (pores de plus de 6-10 μ m de diamètre), domaine où l'eau libre circule plus ou moins rapidement (eau gravitaire et capillaire);
- ☞ La microporosité (pores de moins de 6-10 μ m de diamètre), domaine où la rétention de l'eau domine

Par leur arrangement dans l'espace, les éléments structuraux ménagent des pores dont l'ensemble du volume et l'architecture définissent la porosité d'un sol. Deux types de porosité sont définis selon l'origine des pores: la porosité texturale formée par l'arrangement des particules élémentaires du sol et la porosité structurale correspondant à la fraction de porosité en rapport avec l'histoire du matériau : travail du sol, facteurs climatiques, activités biologiques [86]. La porosité totale peut être aussi subdivisée, selon la taille des pores, en deux parties. La microporosité, correspond aux pores d'un diamètre de l'ordre de 2 à 8 μ m dans laquelle l'eau est retenue par des forces capillaires. Les pores de diamètre plus grands correspondent à la macroporosité, où se déroule l'essentiel des processus de transferts d'eau et d'air [68]. La porosité influence la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol, la capacité du sol à stocker de l'eau et la circulation de l'air dans le sol. Elle est en relation étroite avec la densité apparente.

2.1.6.2 Teneur en eau et degré de saturation

Le degré de saturation S_r désigne le rapport du volume occupé par l'eau au volume total des vides. La présence d'eau augmente la cohésion du sol par les forces de tension superficielle qu'elle développe.

Tableau 2.5. Caractéristiques de quelques sols en place [16].

Sol	Porosité %	Indices des vides	Teneur en eau %	Densité sèche	Densité humide
sable homogène	46 - 34	0.85 - 0.51	32 - 19	1.43 - 1.75	1.89 - 2.09
sable hétérogène	40 - 30	0.67 - 0.43	25 - 16	1.59 - 1.86	2.16 - 1.77
argile	55 - 37	1.2 - 0.6	45 - 22		1.77 - 2.07

2.1.6.3 Propriétés hydrodynamiques

La connaissance des propriétés hydrodynamiques d'un sol demeure pertinente dans les différentes applications des sciences de l'environnement. Elle est utilisée pour estimer l'écoulement d'eau dans le sol ainsi que la détermination du bilan hydrique et le processus des transferts des masses d'eau et de solutés à travers la matrice du sol [89].

Deux paramètres sont suffisants pour caractériser et modéliser l'écoulement de l'eau dans un sol partiellement saturé :

- La pression capillaire : est la capacité du sol à retenir l'eau sous l'effet de la capillarité
- La conductivité hydraulique : traduit le pouvoir d'un sol à conduire l'eau sous l'effet d'un gradient de charge hydraulique

2.1.7 **Classifications du sol et critères de classification :**

En botanique nous disposons de flores, de classifications, d'un langage commun permettant d'échanger des informations tout en sachant de quoi l'on parle et de faire des comparaisons (entre pays par exemple). De la même façon, on retrouve en science du sol des classifications et des référentiels qui tentent de donner un cadre commun. Ainsi tous les sols présentant des caractéristiques identiques sont regroupés dans une même catégorie. Cette classification doit donc comporter les définitions de ces catégories de sols en fonction de leurs caractères. Chaque sol aura sa spécificité, son identité, propres aux conditions d'évolution dans un environnement donné (géomorphologie, végétation, climat...), selon le contexte, les sols seront classés morphologiquement ou selon des critères bien déterminés. Le pédologue se basera donc sur deux aspects fondamentaux : d'une part l'aspect physicochimique (textures, structure, forme) ou aspect statique de la pédologie, et d'autre part, l'aspect dynamique (processus d'évolution et de formation) [54].

2.1.7.1 **Critères de classification:**

La plupart des classifications utilisent les mêmes critères mais en fait avec des grandes différences dans le niveau de classification:

- ✓ **Composition du complexe d'altération** : dans la classification française, ce critère est essentiel tout en prenant en considération les différents aspects de l'altération,
- ✓ **Mouvement de matière:** pour certaines classifications, ce critère demeure un caractère intrinsèque du sol. En effet, dans la majorité des cas, il est sous la dépendance étroite du climat général [35],
- ✓ **Climat** : Le climat est un facteur important parmi les facteurs actifs dans la différenciation des sols, selon l'intensité des agents climatiques, l'altération sera plus longue ou rapide. Ces agents peuvent agir de façon directe (eau) ou indirecte (humidité, vent...) sur les sols. En fait, à l'échelle de la planète, la différenciation des climats se base sur la répartition des sols [54]
- ✓ **La géomorphologie:** La topographie (pente, dépression, zone planes) et la forme des reliefs sont des facteurs qui agissent sur les variations géomorphologiques des sols induisant en fait aux variations dans la différenciation des sols et leurs évolutions [54],
- ✓ **Le facteur biologique:** Le rôle de la végétation grâce aux racines (permettent de créer une certaine porosité et perméabilité) demeure pertinent dans la pédogenèse tout en créant un microclimat particulier. Comme les microorganismes, l'homme aussi par ses activités anthropiques (labours, sous soulage, terrassement), certaines contraintes à l'environnement, est un facteur de modification des sols [54],
- ✓ **Le facteur temps:** la vitesse de la pédogenèse d'une roche dure (par altération physique et chimique) dépend de la nature de ses matériaux. En effet, l'évolution dans le temps dépend de certains agents directs ou indirects tels que le climat (selon si il est humide ou sec, l'évolution peut être rapide ou durera d'un siècle à des milliers d'années [54].

Ainsi, tous les sols présentant des caractéristiques identiques seront regroupés dans une même catégorie. Cette classification doit donc comporter les définitions de ces catégories de sols en fonction de leurs caractères. Pour être satisfaisante, une classification doit être générale et englober tous les sols de la planète Terre, ou chaque

sol observé sera décrit et trouvera sa place dans cette classification. Il existe plusieurs types de classifications à travers le monde, basés sur un ensemble de critères. Ces classifications sont soit :

- **Génétiques:** donnant une grande importance aux différents facteurs de pédogenèse en notant les liens parentaux entre eux
- **Objectives:** basés sur des critères morphologiques et analytiques, indépendamment de tout critère génétique [42].

2.1.7.2 Les différents types de classifications

Une telle classification doit être générale et englober tous les sols de la planète Terre, où chaque sol observé sera décrit et trouvera sa place dans cette classification. Il existe plusieurs types de classifications à travers le monde, basés sur un ensemble de critères.

En France, la première classification qui s'est imposée a été finalisée en 1967 par la Commission de pédologie et de cartographie des sols et a pris le nom de « **CPCS** », c'est une classification génétique, c'est-à-dire qu'elle adopte comme critère dominant le processus de pédogenèse. Dans les années 90, la CPCS est progressivement remplacée en France par le Référentiel Pédologique de l'INRA qui privilégie les propriétés fonctionnelles du sol. Ce référentiel, dont la dernière version date de 1995, définit des références de sols selon leur morphologie, leurs propriétés de comportement et de fonctionnement et selon leurs processus de formation. Il comporte 73 horizons de référence qui ont permis de définir 102 Références de sols [42].

Parmi les différents systèmes de classification, plusieurs se réfèrent uniquement à la granulométrie du sol (diagramme triangulaire, par exemple) et diffèrent par les seuils granulométriques adoptés. D'autres utilisent simultanément la granulométrie et la plasticité [30]. On décrira ici l'une de ces classifications, dite «classification **LPC**», qui n'est autre que la classification **USCS** (Unified Soil Classification System).

Dans la classification LPC (tableau 2.6), les matériaux moyennement et fortement organiques font l'objet d'une sous classification déterminée par l'essai Von Post. La classification **GTR** (tableau 2.7) ne va pas jusqu'à ce degré de précision car la réutilisation de matériaux contenant de la matière organique dans le domaine des terrassements est restée anecdotique jusqu'à présent. On notera dans des sols l'impossibilité de quantifier la fraction argileuse et de distinguer dans cette fraction la proportion d'argile et de matière organique [35].

Tableau 2.6. Les différentes classes des sols selon la classification LPC

SOL	Sol à granulométrie uniforme	Sols pulvérulents (200mm → 20 μm)	Cailloux
			Graves
			Sable
	Sol à granulométrie non uniforme	Sols fins (<20μm)	Sable fin
			Limon
			Argile
Sols grenus (50% >80μm)			

		Sols fins (50% <80µm)
		Sols organiques

Tableau 2.7. Les différentes classes des sols selon la classification GTR

CLASSE	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{\max} \leq 50 \text{ mm}$ et passant à $80 \mu\text{m} > 35 \%$	A1 à A4 selon VBS ou Ip
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{\max} \leq 50 \text{ mm}$ et passant à $80 \mu\text{m} \leq 35 \%$	B1 à B6 selon VBS ou Ip et tamisat
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{\max} > 50 \text{ mm}$ et passant à $80 \mu\text{m} > 12 \%$ ou passant à $80 \mu\text{m} \leq 12 \%$ + VBS > 0,1	30 sous-classes selon VBS, Ip et tamisat à 50 mm
D	Sols insensibles à l'eau avec fines	VBS $\leq 0,1$ et passant à $80 \mu\text{m} \leq 12\%$	D1 à D3
R	Matériaux rocheux	voir la norme NF P 11-300	
F	Sols organiques et sous-produits industriels	voir la norme NF P 11-300	

D_{\max} = diamètre pour lequel 95 % des grains du sol ont une dimension inférieure (soit D_{95} si la courbe granulométrique est disponible, sinon appréciation visuelle de la dimension des plus gros éléments).

Le problème de la classification des sols présente deux aspects bien différents, l'un scientifique et l'autre pratique, l'aspect scientifique, en général basé sur les processus d'évolution (classification dite génétiques) concerne surtout les unités supérieures; au contraire, l'aspect pratique intéresse les unités inférieures qui sont des subdivisions des précédentes; alors que les unités supérieures sont définies à l'aide de caractères dits génétiques (dont beaucoup offrent aussi un intérêt pratique), les classifications des unités inférieures prennent en compte les caractères fonctionnels, c'est à dire ceux qui jouent un rôle important dans la fertilité et la croissance des plantes (par exemple matériau d'origine, texture, profondeur)[35].

2.2 Hydrodynamique des milieux poreux

L'eau est le vecteur principal des solutés dont la description de leur transport implique la caractérisation hydrodynamique de ces composés avec la matrice solide du sol. Les premiers éléments de compréhension de l'hydrodynamique des milieux poreux remontent aux études menées par Darcy.

2.2.1 Le transfert hydrique en milieu poreux

2.2.1.1 Définition

Dans le catalogue des milieux divisés, les milieux poreux désignent "les agrégats d'éléments solides (grains, matériaux, etc.) entre les quels les vides forment l'espace poreux proprement dit" [20]. On trouve de nombreux matériaux naturels dans cette catégorie [70]: Les sols, les couches sédimentaires, la plupart des roches, ainsi que certains matériaux vivants. Certains matériaux artificiels requièrent d'être poreux soit dans le processus de fabrication soit dans leur finalité pour jouer un rôle de filtre.

L'étude expérimentale de milieu poreux exige une définition d'échelle de travail: micro, macro et mégascopique correspondant chacune au pore, laboratoire et terrain [3].

D'une manière générale, les milieux poreux sont définis par deux critères :

- (1) le matériau doit contenir de petits espaces vides, appelés pores, délimités par une matrice solide
- (2) le matériau doit être perméable à un écoulement de fluide (gaz ou liquide).

Ces deux critères renvoient à deux caractéristiques essentielles d'un milieu poreux: la porosité, la fraction de vide et la perméabilité qui indique l'aptitude d'un milieu poreux à être traversé par un écoulement. Ces deux quantités sont des variables macroscopiques, c'est à dire estimées sur un volume contenant de nombreuses entités microscopiques composant le matériau: les pores.

2.2.1.2 *Volume Élémentaire Représentatif (VER)*

Les propriétés caractéristiques moyennes d'un milieu poreux (la porosité, la perméabilité) peuvent être déterminées par le volume élémentaire représentatif (VER). Le choix du VER doit être déterminé en se basant sur certains critères [2]:

- Le VER doit contenir un grand nombre de pores afin d'avoir une moyenne globale significative ;
- Le VER doit être suffisamment petit pour que les variations des propriétés d'un domaine au domaine voisin puissent être approchées par des fonctions continues pour pouvoir introduire l'analyse infinitésimale, sans introduire d'erreur décelable par les instruments de mesure à l'échelle macroscopique.

D'après les critères ci-dessus, un VER dépend non seulement de la structure du milieu poreux, mais aussi des phénomènes physiques étudiés. Un VER doit être assez grand pour représenter la structure du milieu poreux, mais aussi petit pour que les variations des propriétés, parfois non linéaires (teneur en eau, porosité, distribution granulométrique), soient continues [51] et [80].

2.2.1.3 *Quelques exemples de milieux poreux*

2.2.1.3.1 *Milieux poreux naturels*

Dans la nature, les milieux poreux les plus exploités sont essentiellement les roches et les sols dont leur porosité dépend des conditions de température et de pression lors de leurs formations et de l'évolution géologique, comme l'exemple de granite, une roche dense, ayant une porosité inférieure à 2% contrairement aux roches volcaniques qui, à cause des processus de dégazage associés au refroidissement leur porosité est plus élevée [70].

2.2.1.3.2 Milieux poreux artificiels

La porosité est un élément nécessaire lors de la fabrication des bétons et des ciments afin d'obtenir un matériau bien caractérisé, en effet, pour un bon béton, la porosité est comprise entre 6 et 10 %. Selon les méthodes de fabrication, on peut obtenir un papier filtre très absorbant avec une porosité de 80 %, ou au contraire un papier très « serré » et transparent (le papier calque) avec une porosité proche de 0. On a alors des pores de diamètres compris entre 0,2 à 4 μm [70].

2.2.2 Le sol, un milieu poreux

2.2.2.1 Les caractéristiques générales

Le sol peut être défini comme «le produit, remanié et organisé, de l'altération de la couche superficielle de la croûte terrestre, essentiellement sous l'action d'agents climatiques et biologiques» [68]. A la surface de la terre, il existe un grand nombre de types des sols [35], formés depuis des millénaires. A l'échelle macroscopique, le sol est généralement organisé en couches horizontales ou horizons, résultant de l'altération.

Le sol interagit avec l'atmosphère et les autres éléments de l'écosystème dans lequel il s'insère, ainsi qu'avec les eaux souterraines. Il est le siège de nombreux phénomènes et d'échange de matière et d'énergie. C'est un milieu hétérogène à l'échelle microscopique, discontinu et structuré, ses caractéristiques varient dans l'espace et dans le temps. Il représente également un milieu de développement d'un grand nombre d'organismes vivants. Le sol peut ainsi jouer le rôle de réacteur biogéochimique polyphasé ouvert» [24]. Il forme un milieu poreux complexe, en raison de sa structure, de sa composition et de sa variabilité spatio-temporelle [10].

Il est affecté par l'usage dont il est porteur: on distingue par exemple les sols de prairies ou des forêts, les sols agricoles, les sols urbains, et parmi eux les sols des friches industrielles dont le profil est souvent perturbé en raison de remaniements [42].

Un sol est un milieu poreux triphasique [24], comportant :

- Une matrice solide constituée d'éléments minéraux et organiques ;
- Une phase gazeuse, dont la composition est généralement voisine de celle de l'atmosphère mais dépend également de l'activité biologique;
- Une phase liquide, souvent désignée sous le terme de «solution du sol».

Le sol est en effet soumis à des mouvements d'eau entre sa surface et le niveau de la nappe phréatique [47], on distingue en général :

- **La zone non saturée**, dans les premières couches du sol, (près de la surface, jusqu'à quelques mètres de profondeur), dans laquelle l'eau n'occupe qu'une partie de la porosité, le reste étant occupé essentiellement par de l'air ;
- **La zone saturée**, dans les couches plus profondes, où l'ensemble des pores est rempli d'eau

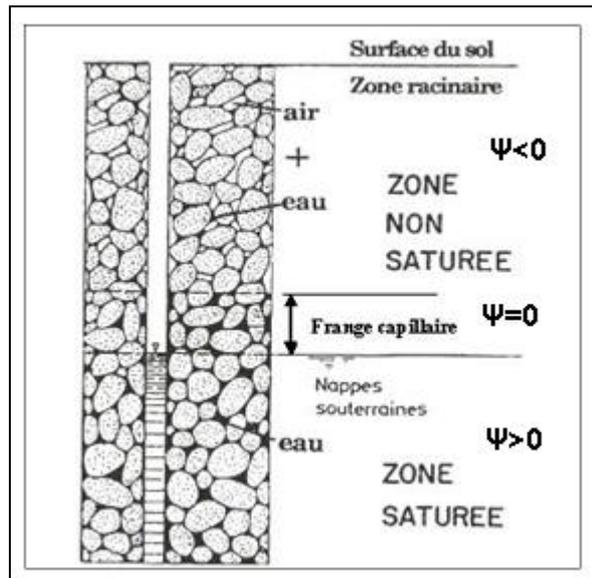


Figure 2.13. Présentation des zones saturée et non saturée [34]
 (Ψ = potentiel capillaire = suction capillaire = hauteur de suction)

2.2.2.2 Quelques variables physiques fondamentales

Les variables caractéristiques du sol sont principalement: la porosité, la teneur en eau volumique (ou massique), la conductivité hydraulique et la perméabilité.

- **La porosité** constitue un indice du volume relatif des vides dans le sol, elle est définie comme le rapport adimensionnel du volume des vides sur le volume total de sol :

$$\varepsilon = \frac{V_a + V_e}{V_t} \quad (\text{éq. 2.1})$$

Où V_a et V_e correspondant respectivement au volume de phase gazeuse et de phase liquide.

Elle est également reliée à la masse sèche par la relation suivante :

$$\varepsilon = 1 - \rho_s \quad (\text{éq. 2.2})$$

Avec ρ_s représentant la masse volumique de solide ($\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$ où V_s est le volume de solide), dont la valeur est souvent prise égale à 2.5 g cm^{-3} pour sable, constitué de grains de quartz.

- **La teneur en eau volumique** : représente le rapport du volume de l'eau V_{eau} contenue dans les pores (vides) du sol, au volume total du sol V_t considéré

$$0 < \theta = \frac{V_{eau}}{V_t} < 1 \quad (\text{éq. 2.3})$$

- **La teneur en eau massique ou pondérale** : rapport de la masse de la phase liquide à la masse de solide

$$W = \frac{M_e}{M_s} \quad (\text{éq. 2.4})$$

Ces deux grandeurs sont reliées entre elles par la relation suivante :

$$\theta = w \frac{\rho_d}{\rho_e} \quad (\text{éq. 2.5})$$

Où ρ_e est la masse volumique de l'eau ($\rho_e = 1 \text{ gcm}^{-3}$ à 20°C)

La teneur volumique en eau varie entre la teneur en eau résiduelle θ_r et la teneur en eau à saturation θ_s . Cette dernière n'est jamais strictement égale à la porosité géométrique ε , mais plutôt inférieure dans les conditions naturelles en raison d'un piégeage d'air dans la matrice poreuse du sol au cours des cycles d'infiltration et de drainage [68]. Pour des sols sableux, la valeur de θ_s est généralement comprise entre 0.35 et 0.5 [24]. Cependant, toute l'eau ne participe pas à l'écoulement. On distingue: l'eau libre, qui peut se déplacer par gravité ou sous l'effet d'un gradient de pression, et l'eau liée, retenue par capillarité et/ou adsorption. L'importance de cette dernière fraction dépend de la forme, de l'arrangement relatif et de la distribution de taille des particules du sol (masse volumique sèche, surface spécifique, connectivité des pores...) [24].

2.2.3 État de l'eau dans le sol

2.2.3.1 L'eau du sol

La composition de la phase liquide du sol résulte des interactions entre les différentes composantes du milieu poreux (dissolution des minéraux solides, échange avec les argiles, activité microbienne de minéralisation des substances organiques...). Les principaux ions contenus dans la solution de sol, que l'on désignera plutôt que le terme « eau du sol » sont : H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et NH_4^+ , pour les cations, et OH^- , Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- et CO_3^{2-} pour les anions [65].

Dans le sol, l'eau prend des différentes formes [56]:

- ☞ L'eau gravitaire
- ☞ L'eau de rétention
- ☞ L'eau de constitution
- L'eau gravitaire: Cette eau remplit les macroporosités du sol. Les forces qui lient cette eau aux minéraux du sol sont trop faibles pour s'opposer à l'action de la pesanteur. Cette eau va donc s'infiltrer et percoler jusqu'à ce qu'elle rencontre un niveau de roches plus imperméables. Là, l'eau va s'accumuler en saturant le niveau de roches sus-jacent en constituant un aquifère. Cette fraction de l'eau est appelée réserve hydrologique du sol [16].
- L'eau de rétention capillaire: Cette eau constitue des films dans les microporosités du sol. "l'eau capillaire est représentée schématiquement dans un pore de forme cylindrique dont les parois sont recouvertes d'un film d'adsorption" [75], physiquement, c'est la loi de Laplace qui établit une relation étroite entre la géométrie de pore à la pression capillaire s'exerçant sur la phase liquide et à la tension superficielle du liquide qui exprime les forces de cohésion.
- L'eau de constitution: Cette fraction de l'eau est totalement indisponible, au moins jusqu'à ce que la roche soit altérée. Une autre fraction de l'eau est fortement adsorbée à la surface des colloïdes minéraux et organiques (argiles, humus), mais

aussi sur divers autres minéraux. Les forces qui lient cette fraction de l'eau avec les particules du sol sont supérieures à la force de succion des racines des plantes [16].

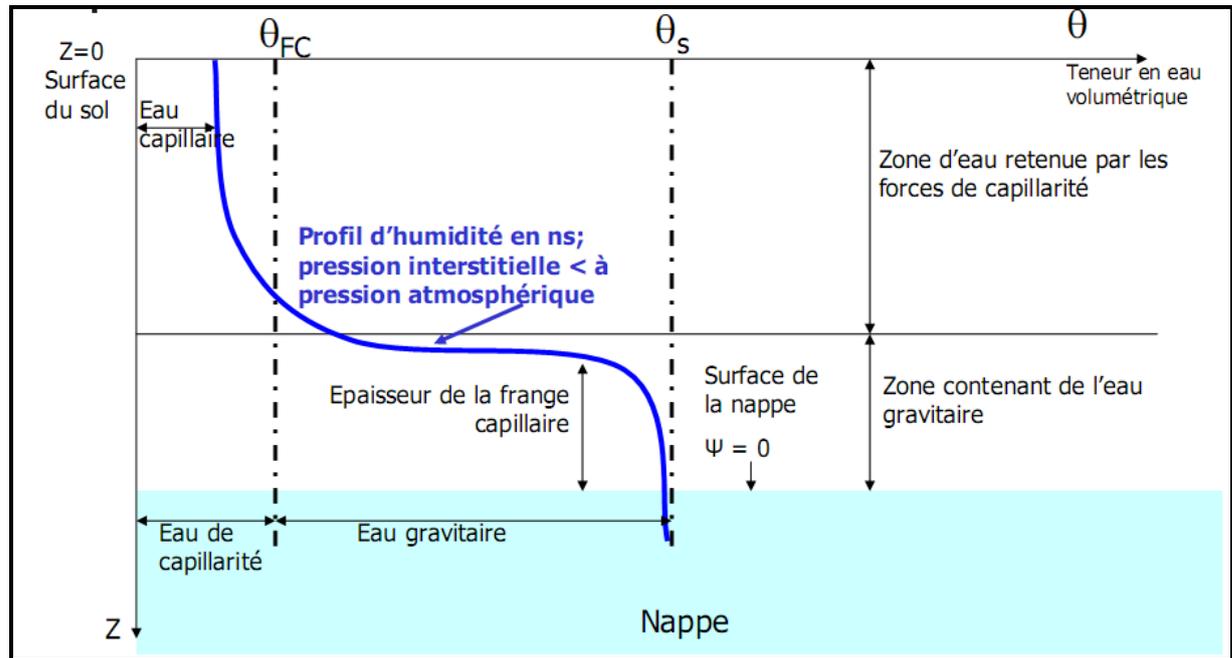


Figure 2.14. Différentes formes de l'eau dans le sol [34]

2.2.3.2 Potentiel de pression et rétention d'eau

2.2.3.2.1 État énergétique

L'état énergétique de l'eau dans le sol s'exprime principalement par le potentiel de gravité et le potentiel de pression de l'eau. La somme de ces deux grandeurs correspond au gradient de potentiel global ou charge hydraulique, H [47]. La contribution éventuelle due à un potentiel osmotique est négligeable dans l'hypothèse d'une concentration de la solution de sol homogène. De même, l'énergie cinétique de l'eau est négligeable devant l'énergie potentielle, du fait de vitesses d'écoulement suffisamment faibles [47].

La connaissance de l'état énergétique de l'eau du sol permet d'évaluer les forces agissant sur l'eau et déterminer leurs directions ainsi que l'état d'équilibre de l'énergie potentielle, cette dernière qui joue un rôle primordiale dans la détermination de l'état et du mouvement de l'eau dans le sol contrairement à l'énergie cinétique qui reste négligeable du fait de la teneur du mouvement lent de l'eau dans le sol [47]. On distingue quatre types de potentiel :

- Le potentiel gravitationnel déterminé par rapport à un niveau de référence et correspond à l'énergie nécessaire pour élever une masse d'eau à une hauteur au dessus de ce niveau [56].
- Le potentiel capillaire ou plus récemment "potentiel matriciel" résulte de l'action des forces de capillarité et des forces d'adsorption, ce le potentiel de pression est considéré comme négatif quand elle est à une pression inférieure à l'atmosphère (une sous pression appelée tension ou succion pour les sols non saturés) [47].

$$H_p = \frac{P_w - P_0}{\rho_w \cdot g} \quad (\text{éq. 2.6})$$

H_p : succion (cm d'eau)

P_w : pression de l'eau du sol (M.L⁻¹.T²)

P_0 : pression atmosphérique (M.L⁻¹.T²)

ρ_w : masse volumique de l'eau (M.L⁻³)

g : accélération de la pesanteur (L.T⁻²)

- Le potentiel osmotique ou pression osmotique, due à des différences de concentrations en solutés, ne s'exerce qu'en présence d'une membrane semi perméable pour provoquer un écoulement liquide.
- Le potentiel total ou "charge de potentiel total" correspond à la somme de la charge gravitationnelle et de la charge matricielle (en négligeant le terme osmotique), et il est également appelé charge hydraulique [56].

Tableau 2.8: Correspondance entre les diverses catégories d'eau et leurs états énergétiques [56].

États caractéristiques du sol	Types d'eau	Forces principales mises en jeu	Moyens pour libérer l'eau
Capacité maximale	Eau gravitaire à écoulement rapide	Gravité	Gravité
Capacité au champ	A écoulement lent		Dépression
Capacité de rétention	Eau capillaire	Tension superficielle	Centrifugation
"Zone de rupture du lien capillaire" Point de flétrissement temporaire Point de flétrissement permanent		Adsorption Forces électrostatiques	
Hygroscopicité	Hygroscopique	Attraction moléculaire	Chauffage
Sol sec	Eau de constitution	Liaisons chimiques	

2.2.4 Milieu saturé

L'équation de Richards (1931) décrit les transferts d'eau dans un milieu poreux variablement saturé. Elle découle de la combinaison de la loi de Darcy généralisée avec l'équation de continuité.

En combinant la loi expérimentale de Darcy et l'équation de continuité sous l'hypothèse d'un fluide incompressible de masse volumique et de viscosité dynamique constante, on obtient l'équation de **Richards** dans un milieu mono, bi et tridimensionnel et variablement saturé:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div}[-\bar{K}(h) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(H(x, y, z, t))] \quad (\text{éq. 2.7})$$

Où θ est la teneur en eau volumique [L^3L^{-3}], $H(x, y, z, t)$ est la charge hydraulique totale ($h+z$) avec h le potentiel de pression [L], $\bar{K}(h)$ est le tenseur de conductivité [LT^{-1}] et t le temps [T].

2.2.4.1 Lois associés à l'écoulement saturé

L'écoulement de l'eau dans le sol saturé est décrit par la variation de la vitesse d'écoulement macroscopique, qui représente la moyenne globale des vitesses microscopiques dans le volume total du sol [47].

