République Algérienne Démocratique Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA
Faculté de la Technologie
Département de Génie des Procédés et Environnement

En vue de L'obtention du Diplôme de master en Génie des Procédés

Option : procédé pharmaceutique

Thème

CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE D'UN REACTEUR

Présenté par

SABOUR abderrezak

MESSOUS mohamed

Soutenu le 15 Juin 2017 devant le jury composé de :

ZOUAMBIA.Y	Présidente
KHALLADI. R	Encadreur
CHIRIFI. H	CO-Encadreur
RAHAL. S	Examinateur

Promo 2016-2017

ملخـص :

يهدف هذا العمـــل إلى دراسة بعض الخصائص الهيدروديناميكية لمفاعل أنبوبي مفتوح من نوع صلب -سائل يعمل تحت تدفق من الأسفل الى الأعلى. تمت دراسة تأثير بعض العوامل (قطر العمود، قطر المادة الصلبة، وارتفاع السرير الصلب,التدفق) على أداء وتوزيع وقت الإقامة لهذا المفاعل. وأظهرت النتائج أن أعمدة الرمال التى درست لديها نوعين من الخلل هما الحجم الراكد والالتفافية , وأن نمط التدفق المناسب لهذا المفاعل هو التدفق الاسطواني.

كلماتالمفاتيح: مفاعل، الهيدروناميكا، وقتا لإقامة، عمود الرمال.

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier quelques caractéristiques hydrodynamiques d'un réacteur tubulaire ouvert solide-liquide en écoulement ascendant. L'effet de certains paramètres (diamètre de la colonne, diamètre des particules solides, hauteur du lit solide, débit) sur les performances et la distribution des temps de séjour de ce réacteur a été étudié. Les résultats obtenus ont montré que les colonnes de sable étudiées présentent deux types de disfonctionnement à savoir un volume mort et un court-circuit. Et que le modèle d'écoulement adéquat à ce réacteur est celui d'écoulement piston.

Mots clés : Réacteur, hydrodynamique, le temps de séjour , colonne de sable.

Abstract:

The objective of this work is to study some hydrodynamic characteristics of an open tubular solid-liquid reactor in an up-ward flow. The effect of some parameters (column diameter, sand diameter, solid bed height, flow rate) on the performances and the residence time distribution of this reactor was studied.

The obtained results showed that the studied sand columns present two types of ills, namely dead volume and by-pass. And that the flow model suitable to this reactor is that of plug flow.

Keywords: Reactor, hydrodynamics, residence time, sand column.

REMERCIEMENT

*En premier lieu nousremercions**ALLAH**,*
le tout puissant qui nous a donné la volonté,
la patience et le courage pour mener ce
travail à son terme.Pour tous les bienfaits et
les faveurs qu'il nousAttribue, et sans lesquels
nous ne serons jamais arrivés.

Nous remercions toutes les personnes qui nous ont aidés à
*réaliser ce travail, surtout notre encadreur **Mme**KhaladiRazika*
quinous a aidés à réaliser ce travail et qui a fait beaucoup de chose
*pournous, ainsi que **Mme**CherifiHakima notre Co-promotrice.*

Nous remercions vivement tous les membres du jury qui ont accepté
de nous honorer et de juger notre travail.

Et enfin, nous remercions tous les enseignants

du département de génie des procédés

Merci à tous

Je dédie mon travail

A mes chères parents ma mère et mon père

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.

ÀMes frères et mes sœurs et À toutemafamille.

À Mes amis : Omar, Mohamed, Rahim

Ainsi qu'a tous mes professeurs, enseignantes et tous mes amis du primaire jusqu'à l'université.

A tous ceux qui ont une relation de proche ou de loin avec la réalisation

du présent travail.



SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE I. GÉNÉRALITÉ SUR LES R ÉACTEURES

I.1 REACTEURS CHIMIQUES……..…..3

I.2 CLASSIFICATION DES REACTEURS CHIMIQUES……...…...3

I.2.1 Classification selon le mode de fonctionnement…….3
I.2.1.1 Réacteurs discontinus (fermés)…….……..…….…3
I.2.1.2 Réacteurs continus (ouverts)……..…….…….....4
I.2.1.3. Réacteurs semi-continus……...……..….5
I.2 .2 Classification selon les types de réaction…….……5
I.2 .2.1 Réaction phase homogène gazeuse……..……...…5
I.2 .2.2 Réaction phase homogène liquide…….…….……6
I.2.2.3 Réaction phases hétérogène gaz – solide……..…….....6
I.2.2.4 Réaction Phases hétérogène gaz- liquide- solide……..…….…..6
I.2.2.5 Réaction phases hétérogène liquide – liquide……..…….....7
I.2.2.6 Réaction phases hétérogène gaz- liquide……...…….…..7
I.2.2.7 Réaction phases hétérogène liquide- solide……...……...7
I.3. HYDRODYNAMIQUE DES REACTEURS SOLIDE-LIQUIDE……...…7
I.3.1 Écoulement en milieu poreux…….…….……...7
I.3.2 Définition du milieu poreux ……...……7
I.3.3 Régimes d'écoulements……..8
I.3.4 Nombre de Reynolds et vitesse apparente……..……9
I.3.5 Pertes de charge ……..……....10
I.3.5.1Pertes de charge singulières ……..…11
I.3.5.Pertes de charges linéaires (régulières)……11
I.3.6 Loi de Darcy ……...……..……...12
I.3.7 Conductivité hydraulique ……...……..13
I.3.8 Perméabilité intrinsèque…….…….……....14
I .4. DISTRIBUTION DES TEMPS DE SEJOUR (DTS) ……..…14
- Notion de temps de séjour et fonction de distribution..…….14

I.4.2 Détermination expérimentale de la DTS au moyen d'un traceur…….....…16
I.4.2.1 Injection-impulsion……..…….……..16
I.4.2.2 Injection-échelon……16
I.4.3. DTS des réacteurs idéaux pour une injection impulsion…….....……....17
- Temps de séjours et temps de passage…….……17

I.4.3.1. Réacteur piston……..……17
I.4.3.2. Réacteur parfaitement agité……...…….……...17
I.4.3.3. Réacteur quelconque……..18
I.5. DIAGNOSTICS DE MAUVAIS FONCTIONNEMENT ……....18
I.5.1.Présence de zones mortes…….…….....18

I.5.2. Présence de court-circuit……19
I.5.3. Présence d'un retard……20
I.6. MODELES DES REACTEURS NON IDEAUX……20
I .6.1. Modèle de dispersion axiale……20
I .6.2. Modèle des mélangeurs en cascade……22

CHAPITRE II : MATÉRIELS ET MÉTHODES

II.1 MATÉRIELS ET PRODUITS UTILISÉS……23
II.1.1 Matériel utilisé ……23
II.1.2 produits utilisés ……23
II. 2 Caractérisation physicochimique du sable utilisé……24
II.2.1 Détermination de la masse volumique réal……24
II.2.2 Détermination de la porosité du sol……24
II.2.3Taux d'humidité ……25
II.2.4 Teneur en matière organique MO……25
II. 3 Analyse granulométrique……26
II. 3.1 Mode opératoire……26
II. 3.2 Déterminer la classedu sable ……27
II.3.3 Détermination du diamètre moyen des particules……28
II.3.4 Détermination du coefficient d'uniformité et du coefficient de courbure……28
II.3.5. Microscopie des particules solides de sol……29
II.4 PROCEDURE EXPÉRIMENTALE ……29
II.4.1 Montage expérimental……29
II.4.2 Mise en marche du dispositif expérimental……31
II.5 ETUDE HYDRODYNAMIQUE……31
II.5.1 Mesure du débit de sortie Q_{sortie}……31
II.5.2 Mesure de la conductivité hydraulique ……32
II.5. 3 Perméabilité intrinsèque……32
II.5.4 Détermination du régime d'écoulement (nombre de Reynolds) ……32
II.6 DISTRIBUTION DES TEMPS DE SÉJOUR (DTS)……33
II.6.1 Courbe d'étalonnageconductivité-concentration du traceur……33
II.6.2 Courbes de percée……34
II.6.3. Détermination du temps de séjour et de la variance ……34
II.6.4 Bilan de masse BM……35
II.6.5 Détermination du nombre dePéclet (Pe), et du coefficient de dispersion axiale..36
II.7. PARAMETRES OPERATOIRES ……36

SOMMAIRE

CHAPITRE III . RÉSULTATS ET DISCUSSION

III.1 PROPRIETES PHYSICOCHIMIQUES DU SABLE……...37

III.2 PROPRIETES GRANULOMETRIQUES DU SOL…….……37

III.2.1 Classe granulométrique du sol……...37

III.2.2 Diamètre moyen, coefficient d'uniformité et coefficient de courbure……...37

III.2.3. Microscopie des particules solides de sol…….39

III.3 RÉSULTATS DE L'ETUDE HYDRODYNAMIQUE ……...39

III.3.1 Débit de sortie Q_{sortie}……39

III.3.2 Détermination du nombre de Reynolds……40

III.3.3 Conductivité hydraulique et perméabilité intrinsèque… ……..41

III.4. DISTRIBUTION DES TEMPS DE SEJOUR……..42

III.4.1 Courbe d'étalonnageconductivité-concentration du traceur……..……42

III.4.2 Conductivitéélectrique en l'absence du traceur traceur……..…….....42

III.4.3 Courbes d'élution ou de percée……...44

III.4.4 Temps de séjour moyen et variance ……..…….46

III.4.5 Bilan de masse MB…….48

III.4.6 Nombre de Pécletet coefficient de dispersion axiales ……..……49

CONCLUSION GENERALE……..……50

REFERENCE ET BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre de la figure	Page
	Chapitre I	
Figure I.1	Réacteur fermé	4
Figure I.2	**a)** Réacteur piston, **b)** Réacteur à cuve parfaitement agité	4
FigureI.3	Représentation d'un milieu poreux	8
Figure I.4	Schématisation des lignes de courant d'un écoulement laminaire	9
Figure I.5	Lignes de courant moyennes dans un écoulement turbulent	9
Figure I.6	Principe des mesures de la perte de charge	10
Figure I.7	Distribution des temps de séjour	16
Figure I.8	DTS des réacteurs idéaux	18
Figure I.9	Présence de zone morte dans un réacteur	19
Figure I.10	Court-circuit dans un réacteur	19
	Chapitre II	
Figure II.1	Série des tamis	27
Figure II.2	Installation expérimentale	30
Figure II.3	Schéma illustratif de la colonne de sable	31
Figure II.4	Dispositif expérimentale	32
	Chapitre III	
Figure III.1	Distribution granulométrique des particules de sable	40
Figure III.2	Image des particules de sables (4x0.1)	41
Figure III.3	Stationnarité du débit de sortie des essais en colonne de sable A	41
Figure III.4	Stationnarité du débit de sortie des essais en colonne de sable B, (Q= 0.03 l/min, H_1=2 cm)	42
Figure III.5	Courbe d'étalonnage de la conductivité électrique du traceur	44
Figure III.6	Conductivité électrique de la colonne A (Q= 0.03 l/min, ds=1.25mm)	45
Figure III.7	Conductivité électrique de la colonne A (Q= 0.03 l/min, H1=2cm)	45
Figure III.8	Conductivité électrique de la colonne A et B (Q= 0.03 l/min, H1=2cm, ds= 1.25mm)	46
Figure III.9	Courbes de percé pour la colonne B(Q= 0.03l/min, ds=1.25 mm)	47
Figure III.10	Courbes de percé pour la colonne B(Q= 0.03l/min, H1=2 cm)	47

Figure III.11	Courbes de percé pour la colonne A et B (Q= 0.03 l/min, H1=2 cm, ds=0.63mm)	46

Liste des tableaux

Numéro	Titre du tableau	Page
	Chapitre II	
Tableau II.1	Dimensions des deux colonnes utilisées	31
Tableau II.2	Paramètres opératoires	37
	Chapitre III	
Tableau III.1	Propriétés du sol utilisé	39
Tableau III.2	Diamètre moyen, coefficient d'uniformité et coefficient de courbure	40
Tableau III.3	Valeur du nombre de**Reynolds** pour les colonnes A et B (Q= 0.03 l/min , H1=2cm)	43
Tableau III.4	Conductivité hydraulique $K_H$et perméabilité intrinsèque *k* (colonne A , Q= 0.03 l/min, ds =1.25mm).	43
Tableau III.5	Conductivité hydraulique K_H et perméabilité intrinsèque *k* (colonne B , Q= 2.4 l/min, ds=1.25mm)	43
Tableau III.6	Paramètres de la DTS de la colonne A à débit Q1=0.03l/min	49
Tableau III.7	Paramètres de la DTS de la colonne B à débit Q2=2.4 L/min	49
Tableau III.8	Valeurs du bilan de masse BM de la colonne A (Q= 0.03 l/mn)	50
Tableau III.9	valeurs de Pe et de $D_a$pour la colonnes A (Q1=0.03L/min)	51
Tableau III.10	Valeurs de Pe et de $D_a$pour la colonnes A (Q1=2.4 l/min)	51

NOMENCLATURE

Lettres grecques

τ : temps de passage s

σ^2: variance

ε: porosité du mélange

μ: viscosité dynamique Pa s

ρ: masse volumique kg m^{-3}

ρ_s :masse volumique solide kg m^{-3}

λ **:** Coefficient de frottement.

Ω :conductivité électrique

Lettres latines

A : est la surface de la section étudiée

BM : bilan de masse

C_C : coefficient de courbure

C_u : coefficient d'uniformité

C_0 :concentration initiale mole m^{-3}

C_f **:** concentration final mole m^{-3}

C(t) : concentration en fonction du temps

D_a : disparation axiale($m^2.s^{-1}$)

D_m : diamètre moyen des particules

D_s *:* diamètre de la particule mm

DTS : distribution des Temps de Séjour

E(t) : fonction de distribution des temps de séjour

F(t) : fonction de distribution cumulée des temps de séjours

H : hauteur de lit cm

H_u **:** taux d'humidité du sable

ΔH :est la différence des hauteurs cm

K_H: Conductivité hydraulique

k: Perméabilité intrinsèque

NOMENCLATURE

L : longueur du réacteur m

Q_v : débit volumique $m^3.\ s^{-1}$

MF : module de finesse

mi : masse de sable g

m_0 : masse de sable avant séchage (g) ;

m_1 : masse de sable après séchage (g) ;

MO : matière organique

ΔP : perte de charge Pa

Pe : nombre de Peclet

Q : débit volumique $m^3\ s^{-1}$

Re : nombre de Reynolds

$\overline{t_s}$: temps de séjour moyen s

t_0 :temps initial

Δt : intervalle de temps min

u : est la vitesse du fluide $m.s^{-1}$

v_s : volume du sable ml

v_t : volume total du mélange ml

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le réacteur constitue le cœur des unités de fabrications chimiques, rencontrées aussi bien dans les raffineries ou les complexes métallurgiques que dans les usines chimiques ou para chimiques, ainsi que dans les installations de traitement et d'épuration. Dans de telles unités industrielles, des colonnes garnies par des particules solides sont largement utilisées. Elles sont généralement entourées d'appareillages, placés en amont et en aval, permettant les traitements physiques des matières premières et des produits de la réaction. Par ailleurs, on trouve également des réacteurs solide-liquide dans les installations de lutte contre la pollution pour épurer, par voie chimique ou physique, un certain nombre d'effluents (eaux résiduaires,effluentsgazeux,, etc…).[1]
L'identification etla description quantitative des processus d'écoulement d'eau et de transport de solutés dans un milieu poreux nécessitent l'acquisition d'un grand nombre de paramètresdont la mesure n'est pas toujours possible à l'échelle du terrain.

La détermination de la distribution du temps de séjour dans de tels systèmes en écoulement ascendant, permet d'en tirer des informations utiles quant à leur fonctionnement hydrodynamique et de rendre compte de ces distributions de temps de séjour au moyen de modèles représentatifs adaptés en particulier à l'extrapolation à l'échelle pilote. Afin de pouvoir utiliser ces informations, conjointement à la connaissance de la cinétique chimique du procédé, pour prévoir les performances et les disfonctionnement du réacteur.

En effet,l'étude des caractéristiques hydrodynamiques, plus particulièrement les pertes de charge, la conductivité hydraulique et la Distribution des Temps de Séjour (DTS) figure d'un grand intérêt. Ce thème est traité d'une manière très claire dans plusieurs ouvrages de synthèse. Néanmoins, il s'impose toujours comme une étape préliminaire obligatoire avant la réalisation de n'importe quel procédé.

Le travail présenté dans ce mémoire de fin d'étude s'articule autour de quatre parties :

- Le premier chapitre est consacré aux réacteurs chimiques et leurs caractéristiques hydrodynamiques.

- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du matériel et de l'installation expérimentale utilisée, ainsi que les méthodes d'analyse et de calculs suivies pour la détermination de la DTS et la caractérisation de la colonne et de son contenu.
- Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats expérimentaux issus de deux colonnes différentes sous des conditions opératoires diverses. On s'attache dans ce chapitre à présenter la méthode élaborée pour accéder à la DTS d'une manière pédagogiquement très facile et qui aide à consolider les apprentissages antérieures en calcul de réacteur et de les appliquer sur un modèle de réacteur réel.
- En fin une conclusion générale qui résume les résultats obtenus au cours de cette étude ainsi que les perspectives envisagées.

Chapitre I

Généralité sur les réacteurs

1 REACTEURS CHIMIQUESÉ

Le réacteur est un appareil permettant de réaliser transformation de produits de caractéristiques données en d'autres produits de caractéristiques et propriétés différentes. II est à la fois le siège de phénomènes chimiques et de phénomènes physiques; ces derniers se divisent en deux catégories : les phénomènes physiques à dominante hydrodynamique (écoulements monophasiques ou poly phasiques, création et suppression d'interface entre phases, etc.) et les phénomènes physiques à dominante cinétique relevant des transferts de masse et d'énergie, soit à l'intérieur d'une phase (homogénéisation des concentrations et des températures), soit entre phases (dissolution d'un gaz dans un liquide) [1].

I.2 CLASSIFICATION DES REACTEURS CHIMIQUES

Les réacteurs chimiques sont principalement classés selon trois facteurs spécifiques, à savoir, le mode de fonctionnement, le type de réaction, et la forme du réacteur.

I.2.1 Classification selon le mode de fonctionnement

Il est reconnu qu'un réacteur peut fonctionner selon trois modes le mode de fonctionnement.

I.2.1.1 Réacteurs discontinus (fermés)

Appelés aussi réacteurs Batch. Ce sont les plus simples que l'on puisse envisager pour réaliser une transformation chimique (figure. I.1). Ils consistent en un récipient dans lequel les réactifs sont introduits au début de l'opération ; après mise en conditions de température et de pression, la réaction se déroule jusqu'au taux de transformation désiré, et à la fin les produits sont récupérés [2]. Ils sont caractérisés par :

- **Avantages**

- Installation simple qui permet des réactions nécessitant la variation des conditions opératoires (notamment changement de la température) [3].

- **Désavantages**

- Travaille à des concentrations de réactifs élevées au début de la réaction (problème de sécurité, conversions moins bonnes en cas d'inhibition par le substrat).
- Nécessite un temps mort entre chaque opération (remplissage, vidange, nettoyage) qui nuit à la performance [3].

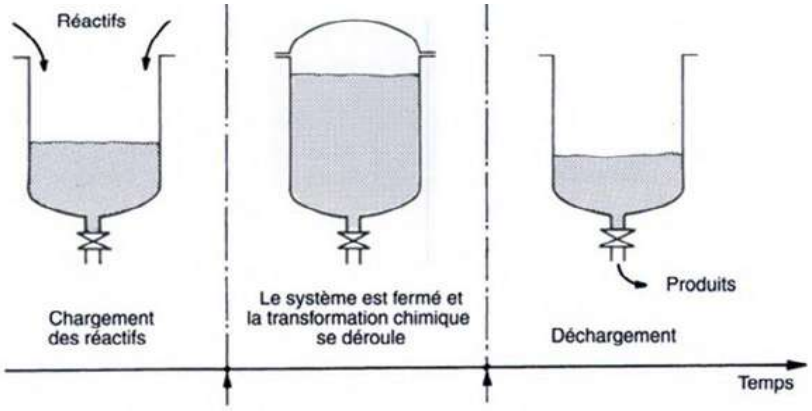


Figure I.1 :Réacteur fermé**.[4]**

I.2.1.2 Réacteurscontinus (ouverts)

Dans un réacteur continu, les réactifs et les produits sont continuellement chargés et récupérés du réacteur [3]. On distingue selon le mode d'écoulement deux types de réacteurs (figure I.2).

- Pour un écoulement de type piston : Réacteur piston
- Pour un écoulement parfaitement mélangé : Réacteur parfaitement agité



Figure.I. 2 : a) Réacteur piston, **b)** Réacteur à cuve parfaitement agité **[4]**

Les réacteurs ouverts sont caractérisésparles avantages et les inconvénients suivants :

- **Avantages**

- Peu de variation dans la qualité d'un produit pendant une longue durée de temps.
- Haute performance.

- Bon pour des études cinétiques.
- Travaille à des faibles concentrations de réactifs (meilleure sécurité, meilleure conversion pour des ordres de réactions inférieurs à 1) [3].

