



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abdelhamid Iben Badis de Mostaganem  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie des Procédés

N° D'ORDRE : M....., /

**Mémoire pour l'obtention du**

## **DIPLÔME DE MAGISTER EN CHIMIE**

**OPTION : CHIMIE APPLIQUEE ET DEVELOPPEMENT DURABLE**

Présenté par

**M<sup>r</sup> SAIED Miloud**

*THEME*

*Détermination des paramètres de transfert de masse de certains composés organiques volatils (COV) dans l'air par simulation*

Soutenu le : 26-06-2013 à 14 :00 h

Devant le Jury :

<b>Président</b>	<b>Mr BELHAKEM Mostefa</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université de Mostaganem</b>
<b>Examineur</b>	<b>Mr BENDERDOUCHE Noureddine</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université de Mostaganem</b>
<b>Examineur</b>	<b>Mr DJENNAD M'Hamed</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université de Mostaganem</b>
<b>Promoteur</b>	<b>Mr BESTANI Benaouda</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université de Mostaganem</b>

**ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2012 /2013**

# **TABLE DES MATIERES**

INTRODUCTION GENERALE :.....	1
<b>CHAPITRE I:</b> Etude bibliographique sur les COV et l'adsorption sur un charbon actif granulé dans un lit fixe.	
I.1) Introduction : .....	3
I.2) Définition des composés organiques volatils (COV) : .....	3
I.3) Les sources d'émission :.....	4
I.4) Toxicologie des COV :.....	5
I.5) Impact sur l'homme et l'environnement :.....	5
I.5.1) Les effets sur la santé :.....	5
I.5.2) Les effets sur l'environnement : .....	6
I.6) Les techniques de récupération et de destruction des COV :.....	6
I.7) Choix des composés organiques volatiles étudiés :.....	8
I.7.1) Dichloroéthylène :.....	8
I.7.2) Trichloroéthylène :.....	9
I.7.3) Tétrachloroéthylène :.....	11
I.8) L'adsorption : .....	13
I.8.1) Définition :.....	13
I.8.2) Principe :.....	13
I.8.3) Les différents types d'adsorption :.....	14
I.9) Charbon actif : .....	15
I.9.1) Définition :.....	15
I.9.2) Charbon actif granulé (CAG) : .....	15
I.9.3) Propriétés :.....	16
I.10) Applications de charbon actif au piégeage de COV :.....	18
I.10.1) Adsorption (gaz/solide) en lit fixe : .....	18
I.10.2) Adsorption/absorption (gaz/liquide/solide) : .....	24
I.11) Comportement des colonnes d'adsorption du charbon actif :.....	26
<b>CHAPITRE II:</b> Les modèles de lit fixe et évaluation des paramètres de transfert de masse.	
II.1) Modèles de transfert de masse : .....	30
II.1.1) Modèle d'écoulement dispersé de diffusion surfacique et poreux (DFPSDM) :.....	30
II.1.2) Modèle d'écoulement dispersé de diffusion extérieur (surface) homogène (DFHSDM) :.	37

II.1.3) Modèle d'écoulement prise pour diffusion extérieur (surface) homogène (PFHSDM) :.....	37
II.2) Paramètres de transfert de masse : .....	37
II.2.1) Coefficient de diffusion moléculaire $D_m$ : .....	38
II.2.2) Coefficient de dispersion axiale $D_e$ : .....	38
II.2.3) Coefficient de transfert du film $k_f$ : .....	39
II.2.4) Coefficient de diffusion poreux (interne) $D_p$ : .....	39
II.2.5) Coefficient de diffusion de surface $D_s$ : .....	40
II.3) Groupes adimensionnels pour les modèles de transfert de masse et leur impact sur les calculs de modèle : .....	40
II.3.1) Nombre de Biot $B_i$ : .....	41
II.3.2) Nombre de Stanton $St$ : .....	41
II.3.3) Module de Diffusion $E_d$ : .....	41
II.3.4) Nombre de Peclet $Pe$ : .....	42
II.3.5) Temps sans dimension : .....	42
II.4) Impact des paramètres d'isotherme sur les calculs des modèles : .....	43
<b>CHAPITRE III: Détermination des paramètres de transfert de masse des COV dans l'air par simulation</b>	
III.1) Logiciel utilisé pour calculer les paramètres de transfert de masse : .....	44
III.2) Élimination des COV par le charbon actif granulé en système continu par simulation : .....	44
III.3) Paramètres d'entrées : .....	44
III.4) Interprétations et discussions des résultats obtenus : .....	45
III.4.1) Calcul des paramètres de l'équation de Freundlich: .....	45
III.4.2) L'effet de la concentration sur l'adsorption : .....	46
III.4.3) L'effet de température sur l'adsorption : .....	49
III.4.4) L'effet de la vitesse superficielle: .....	52
III.4.5) Comparaison entre les trois composées: .....	55
III.4.6) Courbes caractéristiques: .....	56
CONCLUSION : .....	98
BIBLIOGRAPHIE : .....	100
ANNEXES : .....	105

# ***AVANT-PROPOS***

Je tiens, en premier lieu, à remercier Dieu le tout puissant de m'avoir donnée le courage et la patience durant toutes ces années.

Que soient remerciés notre encadreur, BESTANI Benaouda pour le sujet d'actualité qu'il m'a proposé, je le remercie également pour l'intérêt constant qu'il a manifesté tout au long de cette étude, pour les conseils précieux durant l'élaboration de ce projet, l'intérêt qu'il a porté à mon travail et la confiance qu'il m'a constamment témoignée et qui ont été pour moi très motivants.

Je tiens à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'en faire partie et d'avoir évalué ce travail, monsieur BELHAKEM Mostefa en tant que président, messieurs BENDERDOUCHE Noureddine, DJENNAD M'Hamed, en tant qu'examineurs.

Enfin, je souhaiterais exprimer mes plus sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, ma famille et mes amis.

# DEDICACES

*Avant tout c'est grâce à Dieu que je suis arrivé là*

*J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail:*

*-A mes chers parents, pour leurs soutiennent durant toutes mes années d'études.*

*-A mes frères et mes chères sœurs*

*-A ma chère nièce Asma.*

*-A tous mes chères amis (e): Yfreh, Ahmed, Billel, Hanane et surtout Amina pour son aide.*

*- A l'ensemble de mes professeurs, pour leur soutien durant ces longues années universitaires.*

*-A tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin durant les moments difficiles.*

*-A tout les gens qui m'aiment.*

**S-M**



# Résumé

Les préoccupations environnementales prennent, de nos jours, une importance sans cesse croissante. Dans ce contexte, la protection de l'atmosphère par le contrôle des émissions gazeuses chargées en polluants devient un enjeu environnemental majeur.

Parmi les différentes sources de pollution de l'atmosphère, les industries émettrices de rejets chargés en Composés Organiques Volatils (COV) font l'objet d'une attention particulière. En effet, les COV sont des polluants avérés de la basse atmosphère de par leurs impacts sur l'environnement et la santé humaine.

Les COV sont parmi les polluants dangereux. Une limitation des risques associés à l'évacuation de ces éléments constitutifs vers les milieux récepteurs impose une élimination partielle ou totale. Les techniques de récupération valorisent les COV en tant que matière première, on compte parmi elles l'adsorption, la condensation, les procédés membranaires et l'absorption etc.

Le but de cette recherche est l'élimination de ces COV par l'adsorption sur un charbon actif granulé, en utilisant le mode continu (lit fixe). Ensuite on déterminera les paramètres de transfert de masse par simulation en utilisant le modèle de WILKE- LEE, de WAKAO et FUNAZKRI.

Dans ce travail, un programme de simulation a été réalisé pour l'élimination cis-dichloroéthylène, trichloroéthylène et tétrachloroéthylène, souvent présents dans l'air. L'influence de plusieurs paramètres tels que la concentration initiale de composé dans l'air, la température et vitesse superficielle de l'air sur l'adsorption sera présentée.

**Mots-clés :** COV, air, adsorption, modèles de Wilke-Lee, de WAKAO et FUNAZKRI.

# *Abstract*

The environmental concerns take, nowadays, an unceasingly increasing importance. In this context, the protection of the atmosphere by the control of the gas emissions charged in pollutants becomes a major environmental stake.

Among the various sources of pollution of the atmosphere, transmitting industries of rejections charged in Volatile Organic Compound (VOC) are the subject of a special attention. Indeed, the VOC are pollutants proven of the lower atmosphere from their environmental impacts and the human health.

The VOC are among the dangerous pollutants. A limitation of the risks associated with the evacuation with these components about the receiving middles imposes a partial or total elimination. The techniques of recovery develop the VOC as a raw material; we count among them the adsorption, condensation, processes of membrane and absorption etc.

The aim of this research is the elimination of these VOC by adsorption on a granulated activated carbon, by using the continuous mode (fixed bed). Then we will determine the parameters of mass transfer per simulation by using the model of WILKE- LEE, WAKAO and FUNAZKRI.

In this work, a simulation program was carried out for elimination cis-dichloroethylene, trichloroethylene and tetrachloroethylene, often present in the air. The influence of several parameters such as the initial concentration of composed in the air, the temperature and velocity of the air on adsorption will be presented.

**Key words :** VOC, air, adsorption, model of Wilke-Lee WAKAO and FUNAZKRI.

# ملخص

طرق المحافظة على البيئة عرفت تقدما ملحوظا خاصة المحافظة على الجو, وذلك بمراقبة كمية طرح العناصر التي تسبب تلوث الهواء.

من بين هذه العناصر التي تسبب تلوث الجو العناصر العضوية الخفيفة, التي تعد من العناصر الخطيرة على البيئة و على صحة الإنسان و يجب نزعها.

من بين الطرق التي تستعمل لنزع هذه العناصر العضوية, عملية الادمصاص, التكتيف, استعمال الأغشية, و الامتصاص.

الهدف من هذه الدراسة هو نزع هذه العناصر العضوية بعملية الادمصاص على الفحم الاصطناعي, باستعمال النظام المتواصل, و قمنا بتحديد أبعاد تحول المادة باستعمال برنامج ويل كلي, و اكاو و فينازكري.

حيث قمنا في الجزء التطبيقي بنزع الكلورواثيلان, النريكورواثيلان و التيتراكلورواثيلان, المتواجدة في الجو, و قمنا بدراسة تأثير عدة عوامل كالتركيز الابتدائي للعنصر في الهواء, درجة الحرارة و السرعة.

**الكلمات المفتاحية :** العناصر العضوية الخفيفة, الهواء, الادمصاص, نموذج ويل كلي, و اكاو و فينازكري.

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les préoccupations environnementales prennent, de nos jours, une importance sans cesse croissante. Dans ce contexte, la protection de l'atmosphère par le contrôle des émissions gazeuses chargées en polluants devient un enjeu environnemental majeur.

Parmi les différentes sources de pollution de l'atmosphère, les industries émettrices de rejets chargés en Composés Organiques Volatils (COV) font l'objet d'une attention particulière. En effet, les COV sont des polluants avérés de la basse atmosphère de par leurs impacts sur l'environnement et la santé humaine. C'est ainsi que les rejets gazeux d'industries utilisatrices de solvants sont soumis à des réglementations de plus en plus strictes, contraignant les industriels à établir des stratégies de réduction des émissions.

Les COV sont parmi les polluants dangereux. Une limitation des risques associés à l'évacuation de ces éléments constitutifs vers les milieux récepteurs impose une élimination partielle ou totale. Les techniques de récupération valorisent les COV en tant que matière première, on compte parmi elles l'adsorption, la condensation, les procédés membranaires et l'absorption etc.

Afin de répondre à cette attente, il est donc nécessaire de développer de nouvelles voies de traitements des COV ou d'optimiser les installations existantes. L'adsorption sur le charbon actif est une technique très répandue pour l'élimination des COV présents dans l'air ou autre gaz.

Le but de cette recherche est l'élimination de ces COV par un charbon actif granulé, en utilisant le mode continu (lit fixe). Ensuite on déterminera les paramètres de transfert de masse par simulation en utilisant le modèle de WILKE- LEE, WAKAO et FUNAZKRI.

Ce mémoire est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur les composés organiques volatils et le phénomène d'adsorption sur un charbon actif granulé dans un lit fixe. La définition de ces composés organiques, les sources d'émission, les aspects législatifs qui leur sont liés, leurs utilisations ainsi que leurs impacts sur la santé et l'environnement sont tout d'abords exposés dans la première partie de ce chapitre. La seconde partie décrit un rappel bibliographique sur l'adsorption, le charbon actif granulé, les caractéristiques de charbon actif granulé utilisé dans ce travail et l'utilisation de CAG dans un lit fixe mise en œuvre dans le cadre de cette étude.

Le deuxième chapitre décrit quelques modèles de lit fixe et évaluation des paramètres de transfert de masse.

Le troisième chapitre expose la simulation par le logiciel Fortran 77 dont le but de déterminer les paramètres de transfert de masse de certains COV dans l'air. Nous avons intéressé dans notre étude à l'élimination des composés chlorés suivantes : dichloroéthylène, trichloroéthylène et tétrachloroéthylène par un charbon actif granulé en système continu. La discussion des résultats obtenus, et leur comparaison avec la littérature sera présentée.

## **I.1) Introduction :**

La pollution atmosphérique est un problème connu de tout temps qui s'est développé de manière très importante depuis la première Révolution Industrielle. Parmi les principaux polluants atmosphériques recensés sont les Composés Organiques Volatils (COV).

Les composés organiques volatils (COV) constituent une famille importante de polluants atmosphériques, émis notamment par les industries de traitement de surface et de dégraissage des métaux, les ateliers de peinture, d'imprimerie ainsi que les stockages de produits pétroliers, etc. Leurs effets nocifs directs et indirects tant sur la santé que sur l'environnement sont largement décrits dans la littérature et leurs émissions sont dès lors contrôlées de plus en plus sévèrement. A ce titre, une régulation et une réduction de leurs émissions dans l'atmosphère apparaissent comme une préoccupation environnementale importante.

## **I.2) Définition des composés organiques volatils (COV) :**

Les composés organiques volatils (COV) sont définis comme des substances organiques, à l'exclusion du méthane, contenant du carbone et de l'hydrogène auxquels sont substitués partiellement ou totalement d'autres atomes (azote, oxygène, soufre, phosphore, halogènes) [1] et qui se trouvent à l'état de gaz ou de vapeurs dans les conditions de fonctionnement de l'installation.

Le projet de directive européenne complète les différentes définitions se rapportant aux COV en ajoutant qu'il s'agit de composés organiques ayant une tension de vapeur supérieure ou égale à 10 Pa à 293,15 K.