Le modèle de référence pour l'étude hydrodynamique des sols à l'échelle du terrain ou de la colonne de terre en laboratoire est basé sur la loi empirique de Darcy, qui permet de décrire les écoulements permanents et unidimensionnels dans un milieu poreux saturé : le flux d'eau ou vitesse de Darcy qui traversent un élément de sol (débit par unité de surface totale traversée) est proportionnel à la différence de charge hydraulique H dans la direction du flux [74].

2.2.4.1.1 La loi de Darcy :

La loi de Darcy indique que l'écoulement d'un liquide (débit) à travers un milieu poreux se fait dans la direction de la force motrice: le gradient de charge hydraulique agissant sur le liquide. Le débit dépend aussi d'une caractéristique fondamentale du sol: la conductivité hydraulique.

A l'échelle macroscopique, la loi de Darcy peut être généralisée aux milieux variablement saturés, en considérant que la conductivité hydraulique est fonction du potentiel de pression.

La loi de Darcy exprime la proportionnalité entre la densité de flux q [$L T^{-1}$] à travers un milieu poreux et le gradient de charge hydraulique dans le milieu poreux [47].

On considère que les écoulements unidimensionnels verticaux permanents ou non sont régis par :

$$q = -K \frac{\delta H}{L} = -K \frac{\delta(h-z)}{\delta z} \quad (\text{éq. 2.8})$$

Où K est la conductivité hydraulique du sol saturé d'eau, z représente la cote sur un axe vertical orienté vers le bas, et la charge hydraulique H se décompose en la somme des potentiels de pression h (exprimée en hauteur d'eau) et de gravité de z .

Pour que la loi de darcy soit valide, il faut que l'écoulement soit laminaire, ce qui est généralement le cas dans les milieux poreux. La vérification de cette condition se fait à l'aide du nombre de Reynolds, Re [47]. En mécanique des fluides, Re mesure l'importance des forces d'inertie par rapport aux forces de viscosité. Il est donné par:

$$Re = \frac{qD}{\nu} \quad (\text{éq. 2.9})$$

Avec : q : la vitesse [L/T]

ν : la viscosité cinématique (μ/ρ)

D : la longueur représentatif de l'écoulement [L]

2.2.5 Écoulement de l'eau dans les sols non saturés

Au cours des dernières années, la circulation de l'eau en milieu non saturé est devenue un des sujets les plus importants et les plus actifs en matière de recherche en physique du sol, et cette recherche a conduit à des progrès significatifs dans la théorie et dans la pratique.

Comme dans un sol saturé, la force motrice de l'écoulement, la force motrice de l'écoulement est le gradient de pression positive, la succion matricielle, gradient de potentiel de pression négative, constitue lui une force motrice [47].

2.2.5.1 Équation générale de l'écoulement

Comme dans un milieu saturé, on utilise la Loi de Darcy généralisée en milieu non saturé avec les lois d'évolution de la conductivité. La loi de Darcy, bien qu'elle ne fût conçue à l'origine que pour l'écoulement à l'état saturé, fut étendue par Richard (1931) à l'écoulement en sol non saturé en stipulant que la conductivité est cette fois une fonction de la charge de succion de la charge de succion matricielle.

L'équation générale de l'écoulement résulte de la combinaison de l'équation de continuité qui exprime la conservation de la masse d'eau, de l'équation de la dynamique, qui relie le flux lors du transfert d'eau au gradient du potentiel qui l'engendre.

L'équation de continuité peut s'écrire sous la forme générale suivante :

$$\frac{\partial(\rho_w \theta)}{\partial t} = -\text{div}(\rho_w q) \quad (\text{éq. 2.10})$$

ρ : Masse volumique du fluide

θ : teneur en eau volumique

q : flux

L'équation dynamique qui est donné par une relation de la proportionnalité entre le flux de transfert et le gradient du potentiel qui le provoque. Cette équation rassemble à celle de Darcy utilisé pour les écoulements en milieux poreux saturé: elle est appelée équation de Darcy généralisée soit :

$$q = -K(\theta) \text{grad}\phi \quad (\text{éq. 2.11})$$

q : flux

$K(\phi)$: Conductivité hydraulique

ϕ : Potentiel d'eau.

Donc l'équation du transfert peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div}(K(\theta) \text{grad}(\phi)) \quad (\text{éq. 2.12})$$

En effet, la loi de Darcy bien qu'elle ne fut conçue à l'origine que pour l'écoulement à l'état saturé, fut étendue par Richard (1931) à l'écoulement en sol non saturé en stipulant que la conductivité hydraulique est cette fois une fonction de la charge de succion matricielle.

$$D'où \frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div} (K(\theta) \text{ grad} (\Psi(\theta) - z)). \quad (\text{éq. 2.13})$$

La résolution de ces équations différentielles, suivant des conditions aux limites, prend la prédiction de la répartition spatio-temporelle de l'humidité dans les milieux poreux. La courbe de répartition de la teneur en eau à l'instant t , peut permettre d'évaluer la quantité d'eau pénétrée ou extraite, selon le cas des milieux poreux, cette résolution est possible dès que les relations $\Psi(\theta)$ et $K(\theta)$ sont connus dans l'intervalle de variation des teneurs en eau.

➤ Diffusivité :

La diffusivité est définie par :

$$D(\theta) : K(\theta) = \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \quad (\text{éq. 2.14})$$

Ψ : est la succion

Le terme de la diffusivité n'implique pas un déplacement d'eau par diffusion moléculaire dans les pores, et il n'y a pas analogie formelle entre la première loi de Fick et l'équation de l'écoulement que lorsqu'on reste dans un plan horizontal.

L'introduction de la diffusivité simplifie le traitement mathématique des équations décrivant l'écoulement horizontal. Cependant, la relation $D(\theta)$ est très fortement influencée par l'effet de l'hystérésis sur la relation $\Psi(\theta)$. La diffusivité liée aussi à la géométrie du milieu, la nature de l'interaction entre le fluide et la matrice solide, aux conditions initiales et aux limites de l'écoulement [47].

2.2.5.2 Potentiel de pression et rétention d'eau

- Le potentiel de pression exprime la charge hydraulique relative de l'eau du sol:

$$h = \frac{P_e - P_{atm}}{\rho_e g} \quad (\text{éq. 2.15})$$

P_e = pression de l'eau du sol

P_{atm} = la pression atmosphérique

g = l'accélération de la pesanteur

Pour un sol insaturé, on parle de succion (puisque $P_e < P_{atm}$) ou le potentiel matriciel qui représente la force motrice des écoulements provoquée par les phénomènes de capillarité et d'adsorption de l'eau sur les particules du sol.

- La rétention capillaire : on assimile généralement les pores à des tubes capillaires, la rétention capillaire se traduit essentiellement par la formation de ménisque à l'interface eau-air, selon la loi de Jurin, la hauteur d'élévation capillaire de l'eau h en fonction du rayon du pore au niveau du ménisque, r :

$$h = \frac{2\gamma_e \cos\phi}{r \rho_e g} \quad (\text{éq. 2.16})$$

Où ϕ correspond à l'angle de raccordement du ménisque avec la paroi solide et γ_e est la tension superficielle de l'eau.

2.2.5.3 Courbe de rétention d'eau

La variation entre le potentiel matriciel ou tension de l'eau dans le sol(h) en fonction de la teneur en eau volumique(θ) est appelée **courbe de rétention d'eau** ou courbe caractéristique d'humidité du sol, comme expliqué notamment [11].

Cette courbe est généralement spécifique à un type de sol donné. Mais elle n'est pas unique, en raison d'un effet d'hystérèse, lié à la succession des cycles d'infiltration et de drainage subits par le milieu [47].

Différents modèles permettant de décrire l'évolution du potentiel de pression en fonction de la teneur en eau, les plus utilisés sont les modèles de Van Genuchten [91] et Brooks et Corey ([88] et [49]). Ils font définir la saturation réduite θ_{re} définie par:

$$\theta_{re} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (\text{éq. 2.17})$$

L'allure de la courbe de rétention d'eau est donnée sur la figure 2.15.

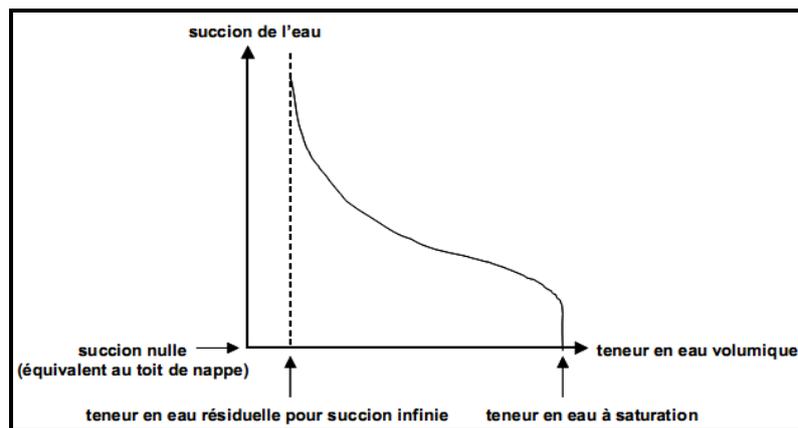


Figure.2.15. Représentation d'une courbe de rétention [61]

Certaines propriétés du sol jouent un rôle sur la rétention d'eau: la granulométrie [43], la densité apparente [21] et la teneur en matière organique [78]. Des modèles ont donc été élaborés à partir de sa texture et sa structure. on peut distinguer les modèles d'estimation semi-physiques qui reposent sur la similarité de forme entre la courbe de distribution de taille des particules et la courbe de rétention d'eau, comme celui d'Arya et Paris ([14] et [7]). Il existe également des fonctions dites de pédotransfert ([15] et [82]) reliant la rétention d'eau à des propriétés connues du sol (teneur en matière organique, densité apparente, granulométrie).

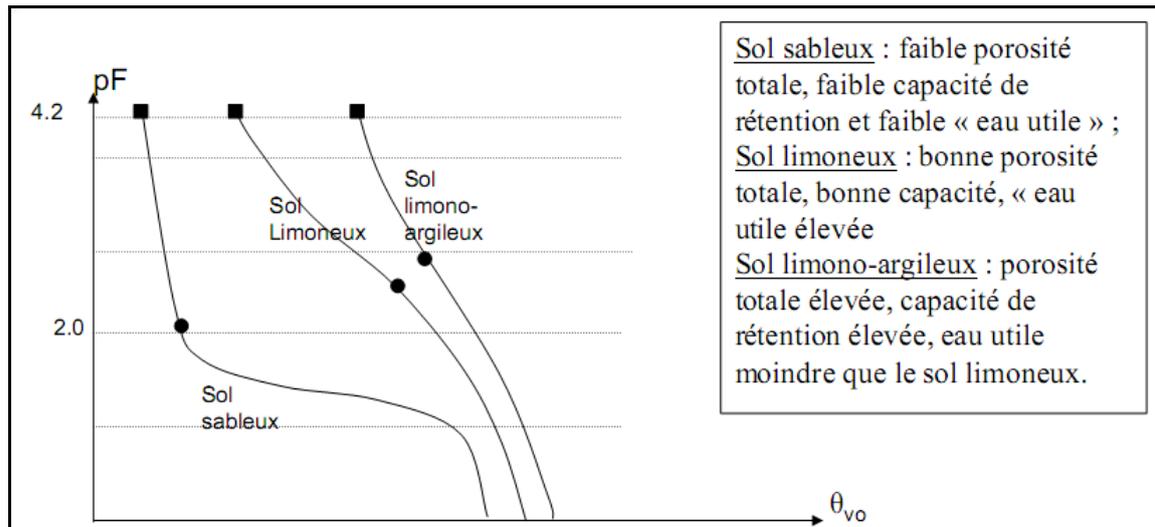


Figure.2.16. Courbes de rétention des certains sols [34]

2.2.5.4 La conductivité hydraulique

Deux paramètres sont suffisants pour caractériser et modéliser dans un milieu un milieu non saturé [85]:

- La pression capillaire(θ):qui exprime l'aptitude d'un sol à retenir ou stocker l'eau sous l'effet de capillarité, ce paramètre dépend essentiellement de la teneur en eau.
- La conductivité hydraulique $K(\theta)$: qui traduit le pouvoir d'un sol à conduire l'eau sous l'effet d'un gradient de charge hydraulique définie par: $H= h(\theta) -z$ où z est le potentiel gravitaire par unité de poids d'eau, l'origine étant la surface du sol.

La conductivité hydraulique K représente la capacité du milieu poreux à «conduire» l'eau, elle contrôle ainsi la dynamique de l'écoulement. La conductivité hydraulique est le rapport du flux au gradient hydraulique. Comme les dimensions du flux sont LT^{-1} , la conductivité hydraulique a les mêmes dimensions que celles du flux si le gradient de charge hydraulique ($\Delta H/L$), rapport d'une longueur à une longueur, est donc sans dimension. Si, par contre, le gradient hydraulique est exprimé en fonction de la variation des pressions avec la longueur, alors la conductivité hydraulique prend des dimensions $M^{-1}L^3T$ [47].

La conductivité hydraulique est évidemment influencée par les propriétés du sol telle que sa structure et sa texture, la géométrie de l'espace poral (pouvant être modifiée par la compaction et l'agrégation des sols) et la connectivité des pores, surtout en présence de macropores, elle sera plus élevée si le sol est très poreux, fracturé ou agrégé que s'il est compact et dense [47]. La conductivité dépend non seulement de la porosité totale mais aussi et, surtout, de la dimension des pores conducteurs, elle est plus élevée pour les sables grossiers que pour les sols argileux où les pores sont de plus petits diamètres [24].

Dans beaucoup de sols, la conductivité hydraulique ne reste pas constante, alors que pour un tel milieu saturé de structure stable, elle est, d'une manière caractéristique, constante. Elle est de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-3} cm/sec dans un sol sableux et de 10^{-4} à 10^{-7} cm /sec dans un sol argileux [47].

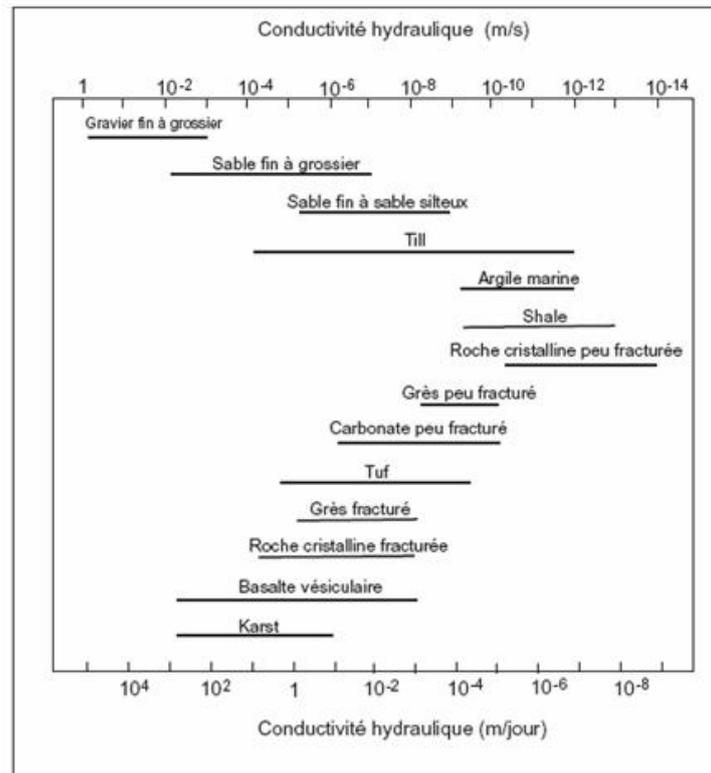


Figure.2.17. La conductivité hydraulique des différents types des sols [58]

En conditions non saturées, la conductivité hydraulique K dépend de la teneur en eau, $K = K(\theta)$. Lorsque la teneur en eau diminue, la conductivité hydraulique décroît (les pores les plus grands se vident les premiers), et la succion matricielle augmente de manière exponentielle jusqu'à sa valeur maximale à saturation, K_s . Elle dépend de la texture et de la structure du sol, l'échelle de la courbe caractérisant son évolution étant influencée par K_s .

2.3 Transferts des polluants dans le sol: mécanismes de transfert

2.3.1 Généralités sur la pollution

Les sols en raison de leurs caractéristiques très variables dans l'espace, de la diversité des processus qui s'y déroulent (de nature physique, physico-chimique et biologique), de leur position d'interface (avec l'atmosphère, le substrat géologique et les milieux aquatiques), exercent une multiplicité de fonctions, notamment de régulation et d'épuration. Ces dernières peuvent cependant être modifiées défavorablement par diverses formes d'agressions, liées aux activités agricoles, industrielles et urbaines [13]. Or la pollution des sols menace le bon fonctionnement des écosystèmes ainsi que la santé humaine. En effet, certains polluants particulièrement toxiques et persistants risquent d'être transférés vers les organismes et/ou de migrer sur de longues distances et de contaminer les nappes. Ces polluants se trouvent en grande majorité dans les sols et sont toujours selon la base de données BASOL «hydrocarbures, HAP, plomb, zinc, solvant halogènes, chrome, cuivre, arsenic, nickel et cadmium», ces polluants sont classés par ordre croissant en fonction de leur quantité.

Au cours des trois dernières décennies, de grands efforts ont été faits pour comprendre les mécanismes de l'eau et transport de soluté dans la zone non saturée.

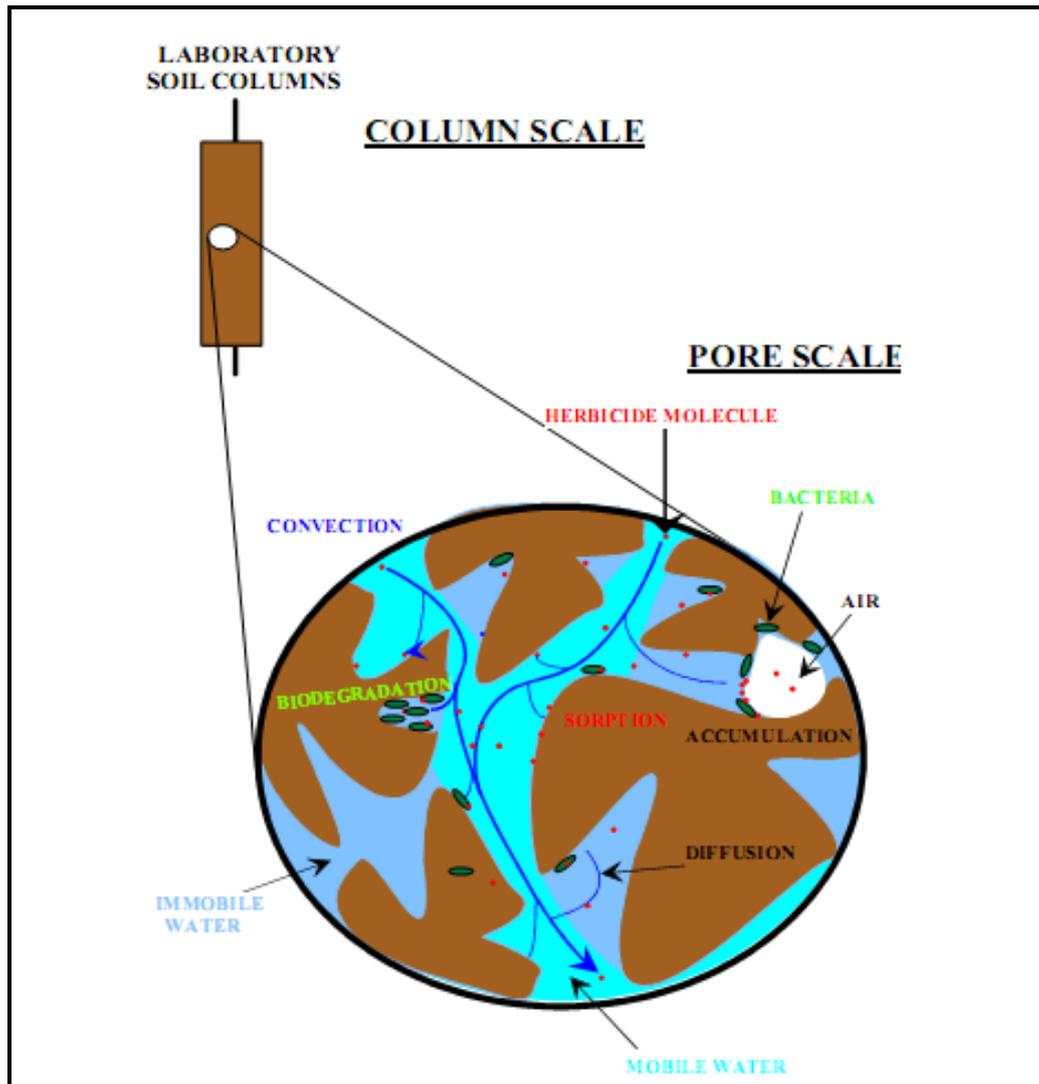


Figure.2.18. Représentation schématique des écoulements hydriques dans les sols à l'échelle du pore : mise en évidence de la circulation de l'eau et des micropolluants dans la macroporosité et dans la microporosité du sol, expliquant les contacts potentiels entre polluants et surfaces minérales, organiques et biologiques [65]

2.3.1.1 Polluants des eaux pluviales

Le terme "eaux pluviales" regroupe les eaux qui par temps de pluie rejoignent le milieu récepteur sans transiter par une station d'épuration. Cette définition, [59], regroupe les eaux météoriques, les eaux de ruissellement des surfaces urbaines (toitures et voiries), les eaux rejetées par surverse de réseau d'assainissement unitaire, les eaux évacuées par le réseau pluvial séparatif.

Les eaux pluviales provenant du ruissellement sur les chaussées peuvent transporter des quantités importantes de polluants notamment des métaux lourds [73], qui sont toxiques pour les milieux récepteurs aquatiques.

Les eaux de ruissellement contiennent principalement du plomb provenant de l'essence, de cuivre, du cadmium et du zinc provenant de l'usure, des pneumatiques ainsi que des phénomènes de corrosion des pièces métalliques ([73], [63] et [30]). Les métaux lourds présents sous forme particulaires peuvent être éliminés par décantation

et s'accumuler dans les sédiments qui se déposent au fond des bassins. Une partie des métaux dessous peut également être éliminée par des mécanismes physico chimiques ou biologiques et se fixer dans les sédiments. La fraction dissoute est susceptible de s'infiltrer dans le sol sous le bassin et contaminer les ressources en eau souterraines, de même les métaux fixés dans les sédiments peuvent être remobilisés sous l'effet des variations physicochimiques du milieu [59].

Le trafic routier, les infrastructures routières connexes, leur construction, leur entretien et le maintien de la viabilité peuvent être la source de pollution des eaux de ruissellement [30]. Différents types de pollution peuvent être à l'origine de nuisances en milieu routier et elles se classent en quatre grandes catégories:

- **pollution chronique**: émission des véhicules, usures des pneus et des revêtements routiers
 - **Pollution accidentelle**: déversement de produits dangereux, fréquemment des hydrocarbures
 - **Pollution saisonnière**: salage hivernal
 - **Pollution temporaire**: travaux de construction des routes .cette pollution ne sera considérée du fait de son caractère ponctuel et antérieur à la mise en service
- **Composition des eaux de ruissellement**:

- Métaux traces

Selon [73], la concentration en métaux traces dans les eaux de ruissellement de chaussées sont très variables et dépendent notamment de l'intensité du trafic, du type d'enrobé de la chaussée (classique ou drainant) et des paramètres climatiques. Ces métaux traces dans les eaux de ruissellement et plus généralement en milieu naturel se présentent majoritairement sous forme particulaire plutôt que sous forme dissoute et cela est confirmée par la présence dans les eaux de ruissellement de matières en suspension (MES) sur lesquelles peuvent se fixer les cations métalliques traces [63]. La limite entre phase particulaire et dissoute arbitrairement fixée à $0,45\mu\text{m}$ ne doit pas faire oublier que de nombreux colloïdes sont plus petits et jouent également un rôle prépondérant dans la répartition des métaux présents. En effet, les colloïdes de natures très diverses (micelles argileuses, bactéries), ont un fort pouvoir complexant vis-à-vis des métaux traces [36].

Comme pour d'autres éléments, la toxicité d'un métal trace dépend étroitement de sa forme physico-chimique et donc de son environnement [73].

- Ions inorganiques:

On trouve les cations majeurs Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ dans des eaux de ruissellement. De nombreux anions sont présents et peuvent jouer le rôle de ligands inorganiques : OH^- , CO_3^- , SO_4^{2-} [61].

L'infiltration chronique d'eaux pluviales contaminées même à de faibles concentrations peut représenter des flux polluants conséquents. L'étude rigoureuse de ces éléments dans un milieu doit à priori inclure le transport colloïdal. Il ressort en effet de la littérature que la pollution en métaux traces des eaux pluviales est principalement particulaire [73].

Les phénomènes de précipitation-dissolution et d'adsorption-désorption exercent une influence déterminante sur la spéciation des métaux et sur leur mobilité [19].

2.3.1.2 Pollution agricole

Au cours de ces dernières années, l'activité agricole a complètement évolué et la contamination des sols due à l'activité agricole, aux épandages des boues d'épuration et des pesticides ainsi que les produits chimiques appliqués aux parcelles d'agriculture et devient aujourd'hui un problème préoccupant.

2.3.1.3 Pollution industrielle

La problématique des sites et sols pollués est souvent associée à l'activité industrielle. Il est vrai que la nature des produits manipulés, les quantités présentes sur site, l'intensité des opérations font que les activités industrielles sont à l'origine d'incidents plus fréquents et aux conséquences plus importantes pour les sols que pour la plupart des activités anthropiques

2.3.2 Le devenir des polluants dans les sols:

Le devenir des polluants dans les sols est une question à fort enjeu environnemental et économique. En effet, la présence de polluants dans ces milieux induit un certain nombre de risques liés à la perturbation du fonctionnement des écosystèmes, menaçant in fine la santé humaine. Ces polluants peuvent être de natures très variées, selon les usages affectés aux sols considérés depuis des décennies. On rencontre aussi bien des composés organiques et minéraux. Dans les sols de friches industrielles, il peut s'agir d'hydrocarbures de toutes sortes, de métaux, d'arsenic et de cyanure. Certains composés sont particulièrement persistants comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les métaux présents dans les friches d'anciennes usines à gaz et cokeries [13].

Par conséquent, la prédiction du devenir des polluants, c'est-à-dire de leur transport et de leur éventuelle dégradation dans le sol, est une question à fort enjeu environnemental, sanitaire et économique. Cette problématique constitue l'un des axes du Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Friches Industrielles, GISFI [44].

Les mécanismes de transfert de substances en solution dans les sols peuvent être analysés en termes

- Hydrodynamiques: paramètres convectifs et dispersifs exprimant la diffusion moléculaire, la dispersion cinématique
- Physicochimiques: paramètres de sorption caractérisant les échanges au sein du fluide ou du milieu poreux, l'adsorption, la chimisorption [19]. Cependant des incertitudes mettent en balance la caractérisation de l'impact réel d'une pollution sur son environnement. Il existe, en effet, encore des lacunes au niveau des connaissances actuelles sur les polluants eux-mêmes et sur les écoulements dans le sol

Les mécanismes impliqués dans le devenir des espèces chimiques dans les milieux poreux sont liés à la fois à leur transport par les phases mobiles, liquide, colloïdale, parfois gazeuse, et aux interactions et réactions biologiques et chimiques auxquelles elles participent [73].

Le transport des polluants résulte du couplage entre le transport de fluides vecteurs (eau, gaz) et les interactions bio-physico-chimiques entre les polluants et les phases solides du sol (minéraux, matières organiques, organismes) [59].

Pour la plupart des micropolluants organiques, les processus responsables de leur rétention par les constituants du sol régulent la mobilisation des micropolluants ainsi que les phénomènes de dégradation et de transformation dans les sols.