- **Désavantages**

- Conversion moins bonne pour des ordres de réactions supérieurs à 1 ou en cas d'inhibition par le produit.
- Nécessite un excellent contrôle des flux entrant et sortant.
- Ne permet la variation continuelle des conditions opératoires des réactions [3].

I.2.1.3. Réacteurs semi-continus

Dans ce type de réacteurs, l'un des réactifs ou l'un des produits est constamment ajouté ou soutiré du réacteur, les autres sont traités comme dans une opération discontinue. En pratique, ils sont connus par « réacteurs semi-fermés » ou « réacteurs semi-ouverts ».

I.2 .2 Classification selon le type de réaction

La réaction chimique peut se dérouler totalement en une seule phase (gaz, solide ou liquide), elle est alors dite : réaction en phase homogène. Ou bien, se dérouler dans deux ou plusieurs phases, ce qui est connue par réaction hétérogène.

- **Les réactions homogènes** se produisent uniformément dans le volume réactionnel ; ce qui rend plus faciles les transferts de matière. Ceci dit, dans les réactions fortement exothermiques le contrôle de la température risque de poser des problèmes de transfert de chaleur.
- **Les réactions hétérogènes** se produisent dans un petit volume bien déterminé, d'ailleurs lié à l'hétérogénéité du milieu (le contact des réactifs n'est possible qu'à l'interface entre les phases, ce qui rend les transferts de matière et aussi de chaleur encore beaucoup plus cruciaux et délicats**.[4]**

Parmi les réactions chimiques, on distingue sept grandes familles de réactions.

I.2.2.1 Réaction en phase gazeuse

Ces réactions sont toujours réalisées dans des réacteurs tubulaires (un tube ou plusieurs) fonctionnant en continu. Le diamètre du tube est de l'ordre du cm (ou dm) et sa longueur

varie d'un mètre à plusieurs dizaines de mètres. Le débit est généralement élevé pour que l'écoulement soit turbulent (donc bien mélangé localement), la température et la pression sont souvent élevées.

I.2 .2.2 Réaction en phase liquide

Ces réactions sont fréquemment réalisées dans une cuve ou colonne discontinue ou continue. Le volume du réacteur peut varier de quelques litres à quelques dizaines de milliers de litres. Si la réaction est très rapide et exothermique et que le liquide est plutôt visqueux, le réacteur cuve doit plutôt s'imposer car une bonne agitation à l'intérieur peut assurer un bon transfert de chaleur. **[4]**

I.2 .2.3 Réaction en phase gaz – solide

Ces réactions impliquent un ou plusieurs solides comme catalyseurs ou comme réactifs, avec un réactif ou plusieurs dans la phase gazeuse. Ce type de réaction représente 80% des réactions chimiquesindustrielles.Ondistingue trois types de réacteurs gaz-solide**[4]** :

- Réacteur tubulaire à lit solide fixe, dans ce cas, le solide joue surtout le rôle de catalyseur. lit de grains solide de quelques mm, et parfois des toiles métalliques.
- Réacteur à lit solide fluidisé. Le solide, composé de granules de quelques microns, est mis en suspension (en état fluidisé) par le gaz ascendant. Dans un état de fluidisation, le solide se comporte comme un pseudo liquide, ce qui lui confère de meilleures propriétés de transfert de masse et de chaleur.
- Réacteur à lit mouvant (mobile), le solide sous forme de lit granulaire se déplace vers le bas par gravité, ce type de réacteur est parmi les réacteurs les plus difficiles à maitriser et à étudier.

I.2 .2.4 Réaction en phase liquide- solide

Ces réactions peuvent se réaliser dans des réacteurs tube ou cuve, qui fonctionnent en continu ou en discontinu par rapport à chacune des deux phases. Un exemple de ce type estla fabrication de l'aluminium par traitement de bauxite par la soude caustique. Les trois types de réacteurs (à lit fixe, à lit fluidisé et à lit mobile) ; cités précédemment peuvent être rencontrés en remplaçant le gaz par le liquide.

I.2 .2.5 Réaction en phase hétérogène liquide - liquide

Ces réactions peuvent se réaliser dans des réacteurs tube ou cuve, en opération continue ou discontinu par rapport à chacune des deux phases.Un exemple industriel de ces réactions est la nitration du toluène par les acides nitrique et sulfurique dans un réacteur continu.

I.2 .2.6 Réaction en phase gaz- liquide

Ces réaction se déroulent dans des réacteurs tube ou cuve. Le gaz (en opération continu) sera dispersé sous forme de bulle dans la phase liquide ou bien au contraire, le liquide sera dispersé dans la phase gazeuse. [4]

I.2 .2.7 Réaction en phase gaz- liquide- solide

Quoique plus complexes au point de vue des divers transferts, ces réactions sont assez répandues dans l'industrie. Le solide en lit fixe ou fluidisé sert fréquemment de catalyseur. Le gaz et le liquide circulent à co-courant, contre- courant ou croisé.

Dans notre travail, le réacteur étudié est une colonne de sable ouvert à l'écoulement.

I.3. HYDRODYNAMIQUE DES REACTEURS SOLIDE-LIQUIDE

I.3. 1 Écoulement en milieu poreux

L'écoulement dans un système Solide-liquide assimilé à un média poreux est un phénomène très complexe. Car le comportement des fluides dans un tel système dépend des caractéristiques du système solide liquide (types de fluides, régimes d'écoulement,..), et de de son environnement (géométrie et forme du réacteur ou colonne). L'étude de l'écoulement en milieu poreux a donné lieu à d'innombrables travaux basés sur la loi de filtration énoncée le siècle dernier par DARCY **[5]**

I.3. 2 Définition du milieu poreux

Un milieu poreux est un solide contenant des espaces vides (pores), reliés ou non, dispersé dans d'une façon régulière ou aléatoire. Ces pores peuvent contenir une des fluides tels que l'air, l'eau, le pétrole etc. Si les pores représentent une certaine partie du volume solide, on peut former un réseau complexe qui peut porter des fluides (Figure. I.3). **[9]**

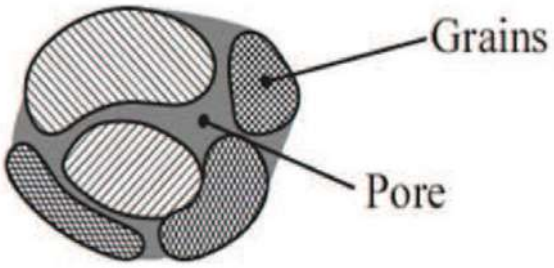


Figure. I.3 : Représentation d'un milieu poreux

En général, un milieu poreux est caractérisé par la proportion du vide dans le volume solide exprimée par la porosité noté ε . Elle est définie par le rapport du volume des pores au volume total du solide.

L'étude de l'écoulement d'un tel système fait appel à différentes notions, nous donnons les plus importantes dans ce qui suit.

I.3. 3 . Régimes d'écoulements

L'écoulement d'un fluide réel est dit laminaire s'il se déplace en formant des lames ou couches entre lesquelles il n'y a pas de mélange(figureI. 4). Cependant, l'écoulement désordonné d'un fluide réel est dit turbulent s'il se déplace en formant destourbillonsde tailles différentes accompagnés d'un mélange intensif des particules fluides(figure.I. 5).

Un écoulement est dit permanent ou stationnaire lorsque les grandeurs caractéristiques du fluide (densité) et de l'écoulement (pression, vitesse), sont constantes dans le temps. Ainsi, la vitesse est indépendante par rapport au temps, mais elle peut varier d'un point à l'autre dans l'espace. La plupart des systèmes sable-fluide étudiés et qui existent sont en écoulement permanent. Toutefois, l'écoulement de liquides sous pression le long d'une conduite de diamètre constant est uniforme qu'il soit permanent ou non. Et dans une conduite dont la section varie lentement ; l'écoulement peut être étudié approximativement en supposant que la vitesse est perpendiculaire à la section droite et uniforme dans cette section. **[6]**

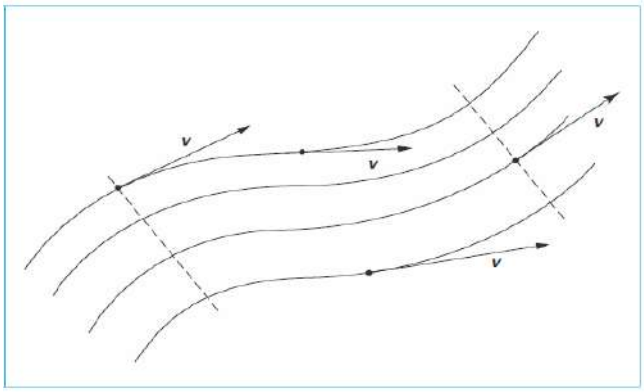


Figure I. 4 :Lignes de courant d'un écoulement laminaire

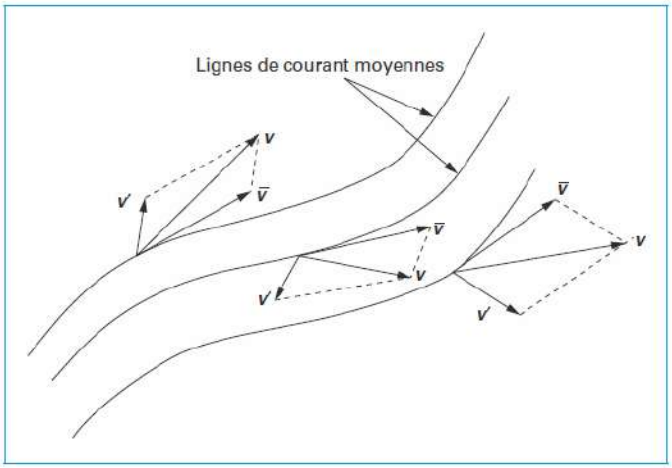


Figure I .5: Lignes de courant moyennes dans un écoulement turbulent

I.3 . 4 Nombre de Reynolds et vitesse apparente

L'expérience montre que, pour un même fluide circulant dans un milieu poreux, l'écoulement est laminaire aux faibles vitesses et devient turbulent pour des vitesses importantes. Le passage d'un régime à un autre dépend de l'importance relative des forces d'inertie et de viscosité. Ceci a été exprimé par un nombre sans dimension appelé : nombre de Reynolds *Re.***[8]**

Le nombre de Reynolds est défini par le rapport des forces d'inertie et des forces de viscosité. Il est donné par la formule suivante :

$$Re = \frac{\text{vitesse d'écoulement} \times \text{distance parcourue}}{\text{viscosité cinématique}} = \frac{u \times L}{\upsilon} \qquad \text{(I.1)}$$

Avec :

u : vitesse apparente du fluide (m/s)

L: Longueur de la conduite ou colonne (m)

ν : viscosité cinématique égale à $\frac{\mu}{\rho}$(cSt)

μ : viscosité dynamique du fluide (Pa.s)

ρ : masse volumique du fluide (kg m^{-3}).

La vitesse apparente(ou superficielle) d'un fluide qui s'écoule avec un débit volumique Q à travers une section S est donnée par : $u = \frac{Q}{\Phi}$(I.2)

Q : Débit du fluide (m^3/s)

Φ : section de la conduite (m^2)

Le nombre de Reynolds permet de caractériser trois types d'écoulements ; à savoir : Laminaire, transitoire et turbulent**. [10]**

- Si Re< 2000, l'écoulement est laminaire.
- Si 2000<Re< 3000, l'écoulement est transitoire.
- Si Re>3000, l'écoulement est turbulent

Lorsque les forces de viscosité sont grandes par rapport aux forces d'inertie, l'écoulement est stabilisé : c'est un écoulement laminaire. Si, par contre, les forces d'inertie l'emportent sur les forces de viscosité, l'écoulement devient turbulent**.**

I.3. 5 Pertes de charge

L'écoulement des fluides réels ans une conduite s'accompagne toujours de pertes de pression, le terme « perte de charge » (ΔP_f)étant ainsi introduit afin d'exprimer de façon globale la chute de pression entre l'entrée et la sortie d'une même conduite (figure I.6) .

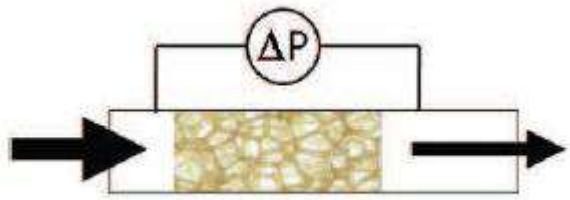


Figure I.6. Principe des mesures de la perte de charge.

On considère deux types de pertes de charge :

- **Pertes de charge singulières :**

Ce sont le résultat des variations de vitesses et des changements de directions du fluide provoqués par les formes et obstacles que rencontre le fluide en traversant un objet:(coudes, grilles, raccordements, jonctions...) on les exprime par **[11]**:

$$\Delta P_f = \lambda \left(\frac{u^2}{2}\right) \quad \text{(I.3)}$$

ΔP_f : Pertes de charge (Pa)

λ : Coefficient de perte de charge singulières.

u : Vitesse moyenne apparente du fluide. (m/s)

- **Pertes de charges linéaires (régulières):**

Les pertes de charges régulières (ou systématiques) dans une conduite vide représentent les pertes d'énergies dues aux frottements du fluide dans une conduite de section constante. On les exprime par **[11]**:

$$\Delta P_f = f \left(\frac{L}{d}\right)\left(\frac{u^2}{2}\right).\rho \quad \text{(I.4)}$$

Avec

***f* :** Coefficient de frottement.

L :Longueur de la conduite(m)

d : Diamètredela conduite(m)

u : Vitesse du fluide(m/s)

ρ: Masse volumique(kg m^{-3})

Un échantillon de mousse de longueur connue est inséré dans un tube et la mesure différentielle de pression permet de caractériser les pertes à l'écoulement dues à la présence du garnissage. **[7]**

Plusieurs études dans la littérature ont été faites pour décrire la **perte de charge linéaire**danslesréacteurs à lit fixe notée ΔP ascendant ou descendant. Parmi ces équations et ces modèles on trouve celle d'Ergun.

- **Ergun (1952)** a constaté que les principaux facteurs qui affectent la perte de charge provoquée par le passage des fluides à travers les lits fixes sont les forces de cisaillement pariétal (dues à la nature visqueuse du fluide) et les forces d'inertie en régime turbulent. Il a développé l'équation ci-dessous (applicable pour tous les types d'écoulement) où le premier terme traduit la dissipation de l'énergie par effet visqueux et le second la dissipation de l'énergie par effet inertiel.

$$\frac{\Delta P}{H} = A\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}\frac{\mu.u}{(\emptyset.d_p)^2} + B.\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3}\frac{\rho.u^2}{(\emptyset.d_p)} \qquad \text{(I.5)}$$

Où :

ΔP = Perte de charge à travers le lit fixe (Pa).

H = Hauteur du lit fixe, (m).

ε = Porosité du lit fixe (-).

μ = Viscosité dynamique du liquide (Pa s).

u = Vitesse superficielle du fluide (m s^{-1}).

Φ = Coefficient de sphéricité du solide (-).

d_p = Diamètre moyen des particules (m).

ρ = Masse volumique du fluide (kg m^{-3}).

Les coefficients A et B (respectivement constantes de Blake-Kozeny-Carman et Burke-Plummer) caractérisent le milieu poreux et dépendent de la tortuosité, rugosité et de la distribution de la taille des pores, du rapport entre le diamètre de la colonne et celui des

particules. Pour des lits homogènes, constitués par des particules sphériques de dimensions similaires : A= 150 et B = 1,75 dans l'équation d'Ergun et dans ses équations dérivée. **[12]**

I.3. 6Loi de Darcy

L'écoulement de l'eau dans un milieu poreux est conditionné par les variations dupotentiel hydrique total (ΔH) qui exprime la perte en pression ΔP. L'eau est déplacée des points où ce potentiel est élevé vers ceux oùil est le plus bas. La différence de potentiel, appelée le gradient de charge hydraulique, est lasomme du gradient de potentiel capillaire et du gradient gravitationnel.

La loi empirique de Darcy (Darcy, 1856) régissant l'écoulement laminaire en régimepermanent d'un fluide homogène, isotherme et incompressible, permet notamment demesurer, modéliser le débit d'eau pouvant s'écouler àtravers un milieu poreux homogène, isotrope et stable en supposant que l'énergie cinétiqueest négligeable. Cette loi a été établie à l'origine pour le cas d'un écoulement vertical dansun milieu poreux saturé. Elle s'exprime empiriquement par la relation suivante **:[26]**

$$Q = K_H . \Phi \frac{\Delta h}{L} \qquad \text{(I.6)}$$

Avec

Q : débit d'écoulement(m^3/s)

K_H : conductivité hydraulique du milieu poreux exprimé en (m/s).

Φ:surface de la section étudiée (m^2)

Δh :Différence des hauteurs piézométriques en amont et en aval de l'échantillon (m)

L :Longueur du lit solide (m).

I.3. 7 Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique d'un solide est une propriété physique fondamentale. Elle est le résultat des forces de frottement de l'eau dans les pores du sol, forces résistant à l'écoulement.

La conductivité hydraulique **K_H**, appelée aussi coefficient de perméabilité (ou coefficient de darcy), dépend des propriétés du milieu poreux où l'écoulement a lieu. Elle peut

êtredéterminée par la loi de Darcy cité précédemment, ou bien par l'équation de Kozeny-Carman. La conductivité hydraulique d'un solide saturée (remplissage total du vide par le liquide) peut-être estimée à partir de sa porosité, ε,et de sa distribution granulométrique à partir de l'équation de Kozeny-Carman donnée ci-après **[26]**

$$K_H = \frac{\rho.g}{\mu}\frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2}\frac{{d_p}^2}{180} \quad \text{(I.7)}$$

I.3. 8Perméabilité intrinsèque

La conductivité hydraulique est lié à la perméabilité intrinsèque du milieu poreux notée ***k*** par la relation suivante :

$$K_H = \frac{k.\rho.g}{\mu} \quad \text{(I.8)}$$

Avec

k: perméabilité intrinsèque du milieu poreux (m^2)

ρ : masse volumique du fluide (kg/m^3) ;

g : accélération de la pesanteur (m/s^2) ;

μ: viscosité dynamique du fluide (Pa.s).

La perméabilité intrinsèque est caractéristique d'un solide est fonction de la grosseur des pores et de la distribution des différentes tailles, de la tortuosité des pores par rapport à un écoulement droit, et finalement de la composition du solide où les différents minéraux avec leurs surfaces spécifiques définissent l'intensité des forces d'adsorption dont découlent les frottements

I .4. DISTRIBUTION DES TEMPS DE SEJOUR (DTS)

I.4.1. Notion de temps de séjour et fonction de distribution

Dans tout ce qui suit, la notion de réacteur est prise dans un sens très large. Les méthodes que nous allons décrire s'appliquent en effet à toute portion d'espace traversée par des éléments mobiles qui y séjournent pendant des durées variables : appareils industriels, bassins fluviaux, organes d'un être vivant, etc. C'est le mérite de Danckwerts en 1953 d'avoir proposé une approche systémique de ce problème en définissant des fonctions de distribution aisément accessibles à l'expérience**. [16]**

La description qui va suivre se limite à des fluides incompressibles en écoulement laminaire et régime stationnaire permanent. Les hypothèses suivantes doivent être faites :

- le système étudié est un réacteur ouvert, possédant une entrée et une sortie à l'exclusion de toute fuite.
- le fluide est en écoulement permanent.
- l'écoulement à l'entrée et à la sortie se fait par convection forcée sans mélange en retour ni diffusion. Cette hypothèse est généralement vérifiée dans les réacteurs de type colonne de laboratoire du fait de la faible dimension des tuyaux d'entrée et de sortie.
- l'expérience doit être reproductible, c'est-à-dire que le milieu ne se modifie pas aléatoirement au cours du temps et le régime d'écoulement est stationnaire**. [13]**

Si l'on injecte à l'entrée du réacteur, au temps t = 0 et instantanément, une quantité de traceur n_0, et que l'on suit son devenir à l'aide d'un détecteur en sortie, on observe une variation de la concentration en traceur au cours du temps C(t).

La fraction de débit qui sort entre ts et ts+dts contient des molécules de traceur qui ont séjourné un temps ts dans le milieu. La courbe C(ts) est donc une représentation de la distribution des temps de séjour notée DTS (Figure .I.4).