Outre les principales familles de solvants :

- ❖ Composés aliphatiques (heptane, hexane, pentane, essences minérales...).
- ❖ Hydrocarbures aromatiques (benzène, toluène, xylène...).
- ❖ Alcools (éthanol, méthanol, butanol...).
- ❖ Cétones (acétone, MEK: méthyléthylcétone, MIBK méthylisobutylcétone, cyclohexanone...).
- ❖ Esters (acétates d'éthyle, de butyle, d'isopropyle...).
- ❖ Esters (tétrahydrofuranne...).
- ❖ Les composés chlorés (perchloréthylène, trichloréthylène, dichlorométhane).

Entrent également dans les COV :

- ❖ Les plastifiants (DOP: dioctylphtalate...).
- ❖ Les composés azotés (amines, nitriles...).
- ❖ Les composés soufrés (mercaptans, diméthylsulfure...) [2].

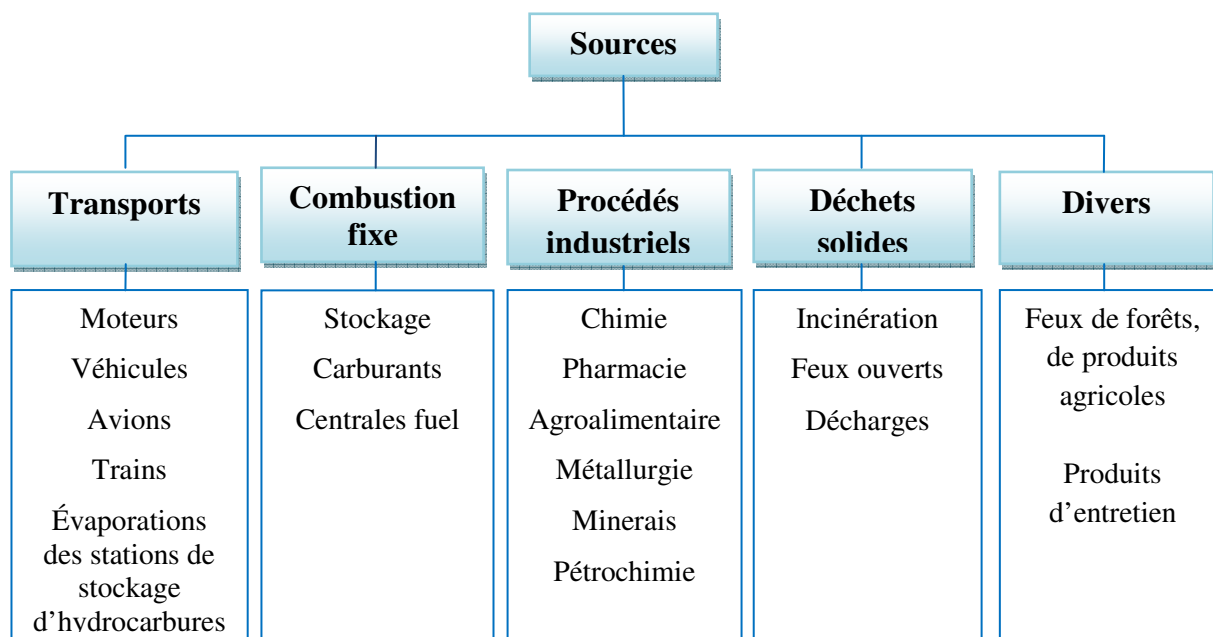
### I.3) Les sources d'émission :

Il existe un grand nombre de sources de pollution appartenant à de multiples secteurs (**Figure I.1**)

Les principales sources d'émission de COV sont :

- ❖ L'utilisation de solvants (29% des émissions) pour des usages domestiques ou industriels : chimie de base et chimie fine, parachimie, traitements de surface, imprimerie, peinture, encre, adhésif, caoutchouc, nettoyage à sec, ...
- ❖ Les transports routiers (25% des émissions).
- ❖ La biomasse : forêts (21% des émissions) [3].

Les composés organiques volatils entrent dans la composition de nombreux produits courants peintures, encres, colles, solvants, dégraissants, cosmétiques, agent de nettoyage... Des COV sont également émis lors de la combustion de carburants ou par évaporation lors de leur fabrication, stockage ou utilisation. La végétation méditerranéenne et certaines cultures participent aux émissions naturelles des COV.



**Figure I.1** : Sources d'émissions de COV [1].

#### **I.4) Toxicologie des COV :**

La pollution constitue un danger immédiat pour la santé et s'amplifie avec la durée d'exposition. Les personnes les plus sensibles sont les enfants, les personnes âgées, les grands fumeurs et les malades du cœur ou des poumons. La pollution peut favoriser des maladies, en aggraver certaines, et parfois même précipiter le décès de ces personnes.

La voie de contact principale avec les COV est la voie respiratoire de santé, principalement des irritations cutanées et des réactions allergiques, peuvent également survenir suite à un contact cutané avec des produits riches en COV ou des matières contaminées par des COV (linge, literie).

En cas d'exposition aiguë, les COV provoquent des irritations des yeux, des voies respiratoires et digestives, peuvent entraîner une réaction allergique ou entraîner une atteinte neurologique (maux de tête, ivresse, vertiges, nausées). A long terme, une exposition aux COV peut générer des cancers de la peau ou du système respiratoire. Les molécules qui en sont la cause sont les suivantes : benzène, toluène, éthylbenzène, xylènes et HAP [4,5].

#### **I.5) Impact sur l'homme et l'environnement :**

Les émissions de COV génèrent deux types d'impact : un impact direct sur la santé de l'homme et un impact indirect sur l'environnement. Les effets des COV sont très variables selon le polluant considéré.

##### **I.5.1) Les effets sur la santé :**

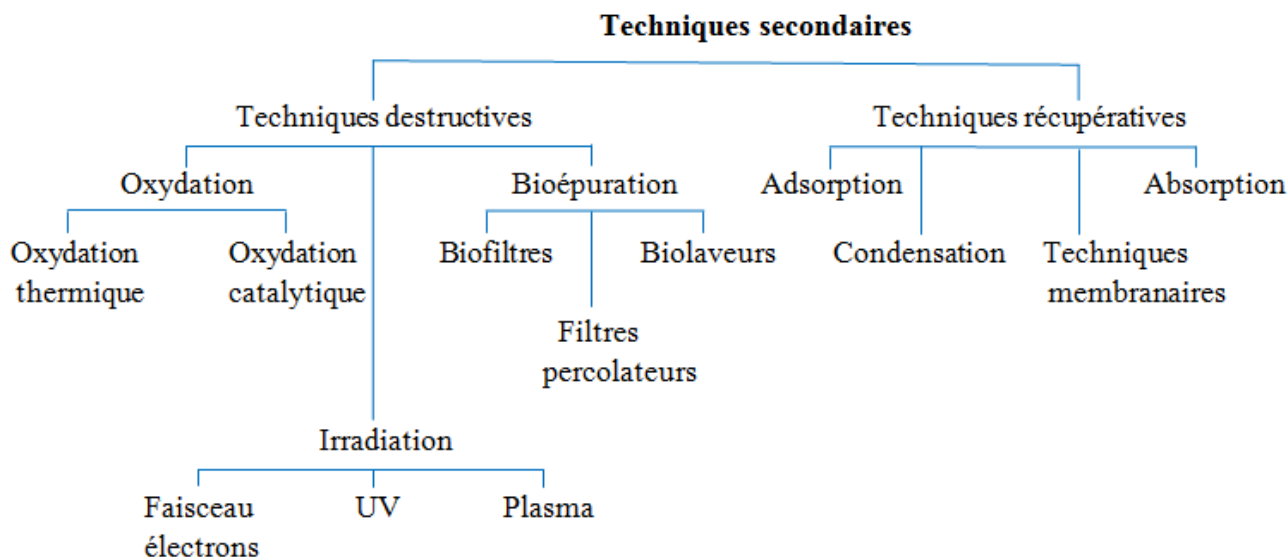
Les émissions de COV ont un impact direct sur la santé humaine. Ils sont à l'origine de la formation des photooxydants tels que l'ozone, lui-même responsable de gêne respiratoire chez l'homme. Les COV peuvent aussi directement provoquer des irritations sensorielles (hydrocarbures et formaldéhydes). Des manifestations plus sévères telles que les troubles cardiaques (toluène, chloroforme) et digestifs ou les effets cancérogènes (benzène) et mutagènes, sont liés à des expositions chroniques ou intenses enregistrées dans le passé dans certaines ambiances de travail. Les concentrations relevées dans l'environnement sont très inférieures à ces atmosphères et n'entraînent pas d'expositions aiguës.

### I.5.2) Les effets sur l'environnement :

L'effet principal des COV sur l'environnement est lié à leur participation à des réactions photochimiques complexes avec d'autres composés présents dans l'atmosphère. En présence d'oxydes d'azote et du rayonnement solaire, ils contribuent à la formation de composés oxydes et nitres dont les plus connus sont les Peroxy-Acyle Nitrate (PAN). Ils font aussi partie des gaz précurseurs de l'ozone troposphérique (basse atmosphère) en se conjuguant avec les oxydes d'azote. Les COV interviennent également dans les processus conduisant à la formation des gaz à effet de serre [6,7,8].

### I.6) Les techniques de récupération et de destruction des COV :

Dans le but de réduire les émissions de COV, il est possible d'agir à la source en évitant toute production de polluant, en réduisant la consommation des solvants ou en substituant les produits polluants par des produits peu ou pas nocifs par exemple. Ces techniques sont dites primaires. Il est aussi possible d'agir après la formation des polluants : on parle alors de techniques secondaires. Ces dernières n'imposent pas le changement des produits mais l'ajout d'une unité de traitement en queue ou milieu de process, voire le changement d'une unité déjà existante. Parmi elles, il existe deux types de techniques comme illustré sur la **Figure I.2** : les techniques destructives et les techniques récupératives.



**Figure I.2** : Organigramme simplifié des principales techniques secondaires de traitement de COV (Okeke, 1995).

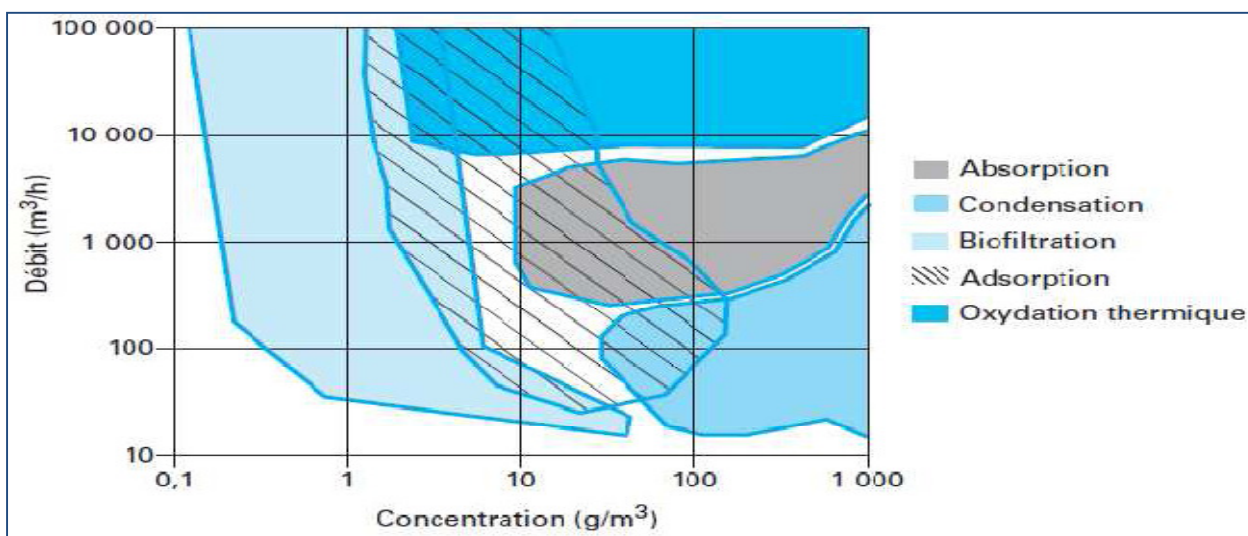
Les techniques de destruction, telles que les procédés d'oxydation, l'irradiation et les procédés biologiques, permettent une valorisation énergétique des COV. Les techniques de récupération valorisent les COV en tant que matière première. On compte parmi elles l'adsorption, la condensation, les procédés membranaires et l'absorption.

Les trois principales techniques de récupération sont :

- ❖ La condensation : mécanique et/ou cryogénique.
- ❖ L'adsorption : sur charbon actif en grains, sur tissu de charbon actif, sur zéolithes, sur gel de silice, sur polymères et autres adsorbants.
- ❖ L'absorption : par lavage à l'eau, à l'huile ou autre absorbant [6,9].

Le nombre important de techniques permettant l'abattement des COV traduit bien le fait que, d'une part, il n'existe pas de solution universelle pour le traitement des rejets de COV et que, d'autre part, le traitement est appliqué avec ses avantages et ses inconvénients à des situations spécifiques. En effet, le choix du type de procédé est lié directement à la composition de l'effluent à traiter (mono ou poly produits, type de polluant), aux débits, aux concentrations ainsi qu'à des contraintes économiques.

Afin de faciliter le choix d'un procédé, certains auteurs ont évalué et représenté les zones de compétitivité des procédés de traitement les plus employés industriellement sur un schéma débit / concentration [1,10]. A titre d'exemple, la **Figure I.3** représente la proposition de Le Cloirec sur les domaines d'application des différentes techniques d'abattement de COV en fonction du débit de gaz à traiter et des concentrations en COV.



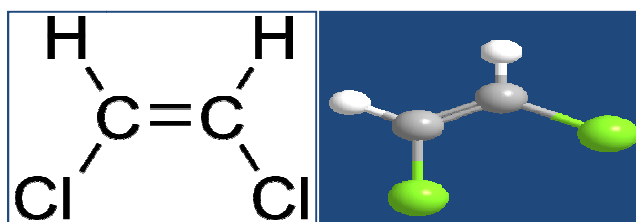
**Figure I.3 :** Zones de compétitivité des principaux procédés de traitement de COV.

## I.7) Choix des composés organiques volatiles étudiés :

Dans le cadre de notre travail nous avons examiné l'adsorption, sur un charbon actif granulé, des micropolluants organiques susceptibles de polluer l'air tels que dichloroéthylène, trichloroéthylène et tétrachloroéthylène. Le choix de ces molécules a été motivé, d'une part, par leur caractère nocif pour l'environnement et la santé humaine, et d'autre part, par leur présence dans l'atmosphère.