Le processus d'adsorption à long terme est attribué à des phénomènes de diffusion des micropolluants. En effet, pour atteindre tous les sites d'adsorption, les contaminants doivent passer des eaux gravitaires (mobiles) au film liquide peu mobile situé à la surface des particules du sol (diffusion à l'intérieur du film), puis dans la microporosité des particules du sol (diffusion intraparticulaire) et dans les phases solides perméables telles que la matière organique du sol (diffusion intramoléculaire). Certaines études montrent que les phénomènes de diffusion à l'intérieur des phases organiques et dans les microporosités des particules du sol sont probablement les deux mécanismes qui contrôlent la phase lente de sorption de certains micropolluants organiques dans les sols. En particulier, [59] ont montré que la diffusion à l'intérieur de la matière organique du sol était principalement responsable de la sorption de nombreuses molécules organiques hydrophobes telles que le benzène, le toluène, l'anthracène, le naphthalène ou encore le chlorobenzène dans les sols sableux.

2.3.2.1 Description du transfert par convection

La convection représente l'entraînement des éléments en solution dans le mouvement du fluide qui se déplace. Le soluté est transporté par le mouvement général de l'eau, à la vitesse q définie par la loi de Darcy [19].

Le transport d'un soluté dans un milieu poreux peut être illustré par un écoulement à vitesse constante dans un long tuyau. Un polluant, injecté dans un courant, et naturellement transporté à la vitesse du courant si l'on considère l'absence de phénomènes annexes. Cette procédure du transport est appelé advection (déplacement par effet de piston figure 2.19).

Le transport convectif lié à la vitesse de circulation de solvant, induit un flux de soluté q_c qu'est lié au flux du solvant q par :

$$q_c = q \cdot c \quad (\text{éq. 3.1})$$

Avec :

q_c : flux de soluté transféré par convection

q : flux de solution $q = u \cdot \theta$, u : vitesse de circulation du solvant dans les pores est donnée par la loi de Darcy

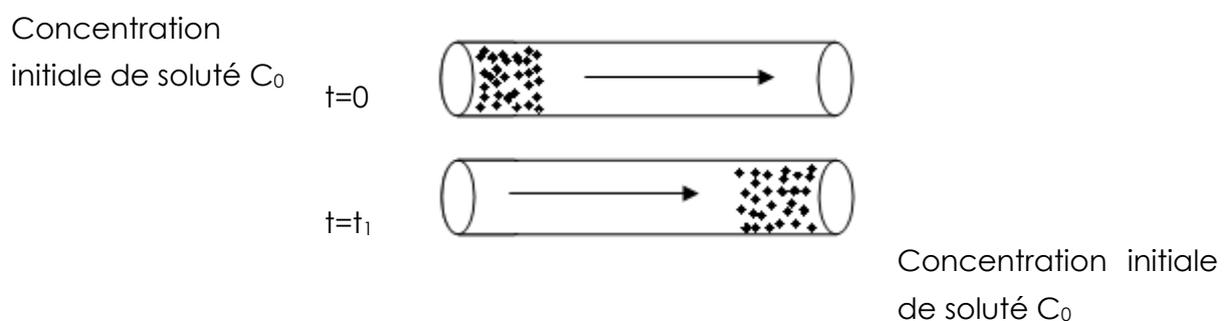


Figure 2.19 : Transport advectif sans dispersion [40]

2.3.2.2 Description du transfert par dispersion

Au cours de transport convectif, la quantité des polluants injectée a tendance à s'étendre et à occuper une longueur du tuyau de plus en plus importante. Le phénomène d'expansion et de dissolution du soluté est la dispersion.

Il est indispensable, pour évaluer la migration de produits chimiques au travers les barrières étanches, de mesurer l'importance de la dispersion.

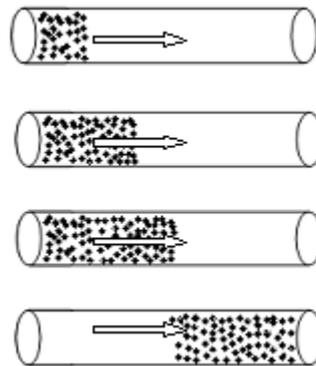


Figure 2.20 : Transport advectif avec dispersion [40]

Une autre notion de ce phénomène de transfert a été introduite dans plusieurs études ([83]; [71]; [94]), la dispersion hydrodynamique. Cette dernière est un phénomène par lequel une substance migre dans le sol. En se déplaçant, l'espèce chimique se dilue (effet du mélange) et s'étale pour occuper un volume plus grand avec une concentration corrélativement décroissante (effet de dilution). Ce phénomène demeure, selon [61], la réunion de la diffusion et de la dispersion hydromécanique.

Cette propagation est provoquée, d'une part, par le déplacement des molécules sous l'effet de la diffusion moléculaire et, d'autre part, par la dispersion cinématique. La dispersion hydrodynamique est fonction de la nature du sol et des caractéristiques du transport de soluté, comme elle dépend de la vitesse interstitielle des pores ainsi que la teneur en eau ([72]; [71]; [32]).

La plupart des modèles établis pour décrire le transport de solutés dans les milieux poreux est l'équation convection-dispersion (CDE) [72]; [83]; [50]; [71]; [32]; [94].

En milieu poreux deux mécanismes de dispersion peuvent contribuer le transfert des solutés dans les sols: diffusion moléculaire et dispersion mécanique [19].

2.3.2.3 La diffusion moléculaire

Phénomène physico-chimique qui tend à rendre homogène la distribution spatiale du soluté jusqu'à une concentration uniforme par diffusion vers la zone moins concentrée (dans un cas hypothétique où le fluide serait au repos). Son influence ne devient important que dans le cas d'écoulement lent [19].

2.3.2.4 La dispersion mécanique

Parallèlement au transport général des molécules en solution par convection, se rajoute un phénomène de dispersion du soluté dans l'eau. Cette dispersion est due à l'hétérogénéité de la distribution des vitesses dans un milieu poreux, elle même soumise à trois phénomènes: (i) le profil de vitesse dans un capillaire est parabolique (donc la

vitesse est plus rapide pour les molécules situées au centre des pores),(ii) la dimension des pores est variable (donc la vitesse est plus rapide pour les molécules transportées par les grands pores),(iii) les lignes de courant variant par rapport à la direction principale de l'écoulement (donc plus rapide pour les molécules qui s'éloignent le moins de cette direction principale). Pour des vitesses d'écoulement inférieures à 10^{-7} cm.h⁻¹, la diffusion moléculaire joue le rôle principal dans la dispersion du soluté. Pour des vitesses élevées, le phénomène de dispersion cinématique est prédominant. Dans notre cas d'étude, les vitesses sont supérieures à ce seuil. Nous négligeons par la suite la diffusion moléculaire.

2.3.2.5 La dispersivité longitudinale

La dispersivité n'est pas un paramètre directement mesurable. Elle peut être obtenue à partir de calage sur les courbes d'élution utilisant des solutions analytiques, des moyens numériques (résolution inverse) ou la méthode des moments. La dispersion hydrodynamique, D , dans des conditions de flux monodimensionnel [90] devient:

$$D = \lambda \cdot v \quad (\text{éq. 3.2})$$

Où λ est la dispersivité [L], v est la vitesse de pores [LT⁻¹], ($v=q/\theta$, avec q la vitesse de Darcy [LT⁻¹] et θ la teneur en eau [L³L⁻³]).

Cette relation linéaire [71], entre D et v est justifiée par l'hypothèse que la géométrie de l'eau remplissant les pores reste constante avec la vitesse des pores.

Bear (1972) (cité par [5]) considère la dispersivité comme une valeur caractéristique du milieu et de la taille de l'échantillon. D'après cet auteur, l'utilisation d'une valeur unique de dispersivité pour l'ensemble du milieu poreux est suffisante afin de caractériser les processus de transport de solutés.

Récemment, beaucoup d'auteurs ont cherché à trouver des modèles théoriques permettant de calculer la relation entre D et v pour les sols non saturés au laboratoire ([72]; [50]; [71]; [32]). Néanmoins, ces relations ont été trouvées dans des conditions où la teneur en eau reste très proche de la saturation [32].

A l'échelle microscopique (pores), deux mécanismes par lequel le transfert des solutés aura lieu: la convection liée à la gravité et à la capillarité, à travers laquelle l'écoulement sera à vitesse constante. Alors que le deuxième mécanisme est la diffusion qui produit une migration aléatoire et uniforme des molécules des solutés dans toutes les directions [61].

Ainsi la figure résume les différents mécanismes de transfert qui pourront être établies dans la matrice du sol à ses différentes échelles (porale, multiporale et macroscopique).

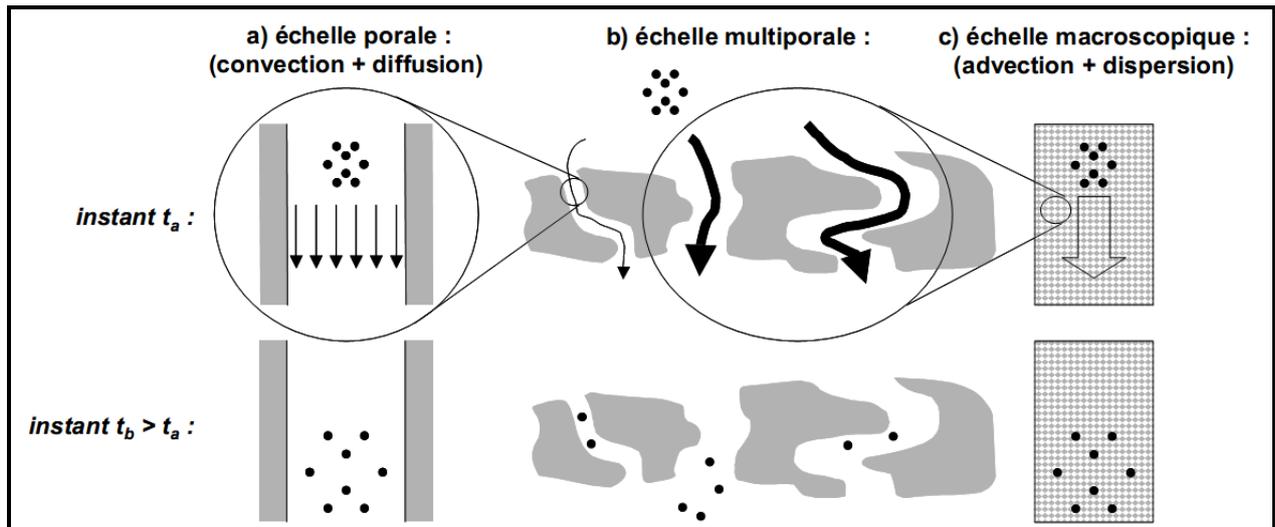


Figure 2.21. Transfert de molécules d'eau (a) à l'échelle porale pour un écoulement à vitesse constante et unidirectionnelle (convection-diffusion), b) à l'échelle multiporale et (c) à l'échelle macroscopique (advection-dispersion) [61]

En conclusion, le mouvement des solutés dans les sols est gouverné (i) par un flux d'ensemble appelé advection et (ii) par un éparpillement des molécules dont les multiples mécanismes sont regroupés sous le terme de dispersion. Ce transfert par advection-dispersion ne peut pas être décrit de façon strictement déterministe à cause de la complexité géométrique de l'espace poral. Il est alors nécessaire (i) soit d'élaborer des hypothèses simplificatrices sur la géométrie de l'espace poral pour décrire la trajectoire moyenne des molécules, (ii) soit de vérifier que le volume élémentaire représentatif (ou l'échelle macroscopique) est atteint pour pouvoir considérer le sol comme un milieu homogène dans lequel l'écoulement de l'eau et le transfert des solutés peuvent être décrits par des équations globales correspondant au milieu poreux homogène équivalent.

2.3.2.6 Fixation des polluants dans les sols: l'adsorption

La rétention caractérise la capacité d'un sol à retenir une molécule et à empêcher son transport à l'intérieur de la matrice solide ou vers l'extérieur. La rétention se traduit par le phénomène d'adsorption. L'adsorption est un phénomène physico-chimique interfacial et réversible provoquant l'accumulation des molécules de soluté dans l'interface solide-liquide (ou solide-gaz) [24].

Des nombreuses compositions des contaminants et les différentes sortes de phases solides doivent être distinguées pour établir les processus exacts régissant les interactions entre solutés, phase aqueuse (eau des pores) et phases solides [67]. Les processus de transfert de solutés peuvent être groupés en trois catégories principales:

- ☞ Sorption: adsorption physique (résultat de réaction d'échange ionique ou de forces de Van der Waals) et adsorption chimique (liaisons covalentes chimiques) [93],
- ☞ Complexation: mise en œuvre de ligands ([8]et [52]);
- ☞ Précipitation: accumulation de matériau (solutés, substances) à l'interface des phases solides du sol pour former de nouvelles phases solides insolubles [60].

En particulier parmi plusieurs constituants responsables de fixation des polluants dans les sols, les argiles [52], qui sont des particules du sol dont le diamètre n'excède pas 2µm, leur faible taille leur confère une forte réactivité chimique et physique ainsi qu'une importante surface de contact, D'autre part, les minéraux des argiles possèdent des propriétés spécifiques colloïdales [55].

Les argiles sont des aluminosilicates appartenant à la famille des phyllosilicates hydratés. Elles sont constituées d'une superposition de feuillets composés de couches tétraédriques à base de SiO et de couches octaédriques à base de Al-OH ou Mg-OH entre lequel se déplacent divers cations tels que K⁺ et Na⁺ et Ca²⁺.

Les argiles peuvent développer de grandes surfaces spécifiques, jusqu'à 700 à 800 m²/g et possèdent des propriétés d'absorption et d'adsorption importantes. Les trois mécanismes de fixation des polluants notamment les ions métalliques sur les argiles sont:

- ☞ L'échange ionique
- ☞ L'adsorption physique
- ☞ l'adsorption chimique

2.4 État de l'expérimentation in situ et en cases lysimétrique

2.4.1 Méthodes de caractérisation des sols

Parmi les méthodes de caractérisation des transferts de contaminants réactifs dans les sols, on peut distinguer(i) celles qui permettent d'étudier exclusivement les interactions chimiques sol-contaminant en conditions simplifiées (tube à essai, réacteur agitée à flux ouvert, colonne de sol remanié);et(ii) celles qui reproduisent l'espace poral du sol sur le terrain (lysimètre de sol non remanié, traçage et infiltrométrie sur le terrain),permettant alors d'étudier le comportement de l'eau et des traceurs inertes mais aussi de réaliser des traçages de contaminant hydrodynamiques représentatives du terrain.

2.4.1.1 Le tube à essai

Le tube à essai est l'instrument le plus simple pour mesurer l'adsorption des contaminants sur les sols. Le principe consiste à mélanger une masse de sol avec un volume de solution de concentration connue. Puis, la suspension est agitée durant un temps précis à température constante. Enfin, cette suspension est centrifugée et filtrée pour récupérer le surnageant. La concentration de contaminant restant en solution permet de calculer la quantité de contaminant adsorbée par le sol selon l'équation suivante [61]:

$$Q = \frac{V}{m}(C_0 - C) + Q_0 \quad (\text{éq. 4.1})$$

C: concentration de contaminant restant en solution (mol. L⁻¹), C₀ : concentration de contaminant initialement présent en solution (mol. L⁻¹), Q: concentration de contaminant adsorbée sur le sol (mol.Kg⁻¹), Q₀:concentration de contaminant initialement adsorbée sur le sol (mol. Kg⁻¹), V: volume de solution(L), m: masse de sol(Kg).

2.4.1.2 Le réacteur agité à flux ouvert

Ce système a été conçu sur le modèle du réservoir mélangeur à flux continu utilisé en génie des procédés ([27] et [84]). Le principe consiste à injecter un créneau de contaminant réactif à travers un réacteur contenant un rapport sol/solution connu, puis à suivre la concentration en sortie. La courbe de percée du contaminant (Figure 2.22) est comparée à celle d'un traceur inerte.

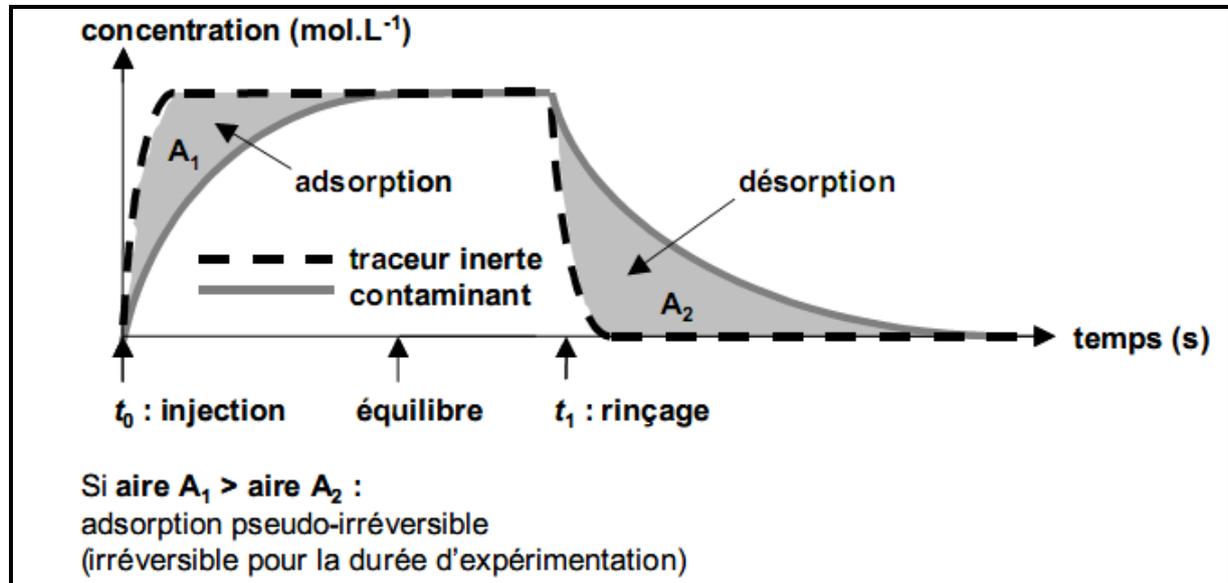


Figure 2.22. Principe de calcul de la quantité de contaminant adsorbé puis désorbé en réacteur agité à flux ouvert à partir des courbes de percée du contaminant et d'un traceur agité à flux ouvert[61].

Le réacteur agité à flux ouvert présente l'avantage de pouvoir suivre la concentration en continu. Et le réglage du débit permet de choisir un temps de contact sol-contaminant inférieur, supérieur ou égal au temps nécessaire pour que se produisent les réactions d'adsorption ou de désorption ([12]; [37]; [26]; [64]). Ce système est donc mieux adapté que le tube à essai à l'étude des cinétiques d'adsorption et de désorption [64].

2.4.1.3 La colonne de sol remanié et tamisé

Il s'agit d'une colonne du sol tamisé à 2mm et compacté de façon homogène, avec une longueur de 20 cm et un diamètre de l'ordre de 20 mm. Une fois remplie, la colonne est parcourue par un flux constant d'eau artificielle équilibrée [61]. Au temps t_0 , un composé chimique est injecté de façon instantanée. Si ce composé est un traceur inerte, il subit uniquement les mécanismes d'advection et de dispersion. Sa courbe de percée en sortie de colonne est donc caractéristique du comportement hydrodynamique de la colonne de sol, ce qui permet de la comparer avec la courbe de percée d'un contaminant réactif (figure 2.23) afin d'appréhender la chimie des interactions sol contaminant [92].

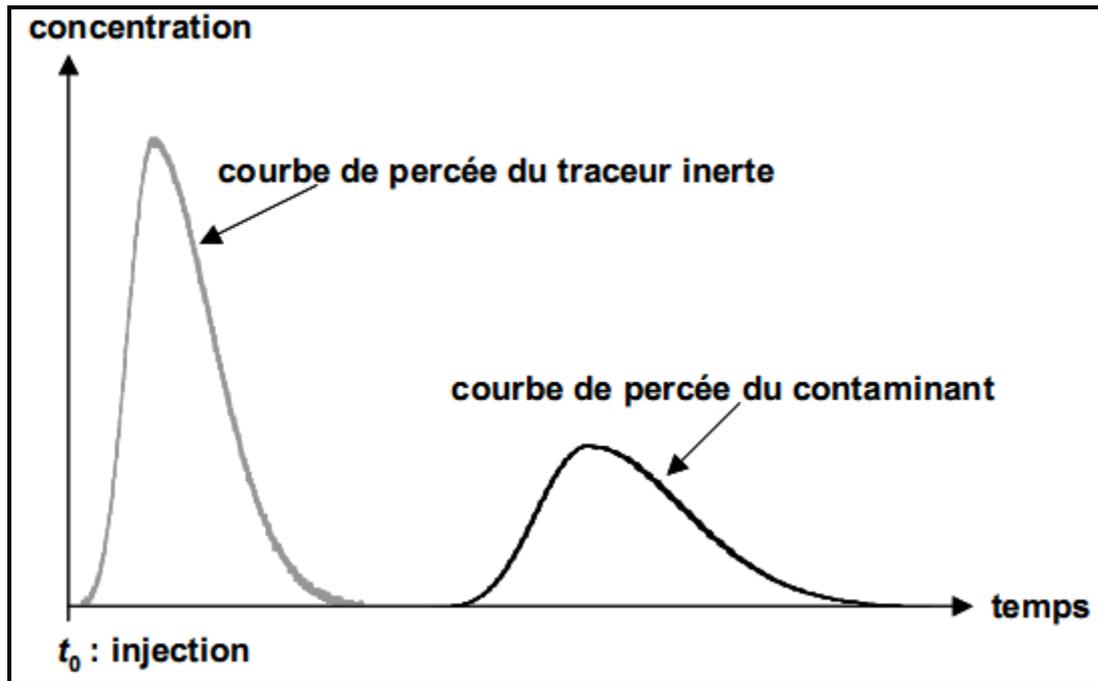


Figure 2.23. Courbes de percée d'un traceur inerte et d'un soluté réactif (ici: rétention du contaminant par le sol) en sortie de colonnes de sol, obtenues à partir d'une injection instantanée et simultanée du traceur inerte et du soluté réactif en entrée de colonne [61].

En conclusion, la colonne du sol remanié et tamisé ne permet pas de connaître les caractéristiques hydrodynamiques du terrain car elle ne conserve ni la granulométrie, ni la structure, ni les conditions hydriques du sol sur le terrain. Cependant, elle permet d'étudier les interactions chimiques sol-contaminant en conditions hydrodynamiques et avec un rapport sol/solution proche de celui rencontré sur le terrain. Mais contrairement au réacteur agité à flux ouvert, les caractéristiques hydrodynamiques sont intrinsèquement liées à la colonne de sol, et doivent être préalablement établies afin de pouvoir caractériser les interactions chimiques à partir de la courbe de percée du contaminant [62].

2.4.1.4 Le lysimètre de sol non-remanié

Un lysimètre (Figure 4.3) dans la est un volume de sol de grande dimension instrumenté pour subir des expériences en flux. Le mode de prélèvement de sol non-remanié a déjà été pratiqué pour certaines études qu'ont été faite dans le cadre de caractériser les mécanismes de transfert des polluants à travers les sols ([2]; [83]; [81]), Il présente l'inconvénient de perturber la structure du sol sur les bords à cause des frottements entre le tube et le sol. Ces perturbations sont de deux types : le premier concerne un tassement global de la carotte de sol, aisément mesurable par la réduction de la hauteur de la carotte de sol après enfoncement.

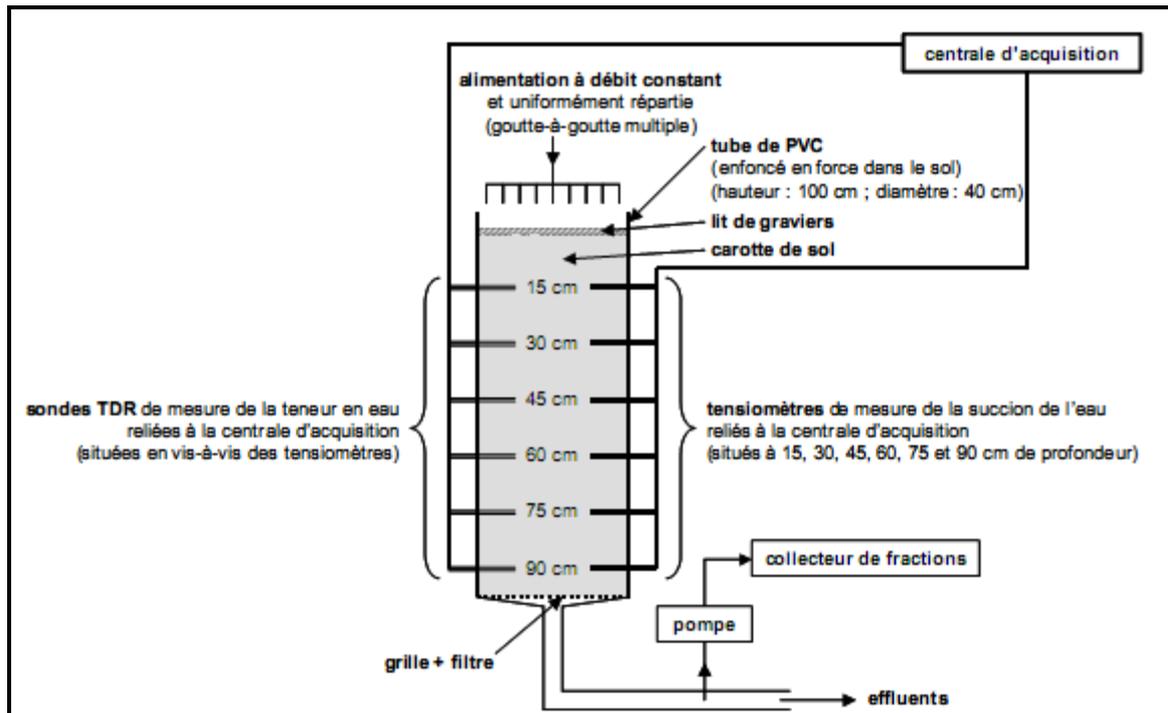


Figure 2.24. Schéma d'instrumentation d'un tube lysimétrique contenant une carotte de sol [61]

Un fois instrumenté, ce dispositif lysimétrique a permis d'accéder aux relations succion-teneur en eau, mais aussi de réaliser des traçages avec des substances inertes ou avec des contaminants réactifs. Les deux principales différences avec la colonne de sol remanié et tamisé sont l'utilisation d'un sol non-remanié dont la structure est conservée, et d'un flux bien en dessous de la conductivité hydraulique à saturation pour que l'écoulement s'effectue en conditions non-saturées sur toute la profondeur.

2.4.1.5 L'infiltrométrie sur le terrain

Les mesures d'infiltrométrie ont été réalisées sur le terrain selon la méthode « beerkan » (ex : [57]), et grâce à un infiltromètre à succion contrôlée [37]. La méthode « beerkan » (Figure 2.25) consiste à poser un cylindre verticalement à la surface du sol, puis à injecter une quantité d'eau connue à l'intérieur du cylindre en mesurant le temps de disparition de l'eau dans le sol. La quantité d'eau injectée, préalablement mesurée, doit être petite de sorte que la hauteur d'eau dans le cylindre soit négligeable et qu'il n'y ait pas de pression ajoutée à la surface du sol par rapport à la pression atmosphérique. L'opération est répétée jusqu'à ce que le temps de disparition de l'eau soit constant. On obtient la variation du flux d'eau en fonction du temps. Associée à des mesures des teneurs en eau volumiques initiale et finale, cette méthode permet de calculer la conductivité hydraulique à saturation en appliquant un modèle hydraulique associé à un calcul inverse des paramètres comme c'est le cas par exemple avec la méthode BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters) [57].