En normant la courbe C(ts) par la surface qu'elle délimite, on obtient ainsi la distribution des temps de séjour E(ts) au sens de la théorie des distributions. On a alors la relation [**18**]:

$$E(t_s)= \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \qquad (I.9)$$

$$\text{et} \int_0^{\infty} E(t_s)\, dt_s=1 \qquad (I.10)$$

Il existe donc une **distribution des temps de séjour,** ou des temps de contact, et cette dispersion a une influence sur les performances du réacteur **[14].** Ces mesures fournissent, sur la circulation du fluide dans le réacteur, une information beaucoup plus globale que celle que fournit l'approche analytique de la mécanique des fluides**. [17]**

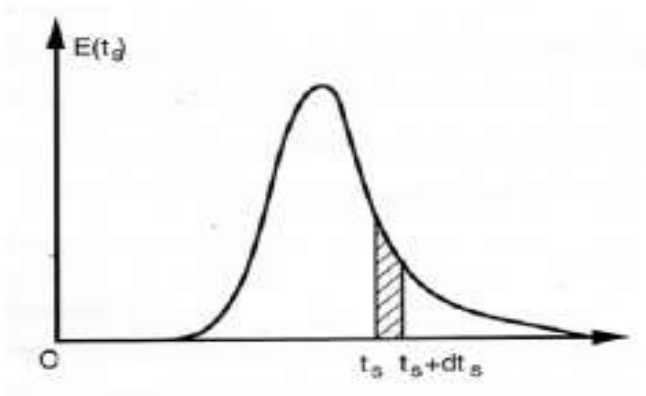


Figure .I.7 : Distribution des temps de séjour **[19]**

I .4.2.Détermination expérimentale de la DTS au moyen d'un traceur

La méthode du traceur pour déterminer la DTS consiste à associer aux molécules du fluide une proportion de molécules discernables des autres molécules par un détecteur.
Cependant ce traceur doit posséder les mêmes propriétés d'écoulement. Il ne doit en particulier pas subir d'interaction avec le milieu. La technique consiste à réaliser une perturbation de concentration sur les molécules marquées à l'entrée du système et à suivre les variations de la concentration en sortie. On distingue les types d'injection suivants :

I .4.2.1 Injection-impulsion

On obtient directement la fonction E(ts) en injectant le traceur instantanément à l'entrée du système, c'est-à-dire en imposant un signal impulsion (delta de Dirac) au système.
Expérimentalement, on réalise un tel signal de concentration en injectant une quantité n_0 de traceur pendant un temps très bref (vis-à-vis d'une estimation du temps de séjour moyen dans le système (< 1 %). Cette injection doit se faire sans perturber l'écoulement. En particulier le traceur ne doit pas être injecté en trop forte concentration pour éviter la formation de courants de convection naturelle transitoires résultant d'un écart de densité entre le traceur et le fluide.

I .4.2.2 Injection-échelon

Du fait de la sensibilité des détecteurs, il est souvent délicat de mesurer la réponse à une injection-impulsion. On est alors amené à réaliser une injection-échelon de traceur en faisant passer brusquement la concentration de ce dernier d'une valeur initiale Ci à une valeur finale Cf. Le plus souvent Ci = 0 et on pose Cf = C_0. Le passage brusque de la

concentration C_0 à la concentration nulle constitue une purge échelon et donne une courbe qui se superpose avec la précédente par simple retournement.

I .4.3.DTS des réacteurs idéaux pour une injection impulsion

- **Temps de séjours et temps de passage**

Le temps de séjour $t_s$est le temps moyen nécessaire à un élément pour passer au travers d'un réacteur de volume V_R à l'équilibre. Il est utilisé pour caractériser les réacteurs qui travaillent avec des flux continus (réacteur agité continu et réacteur à écoulement piston).Il correspond au temps moyen nécessaire à une molécule pour traverser le réacteur depuis le lieu d'introduction des réactifs jusqu'à la sortie.Mathématiquement, la définition du temps de séjour est donnée par le premier moment de la distribution de temps de séjour**[28]**

$$t_s = \int_0^\infty t.E(t) \qquad \text{(I.11)}$$

Si la densité du milieu réactionnel est constante, le temps de séjour équivaut au temps de passage τdu réacteur, défini comme suivant :

$$\tau = \frac{V_R}{Q} \qquad \text{(I.12)}$$

I .4.3.1. Réacteur piston

Dans un réacteur piston, le fluide avance en bloc sans se mélanger. La bouffée de traceur ressort donc au bout d'un temps t = τ (le temps de passage dans le réacteur piston) sous la forme d'une impulsion étroite (figure I.7). La réponse est :

$$E(t_s)=\delta(t_s - \tau) \qquad \text{(I.13)}$$

I .4.3.2.Réacteur parfaitement agité

Dans un réacteur parfaitement agité le traceur se répartit instantanément dans toute la masse, puis il est graduellement élué suivant une décroissance exponentielle. Le temps de séjour ne se marque par aucune particularité sur la courbe de réponse (figure I.7). La réponse à une injection-impulsion est :

$$E(t_s) = \frac{1}{\tau}\exp(\frac{-ts}{\tau}) \qquad \text{(I.14)}$$

I .4.3.3.Réacteur quelconque

Pour ce type de réacteur on obtient des DTS intermédiaires entre les deux cas limites précédents (figure I.7).

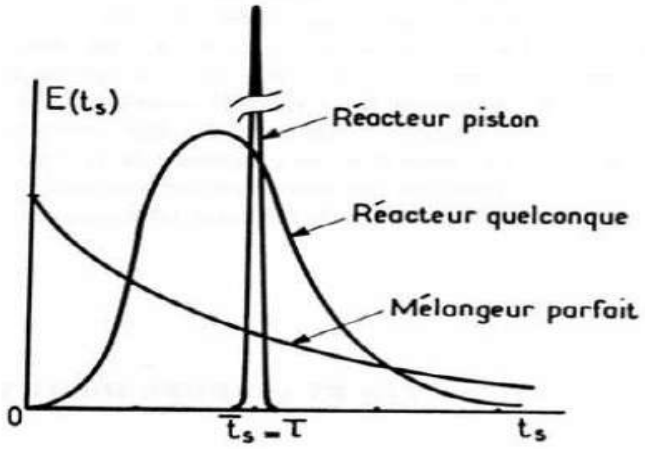


Figure. I.8 :DTS des réacteurs idéaux **[20]**

I.5. DIAGNOSTICS DE MAUVAIS FONCTIONNEMENT

Si tout le volume interne du réacteur V_R est accessible au fluide, le temps de passage τ est égal au temps de séjour moyen t_s.si non, nous constatons les défauts ou les disfonctionnements suivants.

I.5.1.Présence de zones mortes

Dans tout réacteur industriel, on peut remarquer des zones mal irriguées: Coins, chicanes, etc...). Le traceur va donc pénétrer dans ces zones par diffusion, puis il sera éliminé très lentement; On le constatera sur les concentrations de sortie de longues traînées (figure I.8). **[20].** Ceci est traduit par l'inégalité: $ts\langle \tau$

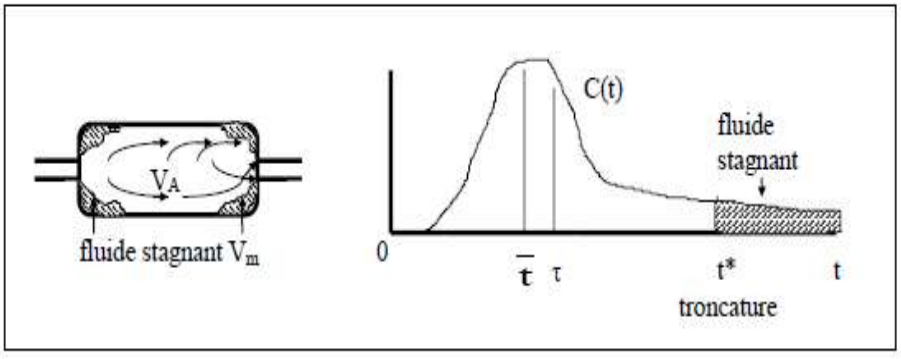


Figure. I.9 Présence de zone morte dans un réacteur**[20]**

I.5.2. Présence de court-circuit

Des passages préférentiels dans le réacteur (mauvais remplissage d'un lit fixe, position d'une déverse trop proche de l'alimentation,...) vont diviser le débit d'entrée. Le débit de court-circuit évitera une partie du réacteur et on observera alors une réponse impulsion composée de deux pics: Le premier correspondant au court-circuit et le deuxième au reste du fluide (figure I.9). Le court-circuit est exprimé par la relation : $t_s > \tau$

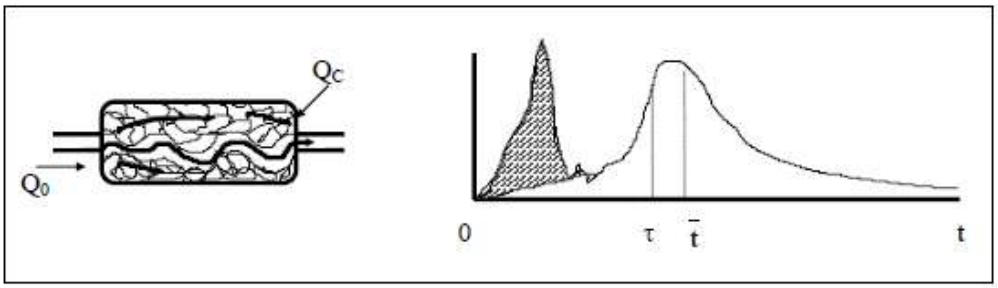


Figure. I .10 : Court-circuit dans un réacteur**[21]**

I.5.3. Présence d'un retard

Dans le cas où la réponse à l'injection présente un retard, le réacteur peut être modélisé par l'association en série:

- D'un réacteur en écoulement piston (REP)
- Du modèle équivalent obtenu en ne considérant que la partie de la courbe située après le retard.

Pour évaluer le phénomène « retard » dans un calcul de réacteur, on détermine le ratio entre le temps de séjour moyen du soluté et le temps de séjour d'une molécule d'eau, qui est appelé le facteur de retard, R. Ce facteur évalue le retard du transfert d'un solutépar rapport à une molécule d'eau :

$$R = \frac{\bar{t}_s}{\tau} \qquad \text{(I.15)}$$

Avec : R : facteur de retard

τ :temps de passage (min)

t_s : séjour moyen du traceur (min)

On distingue les cas suivants :

- R=1 : Iln'y a pas d'interactions entre le traceur et le milieu étudié. Ceci est le cas pour les traceurs non réactifs.
- R>1 : le traceur transféré en retard par rapport aux molécules d'eau. Les interactions entre le traceur et le milieu provoquent leretard du transfert de celui-ci.
- R<1 : représente un traceur transféré plus vite que les molécules d'eau. En général, les traceurs sont des solutés anioniques. Le transfert favorable du soluté s'explique par le phénomène d'exclusion anionique qui est causée par la charge négative des particules présentes dans le sol **[26]**

On voit donc que la DTS permet d'aboutir à bon nombre de renseignements sur l'écoulement au sein des réacteurs et sa prévision. La DTS est également un outil de diagnostic très précieux qui donne accès à des paramètres difficiles à mesurer par des méthodes directes**.[21]**

I.6. MODELES DESREACTEURS NON IDEAUX

L'écoulement siégeant dans les réacteurs réels peut parfois être considéré comme proche d'un écoulement en piston ou en mélange intégral (parfaitement agité). Toutefois, la complexité du système en écoulement, nécessite de faire appel à des modèles d'écoulement plus proche de la réalité.**[22]**

Il existe deux modèles représentant l'écoulement d'un fluide dans un réacteur non idéal :

- Modèle d'écoulement piston avec dispersion axiale
- Modèle des mélangeurs en cascade

I .6. 1. Modèle de dispersion axiale

Ce modèle repose sur la superposition d'un écoulement piston convectif de vitesse linéaire *u* et d'une dispersion aléatoire obéissant à la loi de Fick.Dans une colonne de longueur L, garnie par des particules de diamètre équivalent d_p, l'écoulement du fluide produit une dispersion exprimée par un coefficient de dispersion. En négligeant la dispersion radiale, la dispersion axiale de l'écoulement, exprimée par D_a est généralement estimée par un nombre adimensionnel appelé nombre de Péclet (Pe), défini par:

$$Pe = \frac{u.H}{D_a} \qquad \text{(I.16)}$$

Avec

D_a : coefficient de dispersion axiale ($m^2.s^{-1}$)

u : vitesse interstitielle ($m.s^{-1}$)

H : longueur de la colonne de sol (lit de particules) (m)

Q : débit volumique ($m^3.s^{-1}$)

Pour ce genre de modèle d'écoulement, Levenspiel et Smith **[23]**proposent comme expression analytique de la fonction E(t), la formule suivante:

$$E(t) = \left(\frac{u}{4\pi D_a}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{(H-u.t)^2}{4D_a}\right) \quad \text{(I.17)}$$

En coordonnées réduitesl'équation (15) devient :

$$\mathrm{E}(\theta) = \frac{1}{2}\left(\frac{\mathrm{Pe}}{\pi\theta}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{\mathrm{Pe}(1-\theta)^2}{4\theta}\right) \quad \text{(I.18)}$$

Avec : $\theta = \frac{t}{t_s}$

- **La varianceσ** est un paramètre qui représente l'étalement de la courbe de E(t) et indique l'hétérogénéité du fluide écoulant. La variance en fonction du temps réduit est donnée par :

$$\sigma^2(\theta) = \frac{\sigma^2}{t_s^{-2}} = \frac{2}{P_e} + \frac{8}{P_e^2} \quad \text{(I.19)}$$

Selon Coker (2001), lorsque la dispersion est très grande le deuxième terme dans l'équation (17) peut être négligé. Ainsi le nombre de Péclet s'obtient facilement par l'équation :

$$Pe = \frac{2t_s^{-2}}{\sigma^2} \quad \text{(I.20)}$$

Les valeurs de Pe sont calculées en utilisant les valeurs de la variance et du temps de séjour obtenues expérimentalement. Ensuite en introduisant les valeurs de Pe dans la formule (14), nous pouvons déterminer les valeurs du coefficient D_a.

Selon la valeur du nombre de Péclet, nous avons :

- Lorsque Pe→+∞ , le modèle est celui d'un écoulement piston parfait (Da=0).
- lorsque Pe diminue, la DTS s'affaisse et devient dissymétrique, une queue apparaît.
- Lorsque Pe→0, la forme tend vers celle de l'exponentielle décroissante d'un mélangeur D→∞.

I .6. 2. Modèle des mélangeurs en cascade

Le réacteur réel est assimilé à une cascade de ***j***réacteurs agités placés en série, ayant le même volume. La distribution des temps de séjours sous une forme adimensionnelle est définie par :

$$E(\theta) = \frac{j(j\theta)^{j-1}}{(j-1)!}\exp(-j\theta) \qquad \text{(I.21)}$$

- Pour j=*1* (*Pe = 0)* cas d'un seul réacteur agité.
- Pour j→∞, l'écoulement est proche du piston.

CHAPITRE II

MATERIELS & METHODES

Le but principal des essais réalisés au niveau duÉÉ laboratoire chimie 2 du hall technologique, est d'étudier l'impact de quelques conditions (diamètre des particules, hauteur du lit, débit d'entrée) sur le mouvement de l'eau (ou d'un soluté) à travers le lit de sol dans la colonne. Ceci afin de suivre le cheminement d'une goutte, ou d'une portion d'eau depuis son entrée dans la colonne jusqu'à sa sortie. Pour ce faire, il faut identifier cette goutte afin de la différencier des autres. Une technique simple et facile est adoptée par l'utilisation d'un traceur.

Les expériences réalisées dans cette étude sont regroupées en trois axes ; à savoir :

- Détermination des caractéristiques du sol utilisé
- Caractérisation hydrodynamique de la colonne de sol étudiée
- Détermination de la distribution des temps de séjour

II.1 MATÉRIELS ET PRODUITS UTILISÉS

II.1.1 Matériel utilisé

- Conductimètre : EC 214 ,conductivity meter HANNA instruments
- Sérié de tamis en Inox NF-X11-504 Contrelab 93584 Saint-Ouen-France- Inox ; (1.25 certification N^0 215710 , 0.63 certification $N^0$213880, 0.4certification $N^0$213703 , 0.315 certification $N^0$215698, 0.2 certification $N^0$213355, 0.15 certification $N^0$215028)
- Pompe péristaltique de marque ISMATEC, un débit max=30.1ml/min
- Four à moufle :Nabertherm-MORE THAN HEAT 30 – 3000 °C ,Made in Germany
- Étuve : Memment
- Deux colonnes en verre notées A et B de diamètre (3cm, 2cm) et de longueur (11cm, 21cm) respectivement.
- Réservoir en verre de capacité 10 L
- Tuyaux flexibles et Support métallique
- Filtre en plastique U.S.A.PATENT ,Fabriqué au Canada , 190 µm.

II.1.2 Produits utilisés

- Chlorure de Sodium (NaCl) : demasse moléculaire 58.44 g/mol, fourni par l'Allemagne

Eau distillée de conductivité électrique égale à 22 ($\mu S.cm^{-1}$)

II.2Caractérisation physicochimique du sable utilisé

Au cours de cette étude, nous avons utilisé du sable provenant d'Oued Souf, une localité située à environ 650 km ausud-est de la capitale Alger.
Le sable sec de couleur jeune a été tamisé suivant la norme AFNOR X 31-101 (AFNOR, 1994), puis conservé dans des sacs en plastiques.

II.2.1 Détermination de la masse volumique

La masse volumique absolue du sol a été déterminée par la méthode du pycnomètre, qui consiste à introduire une masse connue de sol (m_s) dans une éprouvette graduée, qui sera remplit par la suite avec de l'eau jusqu'à un certain volume. Le mélange est laissé au repos pendant une trentaine de minutes. La masse totale pesée est la somme de : la masse du solide, la masse de l'eau dans les pores et celles en excès. Et le volume total du solide immergé dans l'eau est la somme du volume occupé par le solide et celui occupé par l'eau dans les pores.

La masse volumique du sol ρ_s est calculée par l'équation suivante :

$$\rho_S = \frac{m_S}{V_S} \quad \text{(II.1)}$$

$$V_s = V_t - V_I \quad \text{(II.2)}$$

Avec :

ρ_s : masse volumique du sol ($kg.m^{-3}$)
m_s : masse du sable (kg)
v_s : volume du sable (m^{-3})
v_t : volume total du mélange [volume d'eau+volume du sable]
v_I: volume initiale de l'eau (m^{-3})

II.2.2 Détermination de la porositédu sol

Une colonne de sable généralement assimilée à un milieu poreux non consolidé est souvent caractérisée par l'espace interarticulaire et le vide qui existe entre les particules du solide ; à savoir : la porosité ε. Sachant que l'écoulement d'un liquide dans une colonne remplie dépend fortement de la porosité du lit traversé**. [25]**

La porosité du lit (ε) dans la colonne est calculée à partir de l'expression suivante :

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{m}{\rho_s.\mathrm{h}.\Phi}\right) \quad \text{(II.3)}$$

Avec

m : masse du sable dans la colonne (kg) É

Φ : section droite de la colonne (m^2)

ρs : masse volumique du sol ($kg.m^{-3}$)

h:Hauteur du lit de sol dans l'éprouvette (m)

II.2.3 Taux d'humidité

L'humidité du sable est déterminée selon la norme NF X 31-102 (AFNOR, 1994).La méthode la plus courante de mesure du taux d'humidité des matériaux est le séchage dans une étuve. Il s'agit simplement de peser l'échantillon avant et après le séchageà une température maintenue à 105°Cjusqu'au point où son poids devient constant. Les principales causes d'erreurs lorsqu'on utilise la méthode de séchage dans l'étuve sont : l'élimination incomplète de l'eau,et l'humidité réabsorbée pendant le pesage**.[27]**.

Le taux d'humidité est calculé par la formule suivante :

$$Hu = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \quad \text{(II.4)}$$

Avec

Hu: taux d'humidité (g d'eau/ 100 g de sol humide) exprimé en %.

m_0 : masse de l'échantillon avant séchage (g)

m_1 : masse de l'échantillon après séchage (g)

II.2.4 Teneur en matière organique MO

La teneur en matière organique (MO) dans le sable est déterminée selon la norme NF X 31-071 (AFNOR, 1994). Un échantillon de sable, préalablement séché à 105 °C pendant une heure est introduit dans un four à 550 °C pendant deux heures. La teneur en matière organique est déterminée comme suit :

$$MO = \frac{m_1 - m_2}{m_0} \times 100 \quad \text{(II.5)}$$

Avec

m_0 : masse de l'échantillon avant séchage (g)

m_1 : masse de l'échantillon après séchage par l'étuve (g)

m_2 : masse de l'échantillon après calcination (g)

MO : teneur en matière organique exprimée en %.

Le sol est classé selon la valeur de MO en :

- MO > 30 % : Sol très organique :
- 3< MO< 30 : Sol moyennement organique
- MO< 3 : Sol non organique

II.3. Analyse granulométrique

II.3.1 Mode opératoire

L'analyse granulométrique du sable a été effectuée par tamisage. Bien que cette méthode soit l'une des plus anciennes, c'est aussi l'une des méthodes les plus utilisées. Cette méthode nous a permet de séparer les particules en catégories ou classes selon leur grosseur, sans tenir compte de leurs autres propriétés à savoir densité, forme, propriétés de surface, etc. **[23]**



Figure II.1 :série de tamis et exemple de tamis

L'analyse granulométrique du sable consiste à faire passer une masse bien définie de sol à travers une série de tamis imbriqués l'un sur l'autre. L'objectif de cette méthode est de déterminer les dimensions des grains par tamisage à sec. Les étapes suivies sont :

1. Commencer par dresser la colonne des tamis.Les ouvertures des tamis doivent être croissantes de bas en haut. Les tamis à prendre en compte sont (en mm) :**5- 4- 3.5- 2- 1.25- 0.63- 0.4- 0.315- 0.2- 0.16- 0.1- 0.08**
2. N'oubliez pas le fond et le couvercle des tamis.
3. Prendre un kilogramme de sable.
4. Verser le sable sur le tamis supérieur puis placer le tamis supérieur sur la colonne.
5. Procéder à l'agitation pendant 5 min manuellement, Nous pouvons aussi procéder à une agitation mécanique de la colonne des tamis en utilisant le vibreur mécanique. Dans notre cas, nous étions obligés de diviser la colonne en deux :commençant par l'agitation de la moitié supérieure de la batterie de tamis. Ce que nous obtenons dans le fond de cette série est versé dans le tamis supérieur de la deuxième série et ainsi de suite.
6. Procéder à la pesée des refus cumulésdes tamis en commençant par le tamis supérieur.
7. Les masse des tamisas et des refus sont reportées à la masse initiale du sol. Dresser un tableau contenant les informations nécessaires (diamètre de maille, Refus cumulé % et Refus cumulé%.)
8. L'essai de granulométrie par tamisage est valide quand la somme des refus et des tamisas soit inférieure à 2% de la masse de l'échantillon utilisé.