### I.7.1) Dichloroéthylène :

Le 1,2-dichloroéthène ou 1,2-dichloroéthylène ou 1,2-dichloroacétylène est un alcène chloré de formule brute  $C_2H_2Cl_2$  (**Figure I.4**). C'est un puissant solvant très inflammable. Il ne doit pas être confondu avec le 1,2-dichlorure d'éthylène, nom ancien du 1,2-dichloroéthane, est un composé chimique se présentant à température ambiante comme un liquide incolore et volatil émettant une odeur douceâtre relativement forte pouvant mettre certaines personnes mal à l'aise.



**Figure I.4 :** Molécule de cis-dichloroéthène [11].

#### I.7.1.a) Caractéristiques :

Les propriétés physico-chimiques de cis-dichloroéthène utilisé sont regroupées dans le **Tableau I.1**.

**Tableau I.1 :** Caractéristiques physico-chimiques de cis-dichloroéthène utilisé.

<b>Aspect</b>	liquide
<b>Masse molaire (g/mol)</b>	96,943
<b>Point d'ébullition (°C)</b>	60
<b>Point de fusion (°C)</b>	-81
<b>Densité du liquide (par rapport à l'eau)</b>	1,29
<b>Solubilité dans l'eau (20°C) (g/l)</b>	0,8
<b>Densité de vapeur (air =1)</b>	3,4
<b>Pression de vapeur (20°C) (kPa)</b>	24

### I.7.1.b) Toxicité :

- ❖ Son caractère très volatil explique un risque d'intoxication aiguë ou chronique par inhalation.
- ❖ Selon la littérature médicale, une exposition aiguë par inhalation peut provoquer une neuropathie optique sévère et à une attaque du foie (hépatite).
- ❖ Le contact prolongé avec la peau peut provoquer des irritations ou des brûlures chimiques par dissolution des tissus adipeux.
- ❖ Tous les solvants sont déprimeurs du système nerveux central :  
Le dichloroéthylène est particulièrement narcotique, il a été utilisé par le passé comme gaz anesthésique [12,13].

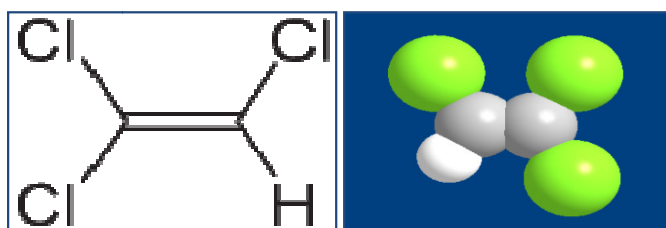
### I.7.1.c) Usages :

Le 1,2-dichloroéthylène est utilisé principalement comme intermédiaire chimique dans la synthèse de solvants (trichloroéthylène, tétrachloroéthylène) et de composés chlorés. Il est également utilisé :

- ❖ Comme solvant pour les graisses, les phénols, le camphre, le caoutchouc naturel, les teintures, les laques, les thermoplastiques et pour l'extraction à froid de substances sensibles à la température (parfums, caféine).
- ❖ Comme réfrigérant.
- ❖ Comme agent de retardement de la fermentation [14].

### I.7.2) Trichloroéthylène :

Le trichloréthylène est un composé organique de formule brute  $C_2HCl_3$  (**Figure I.5**) et de formule semi-développée  $ClCH=CCl_2$ . Il est également appelé trichloréthène (ou trichloroéthène), trichlorure d'éthylène ou d'éthène, trilène ou tout simplement trichlo ou trichlore. Il s'agit d'une molécule d'éthène dont trois atomes d'hydrogène ont été remplacés par des atomes de chlore [15].



**Figure I.5** : Molécule de trichloréthylène.

### I.7.2.a) Caractéristiques :

Les propriétés physico-chimiques de trichloréthylène utilisé sont regroupées dans le **Tableau I.2**.

**Tableau I.2** : Caractéristiques physico-chimiques de trichloréthylène utilisé [16].

<b>Aspect</b>	liquide
<b>Couleur</b>	incolore
<b>Formule brute</b>	$C_2HCl_3$
<b>Masse molaire (g/mol)</b>	131,39
<b>Point d'ébullition (°C)</b>	86,9
<b>Point de fusion (°C)</b>	-84,80
<b>Densité du liquide (par rapport à l'eau)</b>	1,464
<b>Solubilité dans l'eau (20°C) (g/l)</b>	1,0
<b>Densité de vapeur (air =1)</b>	4,53
<b>Pression de vapeur saturante (20°C) (kPa)</b>	7,8

### I.7.2.b) Propriétés toxicologiques [17] :

- ❖ Chez l'homme le trichloroéthylène inhalé a pour organe cible privilégié le système nerveux central.
- ❖ Une fois absorbé, le trichloréthylène est distribué par la circulation sanguine dans la plupart des organes.
- ❖ Le trichloroéthylène est un irritant grave de la peau (érythème, sensation de brûlure) et des yeux
- ❖ L'exposition aux vapeurs peut causer l'irritation des voies respiratoires supérieures, des yeux et de la peau.

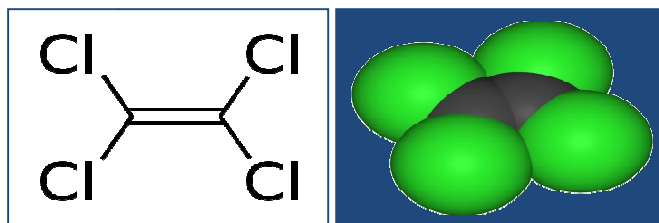
### I.7.2.c) Utilisation et sources d'émission [18] :

Le trichloroéthylène sert principalement :

- ❖ Au dégraissage et nettoyage des pièces métalliques, surtout sous forme de vapeur chaude.
- ❖ A la synthèse d'hydrofluorocarbones.
- ❖ Comme détachant pour l'industrie du textile et du vêtement.
- ❖ Au nettoyage de pièces électroniques.
- ❖ Comme solvant dans diverses applications telles que la formulation d'adhésifs, lubrifiants, peintures, décapants, vernis, colles, teintures de tissus.

### I.7.3) Tétrachloroéthylène :

Le perchloroéthylène ou tétrachloroéthylène est un composé chimique de formule  $\text{Cl}_2\text{C}=\text{CCl}_2$  (**Figure I.6**), parfois simplement appelé « perchlo ». Ce solvant fait partie des composés organiques volatils (COV) : il intervient dans la production d'ozone à basse atmosphère.



**Figure I.6** : Molécule de tétrachloroéthylène.

#### I.7.3.a) Caractéristiques :

Les propriétés physico-chimiques de tétrachloroéthylène utilisé sont regroupées dans le **Tableau I.3**.

**Tableau I.3** : Caractéristiques physico-chimiques de tétrachloroéthylène utilisé [19].

<b>Aspect</b>	liquide
<b>Couleur</b>	incolore
<b>Formule brute</b>	$\text{C}_2\text{Cl}_4$
<b>Masse molaire (g/mol)</b>	165,83
<b>Point d'ébullition (°C)</b>	121
<b>Point de fusion (°C)</b>	-22
<b>Densité du liquide (par rapport à l'eau)</b>	1,6
<b>Solubilité dans l'eau (20°C) (g/l)</b>	0,15
<b>Densité de vapeur (air =1)</b>	5,72
<b>Pression de vapeur saturante (20°C) (kPa)</b>	1,9

### **I.7.3.b) Toxicité [20] :**

- ❖ Le perchloroéthylène est absorbé par inhalation, par voie orale et par la peau (quand il est sous forme liquide). Il est toxique pour le système nerveux et le rein.
- ❖ L'exposition au tétrachloroéthylène peut causer une irritation des voies respiratoires et des yeux, des vertiges, nausées, maux de tête et pertes de mémoire, une somnolence et cela peut aller jusqu'à la perte de connaissance et la mort.
- ❖ Le perchloroéthylène est probablement cancérigène pour l'homme.
- ❖ Le perchloroéthylène est dangereux pour l'environnement. Rejeté dans l'eau ou l'air, il se dégrade très lentement.

### **I.7.3.c) Utilisation et sources d'émission [21] :**

Le perchloroéthylène est utilisé dans les domaines suivants :

- ❖ L'industrie du nettoyage à sec.
- ❖ Le dégraissage et le nettoyage des pièces métalliques.
- ❖ Les décapants pour peinture.
- ❖ Les encres d'imprimerie.
- ❖ Les produits de nettoyage spécifiques, dont plusieurs sous forme d'aérosols.
- ❖ L'industrie textile ( finition et teinture).
- ❖ Les liquides isolants pour transformateurs électriques.
- ❖ La désulfuration du charbon.

Les techniques de l'élimination des COV sont très diversifié on compte parmi elle l'adsorption, les procédés membranaires et l'absorption etc.

L'adsorption sur le charbon actif est une technique très répandue pour l'élimination des COV présents dans l'air ou autre gaz.

La technologie de séparation par adsorption constitue aujourd'hui une des technologies de séparation les plus importantes, en particulier parmi les technologies qui ne sont pas basées sur l'équilibre vapeur-liquide. Elle est largement utilisée pour la séparation et la purification des gaz et des liquides dans des domaines très variés, allant des industries pétrolières, pétrochimiques et chimiques, aux applications environnementales et pharmaceutiques.

## **I.8) L'adsorption :**

### **I.8.1) Définition :**

L'adsorption est un phénomène physico-chimique se traduisant en particulier par une modification de concentration à l'interface de deux phases non miscibles.

L'adsorption est un phénomène de surface par lequel des molécules de gaz ou de liquide se fixent sur les surfaces solides des adsorbants selon divers processus plus ou moins intenses. Il a son origine dans les forces d'attraction intermoléculaires, de nature et d'intensité variées, qui sont responsables de la cohésion des phases condensées, liquides ou solides.

Une molécule attirée inégalement par les autres molécules de deux phases trouvera une position énergétiquement favorable à la surface de la phase qui l'attire le plus.

L'adsorption par un solide peut donc être définie comme étant le phénomène d'enlèvement de molécules d'une phase gazeuse ou liquide par la surface de ce solide. Le terme « Surface » doit s'étendre à la totalité de la surface du solide, surface géométrique pour un solide en grain non poreux à laquelle s'ajoute pour un solide poreux, la surface interne engendrée par les fissures et les pores.

En général l'adsorption se rapporte toujours à l'étude des interfaces gaz/solide et liquide/solide. Le solide qui est siège de cette adsorption est appelé « adsorbant » ; le composé gazeux ou liquide qui subit l'adsorption est appelé « adsorbat » [22,23].

### **I.8.2) Principe :**

L'adsorption est un phénomène de fixation de molécules sur la surface d'un solide, ce phénomène est utilisé pour récupérer les molécules indésirables de fluide (liquide ou gazeux) dispersées dans un solvant par l'établissement entre le solide et les molécules, des liaisons de Van der Waals (liaisons de type électrostatique de faible intensité, avec des énergies d'interaction entre 5 et 40 kJ/mol) [24].

### **I.8.3) Les différents types d'adsorption :**

Il existe deux types de processus d'adsorption : adsorption physique ou physisorption et adsorption chimique ou chimisorption.

#### **I.8.3.1) Adsorption physique :**

L'adsorption physique (ou physisorption) se produit lorsque les forces d'attraction secondaires dites de Van der Waals lient la molécule qui s'adsorbe à la surface du substrat. L'adsorption physique est le type d'adsorption le plus courant, la plupart des procédés d'adsorption séparative étant basés sur la physisorption.

Elle se produit sans modification de la structure moléculaire et est parfaitement réversible (c'est-à-dire que les molécules adsorbées peuvent être facilement désorbées en diminuant la pression ou en augmentant la température), elles correspondent à des énergies faibles. La physisorption est un processus instantané, elle ne nécessite pas d'énergie d'activation, et les molécules du gaz ou liquide sont retenues par la surface du solide presque aussi rapidement qu'elles l'atteignent.

La physisorption est un phénomène non spécifique donnant lieu à la formation de multicouches : la première couche est due aux interactions adsorbat/adsorbant alors que les suivantes concernent les interactions adsorbat/adsorbat.

#### **I.8.3.2) Adsorption chimique :**

Dans le cas de l'adsorption chimique (ou chimisorption), le processus résulte d'une réaction chimique avec formation de liens chimiques entre les molécules d'adsorbat et la surface d'adsorbant. L'énergie de liaison est beaucoup plus forte (entre 100 et 400 kJ.mol<sup>-1</sup>) que dans le cas de l'adsorption physique et le processus est beaucoup moins réversible et même parfois irréversible. Comme une seule couche au plus d'adsorbat peut se lier chimiquement à la surface de l'adsorbant, la chimisorption est nécessairement restreinte à une monocouche. De plus, ce phénomène est spécifique car la formation de liens chimiques (pouvant modifier la nature de l'adsorbat puisque des ruptures de liaison peuvent se produire) a lieu entre une molécule adsorbée et une position particulière de l'adsorbant (site chimiquement actif). Ce type d'adsorption est rencontré lors des réactions catalytiques à la surface du solide et lors du stockage de substances par immobilisation chimique des polluants par formation de composés moins solubles [22,25].

## **I.9) Charbon actif :**

### **I.9.1) Définition :**

Le charbon actif également appelé charbon activé est un matériau noir composé essentiellement de matière carbonée à structure poreuse. De part cette porosité, la surface développée par le charbon actif est énorme, un gramme de charbon actif présente une surface interne pouvant atteindre plus de  $1500 \text{ m}^2.\text{g}^{-1}$  et cette caractéristique unique est responsable de ses propriétés d'adsorption [26]. Le charbon actif est le composé le plus adsorbant actuellement connu. Cette caractéristique est due à des millions de micropores créés lors de la fabrication de ce matériau.

Le charbon actif est en général disponible sous deux formes différentes :

- ❖ Charbon actif en poudre.
- ❖ Charbon actif granulé.

Dans le cadre de ce travail, nous avons intéressé à l'adsorption des COV sur un charbon actif sous forme granulé.

### **I.9.2) Charbon actif granulé (CAG) [27,28,29] :**

Le charbon actif granulé peut être soit en forme granulée soit extrudée, sa granulométrie est comprise entre 0,5 à 3 mm.

Le charbon actif granulé est, la plupart du temps, employé dans le traitement des eaux pour la réduction des oxydants chlorés résiduels et une très faible élimination de certains sous-produits de désinfection tels que les bromates et les chlorates, et aussi utilisé pour enlever la turbidité et pour dissoudre des composés organiques, l'odeur, les taches, les colorants. Le charbon actif granulé est utilisé pour l'élimination des micropolluants organiques et de la matière organique.