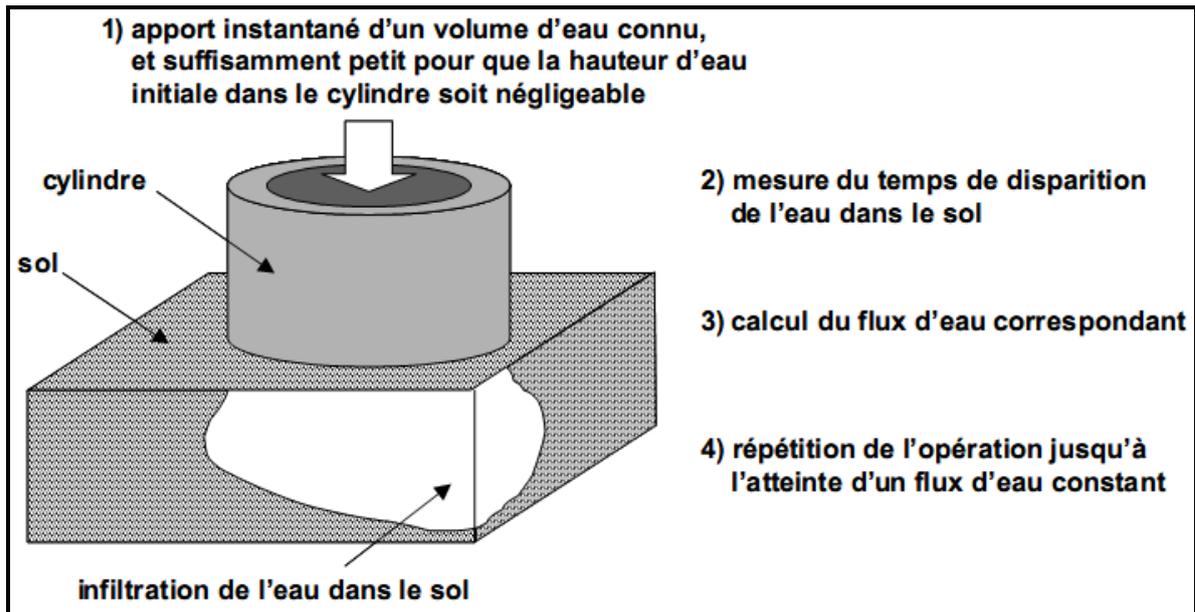


Figure 2.25. Principe de mesure indirecte de la conductivité hydraulique à saturation par la méthode «beerkan» [61]

Un autre dispositif, figuré sur Figure 4.5 et désigné sous le nom d'infiltromètre à succion contrôlée permettant de mesurer la conductivité hydraulique en conditions non-saturées pour des succions peu élevées.

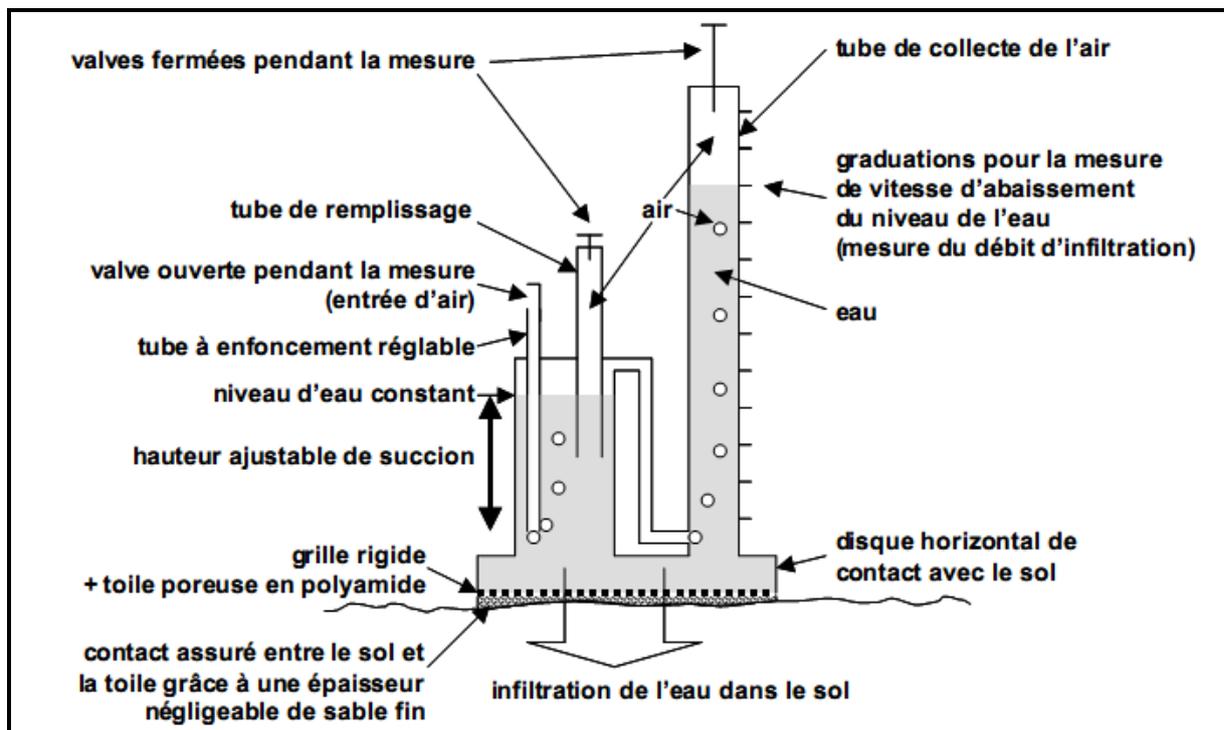


Figure 2.26. Schéma d'un infiltromètre à succion contrôlée [61]

L'infiltromètre à succion contrôlée à travers une succion connue et constante à la surface de sol permet de mesurer un flux d'eau instantané jusqu'à une valeur de flux correspondant à un régime permanent. Ensuite, la mesure d'une nouvelle valeur de flux se fait en baissant la succion imposée. L'opération est répétée jusqu'à une succion

nulle. On obtient donc la variation du flux d'eau en fonction du temps, pour différentes succions de l'eau. Associée à des mesures des teneurs en eau volumiques initiale et finale, cette méthode permet de calculer la conductivité hydraulique en fonction de la succion en appliquant un modèle hydraulique.

2.4.1.6 Le traçage de terrain

Il s'agit d'épandre de la manière la plus homogène possible un traceur inerte ou un contaminant réactif à la surface du sol. Des sondages à la tarière sont ensuite effectués pour dresser des profils du traceur inerte ou du contaminant. Ces sondages peuvent être réalisés à différents emplacements pour connaître la variabilité spatiale des propriétés hydrodynamiques du sol, et à différents intervalles de temps pour suivre la pénétration du traceur inerte ou du contaminant. Le choix des intervalles de temps est basé sur la hauteur d'eau effectivement infiltrée (différence entre la pluviométrie et l'évapotranspiration).

La différence majeure avec les traçages en lysimètre ou en colonne réside dans le fait que le régime hydrique n'est pas stationnaire et les conditions aux limites ne sont pas maîtrisées, car la parcelle est soumise aux conditions atmosphériques. En outre, le sondage est une méthode destructive et il est donc impossible de suivre l'évolution du profil au même endroit au cours du temps. Enfin, contrairement aux autres méthodes de traçage en conditions hydrodynamiques, l'écoulement de l'eau et la migration des substances sur le terrain n'est pas contrainte par la présence de parois.

2.5 Méthodes géophysiques de caractérisation des sols

2.5.1 Géoradar

Le géoradar (en anglais GPR pour Ground Penetrating Radar), est une méthode non destructive éprouvée pour l'imagerie interne de nombreux types de matériaux géologiques comme les sols, roches ainsi que les matériaux artificiels de construction comme le béton, l'asphalte, ou le bois. Le géoradar peut être utilisé pour la localisation d'objets métalliques ou non métalliques tels que câbles, conduites, égouts, fondations, ferraillements, ancrages et de nombreuses autres structures enterrées. En géologie et géotechnique, on peut l'utiliser pour étudier la disposition et l'épaisseur des différentes couches de terrain au préalable à différents types de travaux. L'utilisation judicieuse du géoradar peut permettre un gain d'efficacité et de temps lors de travaux et apporter une sécurité supplémentaire en prévenant des dommages lors de creusements et percements.

L'objectif des mesures radar est d'obtenir des informations sur la taille des blocs contenus dans le sol hétérogène étudié. En effet, compte tenu de leurs propriétés diffractantes et de leur faible longueur d'onde, les ondes radar peuvent constituer a priori une piste potentielle pour obtenir des renseignements sur le diamètre des blocs contenus dans le matériau. Dans le cas d'un sol à granulométrie étendue comportant diverses tailles d'hétérogénéités, on peut envisager de remonter à la courbe granulométrique du sol en effectuant un comptage systématique des hyperboles de diffraction sur les images obtenues à différentes fréquences sur un même profil.

Le géoradar possède de nombreux domaines d'application en fonction de la configuration et du type d'antenne utilisé. Il est utilisable dans tous les cas où l'on a besoin de connaître le contenu d'un milieu naturel ou artificiel sans le recours à des

méthodes destructives. Sa rapidité de mise en œuvre et les résultats obtenus en font un outil qu'aucune autre méthode indirecte ne peut concurrencer à l'heure actuelle.

2.5.2 Le résistivimètre

Afin de mesurer la propriété géophysique d'un sol (la résistivité électrique), on distingue deux types de méthodes: les mesures directes de type sondage ou tomographie électrique (DC) [87] et les méthodes électromagnétiques (EM) [23]. Bien que basées sur deux phénomènes physiques différents (les premières sur la loi d'Ohm et les secondes sur les équations de Maxwell) ces deux méthodes permettent de mesurer la même propriété géophysique (la résistivité électrique).

Ces méthodes consistent à mesurer le potentiel induit par l'injection dans le sol d'un courant continu au moyen d'électrodes métalliques plantées en surface. Les mesures sont généralement réalisées en courant continu, éventuellement à basse fréquence (quelques Hz). Ces méthodes permettent de détecter et quantifier le cheminement des écoulements dans le sous-sol et d'en décrire la variabilité spatiale et temporelle [4].

3. MATERIELS ET METHODES

3.1 Introduction

L'objectif de ce travail est tout d'abord de réaliser et d'étudier un pilote de laboratoire capable de caractériser hydrodynamiquement des sols en colonnes tout en suivant leurs réponses vis-à-vis à l'écoulement insaturé de l'eau claire et déterminer enfin les différents paramètres mis en jeu.

Plusieurs recherches (Pagotto, 1999 ; Blanchard, 2000 ; Anguela, 2004 ; limousin, 2006 ; Gujsaite, 2008) ont été faites afin de déterminer les propriétés hydrauliques des sols à travers les processus d'écoulement en milieux poreux et les mécanismes de transport de contaminants qui dépendent de la compréhension des comportements de l'eau des sols.

Il est nécessaire alors d'utiliser des méthodes rapides et précises pour mesurer ou estimer les propriétés hydrauliques ou hydrodynamiques en milieu non saturé, comme par exemple la courbe de rétention en eau des sols ou leur conductivité hydraulique.

Pour affiner la compréhension des mécanismes d'écoulement dans la zone non saturée, nous avons réalisé des travaux, à l'échelle du terrain ainsi que des expériences en colonnes au laboratoire, avec des milieux poreux non saturés.

Nous avons choisi tout d'abord de travailler avec deux matériaux, donnant lieu à des systèmes modèles destinés à étudier individuellement le processus d'infiltration en milieu non saturé. Il s'agit, d'une part, d'un sol prélevé du terrain du CSTB (terre du CSTB), et d'autre part, du sable. Puis nous avons employé des milieux poreux reconstitués à partir de mélanges de ces deux matériaux suivant des pourcentages massiques bien déterminés afin d'étudier l'aspect hydrodynamique d'un milieu poreux non saturé et reconstitué.

Nous présenterons tout d'abord les milieux poreux étudiés, ainsi que les dispositifs expérimentaux utilisés, permettant de réaliser des expériences en colonnes de laboratoire dans des conditions d'écoulement non saturé. Nous décrirons ensuite le protocole expérimental mis en œuvre ainsi que les différentes conditions des ces expériences.

3.2 Matériaux étudiés

3.2.1 Nature des matériaux étudiés

Six matériaux ont été utilisés dans cette étude: le sable, la terre du CSTB et quatre matériaux reconstitués.

Dans le tableau 3.1, sont consignées quelques caractéristiques des matériaux.

Tableau 3.1: Caractéristiques des matériaux étudiés

Matériaux	origine	Composition/qualité
Sable	CSTB	Sable de maçon débarrassé de ses fines
Terre	CSTB	Terre prélevée du terrain du CSTB
Sol 1	Reconstitué	Mélange de 25% terre, 75% sable
Sol 2	Reconstitué	Mélange de 40% terre, 60% sable
Sol 3	Reconstitué	Mélange de 50% terre, 50% sable

Sol 4	Reconstitué	Mélange de 75% terre, 25% sable
-------	-------------	---------------------------------

Les matériaux (sol 1, sol 2, sol 3 et sol 4) sont reconstitués selon des pourcentages massiques en sable et terre.

3.2.2 Caractéristiques physiques des matériaux

3.2.2.1 Diamètre effectif et coefficient d'uniformité

La courbe cumulative, représentant le pourcentage massique en fonction du diamètre des mailles, nous permet de déterminer le D_{60} et le D_{10} correspondant successivement à 60% et 10% de la courbe cumulative, d'où le coefficient d'uniformité C_u qui représente le rapport entre le D_{60} et le D_{10} alors que le diamètre effectif DE correspond à D_{10} .

Ces deux paramètres sont utilisés pour définir le type d'écoulement et ils sont déterminés à partir de la courbe granulométrique [56].

Les valeurs de ces deux paramètres pour les matériaux testés sont consignées dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2: Valeurs du coefficient d'uniformité et du diamètre effectif pour les différents matériaux

Matériaux	Sable	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Terre
DE (μm)	150	95	85	75	52	56
C_u	4,66	6,05	7,5	9,03	9,33	9,61

3.2.2.2 Diamètre moyen des grains

Le diamètre moyen des grains D_m est donné par l'équation suivante qui relie ce paramètre aux masses des différentes fractions retenues par des tamis de diamètres moyens D_i^* :

$$D_m = \frac{\sum m_i \cdot D_i}{\sum m_i}$$

Avec :

m_i : masse des particules retenues sur un tamis i

D_i^* : diamètre moyen de deux tamis consécutifs

Les valeurs de ce paramètre sont données dans le tableau 3.3 pour tous les matériaux.

Tableau 3.3 : Valeurs des diamètres moyens

Matériaux	Sable	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Terre
$D_m(\text{mm})$	0,41	0,48	0,53	0,65	0,61	0,86

3.2.2.3 Densité relative

La densité relative d'un matériau γ_s est calculée expérimentalement en divisant sa masse par la masse de la quantité d'eau qu'il déplace [56]. Les valeurs de ce paramètre sont représentées sur le tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Valeurs des densités relatives des différents matériaux

Matériaux	Sable	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Terre
γ_s	1,83	1,62	1,60	1,56	1,47	1,26

3.2.2.4 Porosité externe

C'est le rapport du volume des vides externe aux grains sur le volume total apparent. L'expression suivante permet de déterminer ce paramètre sous réserve de connaître la densité relative du matériau [56].

$$\varepsilon = 1 - \frac{4m}{\gamma_s \cdot \rho \cdot \pi \cdot d^2 \cdot H}$$

Avec :

m : masse du matériau (M)

γ_s : densité relative

d : diamètre de colonne (L)

ρ : masse volumique de l'eau (M.L⁻³)

ε : porosité externe du matériau

Les différentes valeurs de porosité sont représentées sur le tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Caractéristiques des matériaux étudiés. H : hauteur des massifs dans les colonnes. ε : porosité initiale, d : diamètre des colonnes

Matériau	Diamètre de colonne (d) (cm)	Hauteur de matériau H (cm)	Ecoulement	Masse de matériau (Kg)	ε
Sable	12.5	5	insaturé	0,80	0,29
	12.5	15		2,6	0,23
	12.5	30		5,2	0,23
Terre	12.5	5	insaturé	0,70	0,09
	12.5	15		2	0,13
	12.5	30		4	0,13
Sol 1	12.5	5	insaturé	0,83	0,17
	12.5	15		2,5	0,16
	12.5	30		5	0,18
Sol 2	12.5	5	insaturé	0,80	0,16
	12.5	15		2,41	0,18
	12.5	30		4,83	0,18
Sol 3	12.5	5	insaturé	0,78	0,19
	12.5	15		2,35	0,18
	12.5	30		4,71	0,17

Sol 4	12.5	5	insaturé	0,73	0,19
	12.5	15		2,21	0,18
	12.5	30		4,43	0,18

Dans le cas où la densité relative n'est pas mesurable, la méthodologie suivante est utilisée :

- Une éprouvette graduée est remplie de matériau à une hauteur H. la masse de l'ensemble est notée M_1 .
- On remplit l'éprouvette avec de l'eau jusqu'à la hauteur H. la masse de l'ensemble est notée M_2 .

Le volume des vides au sein du matériau est ainsi donné par $\rho_1(M_2 - M_1)$, et la porosité est obtenue en rapportant le volume des vides au volume total apparent du matériau.

3.3 Caractérisation hydrodynamique

Dans cette partie, nos travaux sont fondés sur des mesures sur terrain (Test de Porchet pour le sol du CSTB) et sur des expériences en colonnes du laboratoire avec des milieux poreux insaturés présentés dans la partie précédente. L'échelle d'observation est ainsi réduite par rapport au terrain et l'isolement des différents phénomènes est possible. Nous décrivons alors notre protocole expérimental mis en jeu.

3.3.1 Le protocole expérimental

- 1- Préparer la zone de mesure sur terrain (enlever les végétations et les débris existants)
- 2- Réaliser le Test de Porchet et effectuer les mesures correspondantes pour déterminer la variation de la hauteur d'eau infiltrée dans le sol en fonction du temps
- 3- Prélèvement des échantillons des sols afin d'effectuer les mesures au laboratoire
- 4- Installer le banc d'essai au laboratoire et faire le montage nécessaire pour les expériences à effectuer
- 5- Effectuer sur les différents échantillons prélevés les opérations de séchage dans l'étuve et le tamisage afin de préparer ces échantillons avant la mise en place dans les colonnes pour les mesures de l'infiltration
- 6- Mise en place des échantillons dans les différentes colonnes de banc:
 - ☞ On commence par le matériau prélevé du terrain de CSTB, on détermine la courbe caractéristique de la rétention d'eau sous les conditions
 - ☞ Même mesure sera effectuée pour le deuxième matériau: le sable
 - ☞ On reconstitue quatre matériaux, en effectuant un mélange entre les deux matériaux initiaux
 - ☞ Pour chaque matériau reconstitué, des mesures d'infiltration dans les colonnes de profondeurs imposées seront effectuées
- 7- On déterminera alors les différentes courbes caractéristiques (du débit de sortie et de la teneur en eau correspondantes aux matériaux reconstitués)

3.3.2 Mesures in situ

3.3.2.1 Préparation de zone de mesure

Chaque emplacement d'essai a tout d'abord été matérialisé au moyen d'un piquet, ensuite une surface de 1m² a été décapée et la végétation enlevée, racines comprises. Ces opérations ont été soigneusement effectuées à la pelle et à la pioche ; les mottes de terre ont été réservés pour la remise en état du terrain à la fin de la campagne (figure 3.1). La surface a été finalement arasée au moyen d'une truelle. Nous avons donc pour débuter les essais une aire parfaitement plate, sans végétation, ni grosses racines indésirables ou gênantes.



Figure 3.1. Préparation du terrain

3.3.2.2 Mesure de l'infiltration

Lorsqu'une pluie importante ou une irrigation humidifie un sol, il arrive un moment où la terre est complètement saturée. Dans ces conditions, l'eau occupe pratiquement tous les vides de la partie supérieure du sol. Ainsi si les horizons des zones profondes du sol ne sont pas saturés, cette eau va traverser l'horizon de surface sans qu'il y ait variation de la teneur en eau: c'est la filtration. Lorsqu'on veut réaliser une mesure de conductivité hydraulique en milieu saturé dans un sol qui ne l'est pas, on parlera alors d'infiltration, le mécanisme est ici différent de celui de la filtration en milieu saturé. Sur un sol sec, au début de l'infiltration, l'eau pénètre rapidement en remplissant un maximum des vides, puis lorsqu'un certain volume de terre peut être considéré comme saturé, la vitesse de filtration dans cette couche devient constante.

Plusieurs méthodes peuvent être appliquées afin de déterminer le profil d'infiltration du sol (Chossat, 2005):

- ☞ Porchet
- ☞ Méthode de deux tubes
- ☞ Méthode de Winger
- ☞ Méthode de gradient d'infiltration
- ☞ Müntz
- ☞ Guelph...

Les méthodes les plus couramment utilisées étant celles de Porchet et de Müntz.

3.3.2.2.1 Méthode du simple anneau ouvert ou anneau de Müntz (Single ring method)

"Cette méthode, décrite par Müntz et al. (1905), de terrain simple et rustique est dénommée communément «méthode de Müntz»[29]. Elle a été utilisée dans de nombreux pays, pendant de longues années (ex: en Afrique de l'Ouest) pour déterminer le coefficient d'infiltration dans le cadre des projets d'aménagement agricole, le dimensionnement des raies d'irrigation [31].

La figure 3.2 représente le dispositif de mesure de cette méthode, cette dernière consiste à déterminer la hauteur d'eau infiltrée en fonction des temps sur une surface déterminée du sol sous une charge constante [31]. Les matériels nécessaires pour cette méthodes sont présentés comme ci-après (Tableau 3.6).

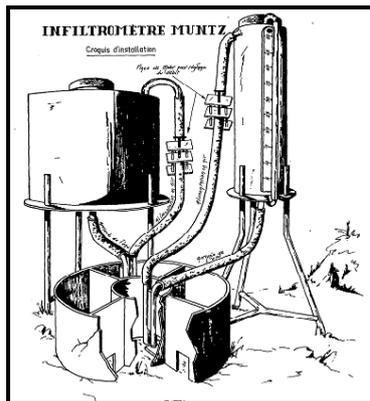


Figure 3.2. Schéma de l'appareil mis au point par l'ORSTOM. Le double tuyau permet de régler plus facilement le niveau dans l'anneau central [31].

Tableau 3.6 : les matériels nécessaires pour la méthode de Müntz [29].

Matériels	Caractéristiques	Commentaires
Cylindre de tôle d'acier	<ul style="list-style-type: none"> - 0,112 m de diamètre intérieur - 0,25 m de hauteur Renforcer la partie supérieure pour pouvoir enfoncer le cylindre en tapant avec une masse	<ul style="list-style-type: none"> - Le diamètre correspond à une section très voisine de 1dm² - Bord inférieur chanfreiné de façon à s'enfoncer facilement dans le sol
Flacon jaugé ou bouteille de Mariotte	<ul style="list-style-type: none"> - Contenance de 5 à 10litres 	<ul style="list-style-type: none"> - L'extrémité du tube est taillée en biseau, pour que, renversé au-dessus du cylindre, et en contact avec la lame d'eau, il puisse moduler l'arrivée d'eau en laissant passer les bulles d'air
Un support réglable (trépied)		<ul style="list-style-type: none"> - Pour maintenir le flacon au dessus de l'anneau
Chronomètre		
Reserve d'eau	<ul style="list-style-type: none"> - Une dizaine de litres 	<ul style="list-style-type: none"> - Jusqu'à 200 litres suivant le type de sol

La cinétique d'infiltration suit une courbe (Figure 3.3) d'équation générale du type $I=f(t)$ qui peut être décomposée en deux domaines: la première partie de la courbe traduit **un régime transitoire** dans lequel la vitesse d'infiltration diminue au cours du temps, la deuxième partie de la courbe correspond à **un régime permanent** où la vitesse d'infiltration devient constante [29]

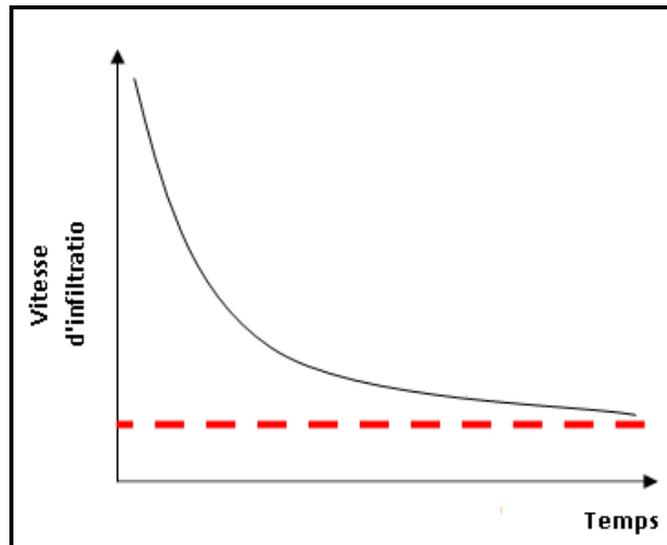


Figure 3.3 : Courbe du type $I=f(t)$ pour la détermination de la valeur de vitesse d'infiltration en régime permanent. L'asymptote horizontale correspond à la vitesse limite en régime permanent [29].

3.3.2.2.2 Méthode de Porchet

Cette méthode du terrain, a été mise au point par Porchet en 1935, dans le but de la caractérisation hydrodynamique des sols in situ dans le cadre des projets de domaine agricole afin d'accéder à la «vitesse de filtration» dans les sols. Elle a une méthode semblable en USA appelée «percolation rate» ou test de percolation à niveau variable [29]. Elle consiste à suivre en fonction du temps, l'infiltration d'une quantité versée dans un trou de tarière. Ce dernier est rempli d'eau et on mesure l'abaissement du niveau de l'eau à des intervalles de temps précis.

C'est une méthode simple et rapide qui donne une perméabilité globale sur toute la profondeur du trou de tarière. La perméabilité obtenue est représentative de la perméabilité conjuguée du sol et du sous sol.

Porchet et al .(1935) ont établi deux méthodes de mesure de la perméabilité du sol(selon [29], dont une est à niveau variable concernant essentiellement les sols présentant une nappe alors que la seconde est à niveau constant qui était largement utilisée en France et qui fait partie des méthodes d'évaluation des projets d'assainissement individuel.

Dans notre cas, la mesure de l'infiltrabilité du sol in situ a été effectuée à l'aide de cette méthode dont son protocole de mesure se déroulera en trois phases:

a- Préparation du trou de tarière :

- Le trou foré à la tarière dans le sol jusqu'à la profondeur de mesure de 35 cm est de section régulière et verticale. Le diamètre est de 15cm,
- Le fond du trou est préparé, nettoyé et régalié



Figure 3.4. Préparation du trou à l'aide d'une tarière

b- Mise en route de la saturation

- Verser de l'eau jusqu'à une hauteur de 30cm dans le trou
- Effectuer une phase d'imbibition du terrain pendant une durée d'au moins 4heures

c- Mise en œuvre de la mesure

- on commence par ajuster le niveau de l'eau à 15cm au dessus du fond du trou ;
- on met en place le régulateur ;
- on déclenche le chronomètre ;
- on observe et on note, à des intervalles de temps, la détermination du niveau de l'eau dans le réservoir ;
- on arrête le test lorsque l'on atteint la stabilisation

On résume les matériels nécessaires dans cette figure :



Figure 3.5 : Photo de dispositif de test de Porchet

On remarque que la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol n'est pas linéaire (Figure 3.6). Elle correspond bien à l'allure de la courbe d'infiltration donnée par [65]. Cette valeur de la vitesse tend vers une vitesse constante qui est la conductivité hydraulique à saturation K_s , ce paramètre demeure essentiel de l'infiltration, il représente la valeur

limite du taux d'infiltration si le sol est saturé et homogène. Ici on calculera K_s en prenant la valeur de la vitesse la plus faible, correspondant à la vitesse limite.

D'après la courbe présentée sur la figure 3.6, **la valeur de K_s calculée est 10^{-6} m/sec** environ tout en prenant la vitesse minimale équivalente à la vitesse constante limite.