II.3.2 Détermination de la classe du sable

Pour déterminer la classe d'un sol quelconqueon doit calculer le module de finesse noté MF selon la norme Française [NFP 18-540] sa formule est donnée ci- après:**[24]**

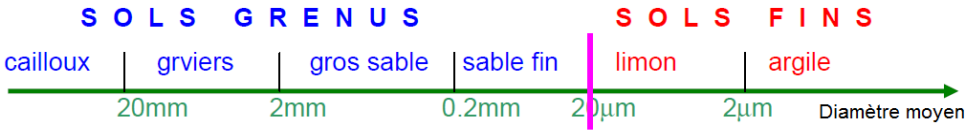
$$MF = \frac{1}{100} \times \sum \text{refus cumulé en \% des tamis } \{5 + 1.25 + 0.315 + 0.63 + 0.16\} \quad \text{(II.6)}$$

- Si 1.8<MF< 2.2 : le sable est à majorité de grains fins,
- Si 2.2 < MF <2.8 : c'est un sable mélangé,
- Si 2.8< MF <3.3 : le sable est un peu grossier.

II.3.3 Détermination du diamètre moyen des particules

Le diamètre moyen (D_m) des particules de sable correspondant au $d_{50\%}$.Il est déterminé à partir de la courbe de distribution granulométrique au point d'intersection entre les courbes refus cumulé et tamisa cumulé.

En première approximation, on peut adopter, lorsque les dimensions des grains sont peu différentes, la classification suivante selon le diamètre moyen des particules comme le montre le schéma suivant :



II.3.4Détermination du coefficient d'uniformité et du coefficient de courbure[26]

La granulométrie d'un sol peut être caractérisée par le coefficient d'uniformité (coefficient de Hazen), et le coefficient de courbure.. Le coefficient d'uniformité, C_u, et le coefficient de courbure, C_c, sont issus de l'exploitation de la courbe de distribution granulométrique. Ils confirment l'homogénéité ou l'hétérogénéitédes particules solides.

Lorsque certaines conditions sur C_u et C_c sont satisfaites, plusieurs informations peuvent être constatées. Concernant le coefficient d'uniformité C_u, nous distinguons les deux cas suivants :

- Si $C_u < 2$: la granulométrie est dite uniforme (granulométrie proche ou serrée)
- Si $C_u > 2$: la granulométrie est dite étalée (granulométrie variée)

Cependant, pour le coefficient de courbure on constate que :

- Si $1 \leq C_c \leq 3$) : le sol est dit bien gradué c'est à dire que sa granulométrie est bien étalée, sans prédominance d'une fraction particulière.
- Et si $3 < C_c < 1$, sa granulométrie est discontinue avec prédominance d'une fraction particulière, le sol est dit mal gradué (il y a prédominance d'une fraction particulière Par rapport à autres).

Ces deux coefficientssont déterminés selon les relations suivantes**:**

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad \text{(II.7)}$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10}.D_{60}} \quad \text{(II.8)}$$

Où :D_{10}, D_{30}, D_{60} représentent respectivement les diamètres du tamis correspondant à10 %, 30 %, et 60 % de tamisa (particules passantes)qui sont lues de la courbede distribution granulométrique.

II.3.5. Microscopie des particules solides de sol

La microscopie d'un échantillon de sol peut nous informer sur la forme géométrique des particules de sol. Elle est effectuée en utilisant un Microscope optique Micros AUSTRIA, (Anti-Mould), équipé d'un logiciel INFINITY Lite.Les particules sont classées selon leur forme en : arrondi, semi arrondi, angulaire et semi angulaire.

II.4PROCEDURE EXPÉRIMENTALE

II.4.1Montage expérimental

Le dispositif expérimental utilisé dans cette étude est présenté sur la figure II.2. Il comporte deux parties essentielles : La première est constituée du réservoir d'alimentationen verre de capacité de 10 L, raccordé avec une pompe de marque (ISMATEC) à débit maximal 30.1 ml/min, qui maintient le débit constant. Au moyen d'un tuyau flexible de diamètre d= 5 mm, cette pompe permet de faire passer l'eau du réservoir vers la colonne qui est la deuxième partie de l'installation.



C

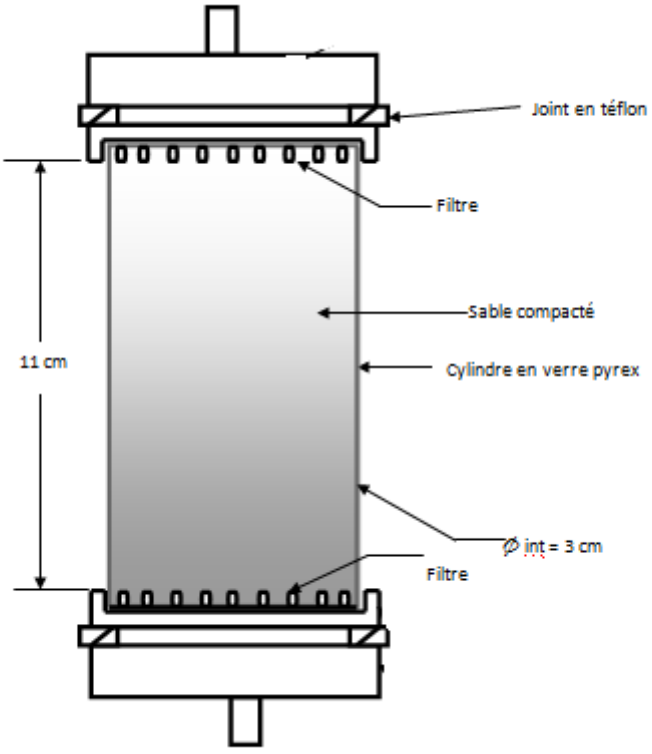
Figure II.2 : Installation expérimentale

La seconde partie du dispositif est la colonne de sable (figure II.3). Dans cette étude nous avons utilisé deux types de colonnes en verre désignée par A et B de diamètre différent dont les dimensions sont présentées dans le Tableau II.1.

Tableau II.1 : Dimensions des deux colonnes utilisées

	Diamètre	Longueur
Colonne A	3cm	11
Colonne B	2cm	21

La colonne est constituée d'un cylindre en verre Pyrex Desfiltres en plastique de diamètre très faible sont placées à chaque extrémité de la colonne en permettant ainsi une distribution uniforme de la solution dans le lit et d'éviter l'entraînement des particules hors de la colonne. L'entrée et la sortie de la colonne sont reliées aux bac d'alimentation et d'échantillonnage en utilisant des tuyaux flexibles.



FigureII.3 : Schéma illustratif de la colonne de sable

II.4.2 Mise en marche du dispositif expérimental

Dans cette étude les deux types de colonnes A et B que nous avons utilisées sont soumis aux mêmes étapes. Au début de chaque essai, une compresse de la gazeest placée à l'entrée de la colonne et au-dessus de laquelle un filtre en plastiquede diamètre 190 µmest inséré. Ensuite, on met une quantité bien définie de sable dans la colonne pour avoir une hauteur voulue. Au-dessus du sable on placeun filtre en plastique suivi d'une compresse de la gaze. Lorsque l'eau (solution) s'écoulesous un débit d'entrée préalablement fixé par la pompe à travers la colonne, on récupère le liquide sortant du sommet de la colonne par un flexible placé juste à la sortie de la colonne.

La collecte se fait dans un bécher placé dans un bécher dans lequel est placé la cellule du conductimètre pour l'essai de la distribution du temps de séjour et dans une éprouvette pour l'essai de détermination du débit de sortieune compresse de la gaze est placée à l'entrée de la colonne et au-dessus de laquelle un filtre en plastique

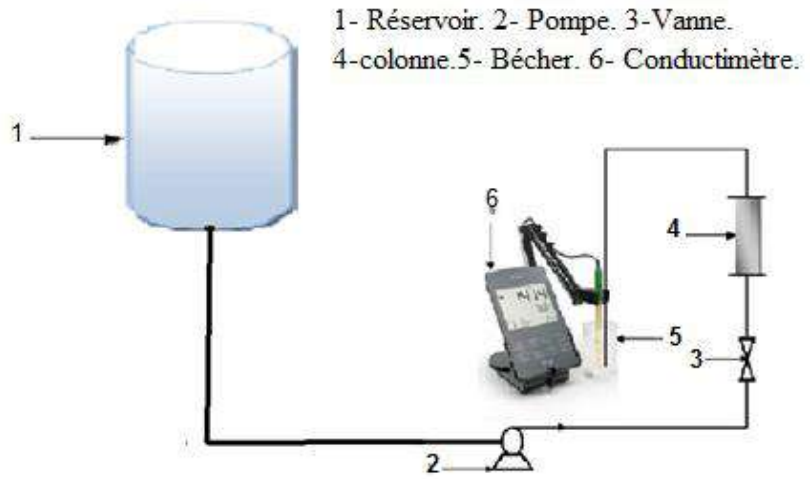


Figure II.4 : Schéma du dispositif expérimental

II.5 ETUDE HYDRODYNAMIQUE

II.5.1 Mesure du débit de sortie Q_{sortie}

La mesure du volume d'eau dans chaque échantillon récupéré à la sortie de la colonne pendant un temps bien défini nous permet dedéterminer le débit de sortie en fonction du temps t. La relation volume écoulé – temps d'écoulementest illustrée par des courbes.

II.5.2 Mesure de la conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique K_H dans le lit de sable dans la colonne est une propriété physique très importante. Elle est le résultat des forces de frottement de l'eau dans les pores du sol, forces résistant à l'écoulement. Elle s'exprime empiriquement par la relation suivante **:[26]**

$$Q = K_H . A \frac{\Delta h}{H} \quad \text{(II.9)}$$

Avec

Q : débit d'écoulement d'entrée (m^3/s)

K_H : conductivité hydraulique du milieu poreux exprimé en (m/s).

A : surface de la section de la colonne (m^2)

H : hauteur du lit solide (m).

Δh : Différence entre les niveaux des surfaces d'eau en amont et en aval de l'échantillon solide (m)

II.5. 3Perméabilité intrinsèque

La perméabilité intrinsèque du milieu poreux notée ***k***est déterminéepar la relation suivante **::[26]**

$$K_H = \frac{k.\rho.g}{\mu} \quad \text{(II.10)}$$

Avec

k : perméabilité intrinsèque du milieu poreux (m^2)

ρ : masse volumique du liquide (kg/m^3) ;

g : accélération de la pesanteur (g = *9,81 kg.m*s^{-2}) ;

μ : viscosité dynamique du liquide (Pa.s).

III.5.4 Détermination du régime d'écoulement (nombre de Reynolds)

Le nombre de Reynolds du système en écoulement est calculé par la relation suivante :

$$Re = \frac{d_S.U.\rho}{\mu} \quad \text{(II.11)}$$

ds : représente le diamètre des particules de sol (m)

μ : viscosité de l'eau, μ=1,002.10^{-3} Pa.s (à 20°C)

$\rho = 1000$ kg.m^{-3}

U = vitesse de l'écoulement(m.s^{-1})

II.6DISTRIBUTION DES TEMPS DE SÉJOUR (DTS)

La détermination de la DTS du réacteur (colonne de sable) étudié a été effectuée par la méthode des traceurs par une impulsion de Dirac. Elle consiste à injecter, dans le réacteur étudié, une substancechimique dont on détecte la présence ou dont on mesure la concentration en fonction du temps. Il est donc bien évident que le choix du traceur est crucial puisqu'il doit respecter une contrainte essentielle : le traceur doit être neutre, non réactif, non volatil et non polluant par rapport à l'environnement dans lequel on l'utilise et au phénomène étudié.

On injecte 2 ml de solution NaCl de concentration 0.2 mol/l par une seringue à l'entrée de la colonne. La prise des valeurs de la conductivité à la sortie de la colonne commence dès l'injection du traceur (t=0). À la sortie de la colonne, le conductimètre indique les valeurs de la conductivité électrique de la solution NaClen présence du sable. En tenant compte de la présence de substances minérales dans le sable, les valeurs de la conductivité correspondent à la somme des conductivités électriques du traceur et des éléments minéraux présents dans le sable.

L'eau introduite dans la colonne durant les essais contient une concentration connue de Chlorure de sodium (NaCl). En recueillant l'eau qui s'écoule à travers le lit de sol et sort du sommet de la colonne. La concentration en traceur est déterminée par le baie d'une courbe d'étalonnage conductivité-concentration, et en portant ces résultats sur un graphique (courbe de percée ou de fuite: C/C_o en fonction du temps), il est possible de déterminer la DTS de ce réacteur.

II.6.1 Courbe d'étalonnageconductivité-concentration du traceur

La courbe d'étalonnage de la conductivité électrique duchlorure de sodiumNaCl, utilisé comme traceur, a été élaborée en suivant l'évolution de la conductivité de la solution en fonction de la concentration en NaCl ($C_{traceur}$). La régression linéaire par EXCEL, a donnée l'équation d'une droite qui passe par l'origine avec le paramètre statistique R^2.

II.6.2 Courbes de percée

L'eau introduite dans la colonne durant les essais contient une concentration connue de Chlorure de sodium (NaCl). En recueillant l'eau qui s'écoule à travers le lit de sol et sort du sommet de la colonne. La concentration en traceur déterminée par moyen d'une courbe d'étalonnage conductivité-concentration, et en portant ces résultats sur un graphique courbe de percée ou de fuite: C/C_o en fonction du temps, il est possible de déterminer la DTS de ce réacteur, ainsi que les paramètres qui lui correspondent.

II.6.3. Détermination du temps de séjour et de la variance

Le temps de séjour moyen $\bar{t}_s$ et la variance (σ^2) ainsi que le temps de passage sont calculés à partir des équations données ci-dessous, avec un intervalle de temps constant Δt =30 sec. Les calculs sont effectués en utilisant les équations suivantes **:[28]**

$$\overline{t_s} = \frac{\sum_0^\infty t.C(t)}{\sum_0^\infty C(t)} \quad \text{(II.12)}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_0^\infty t^2.C(t)}{\sum_0^\infty C(t)} - \overline{t_s^2} \quad \text{(II.13)}$$

$$\tau = \frac{\varepsilon.V_{colonne}}{Q} \quad \text{(II.14)}$$

Avec :

C(t) : concentration du traceur au temps t (mol/l)

$V_{colonne}$: volume de la colonne remplie de sol (l)

Q : débit d'entrée du liquide (l/min)

t : temps de mesure (min)

$\bar{t}_s$: temps de séjour moyen (min)

σ^2: variance (min^2)

τ : temps de passage (min)

ε : porosité du sol

II.6.4 Bilan de masse BM

En régime permanent, Qentrée = Qsortie. Le ratio entre la masse injectée en entrée et celle récupérée en sortie de colonne est appelé le bilan de masse du soluté, BM. Il est un

paramètre important pour estimer la qualité du soluté (si le traceur est inert ou pas) et la précision de l'essai (si BM=1 ou BM<1). Ce paramètre est calculé comme suit :

$$BM = \frac{M_{sortie}}{M_{entrée}} = \frac{M_{exp}}{M_{calculé}} \quad \text{(II.15)}$$

La masse du traceur injectée à l'entrée de la colonne, correspond à la masse contenue dans 2mL de solution concentrée de NaCl qui est réellement introduite dans le réacteur. La valeur de cette masse, notée $m_{calculée,}$ est obtenue en effectuant le produit de la pureté, la densité et le volume injecté.

$$M_{calculé} = \text{Volume injecté du traceur} * C_0 \quad \text{(II.16)}$$

Cependant, en utilisant les résultats de la DTS, nous pouvons calculer la quantité du traceur qui quitte effectivement le réacteur en appliquant un débit bien défini. Cette quantité appelée masse expérimentale du traceur notée m_{exp}, est déterminée par**.[23]**

$$\mu_0 = \int_0^{+\infty} \frac{C(t)}{c_0} dt$$

$$m_{exp} = Q_{sortie}.C_0.\mu_0 \quad \text{(II.17)}$$

La différence entre la masse réelle et expérimentale exprime la perte de masse, ou le BMdu traceur dans la matrice solide. Il peut d'une part, justifier le bon choix du traceur, et d'une autre part prouver la validité du modèle obtenu pour le traceur afin de décrire le comportement des solutés dans ce réacteur.La capacité conservative du soluté est évaluée à travers la valeur du bilan de masse BM :

- BM=1 représente que tout le soluté injecté en entrée est recueilli en sortie. Les interactions entre le soluté et le milieu au cours de son transfert sont entièrement réversibles.
- BM<1 représente qu'il y a une partie de soluté qui reste dans le milieu. Cette rétention du soluté est provoquée par des interactions irréversibles (précipitation, évaporation, dégradation, réaction chimique…).
- BM>1 représente un relargage du soluté. Dans ce cas, il y a une quantité du soluté existant dans le milieu qui est dissous au cours du transfert.

Dans cette étude, le soluté choisi est non réactif. Alors, le bilan de masse doit être proche de1. Si cette condition n'est pas satisfaite, l'essai doit être revérifié et la non-réactivité du traceur réévaluée.**[26]**

II.6.5Détermination du nombre de Péclet (Pe), et du coefficient de dispersion axiale

Les valeurs du nombre de Peclet (Pe), sont calculées en utilisant les valeurs de la variance et du temps de séjour obtenues expérimentalement.

$$Pe = \frac{2\overline{t_s^2}}{\sigma^2} \qquad \text{(III.18)}$$

Ensuite en introduisant les valeurs de Pe dans la formule (II.17), nous pouvons déterminer les valeurs du coefficient de dispersion axiales D_a.

Le nombre de Péclet (Pe), défini par :

$$Pe = \frac{U.H}{D_a} \qquad \text{(II.19)}$$

Da : Coefficient de dispersion axiale de l'écoulement, exprimée par ($m^2.s^{-1}$)

II.7. PARAMETRES OPERATOIRES

Le sol étudié a été fractionné à l'aide des tamis en trois lots de diamètres ds différents. L'étude hydrodynamique ainsi que la détermination de la DTS ont été réalisées sur deux colonnes cylindriques (A et B), de différents diamètres (d_A=3cm,d_B=2cm), sous diverses conditions opératoires (Tableau II.3).

Tableau II.3 : Paramètres opératoires

Colonne (diamètre)	Hauteurs du lit (cm)	Diamètresdesable (mm)	Débit d'entrée (l/min)
A (3cm), B(2cm)	H1= 2; H2= 3 ; H3= 4	ds=0.4 ;ds=0.63 ; ds=1.25	Q=0.03; Q= 2.4

CHAPITRE III

RESULTATS & DISCUSSIONS

Les résultats obtenus au cours de cette étude sont regroupés en trois parties distinctes :

- Caractéristiques et propriétés physicochimiques du sable utilisé
- Caractéristiques hydrodynamiques de la colonne de sol
- Distribution des temps de séjour (DTS) du réacteur étudié (de la colonne de sol).

III.1 PROPRIÉTÉS PHYSICOCHIMIQUES DU SABLE

Les résultats des mesures et analyse effectuées ont donnés les résultats présentés dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Propriétés du sol utilisé

Masse volumique ρ (kg.m^{-3})	Humidité (%)	Matière Organique MO (%)	Porosité
2.5 10^{-3}	0.4	0.2	0.32

Nous constatons que le sol est de nature inorganique vue la teneur très faible en matière organique (valeur MO très petite).

III.2 PROPRIETES GRANULOMETRIQUES DU SOL

III.2.1 Classe granulométrique du sol

La classe granulométrique du sol utilisé est défini par la valeur du module de finesse MF=1.92. Selon la valeur de MF comprise entre 1.8 et 2.2, le sable étudié est à majorité de grains fins, ce qui justifié l'utilisation de filtre de diamètre très petit pour éviter le passage des fines particules.

III.2.2 Diamètre moyen, coefficient d'uniformité et coefficient de courbure

Le diamètre moyen Dm des particules de sable correspondant au $d_{50\%}$ est déterminé à partir de la courbe de distribution granulométrique présentée dans la figure III.1. où, le diamètre des mailles des tamis est défini par d_p.