#### ***I.9.2.1) Avantages du charbon actif granulé :***

- ❖ La durée de vie du charbon actif granulé dépend de l'abattement de la matière organique et du lissage des points de pesticide. Le choix du type de charbon actif est également déterminant sur le rendement de l'élimination.
- ❖ Le charbon actif granulé a une capacité d'adsorber une partie de presque toutes les vapeurs.
- ❖ Il a une grande capacité d'adsorption pour les substances organiques en particulier les solvants.
- ❖ Il retient un grand nombre de substances chimiques en même temps.

- ❖ Il fonctionne bien dans un domaine large de température et d'humidité.
- ❖ Il est inerte et on peut l'utiliser en toute sécurité.
- ❖ Il est facilement disponible et de bon marché.

### ***I.9.2.2) Inconvénients du charbon actif granulé :***

- ❖ Durée de vie limitée.
- ❖ Préfiltration : les carburants dissous et matières en particules peuvent rapidement encrasser le charbon, nécessitant un prétraitement dans la plupart des cas.
- ❖ Coût : le besoin de remplacer régulièrement le charbon épuisé rend le charbon actif granulé plus cher que le stripping pour des concentrations élevées de contaminants.

Les propriétés d'adsorption des charbons actifs sont étudiées depuis plusieurs décennies dans des domaines variés allant des industries chimiques et pharmaceutiques aux applications environnementales.

### **I.9.3) Propriétés [30] :**

Un certain nombre de paramètres permettent de caractériser un charbon actif :

#### **I.9.3.1) Le volume poreux et la taille des pores :**

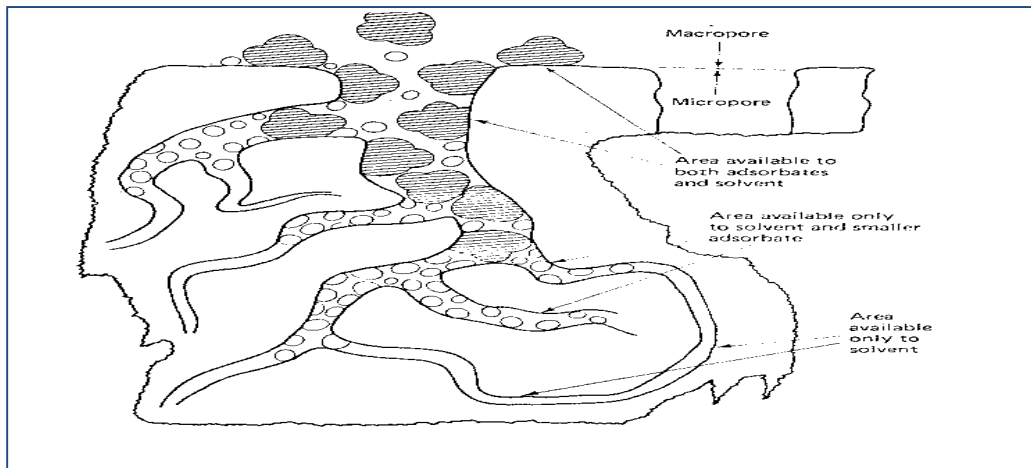
Selon la classification IUPAC, les tailles de pores sont réparties en trois groupes :

- ❖ Micropores : < 2 nm.
- ❖ Mésopores : 2-50 nm.
- ❖ Macropores : > 50 nm.

Les macropores jouent un rôle important dans le processus d'adsorption mais leur importance provient du fait qu'ils permettent l'accès rapide dans les méso et les micropores.

Les mésopores sont le groupe de pores le plus important pour l'adsorption des molécules organiques, tandis que les micropores sont responsables principalement du déplacement des composés plus volatils plus petits. La **Figure I.7** montre la structure typique des pores de charbon actif.

Le volume poreux et la distribution des tailles sont mesurées par adsorption d'azote à 77 K et par porosimétrie au mercure (pour les macropores). Le volume poreux total des charbons actifs est de 0,5 à 1 cm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup> (50 à 70% en volume).



**Figure I.7 :** Structure d'un charbon actif.

### **I.9.3.2) La surface spécifique :**

La surface spécifique est la surface des pores. Le volume poreux étant important, la surface développée est énorme : de 500 à 1500  $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$ . Notons que ce sont essentiellement les micros et mésopores qui créent de la surface. La surface spécifique est calculée en mesurant la quantité d'un gaz adsorbé à basse température (généralement l'azote à 77 K) et en supposant que la surface est recouverte par une monocouche de molécules. Connaissant le diamètre d'une molécule et donc sa surface, on en déduit la surface d'adsorption.

### **I.9.3.3) Les caractéristiques physiques :**

Elles permettent de déterminer les conditions d'utilisation du charbon actif. La taille des grains conditionne la vitesse d'adsorption (plus le grain est petit, plus le transfert vers le centre est rapide) et la perte de charge à travers le lit. Pour les applications en phase gazeuse, le charbon actif est disponible sous forme de grains de 2 à 3 mm de diamètre et de filets ou extrudés, cylindres de 3 à 5 mm de longueur obtenus à partir de charbon actif d'abord réduit en poudre puis aggloméré avec un liant et extrudé pour obtenir la forme cylindrique. La masse volumique du grain est de 0,6 à 1  $\text{g}.\text{cm}^{-3}$ . La dureté est un paramètre important qui conditionne sa résistance au tassement, à l'attrition et aux vibrations. Elle permet d'évaluer la formation de fines (poussières), nuisibles au fonctionnement des installations (colmatage du lit, dépôt dans les tuyaux et vannes...).

### I.9.3.4) Les fonctions de surface :

Ce sont des radicaux souvent oxygénés présents à la surface du charbon et liés à l'origine et à la méthode de fabrication du charbon actif. Ils peuvent influencer la sélectivité du matériau pour certaines molécules.

Les propriétés de charbon actif granulé utilisé dans notre travail sont montrées dans le tableau suivant :

**Tableau I.4 :** Propriétés de charbon actif granulé utilisé.

<b>charbon</b>	BPL charbon (Calgon Co.)
<b>taille de charbon</b>	4×6 mesh
<b>diamètre moyen (<math>d_p</math>)</b>	0.3715 (cm)
<b>densité apparente (<math>\rho_a</math>)</b>	0.85 (g/cm <sup>3</sup> )
<b>densité de charbon (<math>\rho_c</math>)</b>	2.5 (g/cm <sup>3</sup> )
<b>fraction vide de particules (<math>\epsilon_p</math>)</b>	0.595
<b>densité moyenne de lit (<math>\rho_b</math>)</b>	g de CAG/ cm <sup>3</sup> de volume de lit
<b>fraction vide de lit (<math>\epsilon</math>)</b>	1.0 - ( $\rho_b / \rho_a$ )
<b>superficie totale (N<sub>2</sub>, BET)</b>	1050-1150 (m <sup>2</sup> /g)

## I.10) Applications de charbon actif au piégeage de COV :

Après avoir détaillé les caractéristiques physico-chimiques de l'adsorbant utilisé, nous nous intéressons à ses diverses utilisations pour le piégeage de COV. Cette partie se focalise sur les principaux paramètres régissant l'adsorption de COV contenus dans un effluent gazeux par un lit de charbon actif et par une suspension aqueuse de charbon actif. Nous verrons que dans le cadre de ces applications, la porosité et la chimie de surface sont les facteurs prépondérants de leurs performances.

### I.10.1) Adsorption (gaz/solide) en lit fixe :

L'adsorption de COV en phase gaz (**Figure I.8**) correspond au transfert de l'effluent gazeux vers la surface du solide. C'est un phénomène de condensation où les forces d'adsorption concentrent les molécules du fluide au sein des pores du charbon actif. Cette technique représente 30 % des installations actuelles en fonctionnement pour la récupération des COV contenus dans des effluents gazeux [31]. A saturation du solide, la désorption s'effectue à l'aide d'un fluide caloporteur du type vapeur d'eau ou gaz chaud ou par chauffage intrinsèque du matériau [32].

Cette technique peu coûteuse n'est pas simple d'application. En effet, son efficacité dépend du couple adsorbant/polluant à traiter et de paramètres expérimentaux tels que la température ou le taux d'humidité.

Pour le traitement des gaz, le charbon actif est sous forme de granulés d'un diamètre de 2 à 5 mm et d'une longueur de 3 à 10 mm. Il peut être sous forme de petites billes de 0,5 mm de diamètre et de très grande dureté pour les procédés à lit fluidisé.

Le lit de charbon actif dans un adsorbeur est disposé en couche de 400 à 600 mm d'épaisseur.

L'air chaud circule de bas en haut avec une vitesse inférieure à 20 m/min pour éviter d'entraîner le charbon. Les débits traités vont de  $10^3$  à  $10^6$  m<sup>3</sup>/h avec une concentration en entrée de 5 à 25 g/m<sup>3</sup> et une concentration en sortie  $< 10$  mg/m<sup>3</sup>

La désorption consiste à extraire du solide adsorbé en utilisant les paramètres inverses de la thermodynamique : chauffage à la pression atmosphérique avec de la vapeur d'eau, un gaz inerte chaud ou de l'air chaud; chauffage sous vide partiel. Ces opérations de désorption sont suivies d'une condensation à pression atmosphérique.

Lors de la désorption, on récupère une phase liquide concentrée qu'il faut traiter. Selon la pureté des produits d'origine, les mélanges souhaités et le type de désorption utilisé, on procède aux opérations suivantes : décantation gravitaire, distillation, «stripping», déshydratation physique ou chimique. D'autres techniques de désorption utilisent le vide (dépôts pétroliers, remplissage de citernes ou de barges) ou un gaz neutre inerte et chaud (régénération du charbon actif se fait sous azote). L'économie d'énergie dans la désorption à la vapeur est un critère de viabilité. Il est à ce jour dans le domaine public et fait partie du standard pour les grandes unités de récupération dans l'héliogravure de presse. La chaleur utilisée pour la désorption produit de la vapeur basse pression qui, une fois compressée dans un éjecteur avec de la vapeur haute pression venant de la chaudière est recyclée vers l'adsorbeur. Le système ECOVAP permet une économie de 40 à 50% de la vapeur consommée.

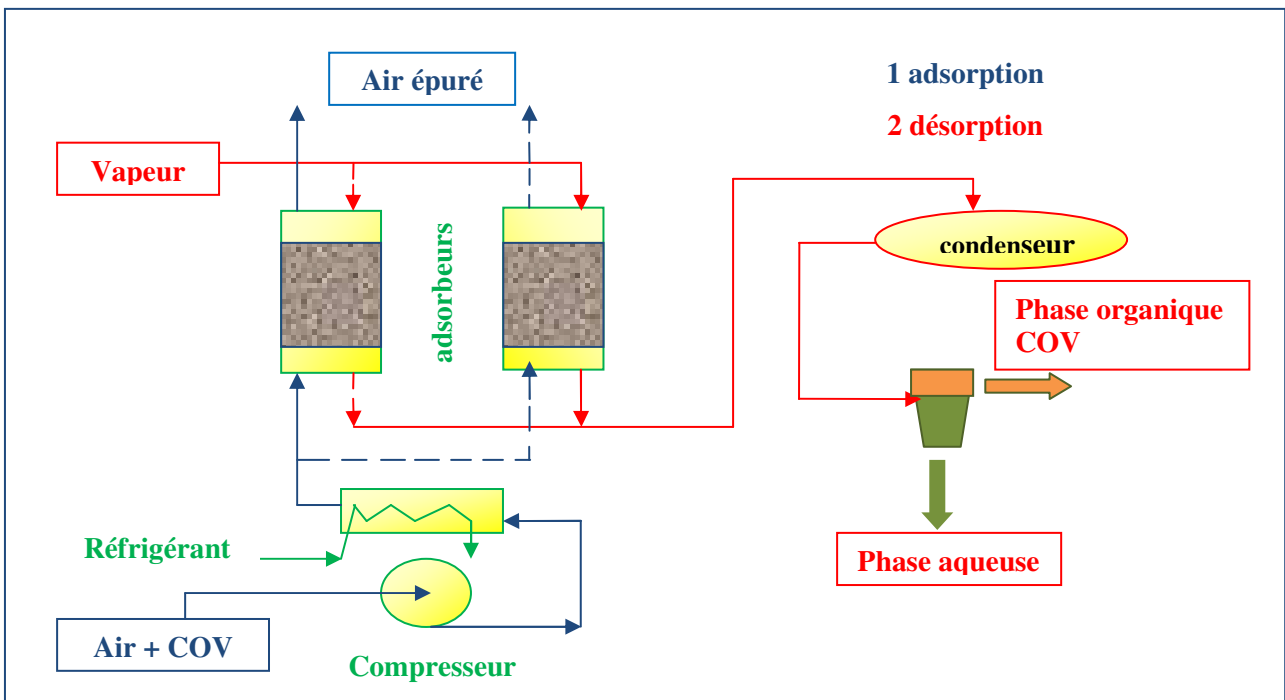
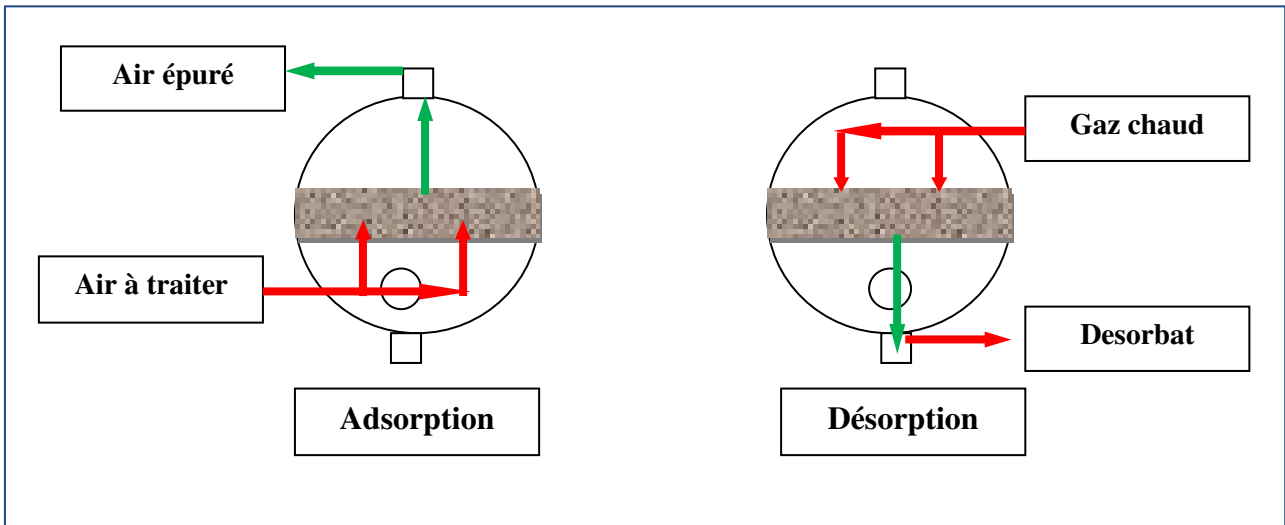


Figure I.8 : Processus d'adsorption & désorption sur un lit fixe.