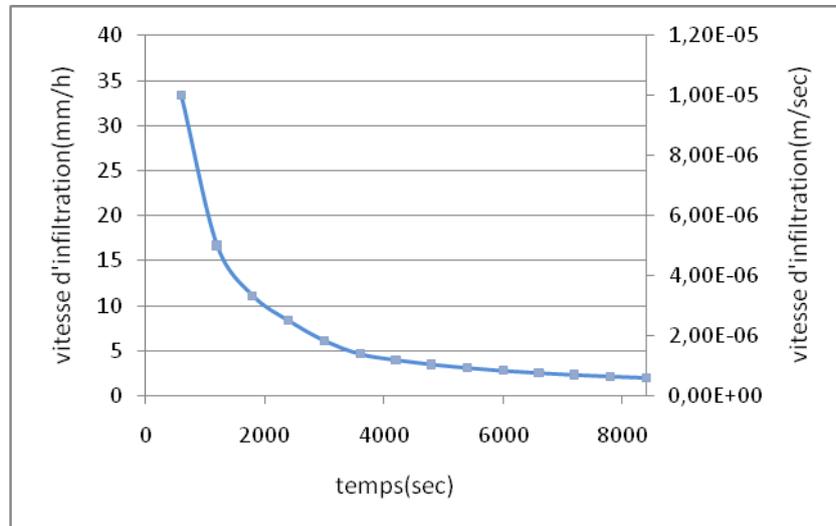


Figure 3.6 : Variation de vitesse d'infiltration d'eau en fonction du temps selon la méthode de Porchet

3.3.3 Prélèvement des échantillons

Le prélèvement peut s'effectuer soit de manière directe (à l'aide de tarières manuelles) ou mécaniquement (par creusement d'une fosse pédologique au piochon ou à la pelle). Dans ce cadre, on distingue, selon la finalité deux types de prélèvement: prélèvements pédologiques (permettant une analyse verticale des divers horizons du sol, alors que le second type, prélèvements à buts agronomiques, peut être effectué à l'intérieur du profil cultural pour l'évaluation de la fertilité des terres.

Il s'agit donc de prélever un volume connu du sol non perturbé afin de déterminer le poids sec ou la densité apparente, ou certaines autres caractéristiques hydriques. La méthode dite «au cylindre» a fait l'objet de la norme AFNOR NF X3-501 (1992).

Pour notre cas, le prélèvement des échantillons de sols a été effectué à l'aide d'une tarière et une pelle et puis seront conservés dans des sacs au laboratoire.

3.3.4 Études en colonnes de laboratoire en conditions non saturées

3.3.4.1 Approche méthodologique

L'objectif de cette étude a été de réaliser un banc d'essais permettant de caractériser hydrodynamiquement les différents matériaux d'étude.

Le protocole expérimental comprend les différentes expériences récapitulées dans le tableau 3.6. En effet, on a démarré l'étude expérimentale par les expériences d'infiltration de deux matériaux non remaniés (Sol du CSTB et le sable), ensuite, des expériences similaires ont été effectuées sur les nouveaux matériaux reconstitués tout en travaillant avec un débit constant pour les deux cas.

Tableau 3. 7 : Tableau récapitulatif de protocole expérimental

Expérience	Sol	Condition	Teneur en eau massique initial(%)	Hauteur de Colonne	Masse de sol de colonne (kg)	Débit d'eau (ml/min)
1	Terre	Non remanié et non saturé	6,2	5	0,70	20
				15	2	20
				30	4	20
2	Sable	Non remanié et non saturé	3,5	5	0,80	20
				15	2,60	20
				30	5,20	20
3	Sol 1	Remanié et non saturé	4	5	0,83	20
				15	2,5	20
				30	5	20
4	Sol 2	Remanié et non saturé	4,2	5	0,80	20
				15	2,41	20
				30	4,83	20
5	Sol 3	Remanié et non saturé	4,4	5	0,78	20
				15	2,35	20
				30	4,71	20
6	Sol 4	Remanié et non saturé	4,5	5	0,73	20
				15	2,21	20
				30	4,43	20

3.3.4.2 Matériels

3.3.4.2.1 Présentation du banc d'essais

Un banc d'essai expérimental a été utilisé pour les expériences en conditions d'écoulement non saturé. Des colonnes utilisées sont en PVC de 12,5cm de diamètre extérieur. L'extrémité basse de la colonne est constituée d'une plaque de PVC perforée recouverte d'un grillage à fine maille afin de retenir le matériau.



Figure 3.7: Photo du banc d'essais réalisé en fonctionnement

3.3.4.2 Alimentation des colonnes

L'alimentation en effluent des colonnes s'effectue à l'aide d'une pompe péristaltique Masterflex L/S, munie d'un variateur permettant d'ajuster le débit volumique. Les fractions sont récupérées en sortie de colonne par des béchers gradués. Le dispositif expérimental est présenté dans la figure 3.7. Les fractions sont collectées sur une période de 24 à 48h.

3.3.4.3 Conduite d'expériences en conditions non saturés

3.3.4.4 Échantillons non remaniés:

Dans notre étude, on définit un échantillon non remanié comme échantillon prélevé de son site initial sans le modifier ni le mélanger avec d'autres matériaux différents, contrairement aux échantillons remaniés qui sont définis comme des matériaux reconstitués à partir des matériaux non remaniés en faisant leur mélange suivant des pourcentages massiques bien déterminés.

La solution utilisée pour alimenter les colonnes est l'eau claire. L'alimentation de la colonne de haut en bas est démarrée à un débit constant environ de 20ml/mn pour chaque colonne. La mesure s'arrêtera quand on trouvera des valeurs constantes de volume de sortie, ces valeurs correspondent au régime permanent.

3.3.4.5 Échantillons remaniés:

Dans ce cas nous avons reconstitué des nouveaux matériaux mélangés à partir des matériaux initiaux (la terre du CSTB et le sable) suivant des pourcentages massiques bien déterminés.

Les différents cas étudiés sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau 3.8 : Les fractions massiques de différents cas des matériaux reconstitués

Sol	Terre de CSTB	Sable
So1	25%	75%
Sol2	40%	60%
Sol3	50%	50%
Sol4	75%	25%

Pour chaque sol reconstitué, une série d'expériences en colonnes ont été effectuées afin de déterminer leurs courbes caractéristiques d'infiltration.

3.3.5 Rétenion d'eau

Le volume d'eau totale retenue peut être caractérisé à l'aide de **deux méthodes** distinctes: la méthode de mise **en régime permanent** et la méthode dite de **ressuyage**.

3.3.5.1 Méthode de mise en régime permanent

3.3.5.1.1 Matériels et produits

Le dispositif utilisé pour la caractérisation de la rétention de l'eau est le banc d'essai décrit précédemment dans le paragraphe (3.3.4.2). Des colonnes de 12,5cm de diamètre garnies sur trois hauteurs différentes de 5, 15 et 30cm sont alimentées à un débit constant de 20ml.mn⁻¹ par de l'eau claire par une pompe péristaltique.

Une balance est disposée à la sortie de la colonne pour la mesure des masses d'eau recueillies en fonction du temps. L'accroissement de la masse d'eau est dérivé sur un pas de temps de 15 minutes.

3.3.5.1.2 Principe de la méthode

Les colonnes précédemment définies et contenant des massifs initialement secs de masse M, sont alimentées avec de l'eau claire. Le tracé du débit de sortie Q_i en fonction du temps, fait apparaître trois phases. Une première phase correspondante à un débit de sortie nul suivie d'une phase de croissance et enfin une dernière phase où le débit est constant. La quantité totale d'eau retenue dans le massif (V_t) est égale à la différence de volume entre l'eau totale introduite ($V_v=Q_e*t$) et l'eau récupérée (V_r) avant l'établissement d'un régime permanent (Figure 3.8).

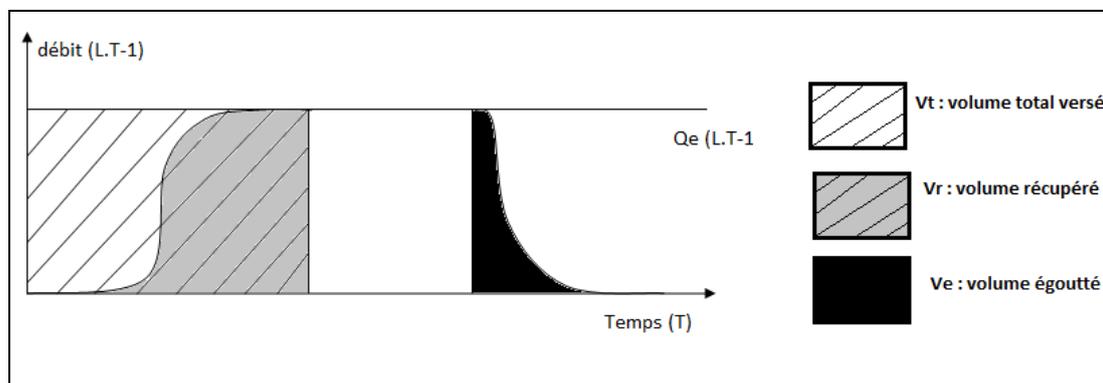


Figure 3. 8: Schéma explicatif caractérisant les volumes d'eau mis en jeu dans le massif de colonne

3.3.5.2 Méthode de ressuyage

La méthode de ressuyage consiste à mesurer les volumes d'eau égouttable et d'eau retenue après égouttage. La somme des volumes d'eau retenue et égouttée correspond au volume d'eau totale mise en jeu dans le massif.

3.3.5.2.1 La méthode de mesure de l'eau égouttable

La détermination du volume d'eau égouttée s'effectue à l'aide de la méthode de drainage qui consiste, après établissement du régime permanent sur les massifs dans les colonnes, à couper l'alimentation et à suivre le débit de sortie en fonction du temps. Le volume d'eau égouttable est alors donné par l'aire V_e (Figure 3.8).

La courbe représentative de technique de drainage (courbe de variation du débit en fonction du temps), permet de caractériser d'une part les phases liquides lors de l'écoulement et d'autre part la capacité de rétention d'eau des matériaux [53].

La figure 3.9 représente schématiquement, l'allure de la courbe de drainage obtenue en régime permanent.

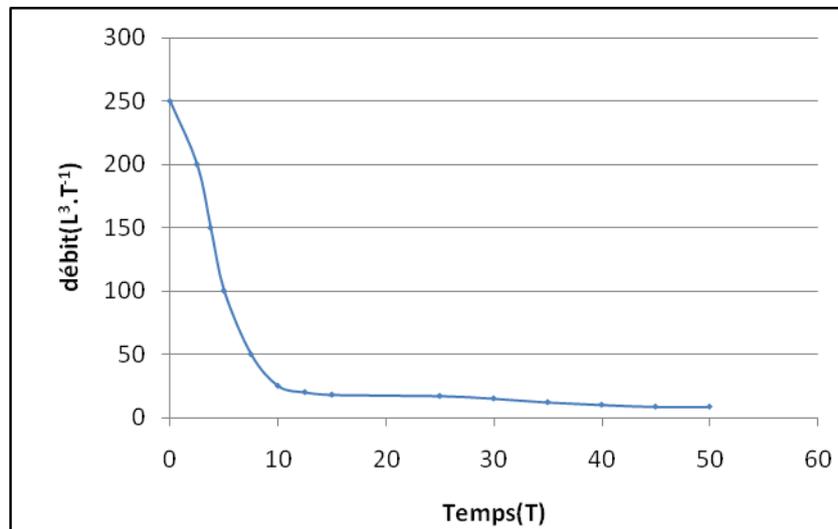


Figure 3.9 .Représentation d'une courbe de drainage en régime permanent [53].

3.3.5.2.2 Méthode de mesure de l'eau retenue après égouttage

Le volume retenu après égouttage peut être obtenu de deux façons différentes :

- La première méthode pouvant être réalisée à l'échelle réelle, consiste à prélever après le drainage, des échantillons de matériaux à différents endroits du lit. Le calcul de leur teneur massique ou volumique en eau retenue permet d'accéder à une moyenne avec laquelle on caractérise la teneur en eau de tout le massif de la colonne.
- La seconde approche, réalisable à l'échelle de laboratoire, consiste à introduire un volume d'eau connu de façon à immerger le massif initialement sec. Après que tout le matériau soit imbibé, la colonne est alors vidangée. La différence des volumes injecté et recueilli rapporté à la masse de matériau, exprime la capacité en eau retenue (non égouttable) de tout le matériau.

3.3.5.2.3 Détermination de temps de passage

Le temps de passage est obtenu en rapportant la quantité totale d'eau utile (volume total retenu par le sol) dans le sol au débit d'alimentation.

Le volume d'eau utile est défini comme étant la somme de la quantité d'eau égouttée et la quantité d'eau retenue par le matériau.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

L'étude hydrodynamique des matériaux étudiés a pour objectif de déterminer d'une part leur aptitude à retenir l'eau, et d'autre part les profils de distribution des temps de passage. Une étude comparative entre les différents matériaux suivant ces aspects sera ensuite effectuée.

4.1 Rétention de l'eau

Le volume d'eau mis en jeu dans le massif de la colonne est intimement lié à la texture et la composition du matériau. Une caractérisation des matériaux par la capacité de rétention en eau est donc déterminante.

La mesure expérimentale de cette capacité peut s'effectuer à l'aide de deux méthodes distinctes: la méthode de ressuyage et la méthode de mise en régime permanent que nous avons développée.

La technique de mise en régime permanent sera ensuite utilisée pour déterminer la capacité de rétention de l'eau des matériaux utilisés, et les principaux paramètres influençant cette caractéristique seront discutés.

4.2 Caractérisation de la capacité de rétention d'eau

4.2.1 Méthode de mise en régime permanent

4.2.1.1 Échantillons non remaniés

La détermination de la capacité de rétention d'eau est réalisée suivant le protocole expérimental défini dans la partie matériels et méthodes (§ 3.3.5.1). Des exemples des résultats obtenus sont présentés sur les figures 4.1 et 4.2.

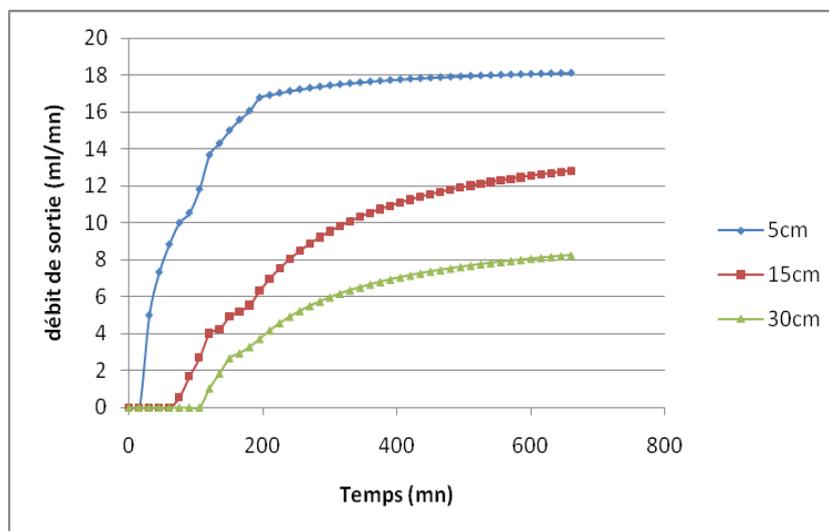


Figure 4.1. Suivi du débit de sortie en fonction du temps dans le cas de la terre du CSTB, (Colonnes $\varnothing=12,5$ cm ; $L= (5,15$ et 30 cm), $Q= 20$ ml.mn $^{-1}$)

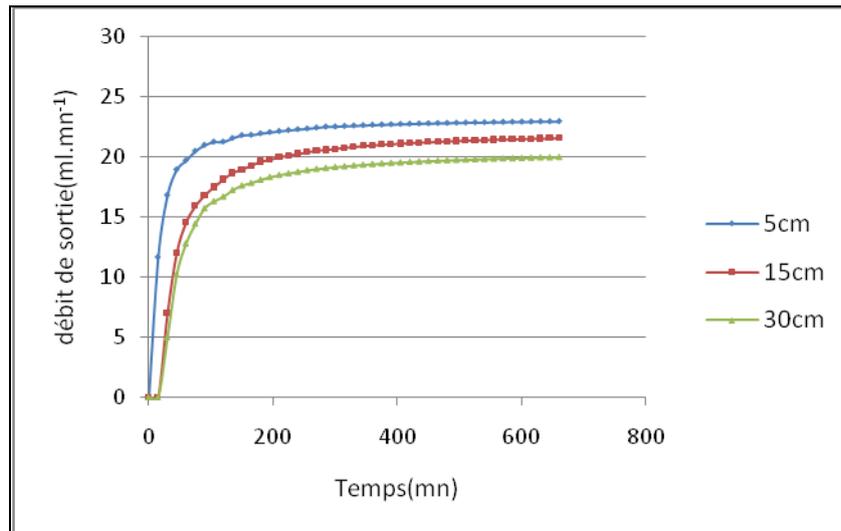


Figure 4.2. Suivi du débit de sortie en fonction du temps dans le cas du sable,
(Colonnes $\varnothing=12,5$ cm ; $L= (5,15$ et 30 cm), $Q= 20$ ml.mn⁻¹)

L'aire comprise entre les points expérimentaux, l'axe des ordonnées et la droite parallèle à l'axe des abscisses, lorsque le régime permanent est atteint, correspond au volume d'eau totale mise en jeu dans le matériau de chaque colonne. La capacité de rétention d'eau représente le rapport de cette quantité au volume ou à la masse du matériau.

On remarque sur les figures 4.1 et 4.2 que la terre du CSTB et le sable ne manifestent pas le même comportement. La courbe du sable est caractérisée par une atteinte rapide du régime permanent et un faible retard (de l'ordre de 15 minutes pour la colonne de 30cm). La courbe de terre du CSTB est caractérisée par un retard assez important (de l'ordre de 100 minutes pour la colonne de 30cm) et un régime permanent atteint aussi avec un intervalle de temps plus important (500 minutes pour la colonne de 30cm).

L'alimentation continue du matériau de chaque colonne initialement sec peut être considérée comme une injection échelon. L'évolution du débit de sortie constitue donc la réponse du système à ce type d'injection.

Pendant le régime permanent, on remarque que pour le sable, le débit de sortie pour les trois colonnes est presque égal au débit d'alimentation (20ml.mn⁻¹) ce qui montre que pendant ce régime le volume retenu par les échantillons devient nul. Alors que pour la terre, les trois colonnes présentent des débits inférieurs au débit d'entrée, d'où des volumes retenus mis en jeu dans les massifs seront enregistrés.

Les résultats obtenus par le suivi du débit de sortie en fonction du temps pour les deux matériaux, montrent que le régime permanent correspond au régime de saturation de chaque colonne, cette saturation est atteinte de façon différente pour les deux matériaux: pour le sable, le débit de sortie est supérieur ou égal à celui d'entrée alors que pour la terre, la formation d'une lame d'eau au dessus de la surface de matériau.

4.2.1.2 Échantillons remaniés (reconstitués)

Les résultats obtenus avec les matériaux (sol1, sol2, sol3 et sol4) ne sont que des cas intermédiaires. Leurs courbes représentant le suivi du débit de sortie en fonction du temps sont représentées sur les figures suivantes.

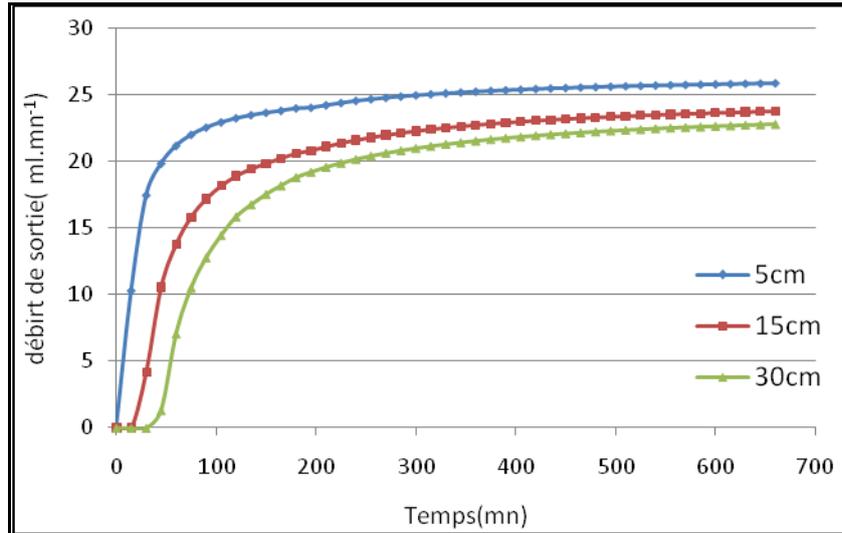


Figure 4.3. Suivi du débit de sortie en fonction du temps dans le cas du sol 1, (Colonnes $\varnothing=12,5$ cm ; $L= (5,15$ et 30 cm), $Q= 20$ ml.mn⁻¹)

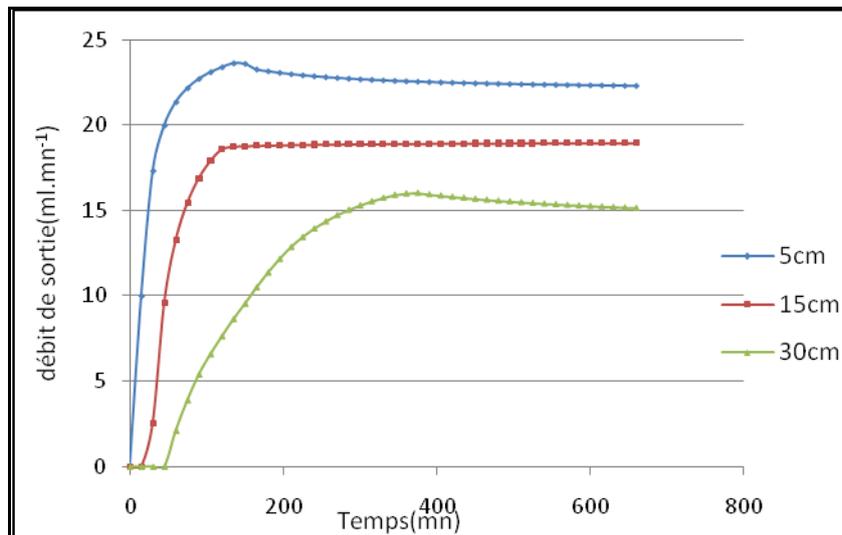


Figure 4.4. Suivi du débit de sortie en fonction du temps dans le cas du sol 2, (Colonnes $\varnothing=12,5$ cm ; $L= (5,15$ et 30 cm), $Q= 20$ ml.mn⁻¹)

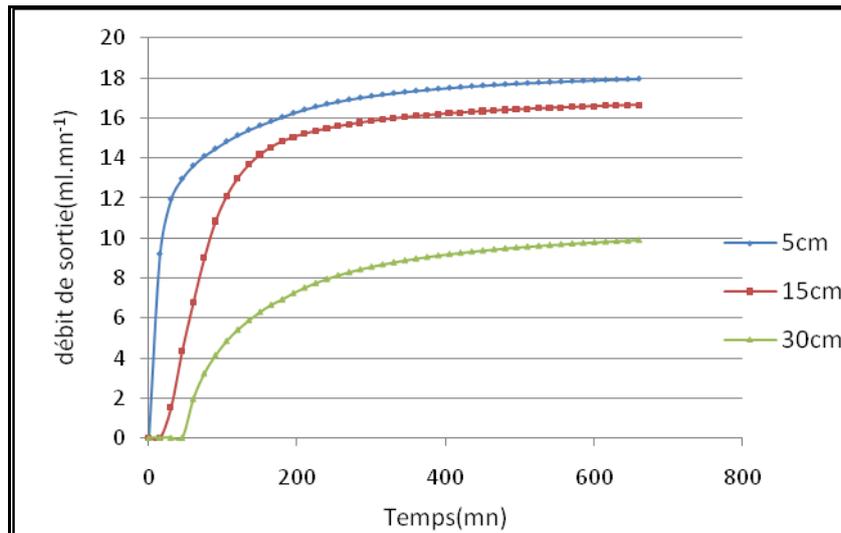


Figure 4.5. Suivi du débit de sortie en fonction du temps dans le cas du sol 3, (Colonnes $\varnothing=12,5$ cm ; $L= (5,15$ et 30 cm), $Q= 20$ ml.mn⁻¹)

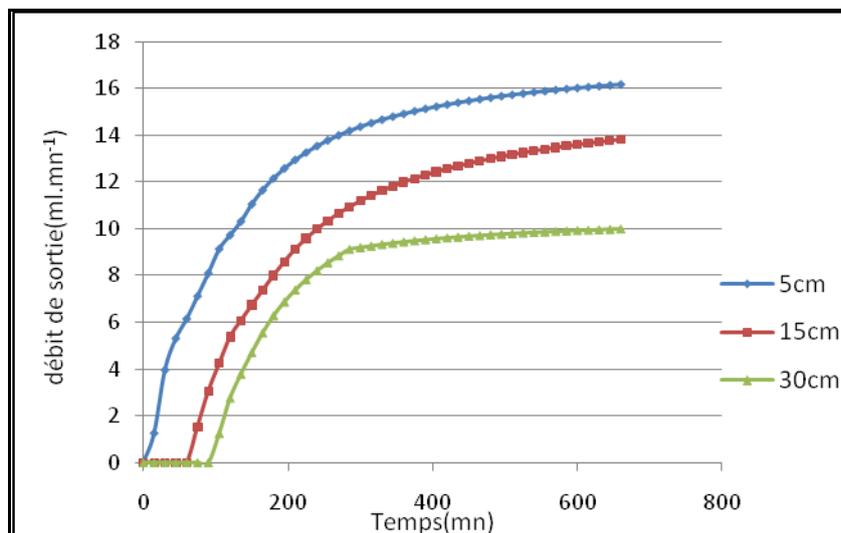


Figure 4.6. Suivi du débit de sortie en fonction du temps dans le cas du sol 4, (Colonnes $\varnothing=12,5$ cm ; $L= (5,15$ et 30 cm), $Q= 20$ ml.mn⁻¹)

Les courbes de suivi du débit de sortie en fonction du temps, pour les quatre matériaux reconstitués, manifestent le même comportement éventuellement avec quelques particularités pour chaque matériaux concernant les temps de début de sortie d'eau de la colonne et de l'atteinte de régime permanent.

En faisant une comparaison des résultats pour les différents matériaux pour une hauteur de colonne de 30cm afin de distinguer les différences entre ces massifs, la figure 4.7 illustre cette comparaison.

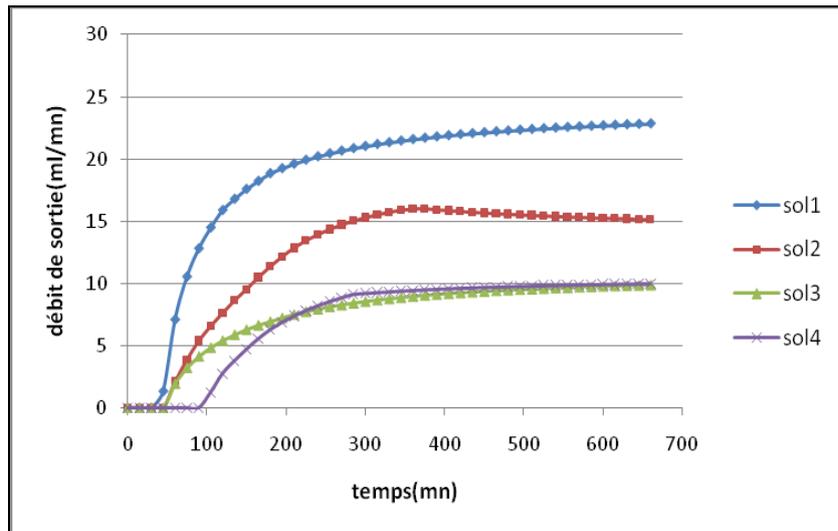


Figure 4.7. Résultats expérimentaux de débit de sortie en fonction du temps pour les quatre sols (Colonnes $\varnothing=12,5$ cm ; $L=30$ cm, $Q=20$ ml.mn $^{-1}$)

En effet, les quatre courbes de suivi du débit de sortie en fonction du temps des différents matériaux reconstitués, montre que le sol 1 est celui qui possède un faible retard de temps du débit de sortie (vers 45 minutes), alors que les autres matériaux, l'eau de sortie de la colonne a commencé après une heure de démarrage de l'expérience.