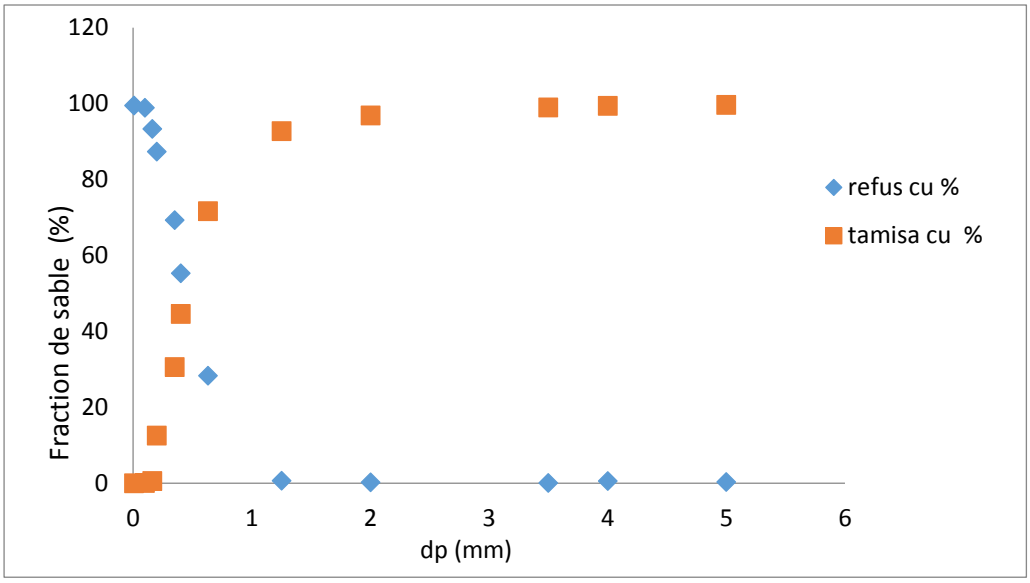


Figure III.1: Distribution granulométrique des particules de sable

Le diamètre moyen des particules de sol étudié déterminée par l'intersection entre le refus cumulé et le tamisa cumulé est égale à D_m= 0.4 mm. Cette valeur montre bien que le sol utilisé est un mélange de sable gros et fin.

L'exploitation des valeurs de l'analyse granulométrique effectuée sur le sol, a donné les résultats présentés dans le tableau III.2.

Tableau III.2 : Diamètre moyen, coefficient d'uniformité et coefficient de courbure

D_m (mm)	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	Cu [-]	Cc [-]
0.4	0.2	0.31	0.48	2.4	1.001

Selon la valeur obtenue pour le coefficient d'uniformité (C_u =2.4 > 2), on constate que le sol est à granulométrie étalée, qui est bien variée.

Cependant, selon la valeur du coefficient de courbure de la courbe distribution granulométrique (C_c = 1.001), on déduit que : que le sol est à granulométrie étalée, sans prédominance d'une fraction particulière.

III.2.3. Microscopie des particules solides de sol

La microscopie d'un échantillon de sol a donné les formes géométriques présentées sur la figure III.2.

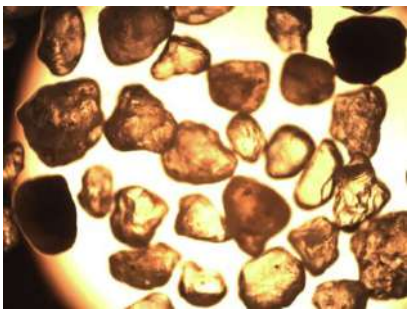


Figure III.2 : Image des particules de sables (4x0.1)

On peut en déduire que la forme géométrique des particules de sol est arrondi à semi arrondi. Et que les particules n'ont pas une forme géométrique identique, ce qui est précédemment démontré par les valeur de C_u et C_C.

III.3 RÉSULTATS DE L'ETUDE HYDRODYNAMIQUE

III.3.1 Débit de sortie Q_{sortie}

La mesure du volume d'eau dans chaque échantillon récupéré à la sortie de la colonne pendant un temps bien défini nous a permet de déterminer le débit de sortie en fonction du temps t. La relation volume écoulé –temps d'écoulement pour les deux colonnes A et B est illustrée sur les figures III.3, III.4.

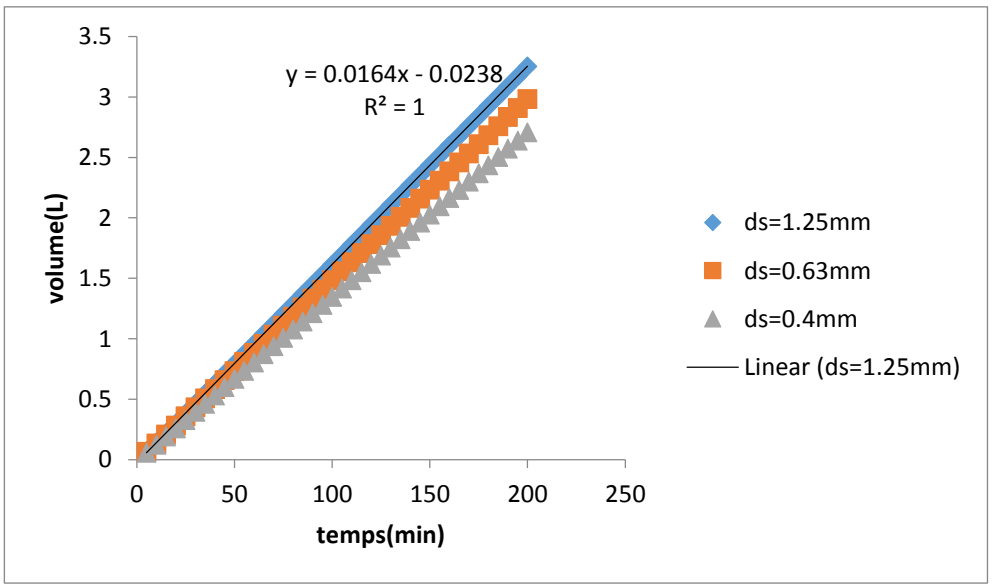


Figure III.3 : Stationnarité du débit de sortie des essais en colonne de sable A.

(Q= 0.03 l/min, H_1=2 cm)

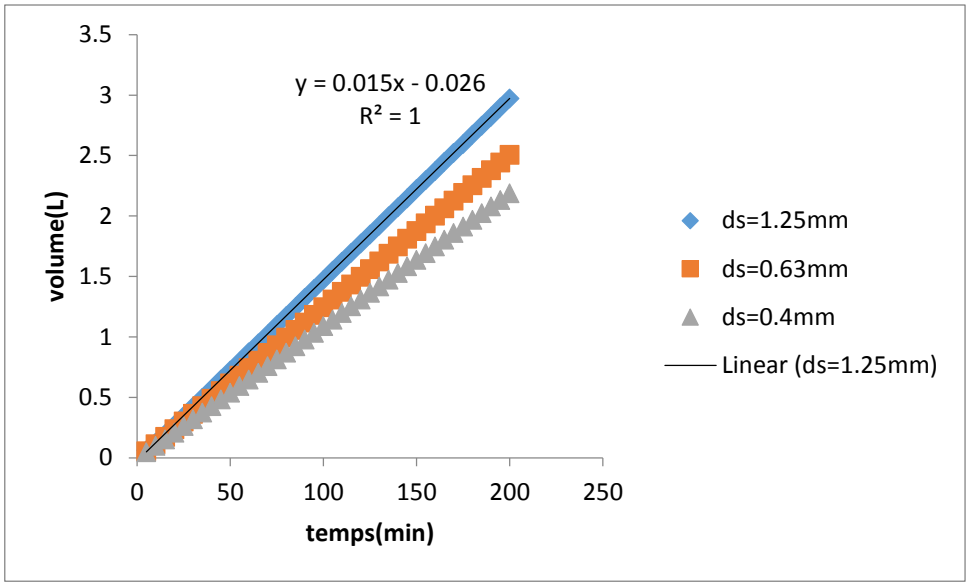


Figure III.4 : Stationnarité du débit de sortie des essais en colonne de sable B, (Q= 0.03 l/min, H_1=2 cm)

La figure.III.3 montre les .profils du débit en sortie en fonction de temps (Q= 0.03 l/min, H_3=4 cm) avec l'eau pure à différentes diamètre des particules (ds=1.25mm,ds=0.63mm, ds=0.4mm). on constate que toutes les courbes sont des droites linéaire. Ce qui signifie que le débit de sortie est constant (stationnaire) tout au long des essais réalisés. Cependant, pour les différents diamètres de sable, les droites obtenues ont des pentes différentes, qui varient proportionnellement avec le diamètre des particules solides. Ceci peut être expliqué par le faite que lorsqu'on diminue la taille des particules, les particules sont plus petites, et par la suite le compactage est plus grand, ce qui rend difficile le passage du liquide à travers le vide interarticulaire.

En comparant les figures III. 3 et III.4, nous constatons que le volume de sortie évolue linéairement en fonction du temps pour les deux colonnes A et B dont les diamètres sont 3cm et 2cm respectivement. De mêmes, pour les autres paramètres (H, ds, colonne A et B), des résultats identiques obtenus concernant le débit de sortie sont présentés dans l'annexe A1.

III.3.2 Détermination du nombre de Reynolds

Après les calculs effectués sur les deux colonnes, les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau III.3.

Tableau.III.3 : Valeur du nombre de Reynolds pour les colonnes A et B (Q= 0.03 l/min , H1=2cm)

ds (mm)		1.25	0.63	0.4
Re	Colonne A	0.88	0.446	0.283
	Colonne B	2	1	0.63

Selon le Tableau III.3, le régime d'écoulement dans la colonne de sol pour les trois dimensions du sable étudiés est pratiquement laminaire (Re << 10) **[29]** . De ce fait, l'utilisation de la loi de Darcy est expérimentalement justifiée.

III.3.3 Conductivité hydraulique et perméabilité intrinsèque

Les valeurs de la conductivité hydraulique (K_H) ainsi que la perméabilité intrinsèque du lit de sol (*k*) sont données dans le tableau ci-après.

Tableau.III.4 : Conductivité hydraulique K_H et perméabilité intrinsèque *k* (colonne A , Q= 0.03 l/min, ds =1.25mm).

H (cm)	2	3	4
K_H (m/s)	$4.17.10^{-5}$	$6.26.10^{-5}$	$8.35.10^{-5}$
k (m^2)	$4.25.10^{-12}$	$6.39.10^{-12}$	$8.52.10^{-12}$

Tableau.III.5 : Conductivité hydraulique K_H et perméabilité intrinsèque *k* (colonne B , Q= 2.4 l/min, ds=1.25mm)

H (cm)	2	3	4
K_H (m/s)	$9.98.10^{-5}$	$1.49.10^{-4}$	$1.99.10^{-4}$
k (m^2)	$1.019.10^{-11}$	$1.52.10^{-11}$	$2.03.10^{-11}$

D'après les deux tableaux précédents, le système étudié (milieu poreux- eau) a une conductivité hydraulique qui varie entre 10^{-4} et 10^{-5}. Selon De Marsily **[26]** ces valeurs sont caractéristiques des sables non argileux et des graviers dont ce paramètre varie entre 10^{-2} et 10^{-5} $m.s^{-1.}$. de plus, la colonne A (la plus large) procure une perméabilité plus faible pour le milieux poreux comparée à la colonne B de section plus petite.

Ainsi, le lit de particules de sable dans les deux colonnes et pour les différentes conditions choisis est caractérisé par une très faible perméabilité de l'ordre de 10^{-12} à 10^{-11}, ce qui signifie que l'espace porale disponible dans ce milieu poreux est très petit.

III.4. DISTRIBUTION DES TEMPS DE SEJOUR

II.4.1 Courbe d'étalonnage conductivité-concentration du traceur

La courbe d'étalonnage de la conductivité électrique du chlorure de sodium NaCl, utilisé comme traceur est représentée sur la figure III. 5.

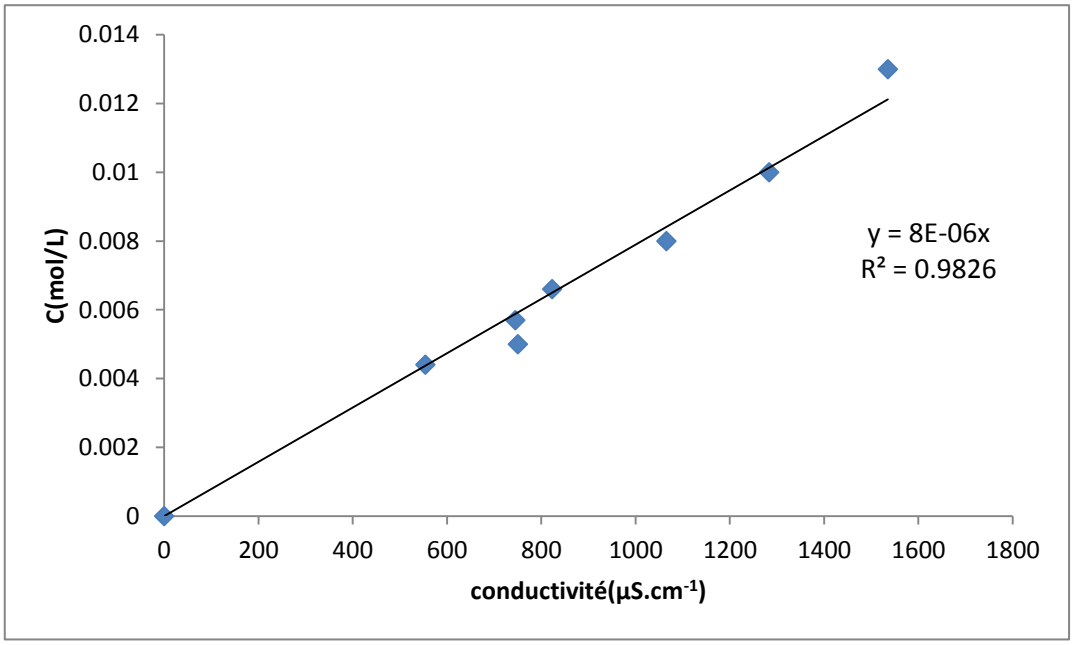
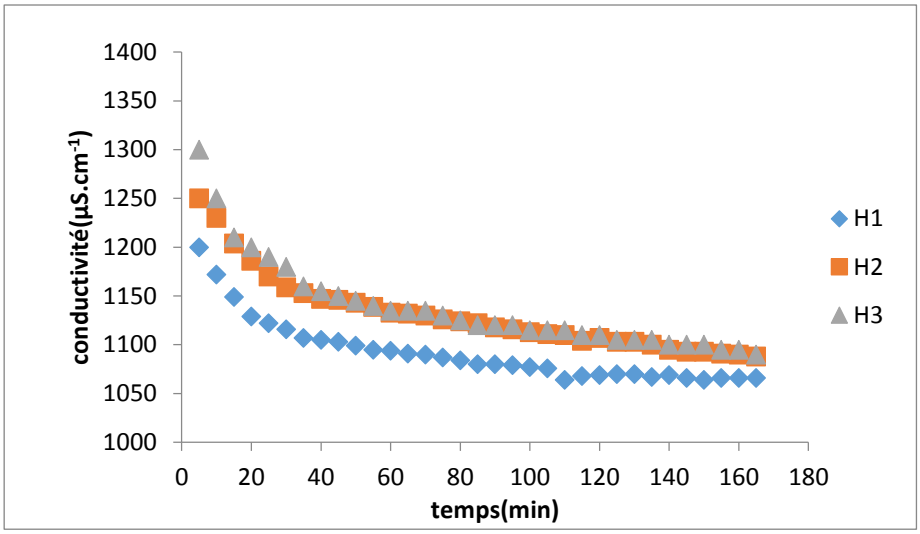


Figure III.5: Courbe d'étalonnage de la conductivité électrique du traceur

La régression linéaire par EXCEL des résultats obtenus a donnée l'équation d'une droite qui passe par l'origine avec un coefficient de corrélation R^2 égale à 0,9826.

III.4.2 Conductivité électrique en l'absence du traceur

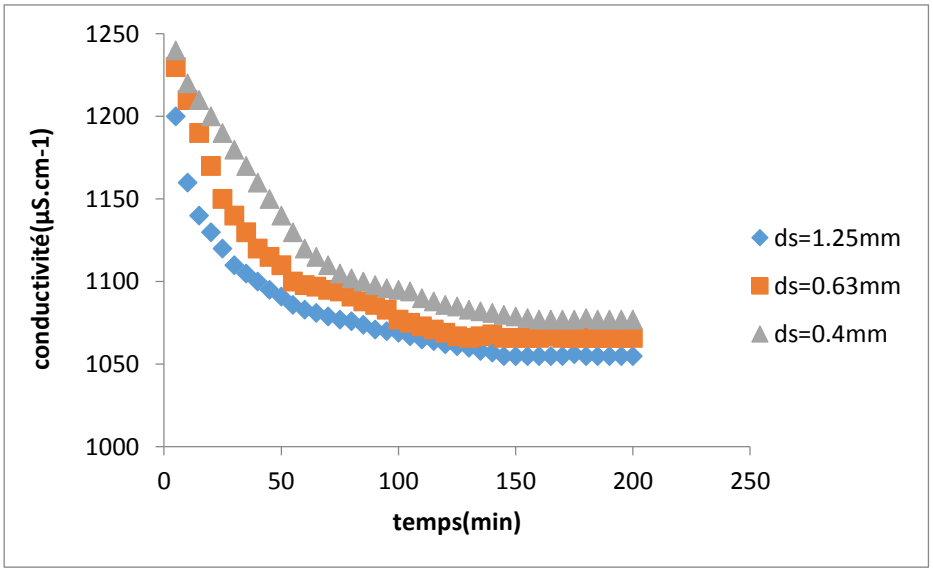
La conductivité électrique de l'eau sortant de la colonne remplie de sol a été mesuré en fonction du temps pour les deux colonnes A et B sous des conditions opératoires différentes. Les résultats sont représentés dans les figures (III.6), (III.7) et (III.8).



Figures III.6 : Conductivité électrique de la colonne A
(Q= 0.03 l/min, ds=1.25mm)

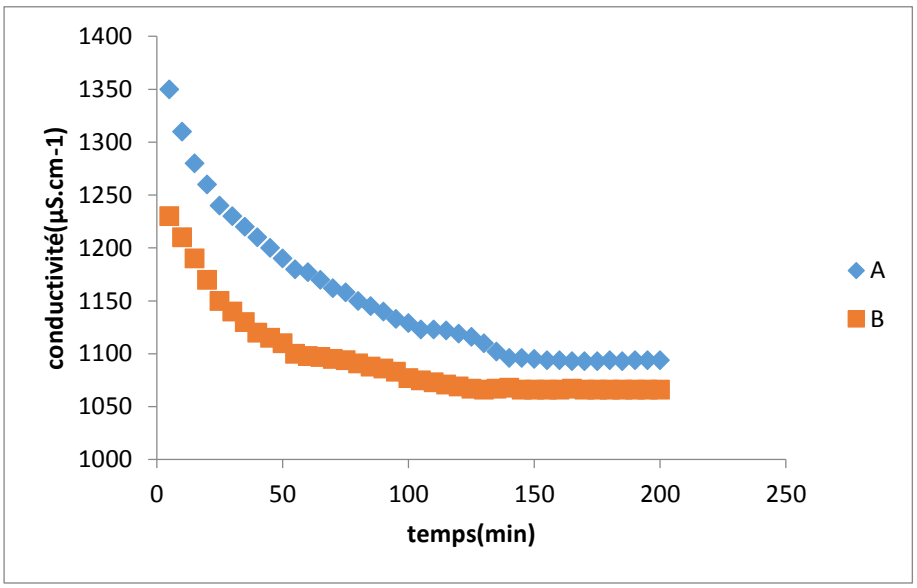
Les figure III.6 et III.7 montrent les profils de conductivité électrique de l'eau sans traceur en fonction du temps pour un sol de différentes hauteurs (H1=2cm, H2=3cm, H3=4cm) et différentes taille (ds=1.25mm, ds=0.63mm, ds=0.4mm) respectivement.

On constat que la conductivité électrique de l'eau s'écoulant de la colonne de sable diminue progressivement en fonction du temps, pour atteindre une valeur presque constante.



Figures III.7 : Conductivité électrique de la colonne A
(Q= 0.03 l/min, H1 =2cm)

Lorsque la hauteur du lit de sable augmente, la conductivité électrique augmente. Ceci est logique par ce que la quantité du sable est proportionnelle à la hauteur du lit. Vue, la nature inorganique du sol prouvée précédemment, l'eau fait relarguée les minéraux présents dans le sol, ce qui va augmenter la conductivité électrique.