### I.10.1.a) Couple adsorbant/polluant :

L'adsorption d'un COV sur charbon actif est fortement liée à sa nature physicochimique. Les facteurs physiques incluent la surface accessible du charbon actif, régie par la taille et le volume de pores vis-à-vis de la dimension moléculaire du polluant [33]. Par exemple, dans une étude d'adsorption du benzène et du toluène sur charbons actifs commerciaux et synthétisés à partir de sources carbonées fossiles (houille, anthracite), Lillo- Ródenas et coll ont démontré que le taux d'adsorption dépendait fortement de la microporosité pour ce type de molécules ( $< 0.7$  nm) [34]. En revanche, le diamètre de pore devait être plus grand que le COV pour permettre une diffusion rapide à l'intérieur du volume poreux. On constate que l'ensemble de la littérature sur le sujet montre que la capacité d'adsorption d'un milieu poreux vis-à-vis d'une molécule est très souvent proportionnelle à la surface adsorbante.

Nous venons de voir que la porosité est un paramètre déterminant. Néanmoins l'adsorption montre des disparités liées à la nature chimique du COV. Dans une étude sur les procédés curatifs pour le traitement des odeurs, Le Cloirec a quantifié les taux d'adsorption moyens des charbons actifs ( $\tau_{ads}$ ) pour différentes molécules odorantes appartenant à la catégorie des COV (**Tableau I.5**) [35].

L'analyse de ces résultats montre que les composés avec un haut poids moléculaire, une faible pression de vapeur et un point de fusion élevé sont généralement fortement adsorbés. En effet, les interactions responsables de l'adsorption de COV en phase gaz sont principalement des forces de Van der Waals. Ces forces sont additives donc la force d'adsorption est la somme de toutes les interactions entre les atomes et la surface. De plus, l'adsorption se produit bien avant que le gaz n'atteigne une pression égale à sa pression de vapeur saturante. Néanmoins, les quantifications de Le Cloirec montrent que les COV tels que le benzène, le toluène ou le phénol ne satisfont pas à ces règles et présentent des taux d'adsorption élevés alors que les températures de fusion sont les plus importantes. En effet, d'autres interactions ont pu être mises en évidence lors de l'adsorption de molécules aromatiques sur le charbon actif, à savoir des interactions dispersives entre les électrons  $\pi$  du noyau aromatique et les électrons  $\pi$  du charbon actif (interactions  $\pi$ - $\pi$  stacking) favorisant ainsi l'adsorption de cette catégorie de molécules [36].

**Tableau I.5** : Influence des caractéristiques physico-chimiques des COV sur les taux d'adsorption sur charbon actif (valeurs issues des fiches toxicologiques INRS).

COV	Masse molaire	Pression de vapeur	Point de fusion	$\tau_{ads}$
-	mol/g	kPa (20°C)	°C	mg/g
Formaldéhyde	30	440	-118	<b>40</b>
Acétaldéhyde	44	138	-123	<b>70</b>
Disulfure de carbone	76	40	-111	<b>150</b>
Acétate d'éthyle	88	10	-83	<b>190</b>
Benzène	78	10	5	<b>240</b>
Toluène	92	3	-95	<b>290</b>
Phénol	94	0,02	41	<b>300</b>
Tétrachlorure de carbone	154	12	-23	<b>450</b>

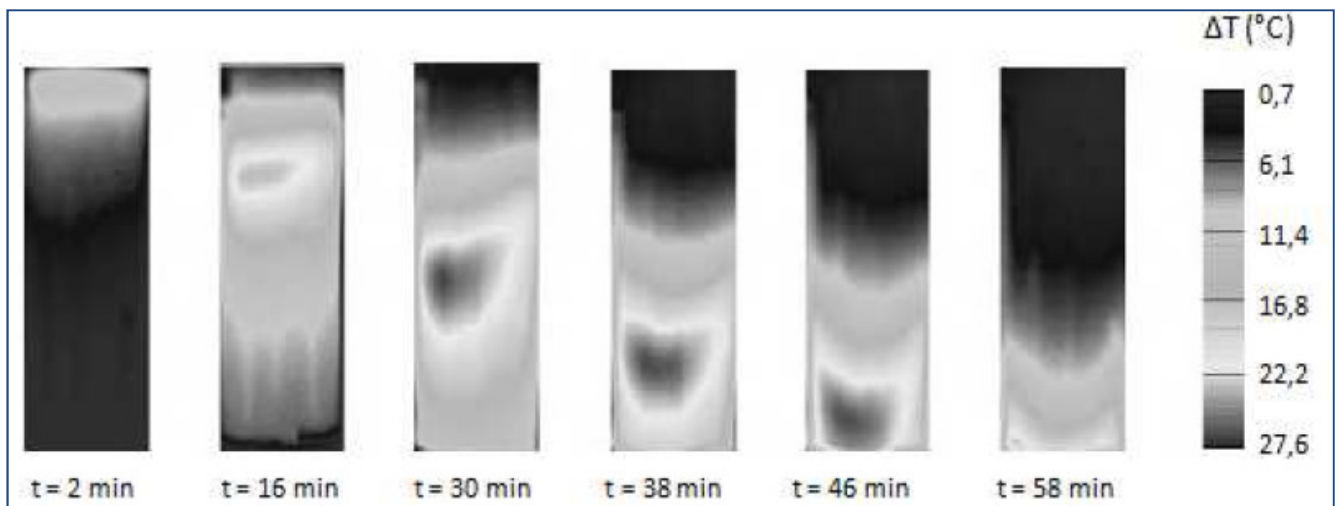
La polarité du COV peut aussi influencer le choix du charbon actif. En effet, une surface apolaire adsorbera préférentiellement des composés apolaires. Par exemple, Lillo- Ródenas et coll ont montré que l'augmentation des quantités de fonctions oxygénées sur la surface de charbons actifs entraînait une diminution des capacités d'adsorption en benzène et toluène. De plus, ces auteurs ont précisé que la présence des fonctions de surface à l'entrée des pores pouvait empêcher l'accès à la porosité interne pour l'adsorbat. A l'inverse, Chiang et coll ont augmenté l'acidité de la surface par traitements chimiques, ce qui s'est traduit par une augmentation de la polarité du charbon actif et donc par une augmentation de l'adsorption de composés polaires comme l'acétone ou l'acétonitrile.

De manière intéressante, le comportement en adsorption des charbons actifs peut être prédit par la détermination des interactions de surface dominantes par chromatographie inverse puis modélisation LSER (Linear Solvation Energy Relationship) [37]. Cette technique permet de comprendre les interactions moléculaires mises en jeu au cours du processus d'adsorption. Ainsi, il a été démontré qu'il était possible de prévoir la sélectivité des matériaux vis-à-vis de mélanges binaires de polluants gazeux dans des conditions de dilution infinie.

### I.10.1.b) Influence de l'humidité et de la température :

Néanmoins, lors de l'utilisation de charbons actifs polaires la présence d'humidité entraîne une adsorption compétitive entre les molécules d'eau et les COV. Dans une étude de compétitivité d'adsorption d'eau et de toluène sur des charbons actifs traités en milieux acides, Bekkum et coll ont présenté une corrélation entre l'augmentation des quantités d'eau adsorbées et l'augmentation des fonctions acides de surface. De plus, Grosze et Aharoni ont montré par microcalorimétrie que l'adsorption de la vapeur d'eau induisait des augmentations de température du charbon actif [38]. Ce qui a été attribué par ces auteurs et par d'autres à la chimisorption de l'eau sur la surface des charbons actifs polaires.

En effet, l'adsorption est un phénomène exothermique, selon les principes de la thermodynamique, ce qui peut mener à un échauffement du solide et donc à un abaissement des rendements. Différents auteurs ont prouvé que les capacités d'adsorption diminuaient quand la température augmentait. Par exemple, Le Cloirec et coll [39] ont étudié les variations de température au sein d'un lit de charbon actif lors de l'adsorption d'acétone. L'analyse par caméra infrarouge de la circulation de l'air pollué du haut vers le bas de l'adsorbant (**Figure I.9**) a montré sans équivoque les variations de température de l'adsorbant qui pouvaient atteindre localement plus d'une vingtaine de degrés.



**Figure I.9 :** Evolution de la température locale (caméra IR) dans un lit de charbon actif traversé par un effluent gazeux contenant de l'acétone (Conditions expérimentales :  $C_{\text{acétone}}=50\text{g.m}^{-3}$ ; Débit= $500\text{m.h}^{-1}$ ).

### **I.10.2) Adsorption/absorption (gaz/liquide/solide) :**

Une alternative possible à ces effets thermiques est de placer le charbon actif en solution aqueuse. Dans ce procédé, le solide adsorbant finement divisé permet de coupler les phénomènes d'adsorption et d'absorption dans l'eau. Les travaux pionniers ont été réalisés par Mehta et coll en 1967. Dans une étude sur le transfert de masse appliqué lors de l'adsorption de gaz (benzène, toluène, trichloréthylène et divers alcanes et alcools) dans des suspensions solides de charbons actifs, Mehta et coll ont montré que les quantités adsorbées étaient directement reliées à la solubilité de l'adsorbat. Pour ces auteurs, lors du transfert du gaz vers la suspension, l'adsorbat se dissout d'abord dans l'eau puis il est adsorbé par les particules de charbon actif.

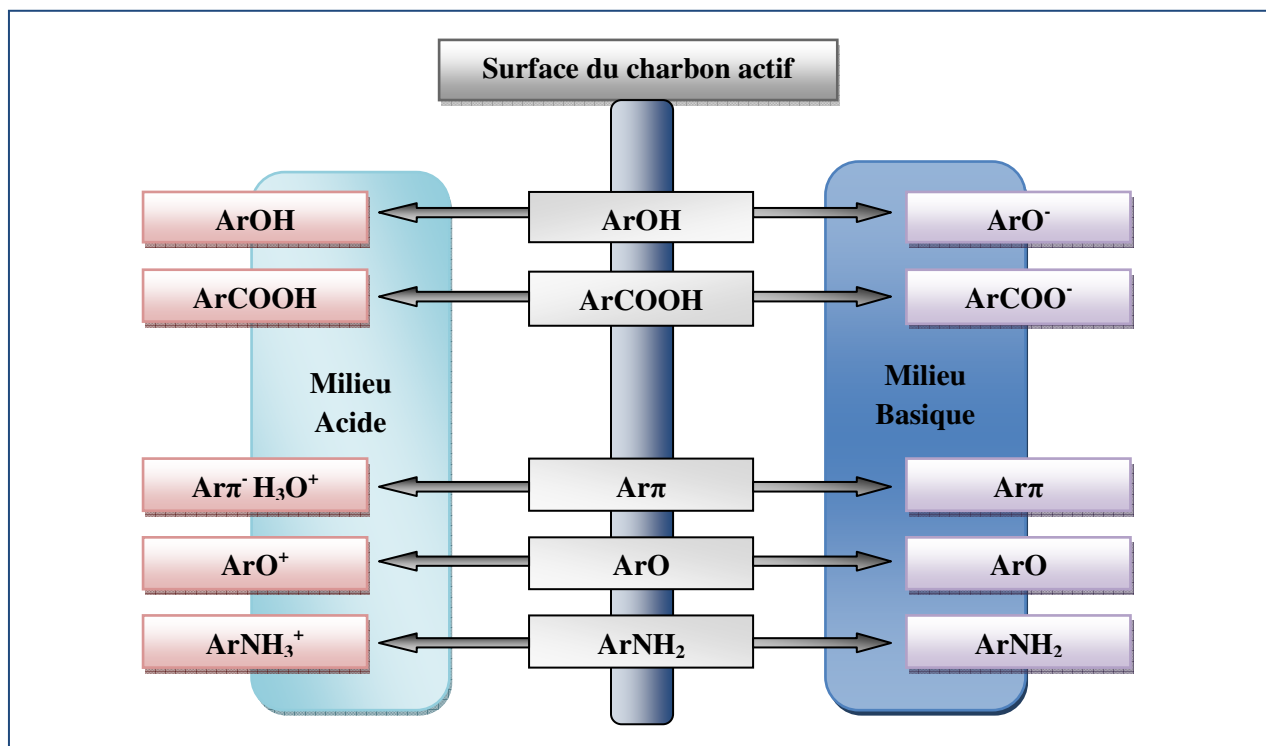
Cette méthode a par la suite suscité l'intérêt de la communauté scientifique car comparativement à un principe d'absorption simple dans l'eau, la suspension de charbons actifs présente l'intérêt de proposer un pouvoir absorbant plus élevé [40].

Toutefois, il n'y a pas d'accord dans la littérature pour expliquer les mécanismes régissant le transfert de matière dans ces systèmes multiphasiques gaz-liquide-solide. De plus, les paramètres pouvant influencer le transfert de matière sont nombreux, et l'interprétation des résultats sujette à controverse. De nombreux mécanismes proposés reposent sur les interactions entre la phase gazeuse et la phase solide : l'accélération du transfert serait due à un effet « navette » des particules présentes à l'interface entre la phase gaz et l'eau [41], ou à la modification de la structure hydrodynamique de la couche interfaciale en présence de grains, ou enfin à la rupture des bulles donnant lieu à une aire interfaciale accrue [42].

#### **I.10.2.a) Comportement du charbon actif en solution aqueuse :**

En milieu aqueux, les fonctions de surface sont responsables du caractère amphotère des charbons actifs, car la surface peut développer, soit des charges positives, soit des charges négatives en fonction du pH (**Figure I.10**).

Alors que les charges négatives sont portées par des fonctions acides déprotonées en milieu basique, on note qu'il y a deux sources principales de charges positives : i) les fonctions oxygénées ou azotées de nature basique initialement et ii) la formation de complexes donneur-accepteur d'électrons des plans graphitiques qui agissent comme des bases de Lewis.



**Figure I.10:** Représentation schématique des fonctions de surface du charbon actif en phase aqueuse.

### I.10.2.b) Couple adsorbant/polluant :

Nous venons de voir que l'immersion du charbon actif peut modifier ses propriétés de surface, dès lors les facteurs régissant l'adsorption sont plus complexes car ils comprennent plusieurs types d'interactions distinctes. Un bon exemple est l'adsorption des composés phénoliques. Il a été proposé plusieurs mécanismes possibles pour l'adsorption de phénols.