En ce qui concerne le régime permanent, le sol 4 est caractérisée par une atteinte de régime permanent la plus lente (300 minutes environ) contrairement au sol 1 dont le régime permanent est atteint assez rapidement (225 minutes environ). Les sols 2 et 3 ont presque le même intervalle de temps (250 minutes).

4.2.2 Méthode de ressuyage

La méthode utilisée permet de quantifier les quantités d'eau mises en jeu lors de l'écoulement (§ 3.3.5.2). Cette capacité de rétention peut être approchée en mesurant les volumes de rétention dynamique (volume d'eau résultant du drainage de la colonne) et les volumes de rétention statique (volume restant dans la colonne après drainage de colonne).

Les volumes de rétention dynamique mesurés sont présentés pour différentes hauteurs et différents matériaux sur la figure 4.8.

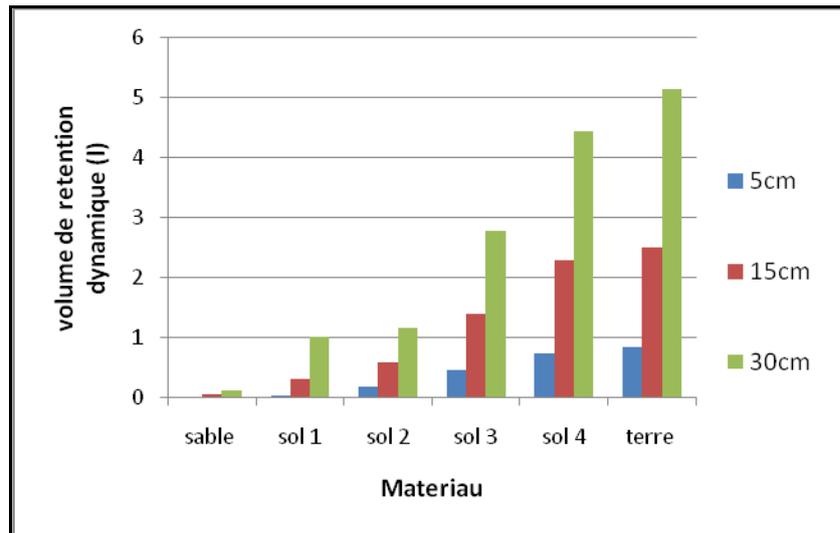


Figure 4.8. Détermination des différents volumes de rétention dynamique en fonction des hauteurs de colonnes des différents matériaux

Les volumes drainés croissent de façon linéaire en fonction des hauteurs des colonnes et en fonction du type de matériaux.

D'une manière générale, ces volumes d'eau retenu ont été très faibles dans le cas du sable (ne dépassent pas 0,5 litre) par rapport aux autres matériaux. Cependant, dans le cas de la terre, les volumes ont été plus importants (5 litres environ pour la colonne de $h = 30\text{cm}$). En ce qui concerne les matériaux intermédiaires (sol 1, sol 2, sol 3 et sol 4), ces volumes sont respectivement: 1l, 1,5l ; 3,5l ; 4,5l (environ pour les colonnes de $h = 30\text{cm}$). Nous attribuons l'ordre croissant de classement des volumes retenus dans les différents matériaux à l'augmentation de la teneur massique en terre dans les matériaux. Cela peut résulter également de l'influence de la texture de la terre sur la capacité de rétention d'eau des différents matériaux

Comparés aux volumes de rétention dynamique, les volumes de rétention statique, demeurent plus importants et ils sont liés à la fois à la hauteur de la colonne et la teneur massique en terre dans les matériaux.

Par exemple, pour le sable, une augmentation considérable de ces volumes a été enregistrée pour les trois hauteurs des colonnes (1 litre environ pour la colonne de $h = 30\text{cm}$). Ces résultats sont présentés sur la figure suivante:

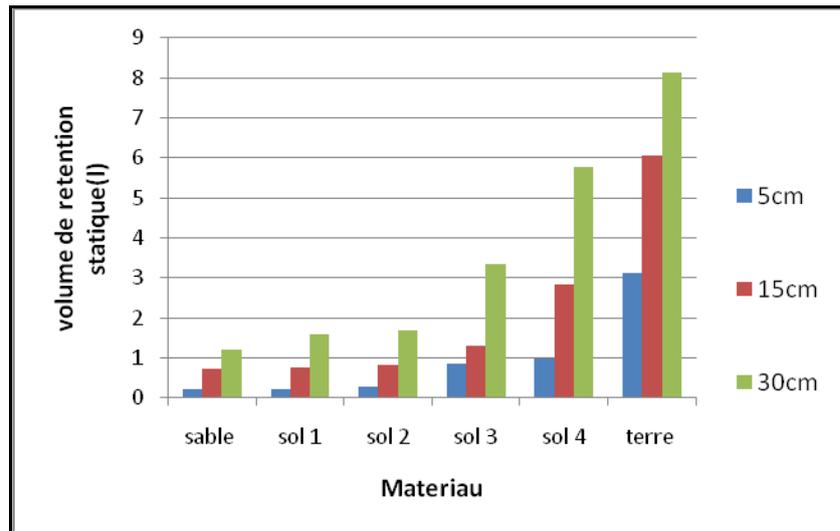


Figure 4.9. Détermination des différents volumes de rétention statique en fonction des hauteurs de colonnes des différents matériaux

Les figures 4.8 et 4.9 montrent des résultats similaires concernant le classement des matériaux suivant les volumes de rétention dynamique et statique. Cela peut nous amener à dire que la rétention totale des différents massifs peut donner une bonne vérification des caractéristiques texturales des sols et ceci est confirmé par la correspondance de classement des matériaux suivant la capacité de rétention au classement suivant la teneur massique en terre dans chaque matériau.

La variation de la teneur massique en fonction de la hauteur de la colonne (Figure 4.10) permet de montrer une légère diminution pour les différentes hauteurs des différents matériaux. Un classement similaire à celui des autres paramètres cités précédemment a été établi tout en gardant la terre à la tête de ce classement avec des valeurs très importantes d'humidité.

Ces résultats montrent que la teneur massique en eau de rétention statique ne dépend pas de la hauteur de la colonne mais il dépend du type du sol. Ils montrent également que ces valeurs mesurées pour chaque matériau représentent la teneur en eau à saturation obtenue après l'atteinte du régime permanent.

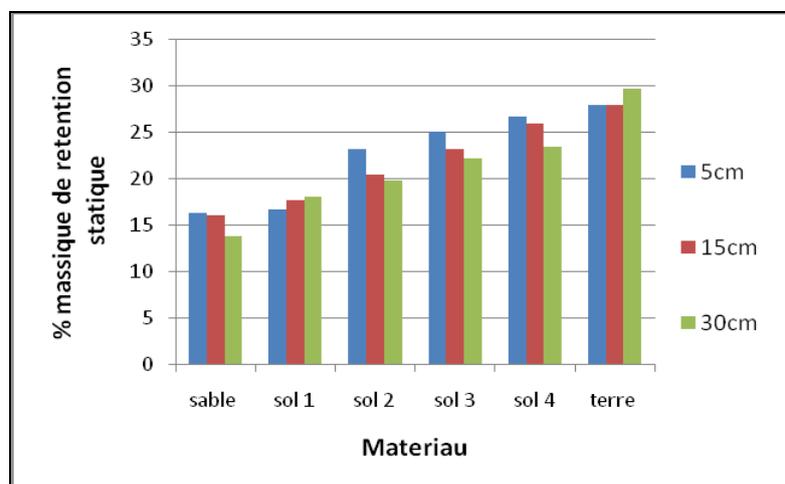


Figure 4.10. Teneur massique en humidité (rétention statique) des massifs des matériaux en fonction des hauteurs des colonnes

La rétention totale en eau (V_t) d'un massif dans une colonne est la somme des volumes de rétention statique et volumes de rétention dynamique. L'augmentation de pourcentage massique de terre dans les matériaux, de même que l'augmentation de la hauteur de la colonne entraîne une augmentation du volume d'eau totale mise en jeu dans les matériaux (Tableau 4.1).

Tableau 4.1. Volume d'eau totale mise en jeu dans les différents matériaux (l)

Sol	5cm	15cm	30cm
Sable	0,2	0,8	1,4
Sol1	0,3	1	2,6
Sol2	0,5	1,5	2,8
Sol3	1,3	2,7	6
Sol4	1,7	5,15	10,2
Terre	4	8,5	13,3

4.2.3 Le temps de passage

Le tableau suivant représente l'évolution des temps de passage calculés par la technique de drainage pour les trois colonnes de chaque matériau. Cette évolution est bien représentée sur la figure 4.11 en fonction de la hauteur de la colonne.

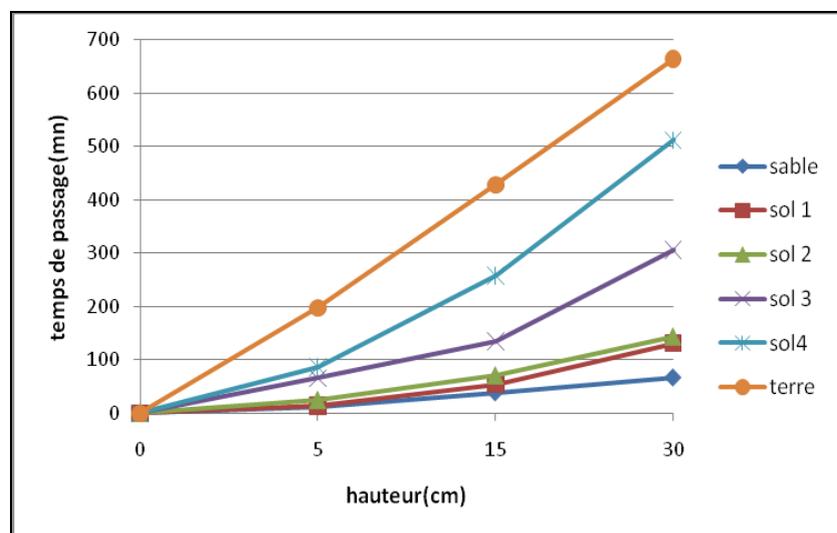


Figure 4.11. Représentation des temps de passage en fonction des matériaux correspondants et la hauteur de la colonne

Comme escompté, nous pouvons constater une relation linéaire entre le temps de passage et la hauteur de la colonne pour les différents matériaux.

Le temps de passage représente le rapport entre le volume d'eau retenue par le matériau et le volume d'eau totale mise en jeu, les résultats de distribution de ce paramètre en fonction du type de matériaux demeurent donc en liaison étroite avec les résultats expérimentaux obtenus pour les volumes d'eau totale mise en jeu dans les différents matériaux.

4.2.4 Comparaison des matériaux

Pour un débit de 20ml.mn⁻¹; les capacités de rétention des différents matériaux sont rassemblées dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2. Teneurs massiques et volumiques en eau totale des différents matériaux

Hauteur de colonne (cm)	Teneurs en eau totale mise en jeu dans les matériaux						
	Matériaux	Sable	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 4	Terre
5	Masse (g)	867	830	805	786	613	692,5
	C.M(%)	20	22	26,7	52,2	61,6	71,8
	C.V(%)	31,4	31,3	36,9	63	70	75
15	Masse (g)	2600	2500	2415	2359	1840	2077,5
	C.M(%)	21,7	23,7	25,4	35,5	60,8	74,5
	C.V(%)	33,7	33,5	35,2	46,2	69,5	78,6
30	Masse (g)	5200	5000	4830	4717	3680	4155
	C.M(%)	22,8	24,2	25,8	41,5	55	60
	C.V(%)	35,8	34	35,8	52,5	60	65

D'après ce tableau, nous avons constaté que pour chaque matériau les teneurs en eau massiques et volumiques présentent une légère variation en fonction de la hauteur de la colonne, ce qui exige de dire, dans ce cas, que pour tous les matériaux, les teneurs en eau sont indépendantes de la hauteur de colonne.

Les valeurs des teneurs massiques obtenus dans le cas de sable sont proches de la littérature [85], [24].

En ce qui concerne le classement des matériaux selon ces teneurs en eau, une comparaison entre ces matériaux pour les colonnes de h= 30cm, a été faite et les figures 4.12 et 4.13 illustrent les résultats de cette comparaison.

En effet, il apparaît que le sable présente des teneurs en eau massique et volumique les plus faibles par rapport aux autres matériaux avec 20% et 30% environ respectivement, alors que la terre est à la tête de ce classement avec une teneur en eau massique de 65% et de 70% de teneur en eau volumique. Pour les cas des autres matériaux, ils suivent le même ordre croissant de la teneur massique en terre dans chaque matériau.

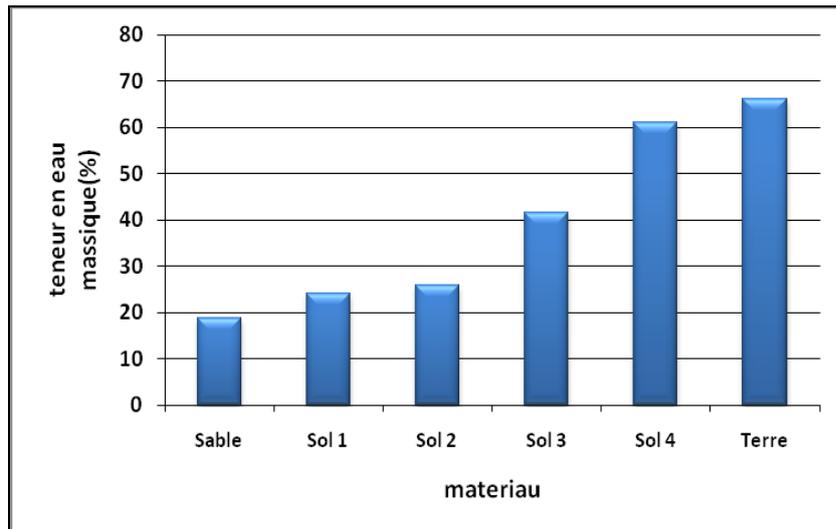


Figure 4.12. Classement des matériaux selon la teneur en eau massique

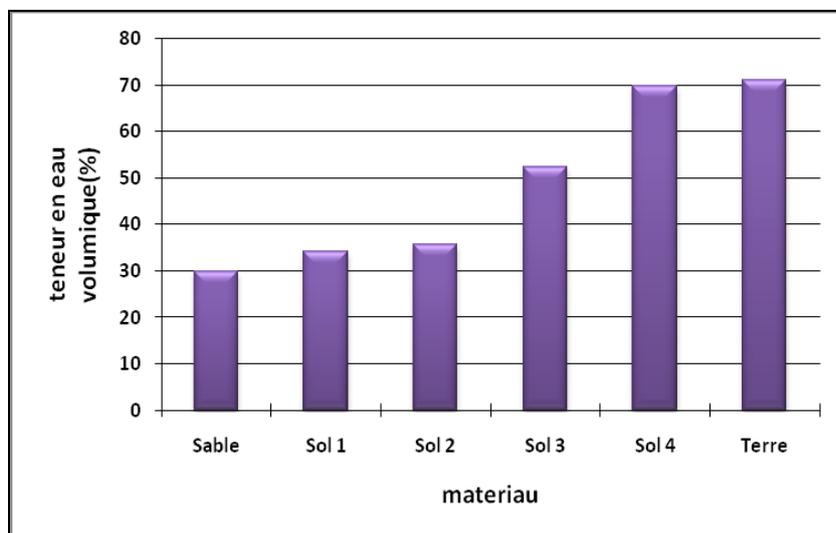


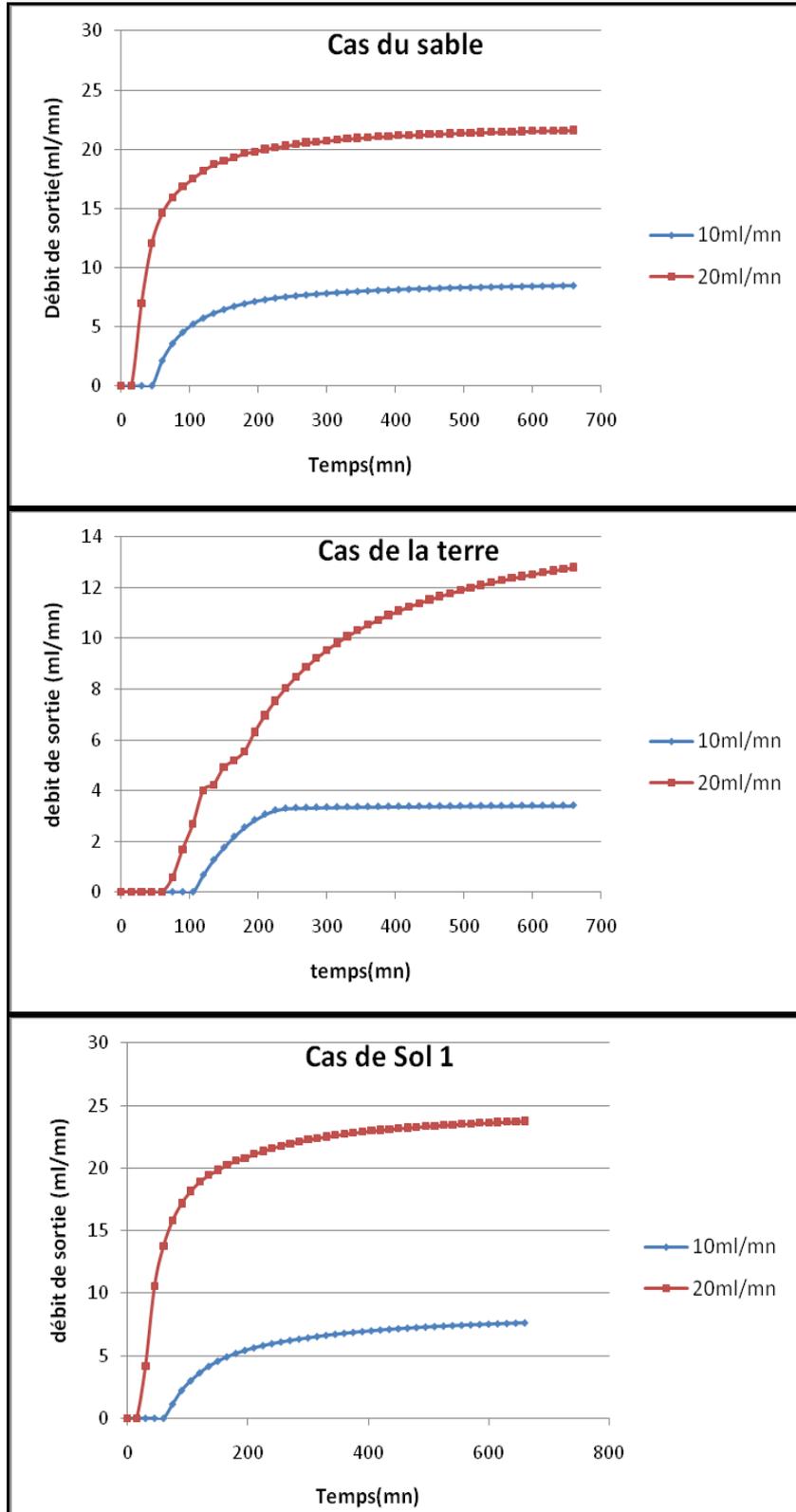
Figure 4.13. Classement des matériaux selon la teneur en eau volumique

4.2.5 L'influence du débit d'alimentation

4.2.5.1 Débit de sortie

Nous avons suivi l'évolution de l'infiltration pour les différents matériaux pour des colonnes de 15cm de hauteur avec un débit d'alimentation de 10ml.mn^{-1} .

En faisant une comparaison entre les résultats obtenus pour un débit d'alimentation de 20ml.mn^{-1} et ceux du débit de 10ml.mn^{-1} , nous avons remarqué une diminution du débit de sortie et par la même, une diminution du volume d'eau totale mise en jeu dans le massif de chaque colonne. La figure 4.14 obtenue dans le cas des différents matériaux, illustre ces résultats.



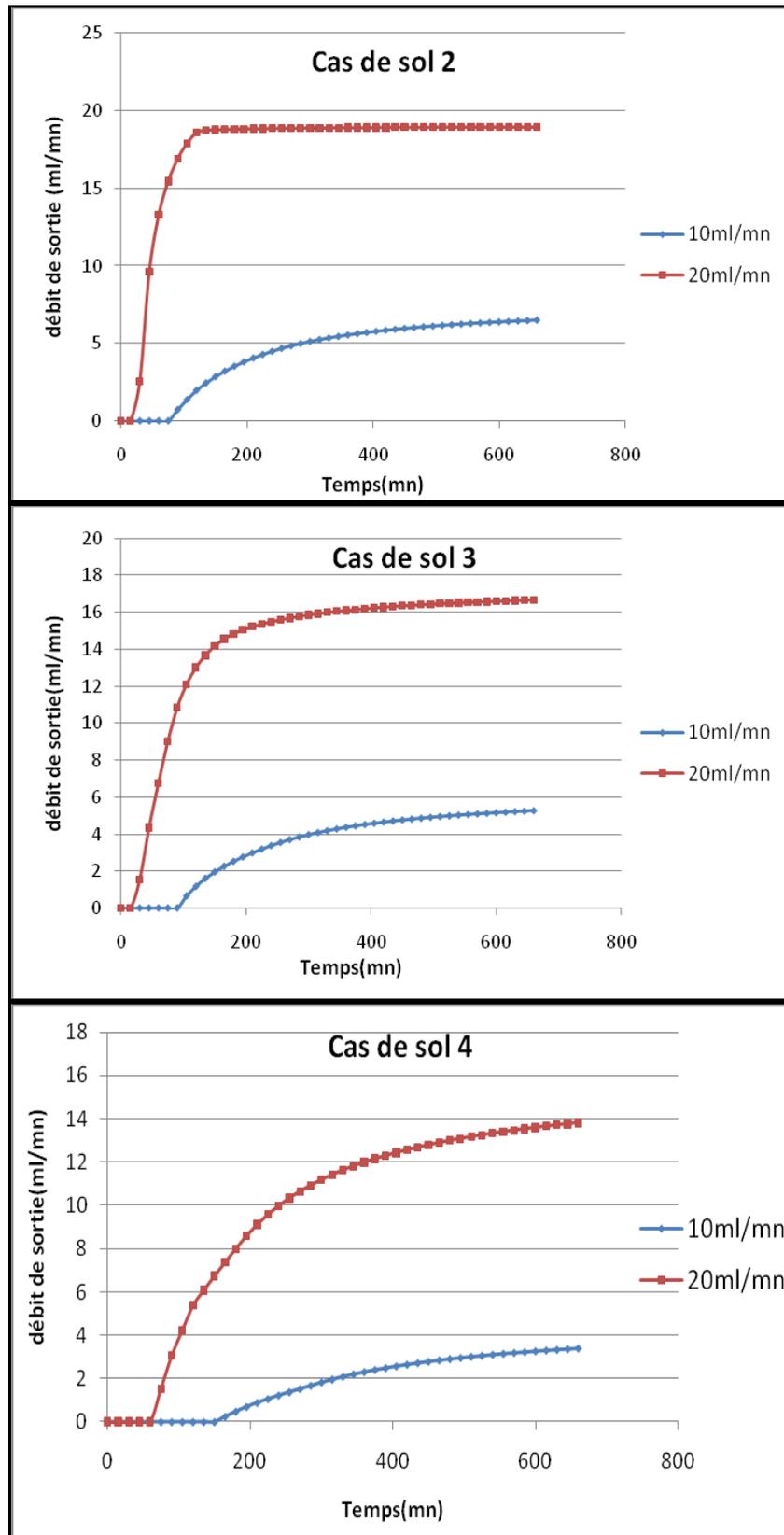


Tableau 4.14. Résultats expérimentaux du débit de sortie pour les différents matériaux en fonction du débit d'alimentation (Colonnes $\varnothing=12,5$ cm; $L=15$ cm, $Q=20$ ml.mn⁻¹ et $Q=10$ ml.mn⁻¹)

Nous observons que la diminution du débit d'alimentation des colonnes engendre éventuellement une diminution du débit de sortie pour les différents matériaux.

L'influence de la diminution du débit d'alimentation sur la vitesse d'infiltration se traduit par: le temps de reponse de massif à cette alimentation continue de la colonne, le temps d'atteinte du regime permanent pour les différents matériaux ainsi que les valeurs des débits de sortie pendant ce regime pour chaque matériau, cette constatation est bien confirmée par les résultats représentés sur la figure 4.14.

4.2.5.2 La capacité de rétention en eau des matériaux

Cette partie compare les résultats de la rétention d'eau dynamique et statique dans les matériaux étudiés, cette comparaison a été effectuée pour le cas des colonnes de $h = 15\text{cm}$.

L'illustration 4.15 et l'illustration 4.16 présentent les courbes des volumes de rétention dynamique et statique respectivement obtenus par les expériences d'infiltration avec les débits de 10ml.mn^{-1} et 20ml.mn^{-1} .

Pour la rétention dynamique (Figure 4.15), on remarque une large différence entre les valeurs des volumes retenus avec le débit 20ml.mn^{-1} et celles obtenues avec le débit 10ml.mn^{-1} , cette différence varie entre $0,5\text{ l}$ pour le sol 2 et 2 l environ pour le sol 4, ce qui correspond à 90% d'augmentation en passant d'un débit de 10ml.mn^{-1} à un débit deux fois supérieur, alors que pour le sol 1 et le sable, la différence ne dépasse pas $0,5\text{ l}$ équivalent à 75% d'augmentation.

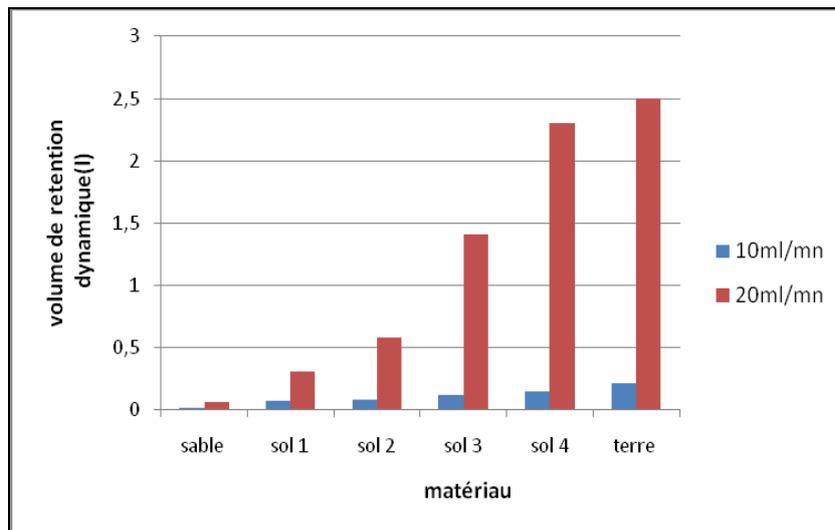


Figure 4.15. Détermination des différents volumes de rétention dynamique en fonction des différents matériaux et du débit d'alimentation

Pour le cas de la rétention statique, il apparaît que la différence est moins accentuée entre les volumes retenus dans les matériaux pour les deux débits d'alimentation. L'augmentation de volume retenu statiquement, est environ de 50% pour les deux cas du débit d'alimentation pour les six matériaux mis en jeu. La figure 4.16 illustre ces résultats.

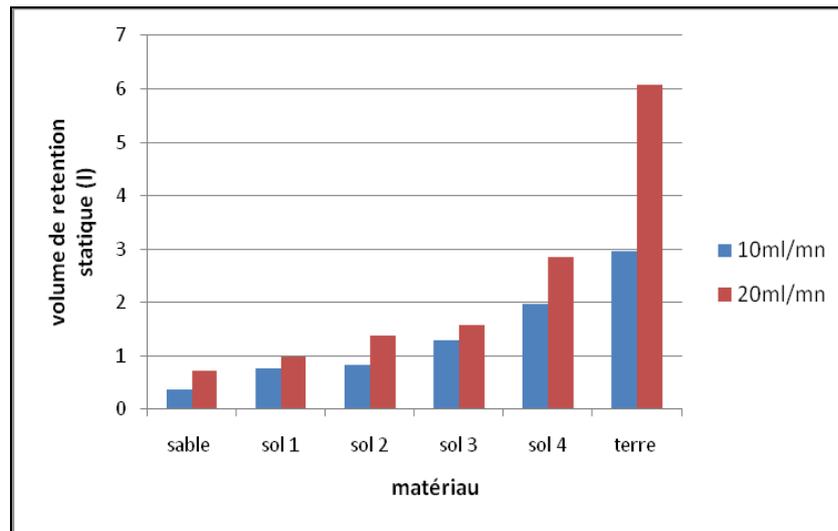


Figure 4.16: Détermination des différents volumes de rétention statique en fonction de différents matériaux et de débit d'alimentation

Les deux illustrations 4.15 et 4.16, ont montré que les volumes de rétention dynamique présentent des faibles valeurs (2,5 l au maximum) et une différence plus importante entre les deux cas du débit alors que les volumes de rétention statique sont caractérisés par des valeurs très importantes (6 l au maximum) mais une différence assez faible entre les volumes retenus pour les deux débits d'alimentation des colonnes.