Figures III.8 : Conductivité électrique de la colonne A et B
(Q= 0.03 l/min, H1 =2cm, ds= 1.25mm)

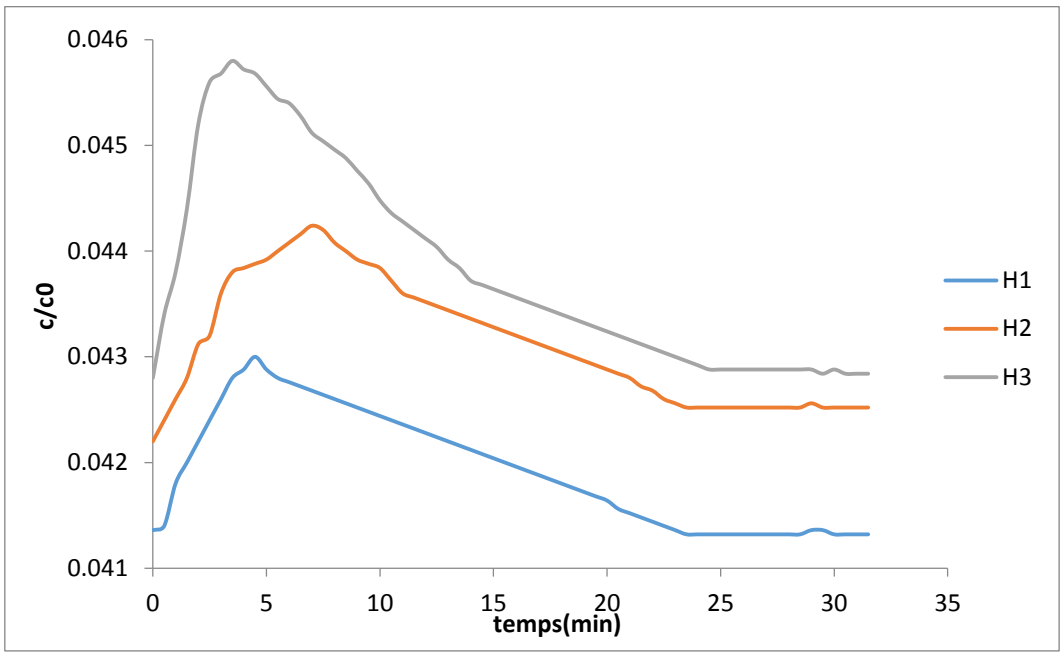
De même que pour l'effet de la hauteur (figure III.6), l'utilisation de colonnes de diamètres différents (3cm pour A et 2 cm pour B) influe sur la conductivité électrique de l'eau sortante. Où, la courbe s'incline lentement pour atteindre un minimum.

Ainsi, pour les deux colonnes A et B il faut respecter un temps de stabilité de la conductivité électrique avant l'injection du traceur. Le temps nécessaire pour atteindre une stabilité de la courbe de la conductivité électrique pour les différentes conditions opératoires (d'autres figures sont données dans l'annexe A2) est compris entre 80 et 150 minutes.

III.4.3 Courbes d'élution ou de Percée

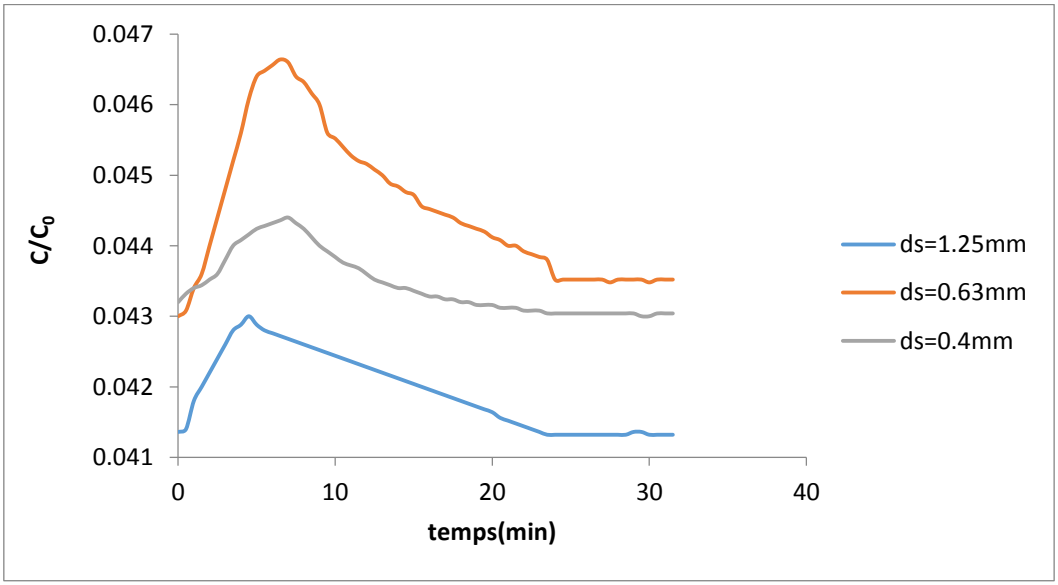
L'injection du traceur étant la première étape pour réaliser la DTS, a été effectuée dans toutes les manipulations après avoir atteint la stabilisation de la conductivité électrique de l'eau sortante de la colonne. Les courbes de percé représentant la concentration réduite

(C/C_0) en fonction du temps pour la colonne B et A à débit Q = 0.03 l/min sont représentées dans les figures (III.9), (III.10) et III.11.



Figures III.9 : Courbes de percé pour la colonne B
(Q= 0.03l/min, ds=1.25 mm)

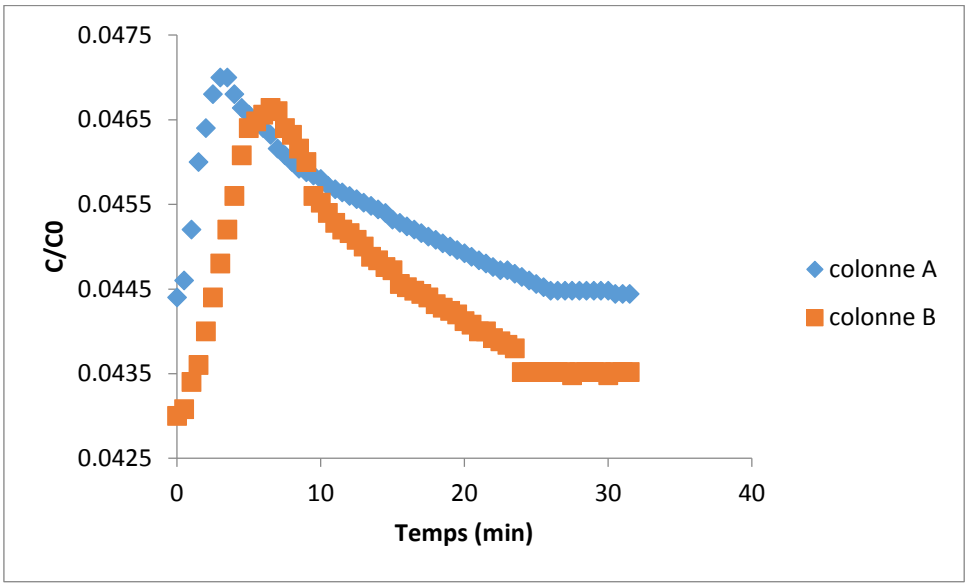
Dans cette figure nous représentons la concentration réduite du traceur C/C_0, qui nous informe sur la restitution du traceur au cours de l'écoulement. Cette figure montre que toutes les courbes ont une allure gaussienne non symétrique pour les différentes hauteurs de lit de sable.



Figures III.10 : Courbes de percé pour la colonne B
(Q= 0.03l/min, H1=2 cm)

En effet, toutes les courbes C/C_0 présentent un maximum de concentration, puis une décroissance continue pour se stabiliser. De plus, on constate que la courbe de restitution est plus fine (plus pointue) quand le lit de particules est plus long.

Dans cette figure nous représentons la concentration réduite du traceur C/C_0 pour différents diamètres de sable dans la colonne B. La figure montre que toutes les courbes ont une allure plus au moins gaussienne non symétrique. On constate aussi que pour un diamètre de sable de 0.63mm, la récupération du traceur est plus uniforme est bien distribuée sur toute la colonne de sol.



Figures III.11 : Courbes de percé pour la colonne A et B
(Q= 0.03 l/min, H1=2 cm, ds=0.63mm)

L'absence de symétrie observée dans les courbes de percée du traceur peut être expliquée par l'hétérogénéité de la matrice solide qui peut s'accentuer avec le remplissage non uniforme du sable dans la colonne. **[23]**

Cependant, selon la figure III.11, la descente progressif fait montrer l'uniformité de l'écoulement dans les deux colonnes. Ainsi, dans les deux colonnes et sous différentes

conditions l'écoulement est hétérogène et reflète la présence de de chemins préférentiels ou de régions préférentielles pour l'écoulement.

III.4.4 Temps de séjour moyen et variance

Le temps de séjour moyen $\bar{t}_s$, la variance et le temps de passage calculés à partir des valeurs obtenues de concentration en fonction du temps sont représentés dans les tableaux III.5, III.6.

Tableau III.6 : Paramètres de la DTS de la colonne A à débit Q1=0.03l/min

ds (mm	1.25			0.63			0.4		
H (cm)	2	3	4	2	3	4	2	3	4
$\bar{\mathbf{t}}_s$ min	15.36	15.53	15.48	15.62	15.56	15.61	15.55	15.64	15.31
τ min	96.34	93.02	89.70	93.02	89.70	86.37	86.37	83.05	79.73
R	0.16	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.19	0.19
σ^2 min^2	82.34	85.54	84.67	85.18	85.41	84.98	85.20	85.21	85.75

En comparant les valeurs du temps de séjour avec ceux du temps de passage obtenus à faible débit Q1=0.03L/min, toutes les valeurs du **ts** sont inférieures à celles du temps de passage **τ**. Ceci peut être confirmé par la présence d'une traînée dans les courbes de percée données précédemment. Ceci nous indique qu'il y a un volume mort ou stagnant dans le réacteur.

En examinant la valeur de R, nous constatons que la fraction du volume stagnant est très grande, et que le traceur se déplace sans interactions avec la matrice solide.
Concernant les valeurs de la variance elles sont presque+- constantes pour les différentes conditions.

Tableau III.7 : Paramètres de la DTS de la colonne B à débit Q2=2.4 L/min

ds (mm	1.25			0.63			0.4		
H (cm)	2	3	4	2	3	4	2	3	4

$\bar{t}_s$ min	15.65	15.66	15.58	15.62	15.74	15.62	15.67	15.61	15.66
τ min	1.22	1.16	1.25	1.16	1.12	1.08	1.08	1.04	1.01
R	12.83	12.43	13.85	13.47	14.00	14.46	14.52	15.01	15.66
σ^2 min^2	85.09	84.93	85.26	84.64	82.93	85.33	85.24	84.64	84.21

Pour la colonne B (tableau III.6). En comparant les valeurs du temps de séjour avec ceux du temps de passage, nous pouvons suggérer l'existence d'un court-circuit non détecté sur les courbes d'élution. En effet, pour le débit Q2=2.4L/min étudiés plus grand par rapport à Q1=0.03l/min, toutes les valeurs du **ts** sont supérieures à celles du temps de passage **τ**, ce qui est un indice de la présence d'une fraction du liquide qui quitte rapidement le réacteur et ne circule pas à travers tout le lit de sable.

La comparaison des tableaux III.5 et III.6 montre que le temps de séjour ainsi que la variance sont presque les mêmes pour les deux colonnes.

III.4.5 Bilan de masse BM

La capacité conservative du traceur est évaluée à travers la valeur du bilan de masse BM. Les calculs effectués ont aboutis aux résultats présentés dans le tableau III.7.

Tableau.III.8 : Valeurs du bilan de masse BM de la colonne A (Q= 0.03 l/mn)

Diamètre de sable (mm)	ds=1.25			ds =0.63	ds =0.4
Hauteur du lit (cm)	2	3	4	2	2
BM	0.23	0.21	0.20	0.18	0.16

D'après ce tableau on constate que toutes les valeurs du BM sont inférieures à un. Ce qui montre que la restitution du traceur par ce réacteur n'est pas achevée, et qu'une bonne partie du soluté reste dans le milieu solide. Aussi, peut-être que les nombre de points détectés lors de la mesure des conductivités électriques n'est pas suffisant pour permettre la récupération de la totalité de la masse injectée du traceur.

Ainsi, nous concluons que cette partie doit être refaite avec un autre traceur et aussi pour d'autres intervalles de temps plus larges, à cause des faible valeurs de BM obtenues.

III.4.6. Nombre de Péclet et coefficient de dispersion axiale

Les valeurs du Nombre de Péclet Pe et du coefficient de dispersion axiales D_a sont calculées en utilisant les valeurs de la variance et du temps de séjour obtenues expérimentalement. Les résultats sont regroupés dans le tableau III.8 et III.9.

Tableau.III.9 : valeurs de Pe et de D_a pour la colonnes A (Q1=0.03L/min)

	ds= 1.25mm			ds= 0.63mm			ds= 0.4mm		
	H1	H2	H2	H1	H2	H3	H1	H2	H3
Pe	5,76	5,78	5,69	5,69	5,98	5,72	5,77	5,76	5,82
$D_a(10^{-3}$ $.m^2.s)$	0.24	0.36	0.37	0.24	0.35	0.49	0.24	0.36	0.48

Tableau.III.10 : Valeurs de Pe et de D_a pour la colonnes A (Q1=2.4 l/min)

	ds= 1.25mm			ds= 0.63mm			ds= 0.4mm		
	H1	H2	H2	H1	H2	H3	H1	H2	H3
Pe	5,76	5,78	5,69	5,77	5,98	5,72	5,77	5,76	5,82
D_a	0.044	0.066	0.067	0.044	0.064	0.089	0.044	0.066	0.087

Les deux tableaux montent que le nombre Pe est indépendant du débit d'alimentation, et que la dispersion dans la colonne A pour un faible débit n'est pas importante et presque nulle vue la distribution faible du flux liquide ascendant sur toute la section du lit solide. Dans ce cas l'écoulement est très proche de l'écoulement piston et très loin d'un mélange agité.

Cependant, pour un débit supérieur (2.4 l/min), la dispersion axiale est moyennement importante est lente ce qui se traduit par une déviation du modèle d'écoulement piston .

Ainsi, nous constatons que le modèle d'écoulement adéquat à ce réacteur « colonne de sol en écoulement ascendant » est celui d'écoulement piston.

Conclusion générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif fixé pour ce travail est l'étude hydrodynamique d'un réacteur solide-liquide ouvert de type colonne de sol en écoulement ascendant, afin de diagnostiquer les disfonctionnements probables qui peuvent en exister.

L'effet de quelques paramètres tels que la taille des particules de sable, dimension de la colonne, la hauteur du lit de sable, et le débit sur les performances et les paramètres de la distribution des temps de séjour (DTS) a été étudié.

Pour la mise en œuvre du procédé d'écoulement en continu à travers un milieu poreux solide une installation expérimentale a été conçue à l'échelle du laboratoire dont la composante essentiel est la colonne de sol. Les résultats des mesures et d'analyses effectuées sur le sol ont montré que le sol utilisé est un sable à majorité de grains fins de diamètre moyen 0.4mmavec une teneur très faible en matière organique. Le sable ayant une granulométrie étalée est fractionné en trois lots de diamètres différents.

Le volume sortant de la colonne de sable évolue linéairement en fonction du temps pour les deux colonnes A et B dont les diamètres sont 3cm et 2cm respectivement pour toutesles conditions opératoires (hauteur de lit de sable =2 , 3 et 4cm ; le débit d'alimentation : 0.03 l/min et 2.4 l/min), ce qui assure la stationnarité du débit de sortie pendant les expériences réalisées.

Après vérification du régime laminaire par le calcul du nombre de Reynolds, les résultats ont montrés que le lit de particules de sable dans les deux colonnes et pour les différentes conditions choisies est caractérisé par une très faible perméabilité de l'ordre de 10^{-12} à10^{-11}.

Les courbes d'élution établies sous différentes conditions ont illustré l'hétérogénéité de l'écoulement dans les deux colonnes ce qui reflète la présence de chemins préférentiels ou de régions préférentielles pour l'écoulement. De plus, l'exploitation de ces courbes a permis la détermination des paramètres de la distribution des temps de séjour (DTS), tels que : temps de séjour moyen, la variance, le facteur de retard et le bilan de masse. Selon les valeurs obtenues les deux colonnes ont montré deux types de disfonctionnement : un volume mort et un court-circuit, et une restitution très faible du traceur utilisé, qui n'a pas fait preuve d'interactions avec la matrice solide. En se basant sur les paramètres obtenus de la DTS, nous pouvons conclure que le modèle d'écoulement adéquat à ce type de réacteur « colonne de sol en écoulement ascendant » est celui d'un écoulement piston.

Ainsi, les résultats obtenus par les essais en colonne nous ont permet de connaitre le comportement hydrodynamique à l'intérieur de ce réacteur continu solide-liquide, ce qui facilitera son utilisation dans des applications futures, qui impose la connaissance préalable du modèle d'écoulement adopté dans ce type de réacteur

Comme perspective, nous envisageons d'approfondir l'étude de ce type de réacteur largement utilisés dans de nombreux domaines notamment environnemental.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] S. MEDDOUR ; Calcul Du Réacteur Fermé Adiabatique Et Chauffe , diplôme Master en : Génie des Procédés Université Mohamed Khider – Biskra , Année 2015

[2] E. KOLLER ; Aide-Mémoire Génie Chimique, Paris, Dunod, 2e édition, , Année 2005.

[3] réacteur piston en phase liquide,
www.m5zn.com/newuploads/2014/03/20/pdf/c60df7dd3485ec2.pdf.

[4] P.TRAMBOUZE , jean-paul EUZEN **;** les réacteurs chimiques de la conception à la mise en œuvre ,Editions technip,paris 2002

[5] Thierry Gosset, Daniel R. Thevenot, L. Zilliox. Hydrodynamic characteristics of peat columns. Tribune du CEBEDEAU , 1987, 40 (527), pp.47 - 58

[6] E. KOLLER ; Aide-Mémoire Génie Chimique, Paris, Dunod,4e édition, , Année 2013

[7] CHABNAM HAJI ESMAILI ; Application des mousses alvéolaires en photocatalyse , titre de docteur de l'université de strasbourg ,Année 2011

[8] A. LALLEMAND ;Écoulement des fluides Dynamique des fluides réels Techniques de l'Ingénieur Année 2015

[9] N BERNI ,Y OULD ELHACEN ; Étude numérique d'un écoulement
dans un milieu poreux , master professionnel ,universitékasdi merbah Ouargla , Année 2012

[10] A. BERKOUNE ;Aide mémoire de mécanique des fluides, Année 2002

[11]M.MELOUKA ;Simulation de l'effet d'insertion de turbulateurs au sein d'un écoulement de fluide dans une conduite, du point vu transfert de chaleur et perte de charge, titre master professionnel université kasdi merbah-ouargla, Année 2014

[12]J. Gabriel GARCIA MALDONADO ; Effet des caracteristiques physiques des materiaux sur l'hydrodynamique et le transfert de matiere des lits fixes fonctionnant a co-courant ascendant de gaz et de liquide , THESE doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, Soutenue le 15 Décembre 2005.

[13] M. Faure 1,2, M. Furman 1, S. Corbel 1 ; Caractérisation de réacteurs photocatalyques utilises pour pour le traitement de l'air ,Séminaire 2008 de l'Ecole Doctorale RP2E « Ingénierie des Ressources, Procédés, Produits et Environnement »,

Nancy, 17 janvier 2008– ISBN 2-9518564-6-6

[14] LEVENSPIEL (O.); Chemical reaction engineering. Wiley (1972).

[15] WEN (C.Y.) et FAN (L.T.). – Models for flow systems and chemical reactors. Dekker (1975).

[16] HIMMELBLAU (D.M.) et BISCHOFF (K.B.). – Process analysis and simulation. Wiley (1968).

[17] DANCKWERTS (P.V.). – Continuous flow systems. Distribution of residence times. Chem. Eng. Sci. (GB), 2, p. 1 (1953).

[18] J. VILLERMAUX Réacteurs chimiques Principes **J 4 010**

[19] M.SARDIN ; Dynamique des Systèmes. Support de cours ENSIC.