Ceux-ci incluaient i) des interactions de type  $\pi$ - $\pi$  stacking entre le plan graphitique du charbon actif et le cycle aromatique de l'adsorbant [43], ii) des interactions électrostatiques d'attraction-répulsion [44], iii) des liaisons d'hydrogène entre l'adsorbant et les groupes fonctionnels de surface du charbon actif et iv) des mécanismes donneur-accepteur d'électrons entre les fonctions oxygénées de la surface et l'anneau aromatique de l'adsorbant [45].

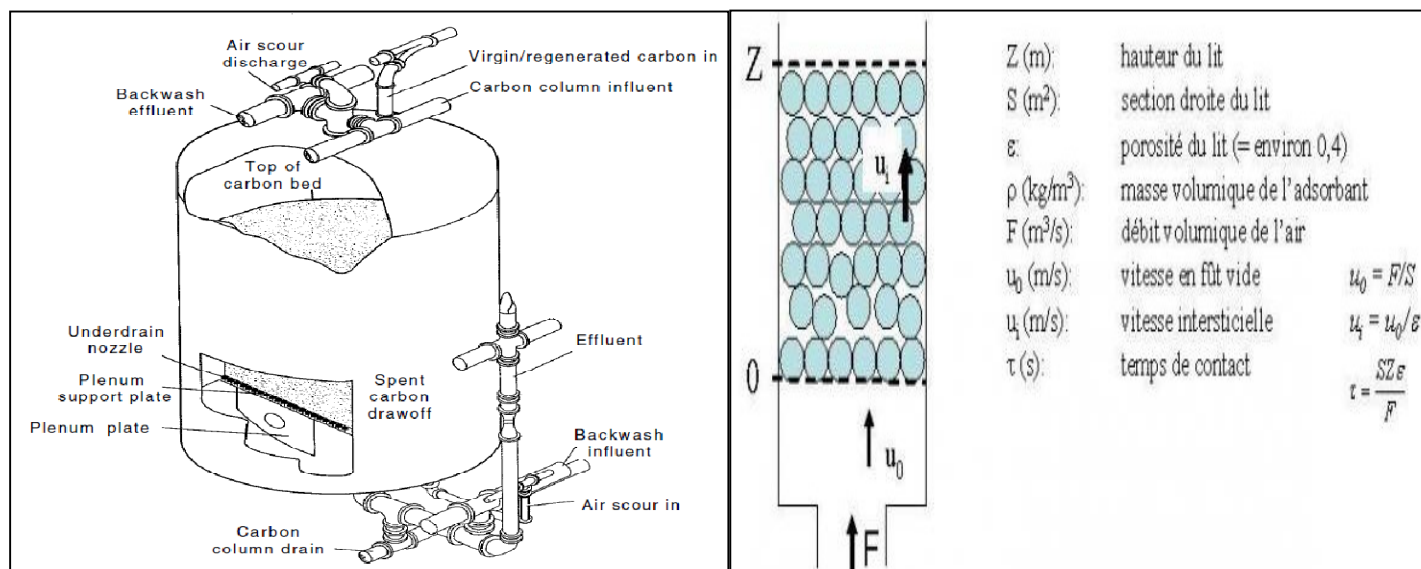
La solubilité du COV joue également un rôle déterminant dans le processus d'adsorption/absorption. La littérature portant sur le traitement des eaux montre qu'un COV polaire n'est plus ou très mal piégé, alors qu'une substance non polaire peut être totalement extraite de la phase aqueuse. Ce constat est en accord avec la loi de Lundelius [46] qui explique que les forces de rétention dans l'eau dues à l'hydrophilie du COV deviennent importantes et concurrencent l'attraction du COV vers le charbon actif.

Enfin des auteurs ont démontré que les sites polaires du charbon actif attiraient les molécules d'eau et pouvaient engendrer la croissance de clusters gênant l'adsorption des composés hydrophobes dans les micropores [47]. Par conséquent l'utilisation de charbons actifs hydrophobes semble préférable pour réduire l'impact de l'adsorption de l'eau.

### I.11) Comportement des colonnes d'adsorption du charbon actif :

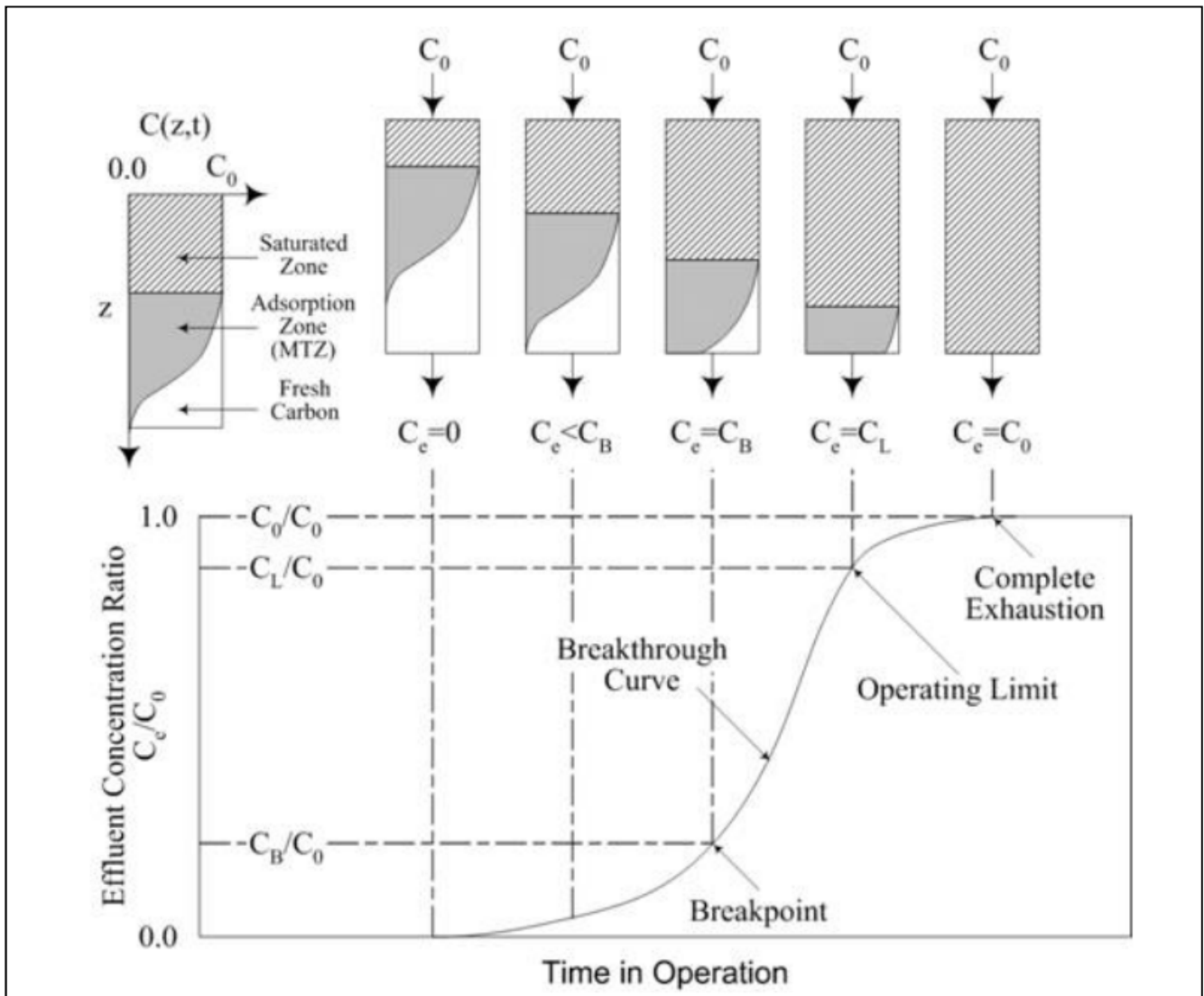
Les colonnes d'adsorption se comportent plus ou moins de la même façon en tant que colonnes d'échange ionique durant leur fonctionnement (**Figure I.11**). Quand les eaux sont introduites au dessus d'un lit propre d'adsorbant, l'élimination de la plus grande proportion des corps dissous se produit dans une couche étroite au top de la colonne, désignée sous le nom de zone d'adsorption (zone de transfert de masse). Pendant que l'opération continue, les couches supérieures se saturent avec le corps dissous, la zone d'adsorption atteint le fond de la colonne et la concentration en corps dissous dans l'effluent commence à augmenter.

Un graphe représentant la concentration de corps dissous dans l'effluent en fonction du temps, donne une courbe en forme de S désignée sous le non de « **courbe de percée** ». La formation et le mouvement de la zone d'adsorption ainsi que la courbe résultante de percée sont représentés sur la **Figure I.12**. Le point sur la courbe en forme de S à laquelle la concentration en corps dissous atteint sa valeur maximale permise est désignée sous le nom de percée. Le point où la concentration effluente en corps dissous a atteint 95% de sa valeur initiale, s'appelle habituellement le point d'épuisement de la colonne [2,48].



**Figure I.11** : Schéma de colonne de charbon actif.

Le mouvement du ZTM dans un lit de charbon peut être graphiquement représenté dans ce qui s'appelle une courbe de percée.



**Figure I.12** : caractéristique de courbe de percée dans lit fixe.

Quand la percée se produit le charbon actif devra être remplacé pour garder des concentrations excessives des impuretés hors de l'effluent.

Une considération importante de conception est la longueur de la zone de transfert de masse (ZTM). La minimisation de la longueur du ZTM tient compte de plus de la capacité du charbon actif d'être utilisé pour n'importe quel objectif prédéterminé de traitement [49]. La longueur du ZTM est une fonction du débit affluant et du taux d'adsorption. Ceci signifie que n'importe quel paramètre qui change le taux d'adsorption changera également la longueur du ZTM dans une certaine mesure. Une équation commode pour calculer la longueur du ZTM est présentée au-dessous :

$$L_{MTZ} = \frac{L \cdot (t_s - t_b)}{t_s} \dots \dots (I.1)$$

Avec :

$L_{ZTM}$  : longueur du ZTM.

$L$  : longueur du lit entier de charbon dans le conjoncteur d'emballer-lit.

$t_b$  : temps où il prend pour que le lit de charbon atteignent le point de percée.

$t_s$  : temps où il prend pour que le lit de charbon atteigne l'épuisement complet.

La conception des adsorbants qui ont un délai de fonctionnement raisonnable à la percée est cruciale dans certaines applications. Le dépassement des objectifs prédéterminés de traitement peut prouver désastreux dans l'utilisation d'une telle eau ou air. Là existe une profondeur et un temps critiques de contact pour un adsorbant donné qui sur le démarrage immédiat mènerait à ce scénario désastreux d'obtenir la percée instantanément. Le temps standard de contact, ou le temps de contact de lit vide (EBCT) est employé dans la détermination de ces valeurs [50,51]. EBCT est défini est couple de différentes manières comme montré ci-dessous :

$$EBCT = \frac{V}{Q} = \frac{L_{lit}}{Q/A} \dots \dots (I.2)$$

Avec :

**EBCT** : temps de séjour de fluide dans le lit sans présence de l'adsorbant ou du temps de contact de lit vide.

$V$  : volume de charbon dans l'adsorbant.

$Q$  : débit volumétrique.

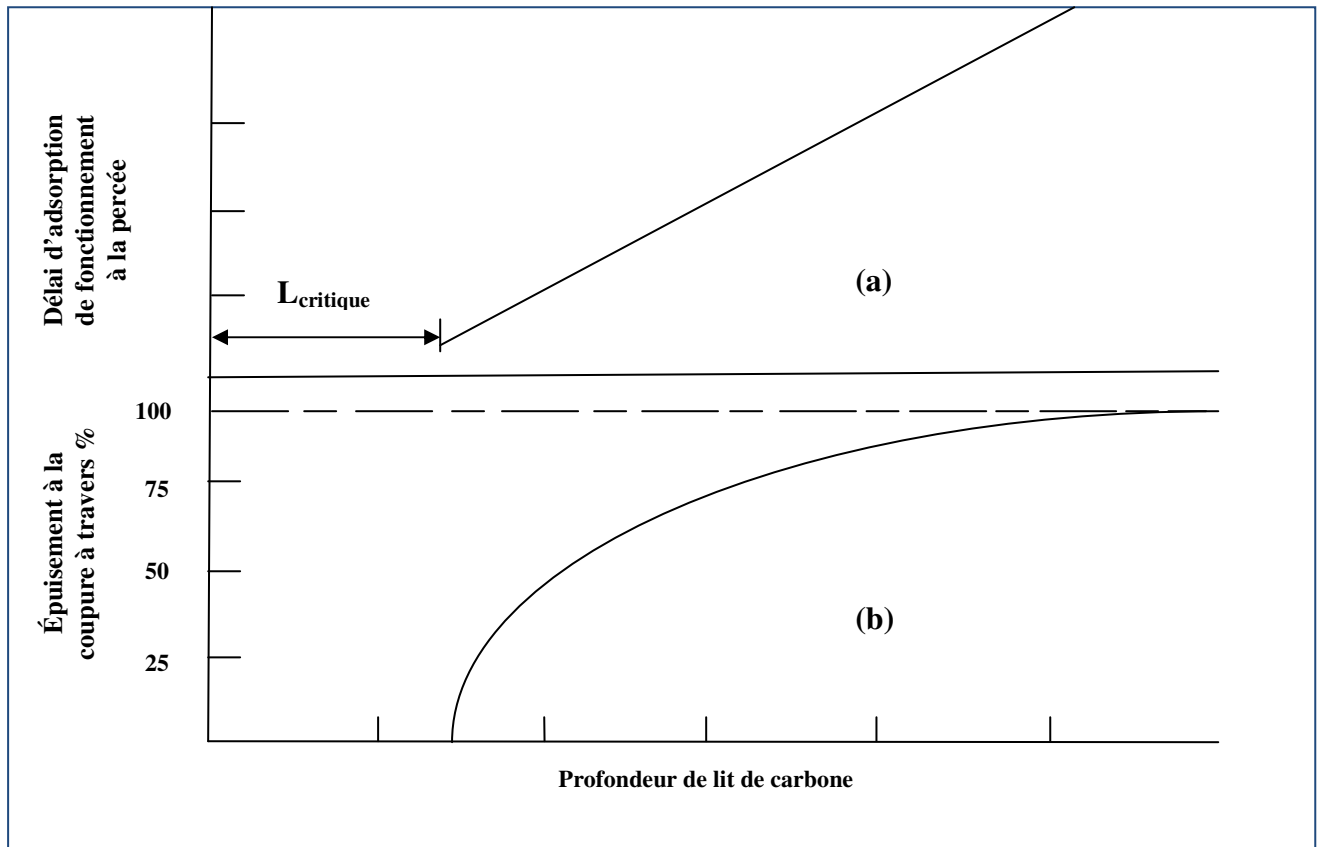
$L_{lit}$  : profondeur de lit.