Comme on constate immédiatement sur le graphe ci-après (Figure 4.17) représentant la variation du volume total retenu en fonction du débit d'entrée et du type des matériaux, que l'augmentation du débit d'alimentation des colonnes entraîne une augmentation du volume total d'eau mise en jeu dans les échantillons de différents matériaux.

Le classement des matériaux suit globalement le même ordre que celui déterminé dans le cas de rétention dynamique et statique, le sol 4 et la terre présentent des volumes retenus les plus importants et par conséquent des capacités de rétention plus importantes que les autres matériaux. En revanche, le sable est caractérisé par des faibles valeurs de rétention dynamique et statique ainsi que le volume total retenu dans le massif de colonne.

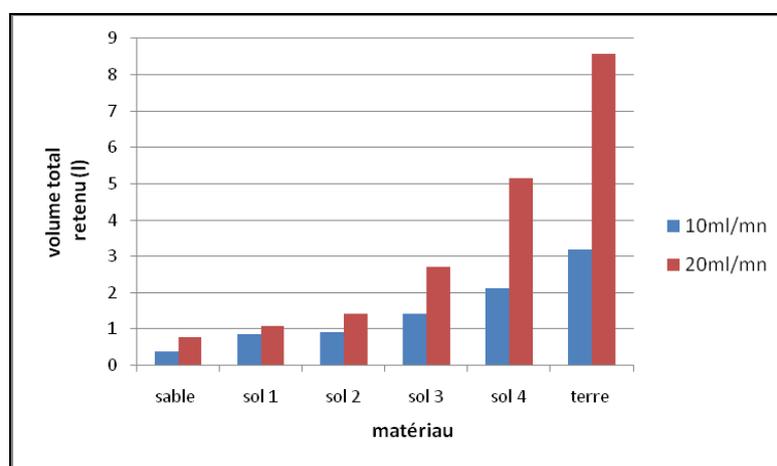


Figure 4.17: Résultats expérimentaux de volume total retenu dans les différents matériaux en fonction du débit d'alimentation

4.2.5.3 Le temps de passage

Nous observons sur le graphe ci-après (Figure 4.18) que le temps de passage croit de façon linéaire en fonction du débit d'alimentation des colonnes.

La comparaison de temps de passage des différents matériaux pour les deux cas du débit d'alimentation des colonnes, montre que l'augmentation du débit d'alimentation engendre une augmentation de temps de passage pour chaque sol, cette augmentation apparaît légère dans le cas du sable, sol 1, sol 2 et elle ne dépasse pas 30 minutes alors que pour le sol 3, sol 4 et la terre, elle varie entre 60, 130 et 200 minutes environ respectivement.

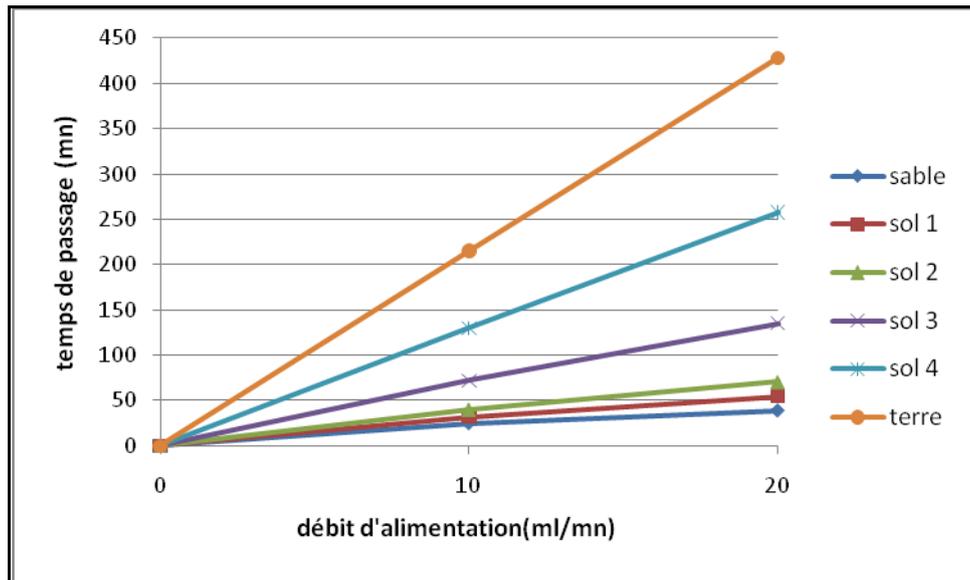


Figure 4.18: Représentation des temps de passage en fonction des matériaux correspondants et de débit d'alimentation

4.3 Conclusions et discussion

Les travaux que nous avons réalisés se destinaient à une caractérisation hydrodynamique des sols en conditions insaturées. Dans ce but nous nous sommes appuyés sur un dispositif expérimental qui permet d'évaluer la capacité de rétention d'eau de colonnes de sol.

Nous avons alors suivi, le phénomène d'infiltration de l'eau claire sur les différents matériaux étudiés. Ce phénomène permet de déterminer l'aptitude de ces différents matériaux à retenir l'eau et distinguer les différents facteurs mis en jeu lors des différents essais d'infiltration.

Six matériaux ont été utilisés dans la présente étude, pour chaque matériau, une série d'expériences d'infiltration en colonnes ont été conduites en conditions d'écoulement insaturé permanent.

Nous démontrons alors que la capacité de rétention d'eau des sols en colonnes dépend de la hauteur de la colonne, de la texture du sol et du débit d'alimentation.

En effet, la série d'expériences que nous avons menée a conduit aux résultats suivants :

- L'étude d'infiltration d'eau claire dans les six matériaux étudiés en régime permanent sous un débit de 20 ml.mn^{-1} a montré que la vitesse d'infiltration dépend de la hauteur de la colonne ainsi que du type de matériau. L'analyse

des courbes de débit de sortie obtenus lors des essais d'infiltration a montré que les matériaux sont caractérisés par des comportements, traduits d'une part, par des variations des temps de début de l'écoulement de sortie et d'atteinte de régime permanent et d'autre part, par des valeurs de débit sortie lors de ce régime.

- La méthode de ressuyage permet d'établir une comparaison entre les différents matériaux à travers les résultats expérimentaux des volumes de rétention dynamique et statique, ces résultats mettent bien en évidence l'influence de la texture du sol sur la capacité de rétention d'eau. La méthode de ressuyage suit un comportement similaire à celui de la méthode de régime permanent traduit par le classement des matériaux suivant les différents paramètres déterminés
- La distribution des temps de passage des différents matériaux, a donc permis une meilleure connaissance de l'influence de la hauteur de la colonne et du type de matériau sur le phénomène d'infiltration suivant une relation linéaire qui a été établie entre le temps de passage et les deux facteurs que nous avons présentés.
- L'influence du débit d'alimentation sur le comportement hydrodynamique des matériaux vis-à-vis du phénomène d'infiltration a été observée dans la diminution des différents paramètres hydrodynamiques analysés (débit de sortie, volumes de rétention, volume total retenu, teneur en eau, temps de passage). Par ailleurs, un classement similaire a été établi en fonction du débit d'alimentation entre les différents matériaux mis en jeu.
- Les caractéristiques physiques du milieu, en particulier la granulométrie et l'hétérogénéité de structure, jouent un rôle important sur l'infiltration de l'eau dans les matériaux, de même que ses propriétés hydrodynamiques.

L'approche expérimentale développée dans cette étude, a mis en évidence l'importance du phénomène d'infiltration dans l'étude hydrodynamique des sols. En effet, ce phénomène caractérise le comportement du sol vis-à-vis au flux d'eau entrant et déterminer alors sa capacité de rétention des effluents en général et de l'eau en particulier. D'après la série des essais d'infiltration effectuée sur les différents matériaux, nous avons constaté que l'infiltration est conditionnée par certains facteurs : la texture du sol, la teneur en eau initiale, la hauteur de colonne et le débit d'alimentation. La comparaison des résultats obtenus par le suivi de ce phénomène pour les différents matériaux étudiés montre que la terre est caractérisée par une capacité de rétention plus importante que celle des autres matériaux alors que le sable est évidemment le matériau qui possède des valeurs les plus faibles pour tous les paramètres hydrodynamiques étudiés dans ce travail. En ce qui concerne les matériaux reconstitués, ils ne sont que des cas intermédiaires entre le sable et la terre, une corrélation a été constatée entre la capacité de rétention d'eau et la teneur massique en terre de chaque matériau.

Par ailleurs, si cette étude nous a permis d'obtenir des enseignements sur l'importance de la rétention d'eau dans l'étude hydrodynamique des sols, certains points méritent d'être développés. En particulier, on pourrait effectuer des prélèvements en carottes afin d'avoir des échantillons de terrain représentatifs et sans perturber les milieux étudiés.

D'autre part, il faut souligner l'importance de l'échantillonnage et de l'intérêt d'une approche reposant sur le découpage du sol sur la base de critères pédologiques et de critères d'usage des sols. Une discussion sur l'échantillonnage (volume des échantillons, date de prélèvement, contrôle de l'état initial) a permis de conclure que les propriétés des sols pouvaient être caractérisées de manière fiable et représentative.

Le comportement de la terre vis-à-vis du phénomène d'infiltration ressemble à celui des sols à texture présentant un pourcentage considérable en argile, cette constatation est confirmée par les valeurs des teneurs volumiques en eau qui sont proches de celles de la littérature.

Les faibles valeurs de débit de sortie pendant le régime permanent pour les sols 2, 3, 4 et la terre sont expliquées par la diminution d'infiltration de l'eau dans les massifs après l'atteinte de régime permanent. Cela est confirmé par la formation d'une lame d'eau au dessus du massif de chaque colonne que nous avons observée, ce qui nous laisse à penser au phénomène de gonflement et de tassement des matériaux provoqué par l'alimentation continue de l'eau, ce comportement est semblable aux argiles.

5. CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Ces dernières années ont connu une augmentation importante de l'émission de polluants dans tous les compartiments des écosystèmes (air, eau, sol). Les formations superficielles des milieux urbains et périurbains sont en particulier régulièrement sollicitées par toutes sortes d'activités polluantes (industrie, trafic routier, ...). Parmi elles, l'évacuation des eaux pluviales urbaines par infiltration directe dans les formations superficielles constitue un risque de contamination de ces formations et / ou des nappes phréatiques sous-jacentes.

L'évaluation de ce risque repose avant tout sur la compréhension des mécanismes impliqués dans le devenir des polluants au cours de leur transfert dans les milieux géopédologiques. En particulier, il s'agit d'évaluer à la fois les processus hydrauliques de transport des polluants et les transformations biologiques, chimiques et / ou physiques qu'ils peuvent subir dans ces milieux.

L'étude de ces processus à l'échelle de la parcelle de sol dans des conditions réelles est difficile du fait de la complexité du système. Une première étape consiste à étudier des systèmes simplifiés. Une seconde s'appuie sur les connaissances acquises en conditions plus proches de la réalité.

Ce travail, s'inscrit dans cette problématique. Il repose sur une étude expérimentale à travers laquelle une étude hydrodynamique de six matériaux différents a été conduite afin de déterminer les facteurs influençant le comportement hydrodynamique des sols vis-à-vis d'un écoulement insaturé permanent en vue d'une recherche des conditions de reconstitution de parcelles d'infiltration.

La première partie de cette étude a eu pour finalité un état des lieux sur les connaissances relatives à la caractérisation des sols, l'hydrodynamique des milieux poreux et les processus de transferts des polluants.

L'étude bibliographique a permis d'identifier la relation entre les trois paramètres impliqués dans la problématique de notre étude: sol – eau –polluant. De ce fait nous avons développé pour chaque paramètre une synthèse bibliographique commençant par la caractérisation de sol par la définition de sa composition, ses propriétés, sa texture et structure et enfin les différents systèmes ainsi que les critères de classification. Puis une partie concernant les lois d'écoulement dans les milieux poreux saturés et non saturés par présentation de quelques équations physiques. Et en fin une dernière partie concerne les différents mécanismes de transfert des polluants à travers les sols.

L'approche expérimentale développée dans la suite de l'étude nous a permis d'acquérir une vision synthétique sur le comportement hydrodynamique de six matériaux différents à travers des essais d'infiltration en colonnes à l'échelle du laboratoire.

Les résultats expérimentaux de ces essais mettent en évidence l'importance de la capacité de rétention d'eau comme un facteur primordial dans la caractérisation hydrodynamique des sols, ce paramètre dépend des propriétés physiques et hydrodynamiques des milieux étudiés.

Les différents milieux étudiés dans la présente étude ne manifestent pas les mêmes caractéristiques hydrodynamiques du fait que chaque matériau présente des résultats différents pour tous les paramètres analysés. La terre prélevée au CSTB possède une capacité de rétention d'eau la plus importante, les matériaux reconstitués (sol 1, sol 2, sol 3 et sol 4) ne présentent que des cas intermédiaires entre le sable et la terre et ils

manifestent un classement similaire pour les différents paramètres hydrodynamiques étudiés et équivalent à leur classement suivant la teneur massique en terre.

La suite immédiate de cette recherche va être la prévision à long terme de comportement des sols de parcelles d'infiltration reconstitués pour la rétention des différents polluants. Dans ce cadre, un ensemble de perspectives s'ouvre au regard des résultats obtenus lors de ce travail et ce sur plusieurs points:

- Les différents cas d'essais d'infiltration considérés dans notre étude ont cependant été étudiés sur des matériaux différents, les conclusions peuvent donc être encore difficilement généralisées. Une poursuite du travail sur un même matériau pourrait alors être envisagée.
- Une caractérisation mécanique et géophysique (résistivité, tassement,...) pourra être abordée, en fait les méthodes géophysiques permettront d'estimer à plus grande échelle l'humidité du sol, notamment la résistivimétre électrique et le radar géologique.
- Par ailleurs, il pourrait être envisagé d'étendre le domaine d'étude de la zone non saturée aux écoulements transitoires, afin d'évaluer l'impact de cycles d'infiltration/redistribution de l'eau sur le transport des solutés.
- A l'échelle de la colonne de laboratoire, il faudrait utiliser des méthodes de traçages afin de déterminer les temps de séjours des polluants dans la parcelle ainsi que les différents mécanismes de transfert et éventuellement le comportement des sols reconstitués vis-à-vis de ces polluants et leur impact sur la qualité des sols et des eaux de la nappe sous jacente.
- Une simulation numérique des résultats par un modèle tel que Hydrus 2D, pourra être utile afin de simuler l'écoulement à travers la parcelle et afin de comparer les résultats expérimentaux obtenus et les résultats numériques
- Pour s'approcher davantage des conditions naturelles, le passage à des plus grandes échelles pourra également être effectué, en utilisant par exemple des lysimètres ou par des expériences de terrain.
- Le passage à une échelle supérieure (terrain) constitue également une perspective, plus lointaine cependant, lors d'un changement d'échelle, il est courant d'être confronté à des problèmes d'hétérogénéité physique et chimique du milieu.
- Des méthodes d'extraction sous pression pour la décontamination des sols pollués par des composés organiques volatils présentent une perspective qui ouvre de nouvelles pistes de recherche pour la suite de cette étude.

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] AFNOR NF X 31-501- 7 -1992 - Qualité des sols – Méthodes physiques – Mesure de la masse volumique apparente d'un échantillon de sol non remanié – Méthode du cylindre.
- [2] Abou Hamdeh N.H., Al-Jalil H.F., 1999. Hydraulic powered soil core sampler and its applications to soil density and porosity estimation. *Soil & Tillage Research* ,**52**: 113-120
- [3] Al bitar A., 2007: modélisation des écoulements en milieux poreux hétérogènes 2D/3D, avec couplages surface/souterrain et densitaires
- [4] About, Y., Camerlynk, C., Doussan, C., Florsch, N., Pozzi, J.P., Rousset , D., 2000. PNRH géophysique – hydrologie **99**: un premier compte-rendu des expérimentations menées sur le site INRA d'Avignon.
- [5] Anguela T. P., 2004. Étude du transfert d'eau et de solutés dans un sol à nappe superficielle drainée artificiellement. École Nationale de Génie Rural, des Eaux et Forêts –Paris
- [6] Annabi M., 2005, stabilisation de la structure d'un sol limoneux par des apports de composts d'origine urbaine : relation avec les caractéristiques de leur matière organique, INAT-Tunis, 270p
- [7] Arya, L. M., F. J. Leij, M. T. Van Genuchten and P. J. Shouse (1999). "Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data." *Soil Science Society of America Journal* **63**(3): 510-519.
- [8] Alexandratos, S.D., Zhu, X. (2007). High- affinity ion-complexing polymer-supported reagents: immobilized phosphate ligands and their affinity for the uranyl ion'. *Reactive & Functional polymers*, **67**: 375- 382
- [9] Baize D. 2000: guides des analyses en pédologie; 2eme édition revue et augmentée. INRA
- [10] Baize D., Jabiol B. (1995) – Guide pour la description des sols. INRA
- [11] Barbour, S. L. (1998). "Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The soil-water characteristic curve: a historical perspective." *Canadian Geotechnical Journal* **35**(5): 873-894.
- [12] Bar Tal A., Sparks D.L., Pesek J.D., Feigenbaum S., 1990. Analyses of adsorption kinetics using a stirred-flow Chamber: I. Theory and critical tests. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **54**: 1273-1278
- [13] Barriuso, E., Calvet, R., Schiavon, M et Soulas, G. 1996. Les pesticides et les polluants organiques des sols. Transformations et dissipation. *Etude et gestion des sols*, **3**(4): 279-296
- [14] Basile A., D'Urso G., 1997, "Experimental corrections of simplified methods for predicting water retention curves in clay-loamy soils from particle-size determination." *Soil Technology* **10**(3): 261-272.
- [15] Bastet, G., A. Bruand, P. Quétin et I. Cousin (1998). "Estimation des propriétés de rétention en eau des sols à l'aide de fonctions de pédotransfert (FPT) : Une analyse bibliographique." *Etude et gestion des sols* **5**(1): 1-24.
- [16] Beauchamp J., 2008, Propriétés des sols, Cours pédologie, Université de Picardie Jules Verne
- [17] Benhabib, K. (2005). Transport dans les sols de cokerie de HAP issus de particules de goudron de houille. Nancy, INPL.
- [18] Ben Hassine H., 2006, Nature minéralogique et rôle nutritionnel des argiles de sols céréaliers en région subhumide à semi-aride(Tunisie). *C.R Géosciences*, **338** : 329-340
- [19] Blanchard,C. (2000). Caractérisation de la mobilisation potentielle des polluants inorganiques. Lyon, INSA.

- [20] Bourbié, T., Coussay, O. et Zinszner, B. (1986), Acoustique des milieux poreux (Technip, Paris).
- [21] Bruand A., Duval O., Gaillard H., Darhout R., Jamagne M., 1996, Variabilité de rétention en eau des sols: importance de la densité apparente. *Etude et gestion des sols*, **3**(1) : 27-40
- [22] Brusseau, M.L., Larsen, T et Christensen, T. H. 1991. Nonequilibrium sorption of organic chemicals elucidation of rate-limiting processes. *Environmental Science & Technology* **25**(1): 134-142
- [23] Buselli, G., Kanglin, L. (2001), 'Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods', *Journal of Applied Geophysics* **48**, 11-23.
- [24] Calvet, R. (2003). *Le sol Propriétés et fonctions-Tome 1: constitution et structure, phénomènes aux interfaces*, Éditions France Agricole.
- [25] Camusard J.P., 2009. *Le sol, un milieu complexe au pouvoir épuratoire limité*. ENGREF Paris.
- [26] Cappellen P.V., Qiu L., 1996. Biogenic silica dissolution in sediments of the southern ocean. II. Kinetics. *Deep- Sea Research II*, **44**,(5): 1129-1149
- [27] Carski, T.H., Sparks, D.L. (1985), 'A modified miscible displacement technique for investigating adsorption-desorption kinetics in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **49**, 1114-1116
- [28] Cédric Durand M., 2003. *Caractérisation physicochimique des produits de l'assainissement pluvial. Origine et devenir des métaux traces et des polluants organiques*. Université de Poitiers
- [29] Chossat, J.C. 2005. *La mesure de la conductivité hydraulique dans les sols- Choix des méthodes*, Tec et Doc, Hermès- Lavoisier.
- [30] Citeau, L (2008): *transfert eaux-sols-plantes de micropolluants: état des connaissances et application aux eaux de ruissellement urbaines*.
- [31] Colombani, J., Lamagat, J.P., Thiebaut, J. 1972. Mesure de la perméabilité des sols en place : un nouvel appareil pour la méthode de Muntz, une extension de la méthode de Porchet aux sols hétérogènes. *Cah ORSTOM, sér, Hydrol*, vol **9**(3)
- [32] Costa J.L., Prunty L., 2006- Solute transport in fine sandy loam soil under different flow rates. *Agricultural Water Management*, **83**: 111-118
- [33] Daniel HILLEL(1988). *L'eau et le sol : principes et processus physiques-Louvain-la-Neuve: Academia, 1988. - (Pedasup ; 5).ISBN 2-87209-015-0*
- [34] Dimtiri X., 2006. *Cours de physique de sol*. FUSAGX
- [35] Duchaufour Ph., 1984. *Abrégés de pédologie*. Masson
- [36] Durin B., 2006. *Transfert et transport colloïdal des polluants métalliques, applications en assainissement routier*. Université de Nantes.
- [37] Elrick, D.E., Reynolds, W.D. (1992), 'methods for analyzing constant head well permeameter data'. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **56**: 320-323
- [38] FAO (2006). *World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication*. World soil resources reports. Rome
- [39] Feller C., 1998. Un fractionnement granulométrique de la matière organique des sols en 1874. *Étude et gestion des sols*, **5**, (3): 195-200
- [40] Gaidi L., Ichola A., 2002, Utilisation des sondes TDR pour estimer la masse de soluté retenu par une couche d'argile lors d'une infiltration. *GEOL Env*, **62** : 47-56
- [41] Giasson Ph., Jaouich A. 2008: *propriétés physique des sols*
- [42] Girard M., Walter C., Rémy J., Berthelin J., Morel J. 2005, *Sols et environnements*. Collection: Sciences sup

- [43] Guber A., Pachepsky Ya., Shein E., Rawls W.J., 2004. Soil aggregates and water retention. *Developments in soil science*, **30**: 0166-2481
- [44] Gujsaite V., 2008. Transport réactif en milieux poreux non saturés. INPL
- [45] Gras R., 1988, *Physique du sol pour l'Aménagement*. Masson
- [46] Henin S., 1976, *Cours de physique du sol*. Ed ORSTOM: 159P
- [47] Hillel D., 1982: *Environmental soil physics*. Academic Press (USA)
- [48] Hillel D., 1988, *L'eau et le sol. Principes et processus physiques*. Collec. Pédo.Sup. Codeni
- [49] Ibnoussina M., El Haroui M., Maslouhi A., 2006, Expérimentation et modélisation de la lixiviation de l'azote nitrique dans un sol sableux. *C.R. Geosciences*, **338**: 787- 794
- [50] Jacques D., Šimůnek J., Timmerman A., Feyen J., 2002, Calibration of Richard's convection –dispersion equations to field-scale water flow and solute transport under rainfall conditions. *Journal of Hydrology*, **259**: 15-31
- [51] Kanit T., Forest S., Galliet I., Mounoury V., Jeulin D., 2003. Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach. *International Journal of Solides and Structures*, **40**: 3647-3679
- [52] Kantar, C. (2007), 'Heterogeneous processes affecting metal ion transport in the presence of organic ligands'. *Reactive transport modeling. Earth Sciences Reviews*, **81**: 175-198
- [53] Kemper W.D., Chepil W.S., 1966- Size distribution of aggregates. *Agronomy*, **9**: 499-510.
- [54] Kholadi M., kholladi. M.N., 2009. Système d'aide à la classification des sols. Université Mentouri – Constantine.
- [55] Kowalska M., Guler H., Cocke D.L., 1994. Interactions of clay minerals with organic pollutants. *The Science of the Total Environment*, **141**: 223-240
- [56] Lakel A., 1995, Analyse déterministe de systèmes de biofiltration en écoulements saturé et insaturé dans le cadre d'un procédé d'assainissement autonome avec recyclage permettant l'élimination des composés azotés, université de limoges, 152p
- [57] Lassabatere L., R. Angulo-jaramillo, J. M. Soria-Ugalde, J. Šimůnek, and R.Haverkamp., 2009, Numerical evaluation of a set analytical infiltration equation. *Water Resour.Res.*, 45
- [58] Le Cœur F., Tromel S., Vidal H., 2006. Écoulement dans un milieu poreux. Synthèse TP hydraulique
- [59] Legret, M., C, Le Marc, D.Demare, V.Colandini., 1995."Pollution par les métaux lourds dans un bassin de décantation recevant des eaux de ruissellement d'origine routière "environmental technology, vol.**16**. pp 1049-1060.
- [60] Ligia, T.B., Radu, B., Pierre, M., Ryong, B.H. (2000), 'Distributed mass transfer rate for modelling the leaching of porous granular materials containing soluble pollutants', *Chemical Engineering Science* **55**, 1257-1267
- [61] Limousin, G. (2006), transfert de solutés réactifs dans la zone non –saturée des sols à différentes échelles d'observation. Université Joseph Fourier- Grenoble 1
- [62] Limousin, G., J. P. Gaudet, L. Charlet, S. Szenknect, V. Barthes and M. Krimissa (2007)."Sorption isotherms: A review on physical bases, modeling and measurement." *Applied Geochemistry* **22** (2): 249-275.
- [63] Marcos L., 2001. Étude expérimentale et modélisation du transfert du zinc et du plomb dans des milieux sableux modèles. École polytechnique de l'université de Nantes
- [64] Martin Garin A., Van Cappellen P., Charlet L., 2003. Aqueous cadmium uptake by calcite: a stirred flow-through reactor study. *Geochimica et Cosmochimica Acta* ,**67**: 2763-2774