[20] J. VILLERMAUX ; Génie de la Réaction Chimique. Conception et Fonctionnement des Réacteurs. Ed. Lavoisier Tech .& Doc.1995

[21] A. DABALIZ ; Etude d'un réacteur (contacteur) gaz-liquide à jet vertical immergé en vue de son application dans le traitement des eaux usées, titre de docteur de l'institue National des Sciences Appliquées de Lyon, Année 2002

[22] F. SÉGURET ; Etude de l'hydrodynamique des procédés de traitement des eaux usées à biomasse fixée Application aux lits bactériens et aux bio filtres, titre de docteur de l'université de bordeaux, Année 1998

[23]R. KHALLADI ; utilisation recyclage et réutilisation des tensioactifs dans le traitement de la pollution par les hydrocarbures, titre de docteur de l'université Houari Boumediene, Année 2011

[24] Baudouin M. AISSOUN **;** études de l'influence des caractéristiques des granulats sur la performance des bétonnes fluides à rhéologie adapté, université de sherbrooke, année 2011

[25] A. BELLIL ; Méthodologie spécifique globale de caractérisation des écoulements gaz/solides pour l'optimisation d'enceintes thermiques, titre de docteur, université de technologie compiègne, Année 2014

[26] Le Binh BIEN ;Transferts d'eau et de soluté en milieu non saturé hétérogène à l'échelle d'un pilote de laboratoire: expériences et modélisations, titre de docteur,Ecole doctorale de chimie de Lyon Chimie, Procédés, Environnement, Année 2013

[27] 155 **QUEEN • SUITE 1300 • OTTAWA, ONTARIO ;** méthodes de détermination de l'humidité dans les matériaux de couverture mesures et limites, Année 1998

[28] J.VILLERMAUX ; Génie de la réaction chimique (2e éd.), conception et fonctionnement des réacteurs, Année 1999

ANNEXES

Annexe A1

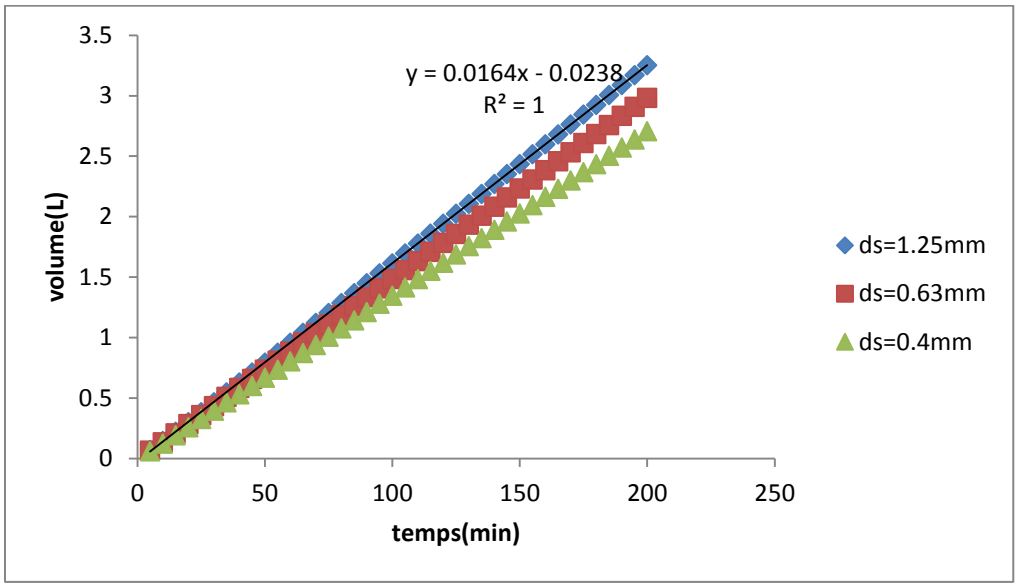


Figure A1.1. Stationnarité du débit en sortie des essais en colonne A, à débit Q= 0.03 l/min, H2=3cm

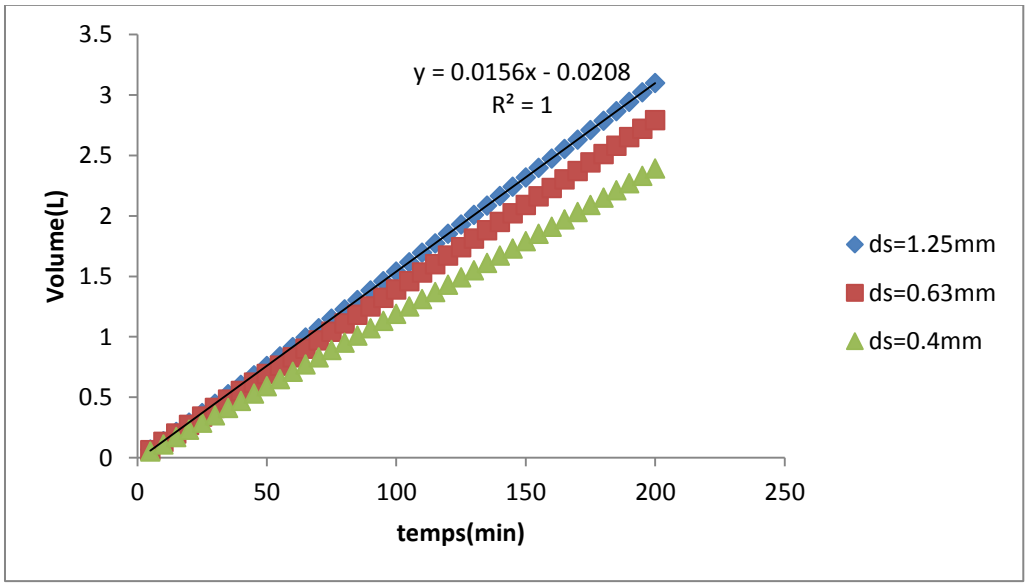
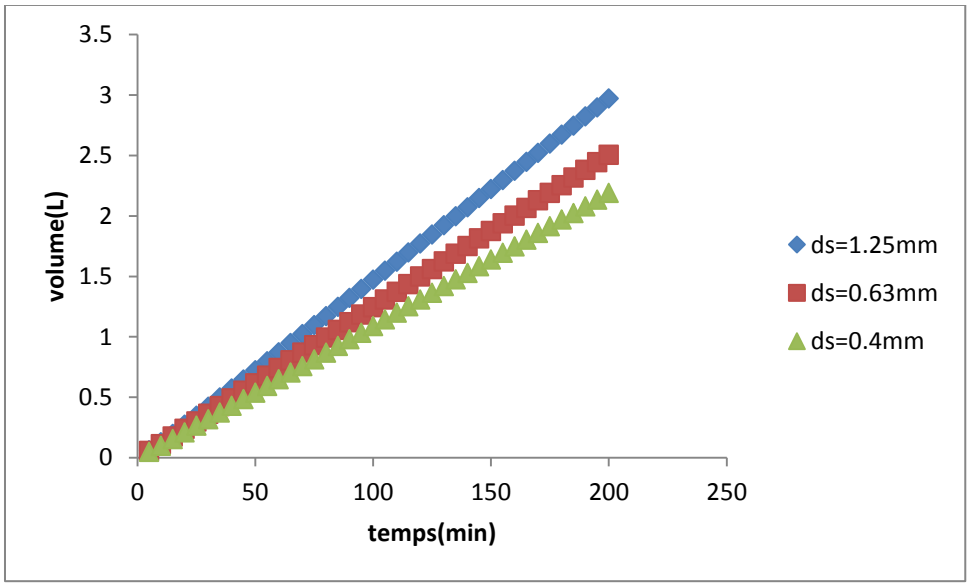
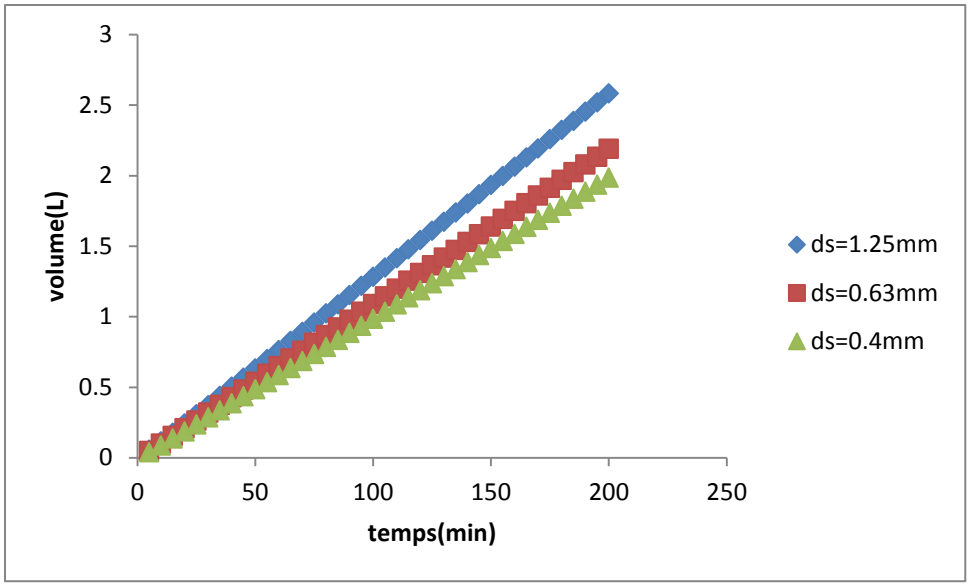


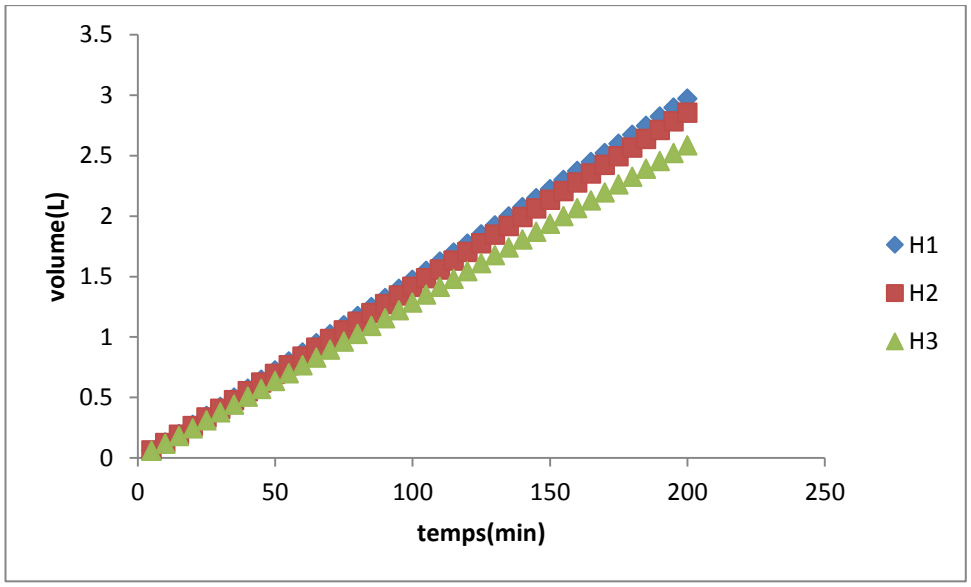
Figure A1.2. Stationnarité du débit en sortie des essais en colonne A, à débit Q= 30.1ml/min, H3 =4cm



FigureA1.3. Stationnarité du débit en sortie des essais en colonne B, à débit Q= 2.4 l/min,hauteur H1 = 2cm



FigureA1.4. Stationnarité du débit en sortie des essais en colonne B, à débit Q= 2.4L/min,H3 = 4 cm



FigureA1.5. Stationnarité du débit en sortie des essais en colonne B, à débit Q= 2.4L/min,ds= 1.25mm

Annexe A2

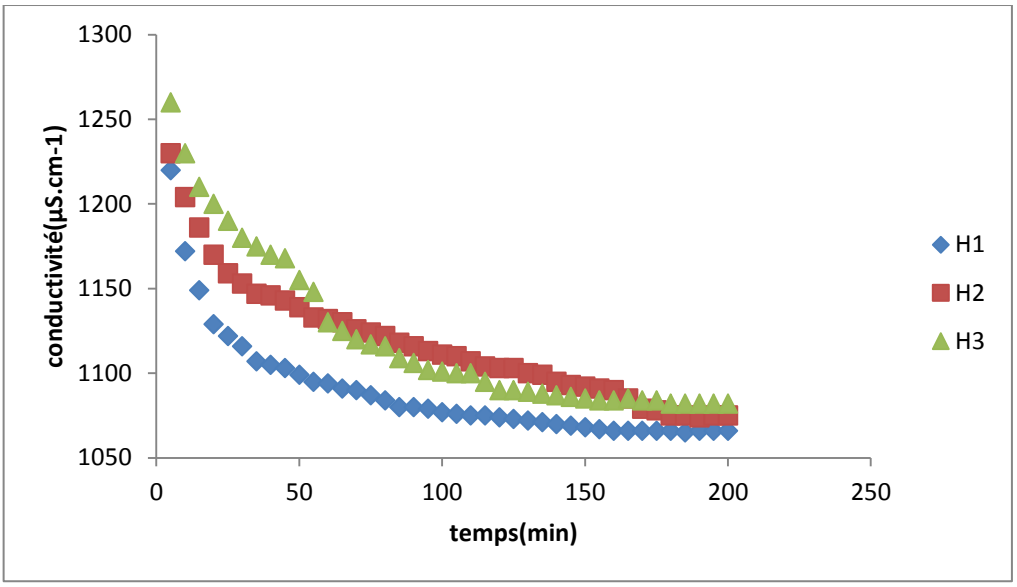


Figure A2.1.profil de conductivité en fonction de tempscolonne A(Q= 2.4 l/min ds=1.25mm)

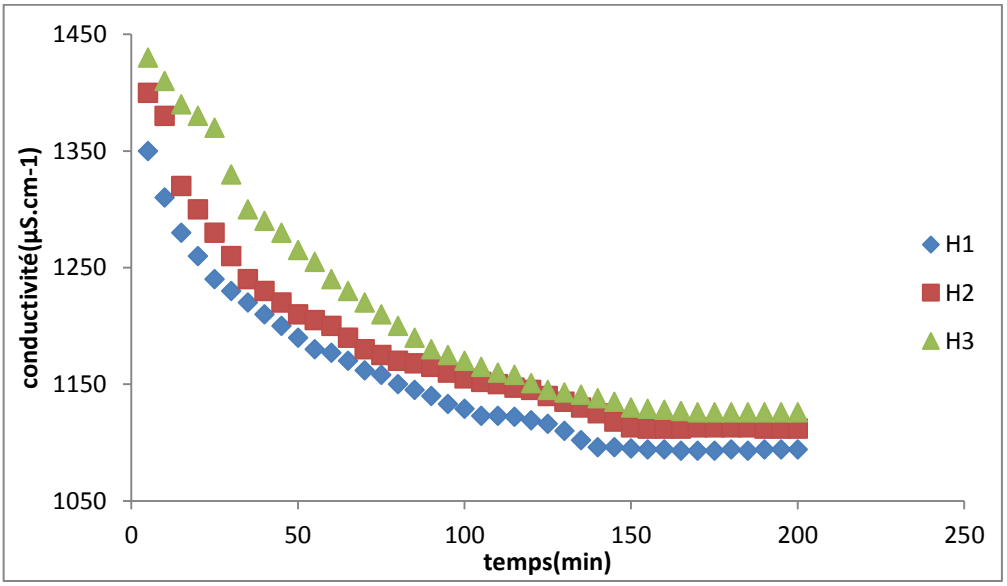


Figure A2.2.profil de conductivité en fonction de tempscolonne A(Q= 0.03 l/min ds=0.63mm)

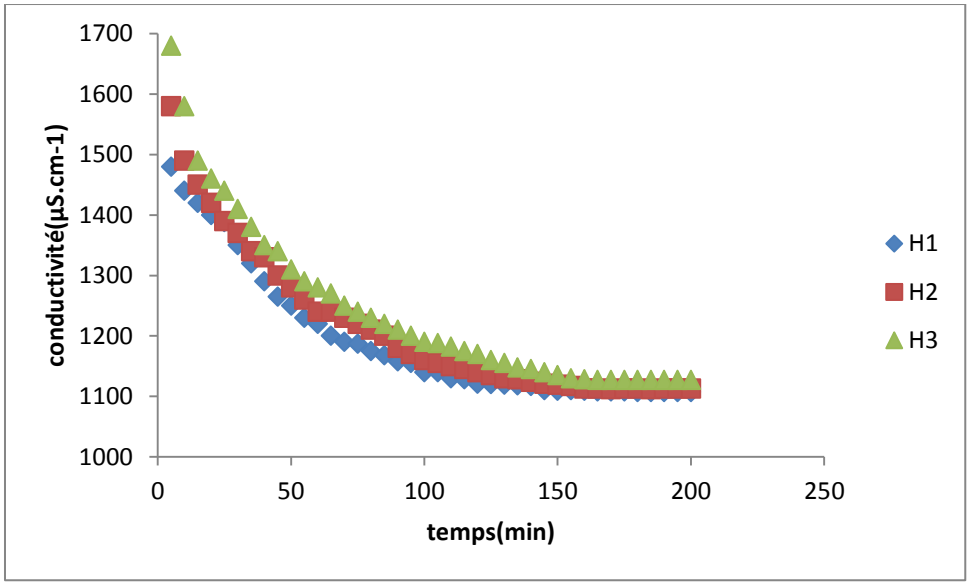


Figure A2.3.profil de conductivité en fonction de temps, colonne A(Q= 0.03 l/min ds=0.4mm)

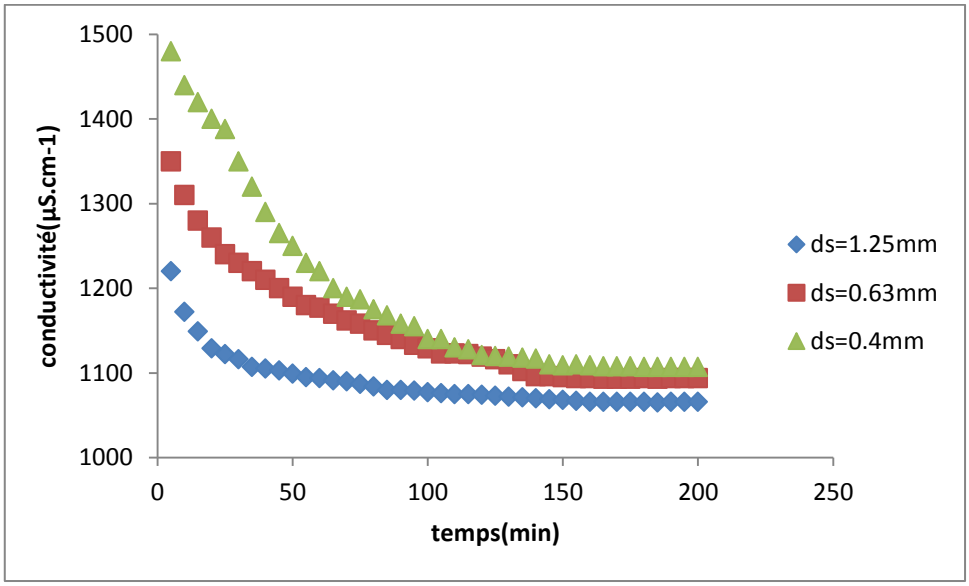


Figure A2.4.profil de conductivité en fonction de temps, colonne A,(Q= 0.03 l/min H1=2cm)

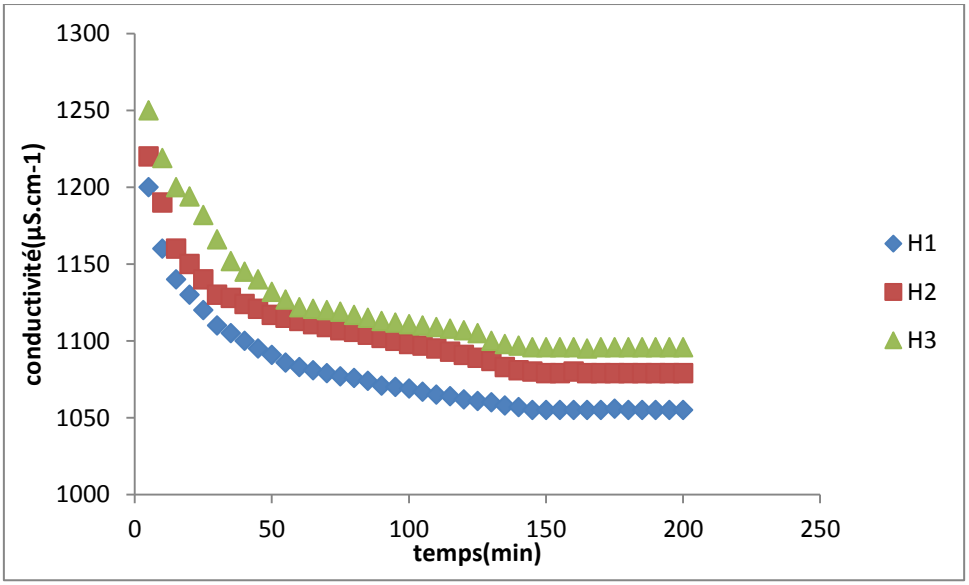


Figure A2.5.profil de conductivité en fonction de tempscolonne BQ= 0.03 l/min ds=1.25mm

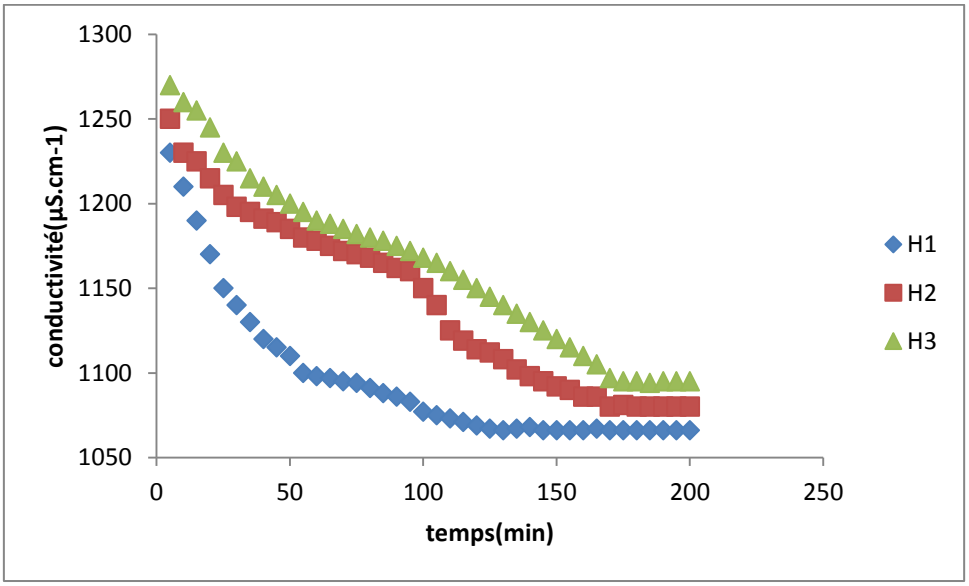


Figure A2.6.profil de conductivité en fonction de tempscolonne BQ= 0.03 l/min ds=0.63mm