$A$  : section de lit.

Le graphe (I.13.b) prouve que plus d'un pourcentage de charbon est épuisé à la percée avec l'augmentation de la profondeur de lit. Utilisant la longueur critique du graphe (I.13.a) on pourrait

calculer le temps minimum de contact de lit vide ( $EBCT_{min}$ ) qui serait nécessaire pour produire l'air traitée passant les objectifs de traitement. Ce rapport est comme suit :

$$EBCT_{min} = \frac{L_{critique}}{Q/A} \dots \dots (I.3)$$



**Figure I.13 :** Le temps minimum de contact de lit vide et les pourcents d'épuisement à la percée contre la profondeur [52].

Nous avons vu que l'adsorption sur le charbon actif est une technique utilisée depuis plusieurs décennies qui se révèle efficace pour l'élimination de COV. En effet, le charbon actif est un matériau relativement façonnable car la taille et la distribution des pores et les fonctions de surface de la matrice carbonée peuvent être contrôlées. En revanche, cette technique souffre de problèmes liés à la spécificité des charbons actifs pour certaines familles de COV et à leur perte d'efficacité en présence d'air.

## II.1) Modèles de transfert de masse :

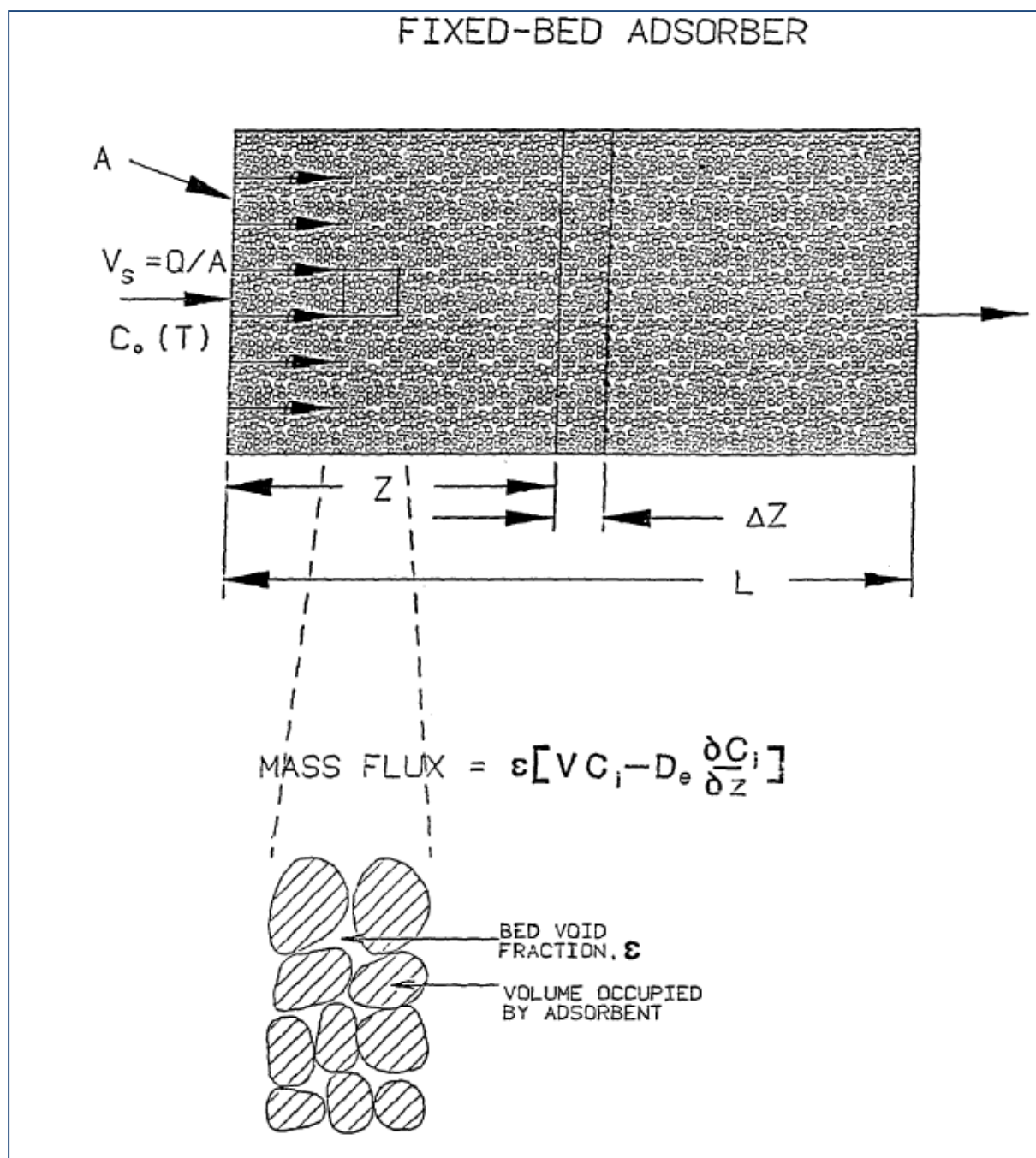
Quand l'air chargé de solvant est introduit dans un lit de CAG. Initialement, les composés organiques volatils (COV) adsorbent à l'entrée de lit. Cependant, en raison des résistances de transfert de masse, l'adsorption ne sera pas instantanée et n'a pas lieu au-dessus d'une certaine profondeur de lit. Dans la discussion qui suit, trois modèles mathématiques qui décrivent le destin d'un adsorbant dans un adsorbant à lit fixe sont décrits (Crittenden et al 1980, Friedman 1984). Ces modèles qui varient en complexité, seront comparés pour décider quels sont les mécanismes importants pour les inclure. Friedman (1984) donne une déviation complète des équations du modèle et de leurs solutions [53,54].

### II.1.1) Modèle d'écoulement dispersé de diffusion surfacique et poreux (DFPSDM) :

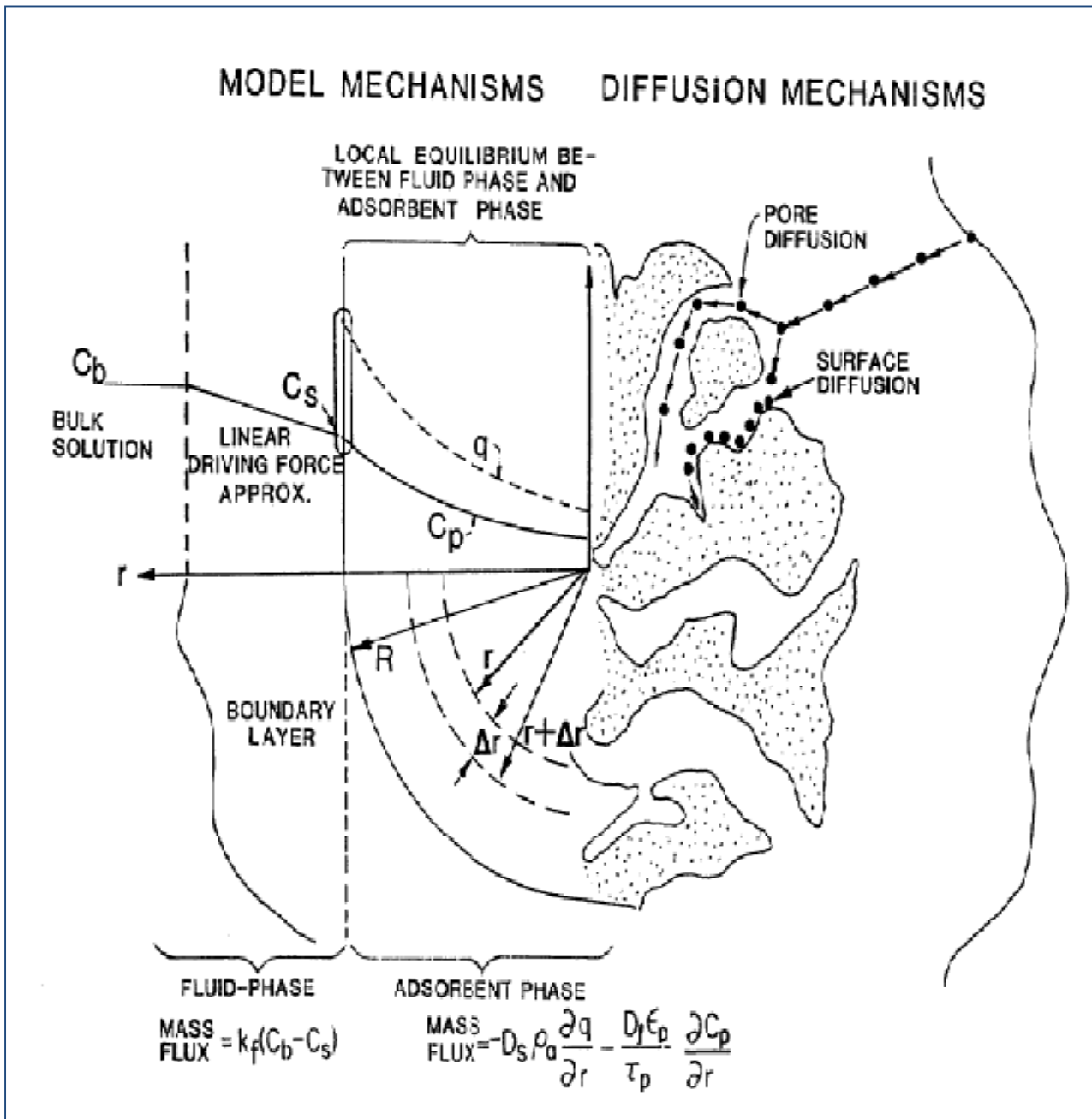
Les mécanismes de transport de masse qui sont incorporés au modèle d'écoulement dispersé de diffusion surfacique et poreux (DFPSDM) sont montrés sur les **Figures II.1** et **II.2**. Le DFPSDM incorpore des descriptions mathématiques des processus suivants : **1)** transport de corps dissous dans la direction axiale par écoulement advective et dispersif, **2)** résistance de diffusion dans la phase gazeux entourant la particule adsorbante, **3)** équilibre local à côté de la surface de l'adsorbante extérieure, **4)** résistance de diffusion dans l'adsorbant, et **5)** équilibre concurrentiel des corps dissous sur la surface de carbone (on assume que les effets concurrentiels sont entièrement expliqués par des expressions d'équilibre de multi-corps dissous et il n'y a aucune interaction de diffusion entre elles. Suivant les indications du **schéma II.2**, les adsorbants peuvent répandre dans une particule adsorbante par deux mécanismes cinétiques : ils peuvent aller le long des murs extérieurs des pores adsorbants ou dans le vide contenu dans les pores.

Les hypothèses suivantes sont également incorporées au DFPSDM :

**a)** des équilibres d'adsorption est décrits par l'équation d'isotherme de Freundlich, **b)** le flux de la phase gazeux peut être décrit par l'approximation linéaire de force d'entraînement, **c)** le taux d'adsorption est très rapide comparé au taux de transport (l'équilibre local est assumé dans tout l'adsorbant), **d)** le flux massique intra-particule est donné par la loi de Fick, **e)** il n'y a aucune dispersion ou acheminement radiale, **f)** le chargement hydraulique est constant, et **g)** l'adsorbant est dans un à position fixe dans le lit [55,56,57].



**Figure II.1** : Les mécanismes axiaux de transfert de masse dans un adsorbant de lit fixe.



**Figure II.2 :** Mécanismes de transfert de masse intraparticulaire qui sont incorporés dans le modèle de diffusion surfacique et poreux.

Si l'équation d'isotherme de Freundlich est utilisée pour décrire le comportement simple de corps dissous, IAST rapporte l'équation suivante pour chaque adsorbant :

$$\bar{C}_{p,i}(\bar{r}, \bar{z}, T) = \frac{\bar{Y}_i(\bar{r}, \bar{z}, T)Y_{e,i} - \frac{\epsilon_p}{\rho_a} \bar{C}_{p,i}(\bar{r}, \bar{z}, T)C_{0,i}}{C_{0,i} \sum_{j=1}^m \left[ \bar{Y}_j(\bar{r}, \bar{z}, T)Y_{e,j} - \frac{\epsilon_p}{\rho_a} \bar{C}_{p,j}(\bar{r}, \bar{z}, T)C_{0,j} \right]} \left[ \frac{\sum_{k=1}^m \left[ n_k \bar{Y}_k(\bar{r}, \bar{z}, T)Y_{e,k} - \frac{\epsilon_p}{\rho_a} \bar{C}_{p,k}(\bar{r}, \bar{z}, T)C_{0,k} \right]}{n_i K_i} \right]^{n_i} \dots \dots (\text{II. 1})$$

L'équation II.1 a été employée pour coupler les concentrations de phase liquide et pleine sur les surfaces adsorbantes internes et externes.

Le chargement total de particules, Y (Fritz, Merk et Schlunder, 1980) [58] est défini comme :

$$Y_i(r, z, t) = q_i(r, z, t) + \frac{\epsilon_p}{\rho_a} C_{p,i}(r, z, t) \dots \dots (\text{II. 2})$$

À n'importe quelle coordonnée radiale r, la coordonnée axiale z, et le temps t, Y<sub>i</sub> seront la somme de la concentration sur la surface adsorbante et dans les pores adsorbants. Le chargement total réduit de particules est défini par :

$$\bar{Y}_i(\bar{r}, \bar{z}, T) = \frac{Y_i(r, z, t)}{Y_{e,i}} \dots \dots (\text{II. 3})$$

Dans le quel Y<sub>e,i</sub> : est le chargement de particules à l'équilibre avec la C<sub>0,i</sub>

$$Y_{e,i} = q_{e,i} + \frac{\epsilon_p}{\rho_a} C_{0,i} \dots \dots (\text{II. 4})$$

Le bilan de matière de la phase fluide pour chaque adsorbant en forme sans dimensions est :

$$-\frac{\partial \bar{C}_i(\bar{z}, T)}{\partial \bar{z}} + \frac{1}{p_{e_i}} \frac{\partial^2 \bar{C}_i(\bar{z}, T)}{\partial \bar{z}^2} = \frac{1}{(D_{g_t} + 1)} \frac{\partial \bar{C}_i(\bar{z}, T)}{\partial T} + 3St_i [\bar{C}_i(\bar{z}, T) - \bar{C}_{p,i}(\bar{r} = 1, \bar{z}, T)] \dots \dots (\text{II. 5})$$

Les limites qui apparaissent dans l'équation II.5 expliquent l'écoulement advective, la dispersion et la diffusion axiale, l'accumulation dans la phase fluide, et le transport du fluide à la phase solide par transfert de masse de la phase fluide. Les conditions initial pour l'équation II.5 est :

$$\bar{C}_i(0 \leq \bar{z} \leq 1, T = 0) = 0 \dots \dots (\text{II. 6})$$

Les conditions de limites pour le bilan de matière de la phase fluide sont ceux proposé par Danckwerts (1953) :

$$1 - \bar{C}_i(\bar{z} = 1, T) = \frac{1}{(D_{gt} + 1)} \frac{\partial}{\partial T} \left[ \int_0^1 \left[ \bar{C}_i(\bar{z}, T) + 3D_{gi} \int_0^1 \bar{Y}_i(\bar{r}, \bar{z}, T) \bar{r}^2 d\bar{r} \right] d\bar{z} \right] \dots \dots (II. 7)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{C}_i(\bar{z}=1, T)}{\partial \bar{z} \partial T} = 0 \quad \text{Et} \quad \frac{\partial^2 \bar{C}_i(\bar{z}, T=0)}{\partial \bar{z}} = 0 \quad \dots \dots (II. 8)$$

Les équations II.7 et II.8 sont dérivées à partir de l'égalisation de flux de masse entrant dans et partant du lit, supposant que le transport de l'adsorbant dans ou hors le lit fixe par la dispersion et la diffusion axiales est négligeable une fois comparé à l'advection.