- [65] Martins, J.M.F, 2008. Microbiogéochimie , transfert réactif et impact des micropolluants dans les sols. Approche couplée multi-échelles et modélisation. HDR, université Joseph Fourier – Grenoble I
- [66] Miller, C.T., Walter, J., Weber, Jr, (1986), 'Sorptions of hydrophobic organic pollutants in saturated soil systems', *Journal of Contaminant Hydrology* **1**, 243-261.
- [67] Mori Y., Higashi N., 2009. Controlling solute transport processes in soils by using dual-porosity characteristics of natural soils. *Colloids and surfaces A: physicochem. Eng. Aspects*, **347**: 121-127
- [68] Musy, A., et Soutter, M. (1991). *Physique du sol*. Lausanne, Collection gérer l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [69] Nagy K.L., Blum A.E., Lasaga A.C., 1992. Dissolution and precipitation kinetics of kaolinite at 80°C and pH 3: The dependence on solution saturation state. *American Journal of Sciences*, **291**: 649-686
- [70] Nicolas M., 2003. Écoulements dans les milieux poreux. DEA mécanique énergétique, université de Provence, Marseille
- [71] Nützmann G., Maciejewski S., Joswig K., 2002 "Estimation of water saturation dependence of dispersion in unsaturated porous media: experiments and modelling analysis." *Advances in Water Resources* **25**: 565-576.
- [72] Padilla Y.I., Jim Yeh T.C., Conklin M.H., 1999, the effect of water transport in unsaturated porous media. *Water Resources Research*, Vol.35, No **11**:3303-3313
- [73] Pagotto, C (1999): étude sur l'émission et le transfert dans les eaux et les sols des éléments traces métalliques et des hydrocarbures en domaine routier. EMN, Nantes.
- [74] Perrier, E., 1995. Structure géométrique et fonctionnement hydrique des sols. Simulations exploratoires. Ed. ORSTOM
- [75] Pettenati, M. (2007), *Géochimie capillaire et couplage rétention-percolation en zone non saturée des sols*, Université de Paris Sud 11, BRGM.
- [76] Picot, G., Bernard, F., Abriak, N. (2004), 'démarche de caractérisation de la zone non saturée d'une friche industrielle en vue de modéliser le flux de polluants transitant vers un système fluvial', VIII^{ème} Journées Nationales Génie Civil - Génie Cotier, Compiègne
- [77] Randle, K., Hartmann, E.H. (1987), 'Applications of the continuous flow stirred cell (CFSC) technique to adsorption of zinc, cadmium and mercury on Humic acids', *Geoderma* **40**, 281-296.
- [78] Rawls W.J., Pachepsky Y.A., Ritchie J.C., Sobecki T.M., Bloodworth H., 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, **116**: 61-76
- [79] Richer de Forges A., Feller C., Jamagne M., Arrouays D., 2008. Perdus dans les triangles des textures. *Etude et gestion des sols*, **15**(2): 97-111.
- [80] Riyadh A.R., Papadopoulos A., 2010. Representative elementary volume analysis of porous media using X-ray computed tomography. *Powder Technology*, 200: 69-77
- [81] Rousseau, M., Di Pietro, L., Angula-Jaramillo, R., Tessier, D et Cabibel, B. (2004). Preferential transport of soil colloidal particles : Physicochemical effects on particle mobilization. *Vadose Zone Journal* 3(1): 247-261.
- [82] Saxton K.E., Rawls W.J., Romberger J.S., Papendick R.I., 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1031-1036
- [83] Schoen R., Gaudet J.P., Elrick D.E., 1999, Modelling of solute transport in a large undisturbed lysimeter, during steady-state water flux. *Journal of Hydrology* ,215: 82-93
- [84] Seyfried M.S., Sparks D.I., Bar Tal A., Feigenbaum S., 1989. Kinetics of calcium-Magnesium exchange on soil using a stirred-flow reaction chamber. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **53**: 406-410

- [85] Soutter, M., Mermoud, A., Musy, A. 2007. Ingénierie des eaux et du sol. Presses polytechniques et universitaires romands.
- [86] Stengel P., 1979- Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. Ann. Agron, **30**: 27-49.
- [87] Sudha, K., Israil, M., Mittal, S., Rai, J. (2009), 'Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations', Journal of Applied Geophysics **67**, 74-79.
- [88] Tamoh K., Maslouhi A., 2004, Mesures in situ par infiltrométrie des propriétés hydrodynamiques des sols de Mnasra (Maroc). C.R Géosciences, **336** : 535-545
- [89] Vachaud G., Vauclin M., Laty R., 1991, Caractérisation hydrodynamique in situ de quelques sols soudano-sahéliens à l'aide d'un programme de calcul assisté par micro-ordinateur. Soil Water Balance in the Sudano-Sahelian Zone, LAHS Publ, 199
- [90] Van Hei T., De Ten Ryen M., 1984. Mouvement of pertechnetate through soils: hydrodynamic dispersion. J Environ. Radioactivity, **1**: 41-50
- [91] Van Genuchten, M.TH., (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., **44**: 277-287
- [92] Vauclin, M. 1994. Modélisation du transport de solutés dans la zone non saturée du sol. Revue des sciences de l'Eau **7**(1) : 81-102
- [93] Weber JR., Mcginley P.M., Katz L.E., 1991. Sorption phenomena in subsurface systems: concepts, models and effects on contaminant fate and transport. Wat. Res, **25**(5), 449-528
- [94] Zhang X., Qi X., Zhou X., Pang H. (2006), 'An in situ method to measure the longitudinal and transverse dispersion coefficients of solute transport in soil', Journal of Hydrology, **328**, 614-619

7. ANNEXES

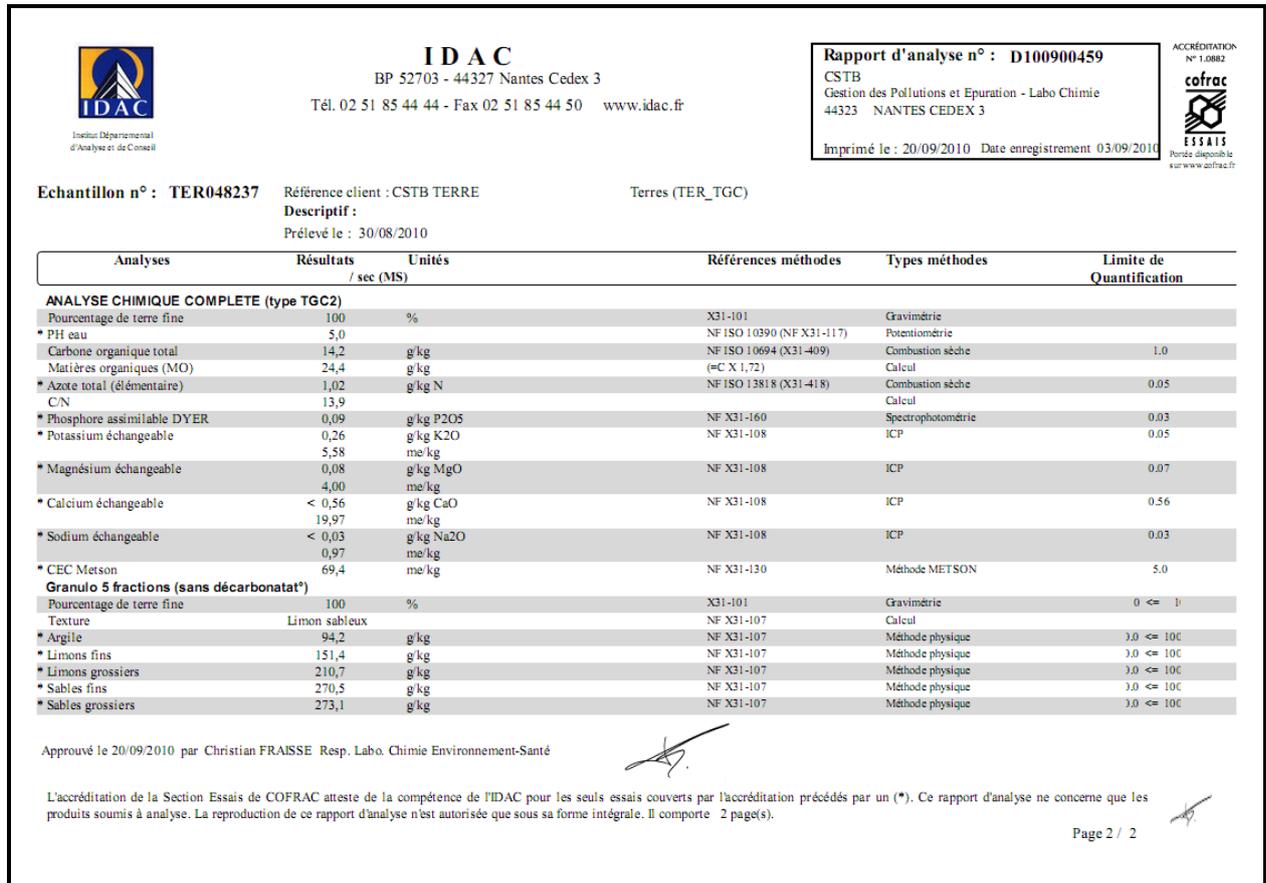


Figure 7.1: Caractéristiques physico-chimiques de la terre (laboratoire d'analyses IDAC)

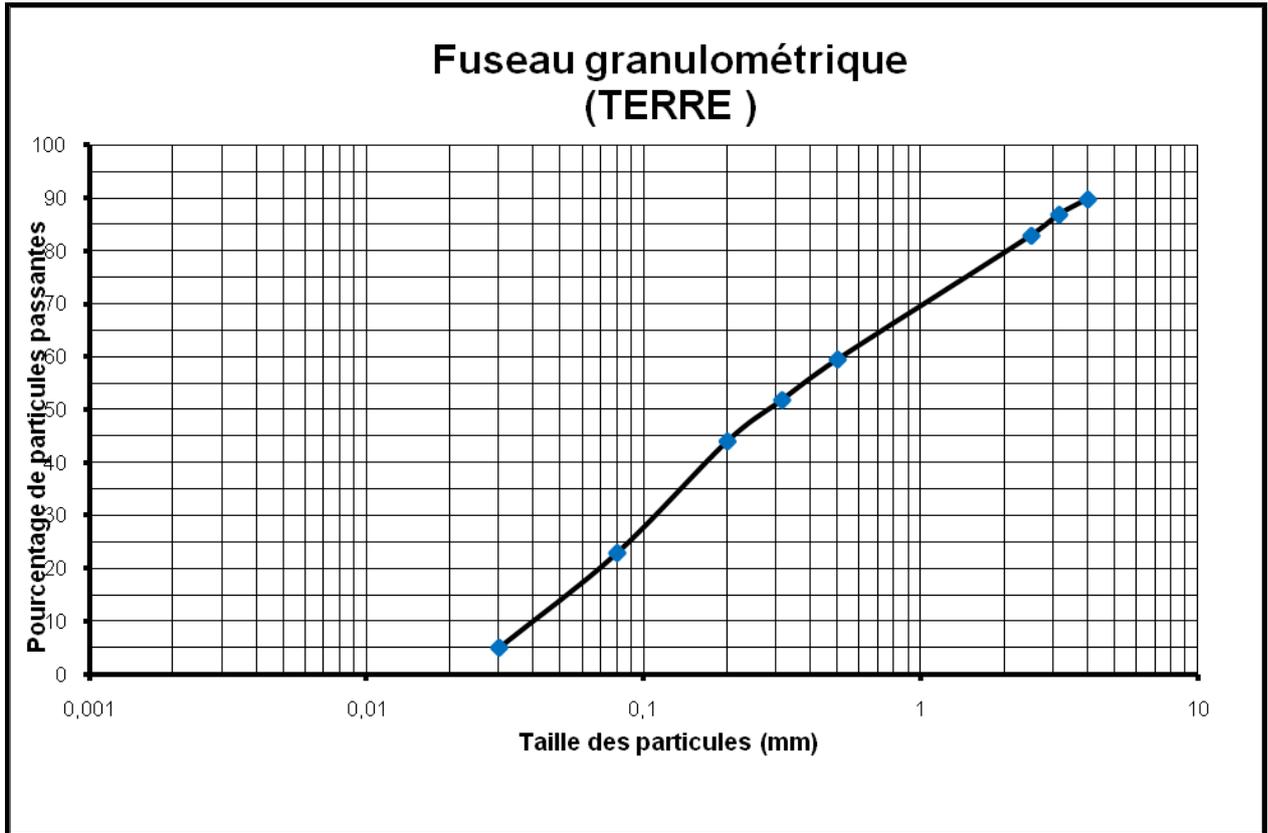


Figure 7.2: courbe granulometrique de la terre

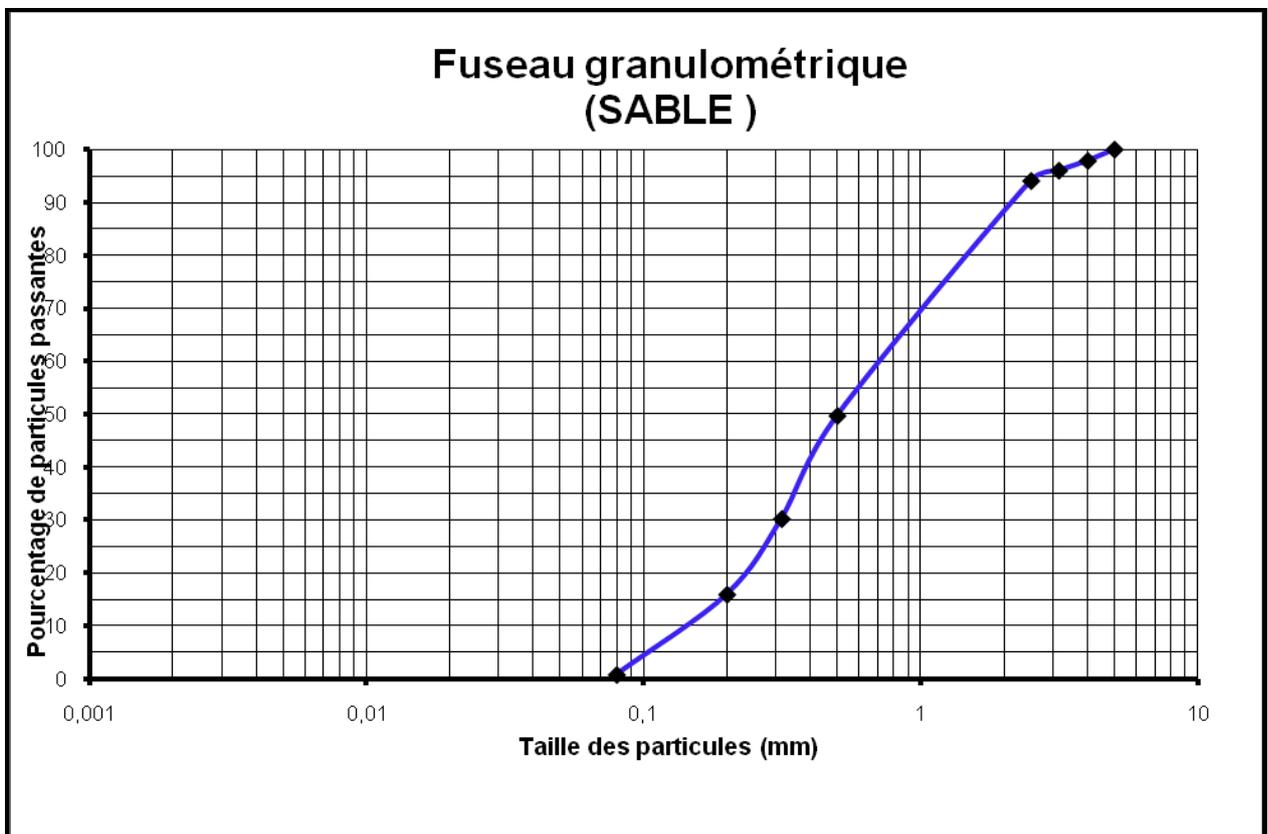


Figure 7.3: courbe granulometrique du sable

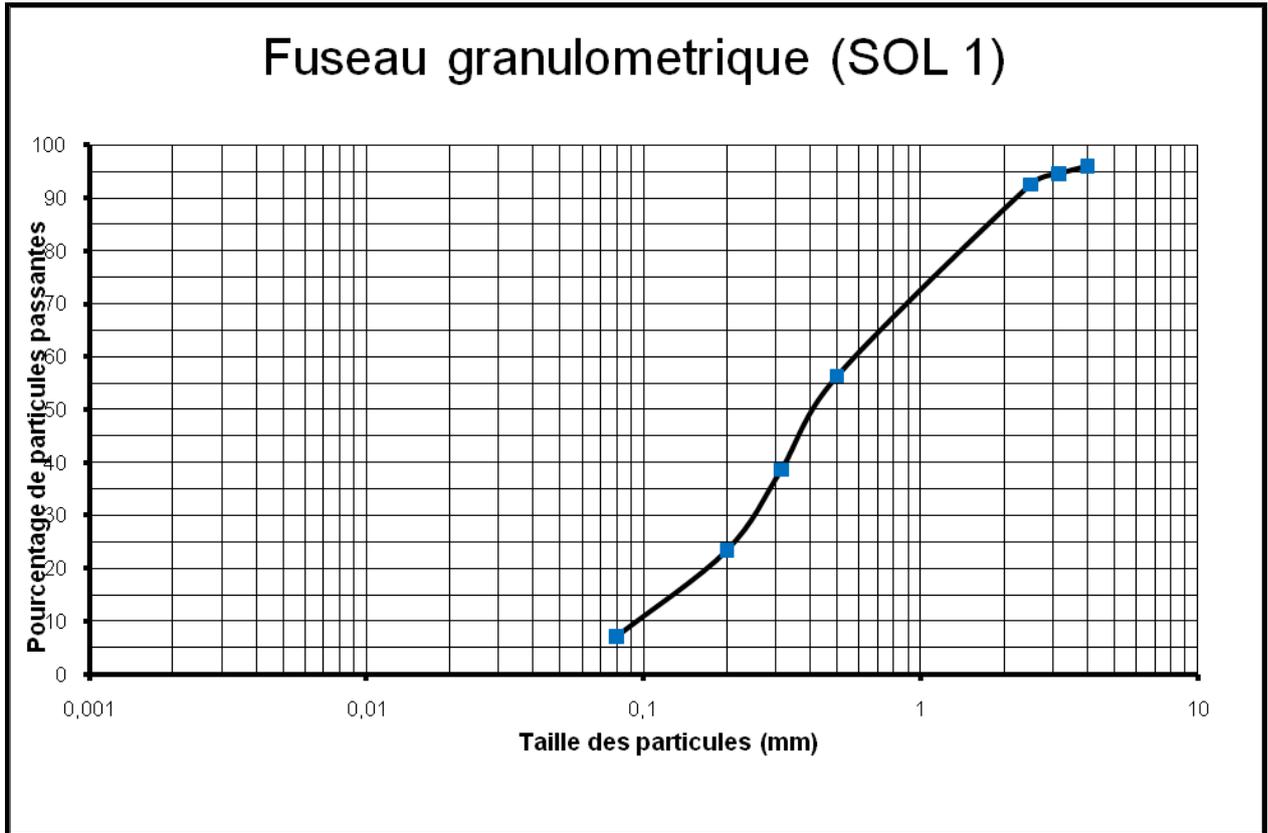


Figure 7.4: courbe granulometrique du sol 1

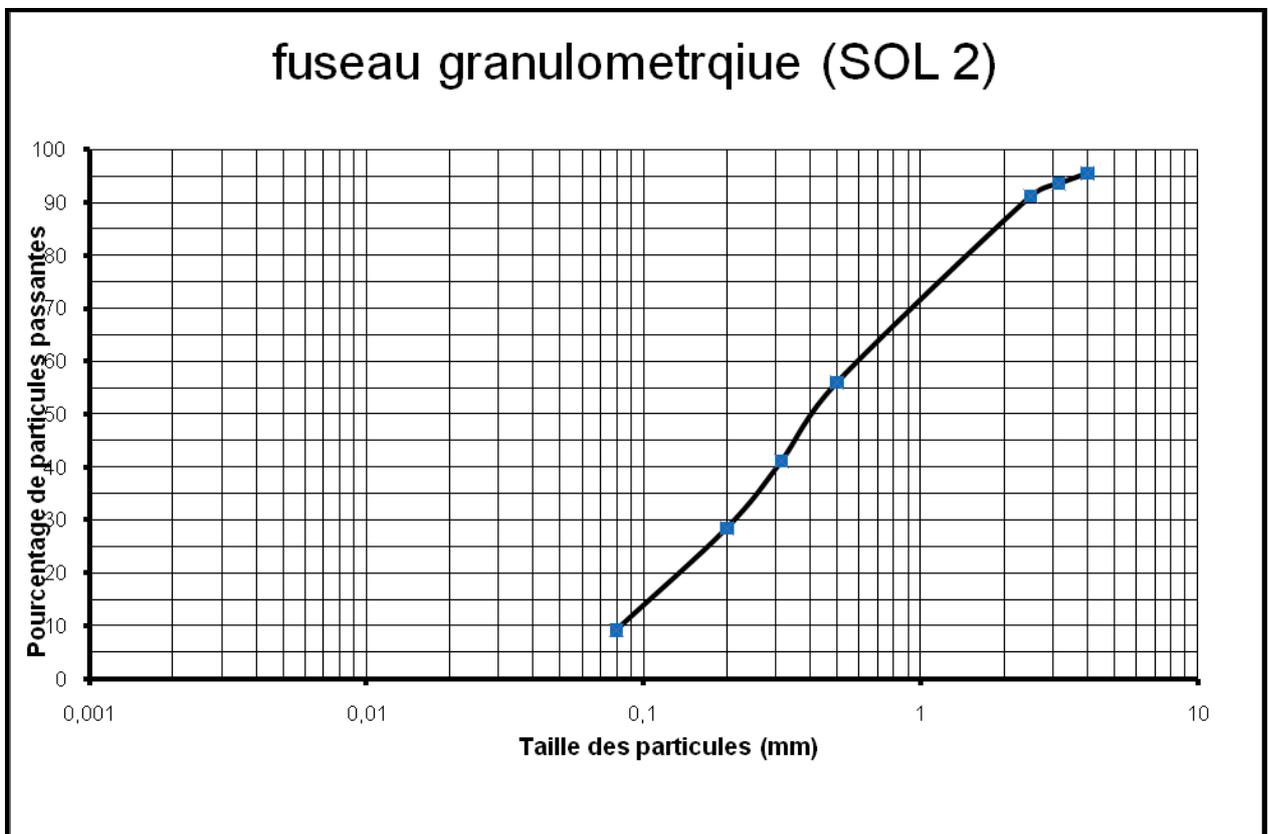


Figure 7.5: courbe granulometrique du sol 2

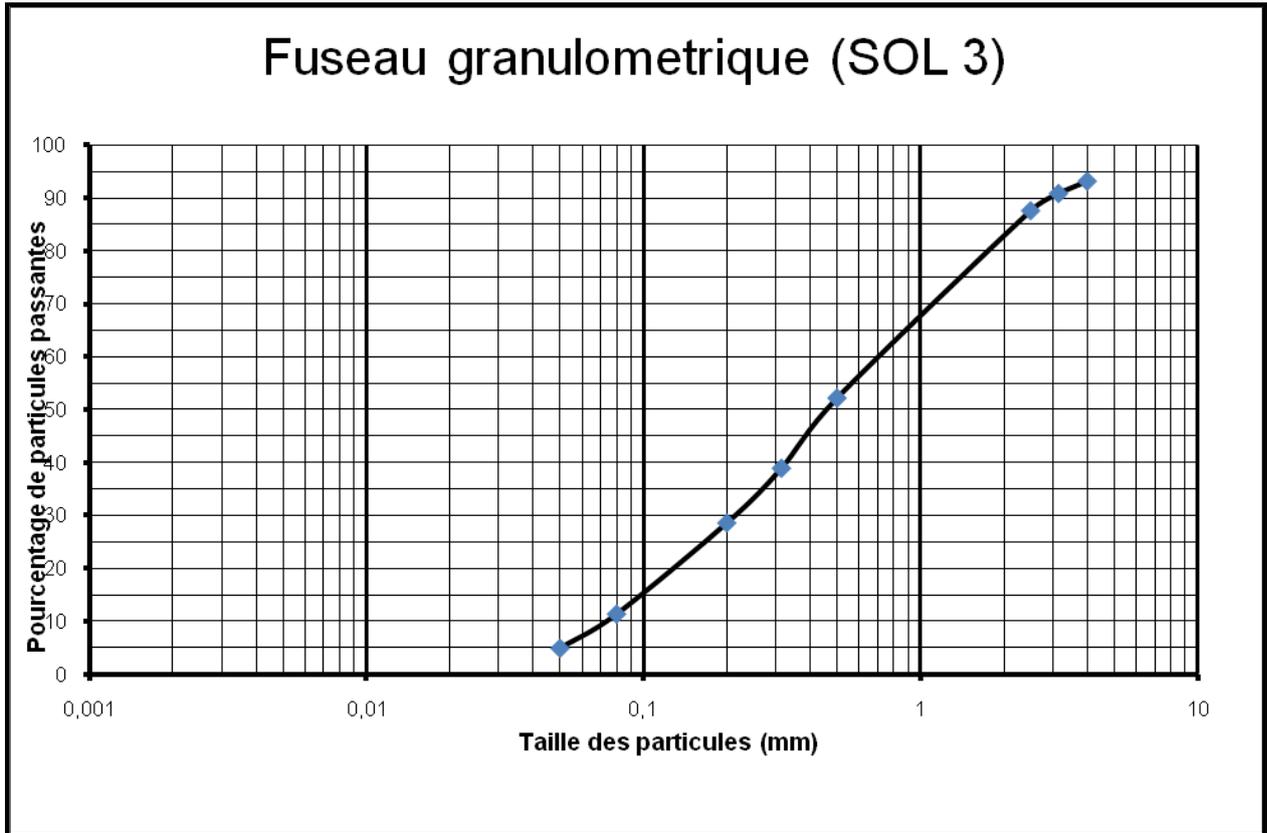


Figure 7.6: courbe granulometrique du sol 3

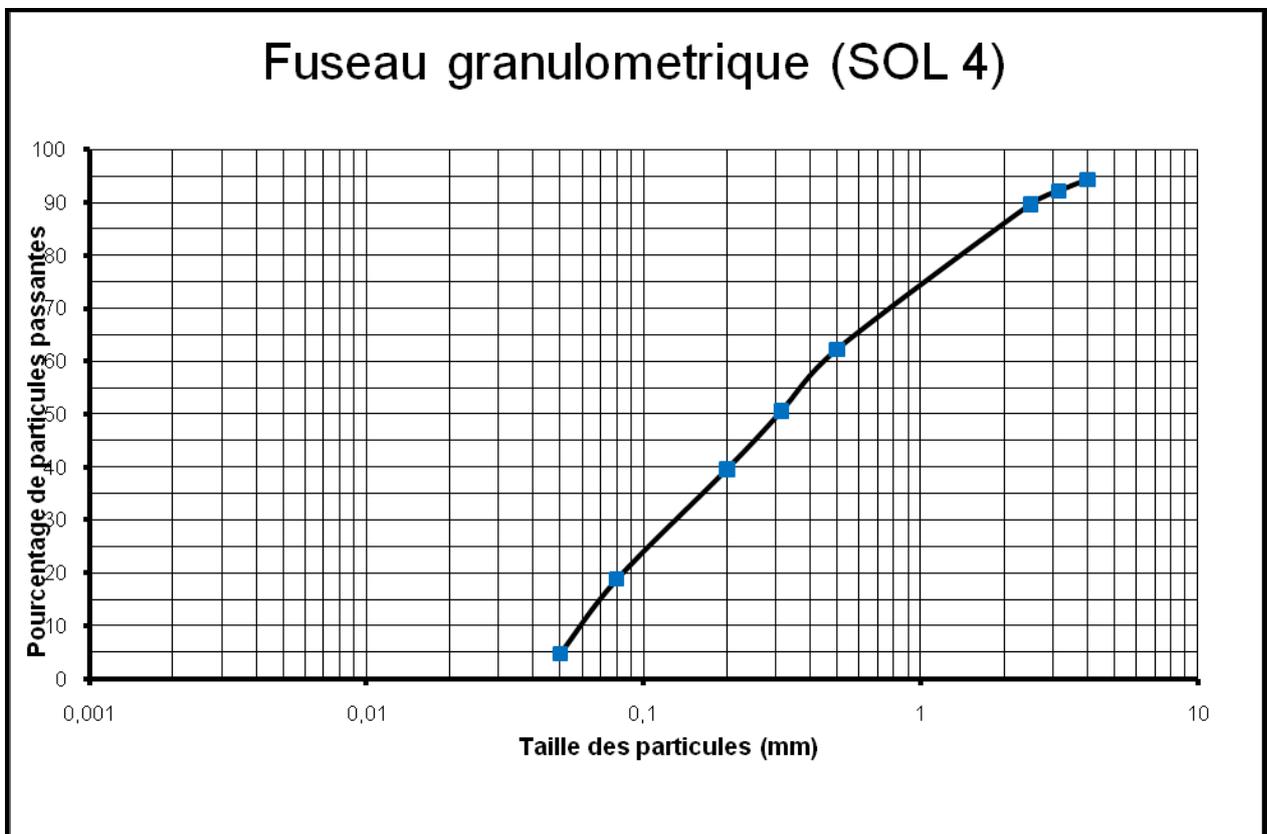


Figure 7.7: courbe granulometrique du sol 4