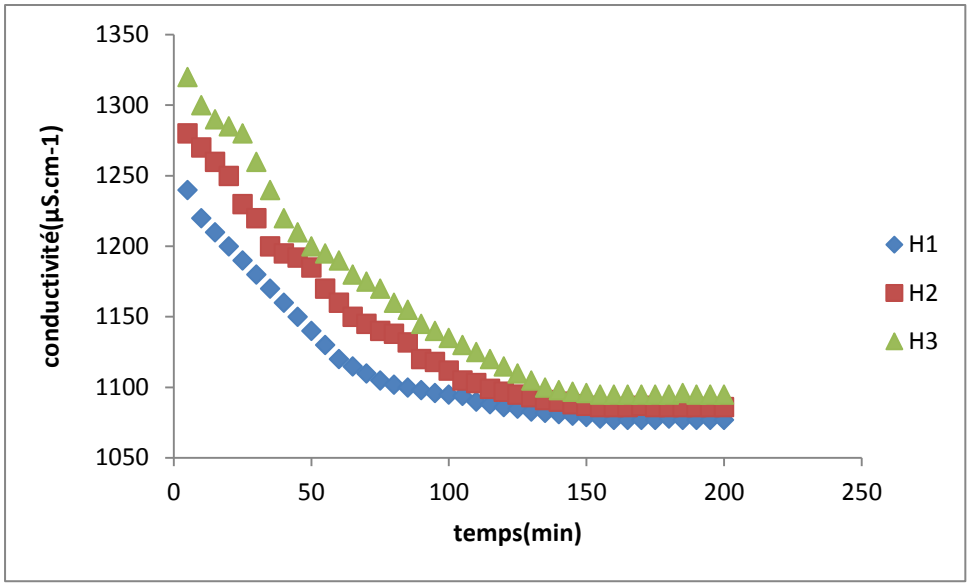


Figure A2.7.profil de conductivité en fonction de temps, colonne B(Q= 2.4 l/min ds=0.4mm)

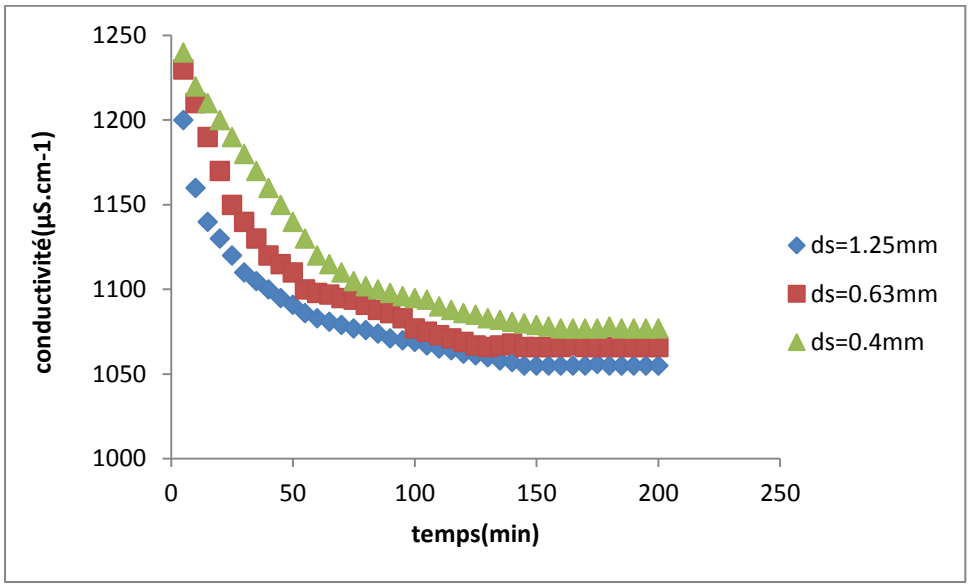


Figure A2.8.profil de conductivité en fonction de temps, colonne B, (Q= 0.03 l/min H1=2cm)

Annexe A3

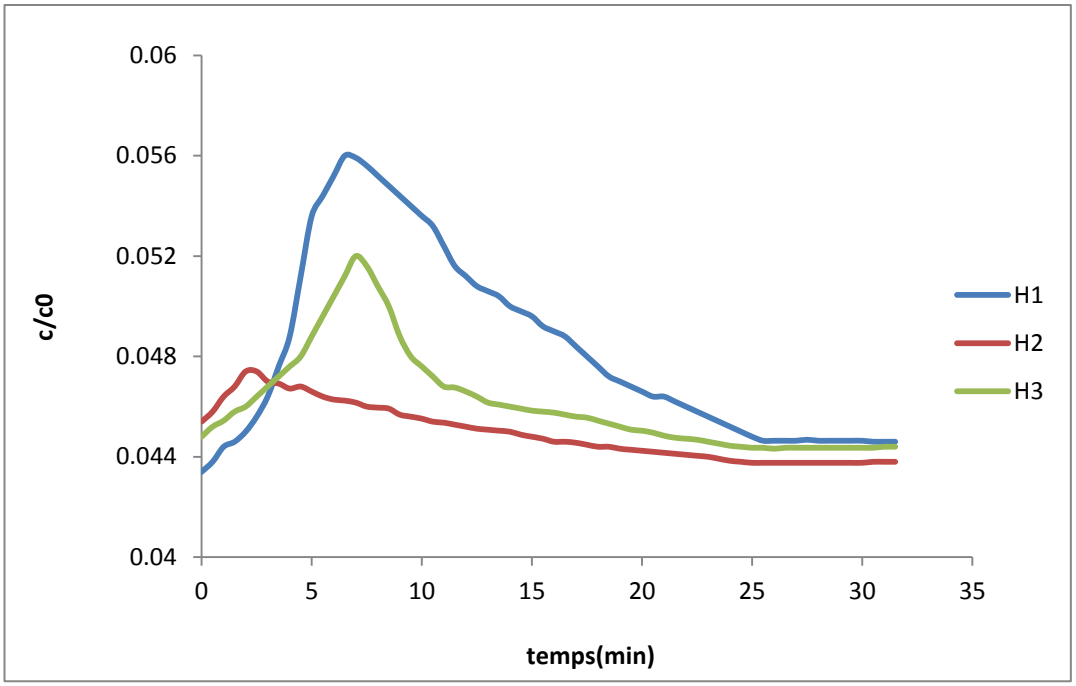


Figure A3.1. Caractéristiques schématiques d'une DTSpour colonne A, à débit Q= 0.03 l/min, ds = 1.25 mm

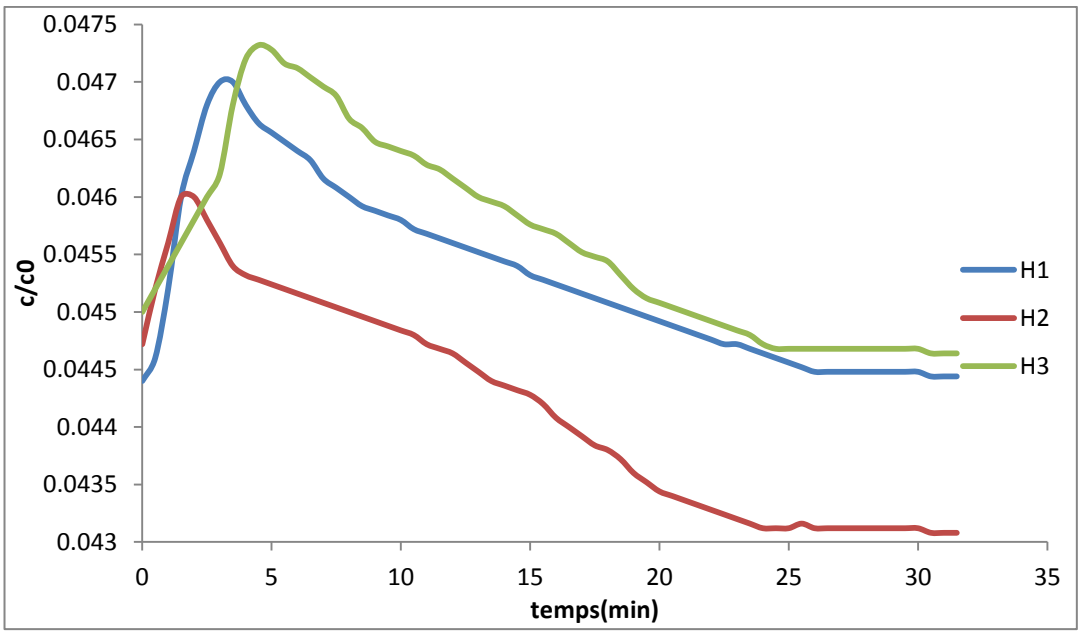


Figure A3.2. Caractéristiques schématiques d'une DTSpour colonne A, à débit Q= 0.03 l/min, ds = 0.63 mm

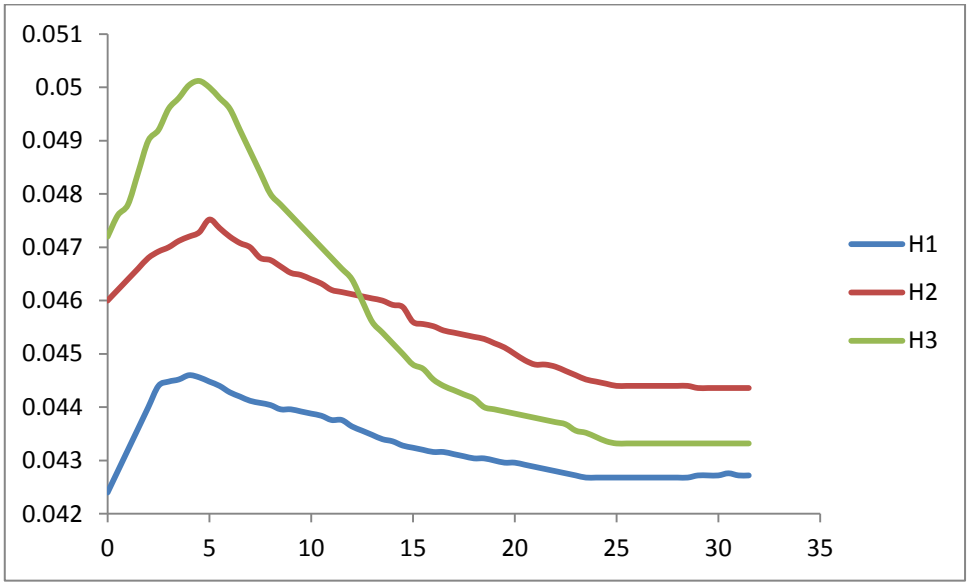
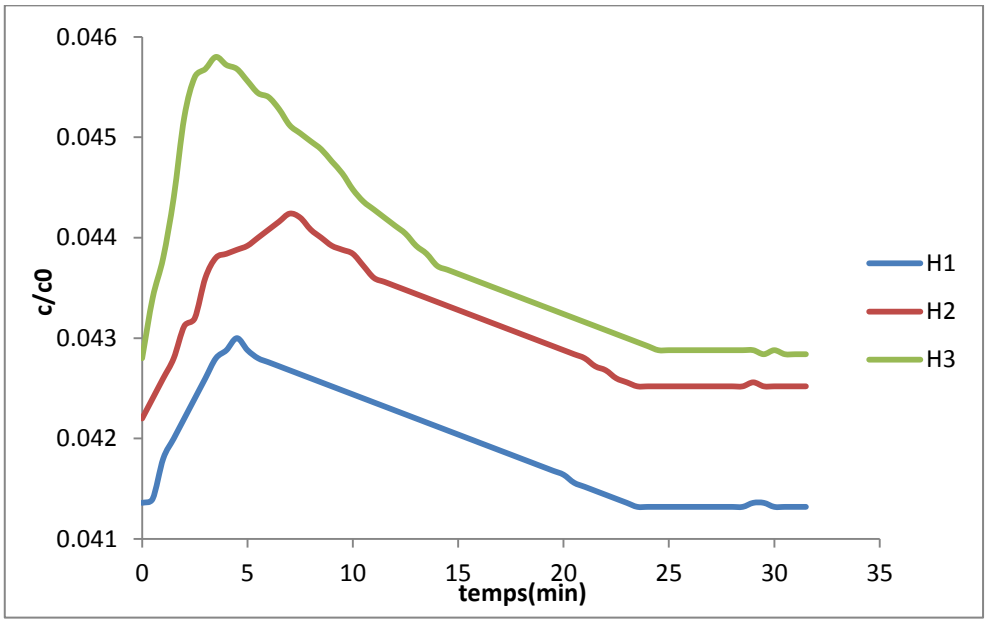


Figure A3.3. Caractéristiques schématiques d'une DTSpour colonne A, à débit Q= 30.1 ml/min, ds = 0.4 mm



FigureA3.4. . Caractéristiques schématiques d'une DTSpour colonne B, à débit Q= 2.4 l/min, ds = 1.25 mm

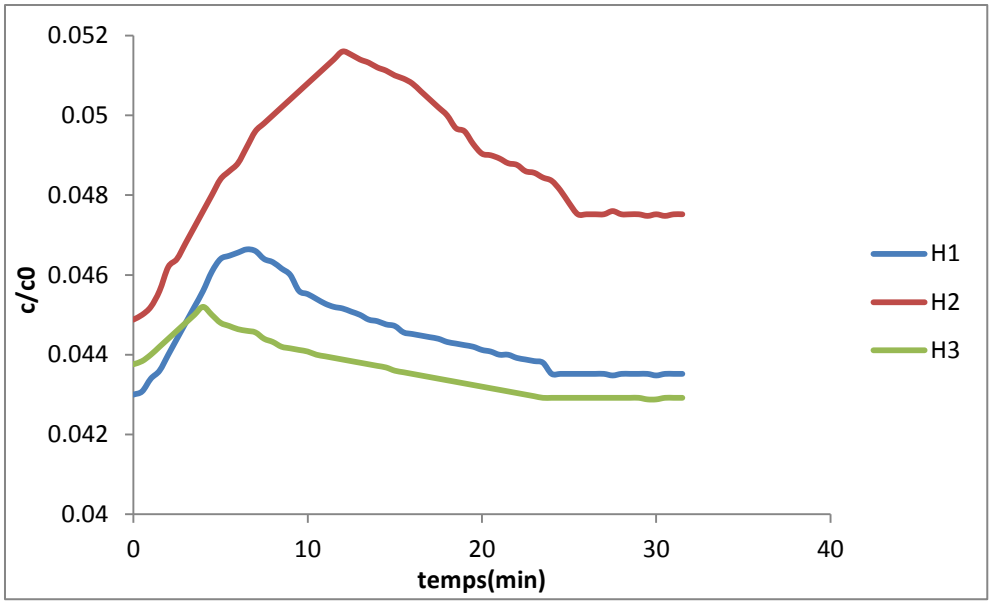


Figure A3.5. Caractéristiques schématiques d'une DTSpour colonne B, à débit Q= 2.4 L/min, ds = 0.63 mm

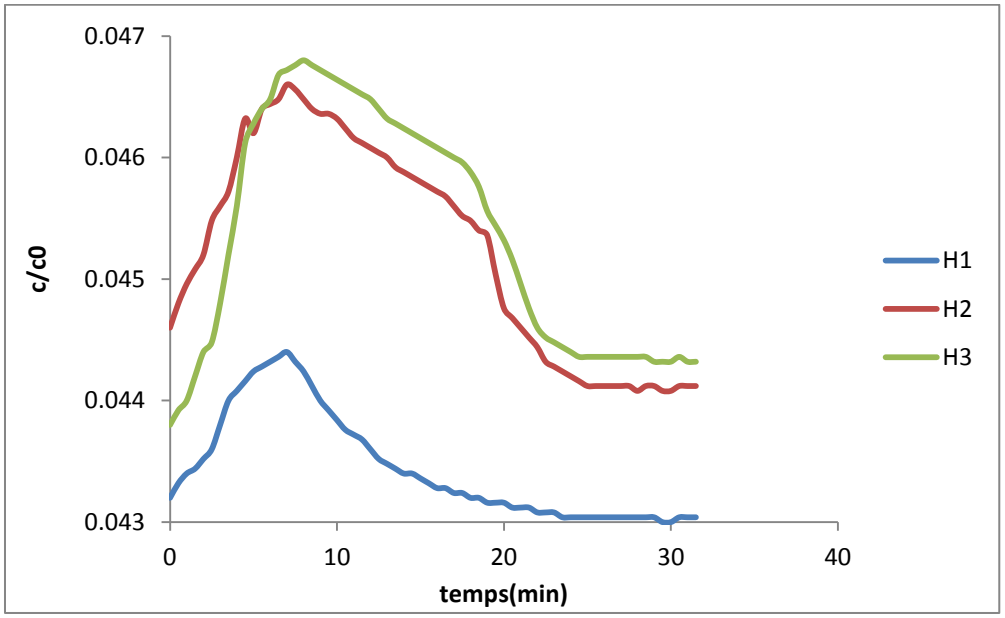


Figure A3.6. Caractéristiques schématiques d'une DTSpour colonne B, à débit Q= 2.4 L/min, ds = 0.4 mm

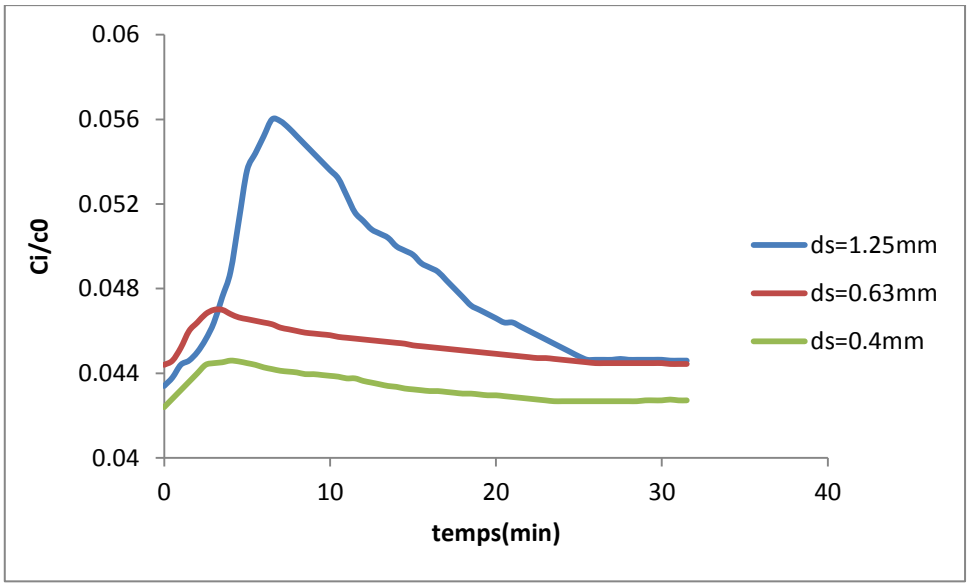
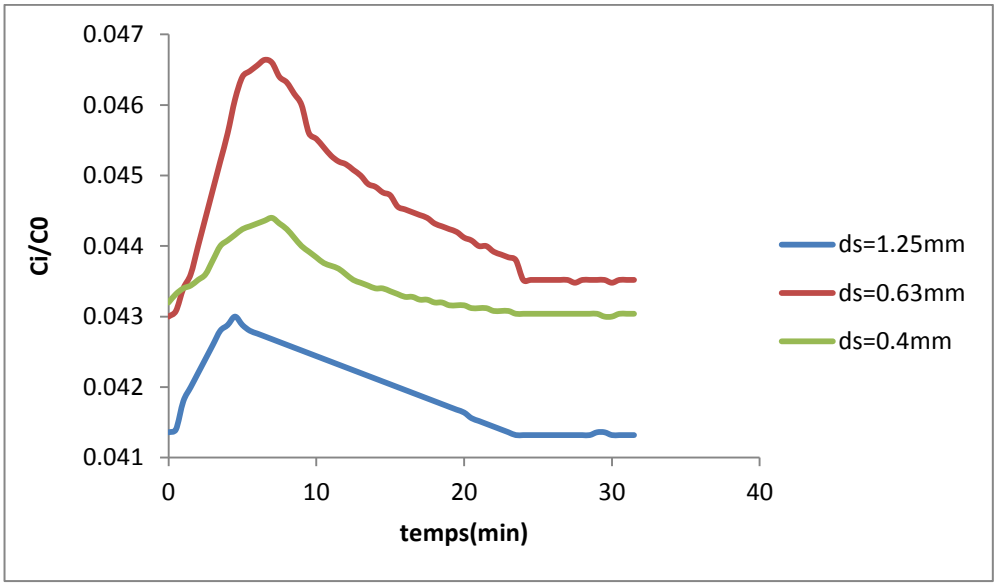


Figure A3.7. caractéristiques schématiques d'une DTSpour colonne A, à débit Q= 30.1ml/min , H1 = 2cm



FigureA3.8. caractéristiques schématiques d'une DTS pour colonne B, à débit Q=2.4l/min, H1 = 2cm