Le bilan de matière d'intraparticule est exprimé par :

$$\frac{1}{\bar{r}^2} \frac{\partial}{\partial \bar{r}} \left[ \bar{r}^2 \left[ (Ed_{s,i} + D_i Ed_{p,i}) \frac{\partial \bar{Y}_i(\bar{r}, \bar{z}, T)}{\partial \bar{r}} + (Ed_{s,i} + D_i Ed_{p,i}) \frac{\partial \bar{C}_{p,i}(\bar{r}, \bar{z}, T)}{\partial \bar{r}} \right] \right] = \frac{D_{gi}}{D_{gt}} \frac{\partial \bar{Y}_i(\bar{r}, \bar{z}, T)}{\partial T} \quad \dots \dots (II. 9)$$

Les limites qui apparaissent dans l'équation II.9 expliquent la surface et étudient à fond la diffusion, et l'accumulation dans la phase l'intraparticule, respectivement. Les conditions initial pour l'équation II.9 est:

$$Y_i(0 \leq \bar{r} \leq 1, 0 \leq \bar{z} \leq 1, T = 0) = 0 \quad \dots \dots (II. 10)$$

Les conditions limites (de frontière) pour l'équation II.9 sont :

$$\frac{\partial}{\partial \bar{r}} \bar{Y}_i(\bar{r} = 0, 0 \leq \bar{z} \leq 1, T \geq 0) = 0 \quad \dots \dots (II. 11)$$

$$\frac{D_{gi}}{(D_{gt} + 1)} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^1 \bar{Y}_i(\bar{r}, \bar{z}, T) \bar{r}^2 d\bar{r} = St_i [\bar{C}_i(\bar{z}, T) - \bar{C}_{p,i}(\bar{r} = 1, \bar{z}, T)] \quad \dots \dots (II. 12)$$

Équation II.11 est un résultat de la symétrie. Dans l'équation II.12, le flux de masse en phase fluide est assimilé à la phase d'accumulation intraparticulaire de masse.

Avec :

$\bar{C}_{p,i}(\bar{r}, \bar{z}, T)$  : concentration réduite en adsorbant dans les pores adsorbants en fonction de la position radiale et axiale réduite et du temps réduit (sans dimensions);  $C_{p,i}(\mathbf{r}, \mathbf{z}, \mathbf{t})/C_{0,i}$ .

$i$  : indice inférieur dénotant un corps dissous  $i$ .

$r$  : coordonnée radial.

$\bar{r}$  : coordonnée réduite de radial (sans dimensions);  $r/R$ .

$z$  : coordonnée axiale (L).

$\bar{z}$  : coordonnée axiale réduite (sans dimensions);  $z/L$ .

$t$  : temps écoulé.

$T$  : temps réduit (sans dimensions);  $\mathbf{t}/\tau(\mathbf{D}_{g,t} + \mathbf{1})$  (utilisé dans les modèles de lit fixe).

$C_{0,i}$  : concentration en phase gazeux d'équilibre de corps simple dissous ( $\mu\text{mol/g}$ ).

$C_i$  : concentration de phase fluide ( $\mu\text{mol/g}$ ).

$\bar{C}_i(\bar{z}, T)$  : concentration réduite en adsorbant en vrac la phase en fonction de la position axiale sans dimensions et du temps réduits (sans dimensions);  $C_i(\mathbf{z}, \mathbf{t})/C_{0,i}$ .

$\bar{Y}_i(\bar{r}, \bar{z}, T)$  : concentration adsorbante totale réduite de phase en fonction de la position radiale et axiale sans dimensions et du temps réduits (sans dimensions);  $Y_i(\mathbf{r}, \mathbf{z}, \mathbf{t})/Y_{e,i}$

$Y_i(\mathbf{r}, \mathbf{z}, \mathbf{t})$ : concentration adsorbante totale de phase en fonction de la position et du temps radiaux et axiaux (M/M);  $q_i(\mathbf{r}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) + [\epsilon p C_{p,i}(\mathbf{r}, \mathbf{z}, \mathbf{t})/\rho a]$

$Y_{e,i}$  : concentration adsorbante totale de phase dans l'équilibre avec la concentration initiale (M/M);  $q_e + \epsilon p C_{0,i}/\rho a$ .

$Y_i(\mathbf{r}, \mathbf{t})$  : Concentration adsorbante totale de phase en fonction de la position et du temps radiaux (M/M);  $q_i(\mathbf{r}, \mathbf{t}) + [\epsilon p C_{p,i}(\mathbf{r}, \mathbf{t})/\rho a]$

$\bar{q}_i(\bar{r}, \bar{z}, T)$  : concentration adsorbante réduite de phase en fonction de la position radiale et axiale et du temps sans réduits (sans dimensions);  $q_i(\mathbf{r}, \mathbf{z}, \mathbf{t})/q_{e,i}$

$q_{e,i}$  : concentration adsorbante de phase dans l'équilibre avec la concentration initiale (M/M);

$K_i C_{0,i}^{1/n}$

$K_i$  : constante de capacité d'isotherme de Freundlich (M/M)  $(L^3 / M)^{1/n}$

$1/ni$  : constante d'intensité d'isotherme de Freundlich (sans dimensions).

$q_i$  : chargement extérieur du composant  $i$  ( $\mu\text{mol/gm}$ ).

$D_{g,i}$  : paramètre combiné de distribution de corps dissous (sans dimensions);  $(D_{g,s,i} + D_{g,p,i})$ .

$D_{g,p,i}$  : paramètre de distribution de corps dissous de pore (sans dimensions);  $\epsilon p(1 - \epsilon)/\epsilon$

$D_{g s,i}$  : paramètre extérieur de distribution de corps dissous (sans dimensions);  $\rho_a q_{e,i} (1 - \epsilon) / \epsilon C_{0,i}$

$D_{g t}$ : paramètre total de distribution de corps dissous (sans dimensions);  $(D_{g p,i} + D_{g s,i})$  au-dessus de tous les composants.

$D_i$  : rapport de la surface au transport de diffusion de pore (sans dimensions);

$(Ed_{s,i} D_{g p,i}) / (Ed_{p,i} D_{g s,i})$ .

$Ed_{p,i}$ : module de diffusion de pore (sans dimensions);  $D_{p,i} D_{g p,i} \tau / R^2$

$Ed_{s,i}$ : module extérieur de diffusion (sans dimensions);  $D_{s,i} D_{g s,i} \tau / R^2$

$D_{p,i}$ : la diffusivité de pore basée sur la fraction de vide de pore ( $L^2/t$ ).

$D_{s,i}$ : diffusivité extérieure ( $L^2 / t$ ).

$St_i$ : nombre modifié de Stanton (sans dimensions);  $k_{f,i} \tau^{(1-\epsilon)} / Re$

$k_{f,i}$ : coefficient de transfert de film ( $L/t$ ).

$\epsilon$  : fraction de l'espace volumétrique dans le réacteur, ou fraction vide (sans dimensions).

$\epsilon_p$  : fraction de l'espace volumétrique dans la phase adsorbante sur la fraction de volume de pore (sans dimensions).

$\rho_a$  : densité adsorbante qui inclut le volume de pore ( $M/L^3$ ).

### **II.1.2) Modèle d'écoulement dispersé de diffusion extérieur (surface) homogène (DFHSDM) :**

Le modèle d'écoulement dispersé pour diffusion extérieur (surface) homogène (DFHSDM) aux mêmes mécanismes de transfert de masse que le DFPSDM, à moins que le transfert de masse d'intraparticule soit dû seulement à la diffusion extérieure. Pour le DFHSDM, l'équation II.9 est simplifiée en éliminant le terme de diffusion interne (poreux) qui correspond au deuxième terme. Dans une version du DFHSDM, le DFHSDM a été modifié utilisant l'équation de D-R pour déterminer l'équilibre entre le fluide et les phases de surface au lieu de l'équation de Freundlich [55].

### **II.1.3) Modèle d'écoulement prise pour diffusion extérieur (surface) homogène (PFHSDM) :**

Ce modèle suppose que la dispersion axiale est négligeable et le transfert de masse intraparticulaire est dû à la diffusion extérieure seulement.

Cette hypothèse élimine le deuxième terme dans l'équation II.5 et simplifie les conditions aux limites. Crittenden et al (1980) ont donné la résolution des équations de PFHSDM [53,59].

Si  $(1/n)$  est moins de 1,0 et l'adsorbeur a la longueur suffisante de lit, alors il est possible qu'une vague constante de concentration de modèle puisse exister. Initialement, à l'admission de lit, la zone de transfert de masse (ZTM) sera courte. Comme la ZTM entre dans le lit, la longueur de ZTM augmentera. Cependant, si le lit est assez long la ZTM atteindra une longueur équilibrée connue sous le nom de modèle constant. La longueur du lit exigée pour la formation du ZTM constant peut être exprimée par le temps de contact minimum de lit vide  $EBCT_{min}$ . La longueur du ZTM peut également être exprimée comme un temps de contact de lit vide  $EBCT_{mz}$ . Hand et al (1984) fournissent des corrélations basées sur de nombreuses solutions de PFHSDM pour estimer  $EBCT_{min}$  et  $EBCT_{mz}$  [60].

## **II.2) Paramètres de transfert de masse :**

Les paramètres suivants sont contenus dans le DFPSDM : coefficient de diffusion moléculaire ( $D_m$ ), coefficient de dispersion axial ( $D_e$ ), coefficient de transfert de film ( $K_f$ ), coefficient de diffusion poreux ( $D_p$ ) et coefficient de diffusion extérieur ( $D_s$ ). Les corrélations qui peuvent être employées pour calculer  $D_m$ ,  $D_g$ ,  $K_f$  et  $D_p$  sont discutées ci-dessous. Le coefficient de diffusion extérieur ( $D_s$ ) a été trouvé des données effluents convenables de percée de l'installation pilote en phase gazeux.

### II.2.1) Coefficient de diffusion moléculaire $D_m$ :

La valeur du coefficient de diffusion moléculaire pour un composé gazeux est fonction de la température, de pression, et de la nature du composé. La valeur du  $D_m$  peut être estimée pour un système binaire par des corrélations basées sur la théorie cinétique des gaz. Les modifications de certaines corrélations de Wilke-Lee (1955) ont été utilisées parce qu'elles ont été recommandées pour les mélanges de gaz non polaires ou d'un gaz polaire avec un gaz non polaire [61,62].

### II.2.2) Coefficient de dispersion axiale $D_e$ :

Miyauchi et Kikuchi (1975) résument une grande quantité de données sur la dispersion axiale des gaz et des liquides dans les lits garnis. Ces données ont été utilisées pour développer une relation de dispersion axiale dans tous les deux le régime d'écoulement : de Stokes (nombre de Reynolds  $< 20$ ) et la région d'écoulement turbulent. Cette corrélation intègre les effets de la diffusion moléculaire et hydrodynamique mélangeant sur la dispersion axiale [61,63] :

$$\frac{D_e}{v_i d_h} = \frac{1}{Pe_z} = \frac{1}{\tau Pe_m} + \frac{1}{x Pe_n} \left[ 1 - \frac{(1 - e^{-2x})}{2x} \right] \quad \dots \dots (II. 13)$$

Avec :  $Pe_z = \frac{v_i d_h}{D_e}$  (nombre de Peclet axial).

$Pe_m = \frac{v_s d_h}{\varepsilon D_g}$  (nombre de Peclet pour la diffusion moléculaire).

$Pe_n = \frac{v_s d_h \rho_h}{\varepsilon \mu_g}$  (nombre de Peclet pour le mélange hydrodynamique).

$\tau =$  tortiosité (= 1.4).

$x =$  fonction du  $Pe_m$   $\left( = \frac{22}{Pe_m^{2/3}} \right)$ .

$d_h = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} d_p$  (diamètre hydrodynamique).

$v =$  vitesse interstitielle.

$d_p =$  diamètre de particule.

### II.2.3) Coefficient de transfert du film $k_f$ :

Wakao et Funazukri (1978) ont penché sur la publication des données de transfert de masse en phase gazeux et liquide et les corrigent pour la dispersion axiale. Ces données réévaluées ont été alors utilisées pour produire la relation suivante [62] :

$$Sh = 2 + 1.1 Re^{0.6} Sc^{0.33} \dots \dots (II. 14)$$

Avec :  $Sh = \frac{k_f d_p}{D_m} = \text{nombre de Sherwood.}$

$Re = \frac{d_p V_i \rho}{\mu} = \text{nombre de Reynold.}$

$Sc = \frac{\mu}{D_m \rho} = \text{nombre de Schmidt.}$

Cette corrélation est valable pour des nombres de Reynolds compris entre 3 et 10000.

### II.2.4) Coefficient de diffusion poreux (interne) $D_p$ :

Dans la diffusion des gaz, il existe deux mécanismes utilisés pour décrire la diffusion dans les pores, la diffusion moléculaire à travers les pores et la diffusion de Knudsen. Dans la diffusion moléculaire, le diamètre des pores est sensiblement plus grand que le libre parcours moyen des molécules de gaz et il est peu d'effet d'une collision de molécules de gaz avec les parois des pores. Toutefois, si le libre parcours moyen est grand par rapport au diamètre des pores, la collision de molécules de gaz avec la paroi du pore devient significative et la diffusion de Knudsen se produit. Le coefficient de diffusion de Knudsen est donné par [64,65,66] :

$$D_k = \left( \frac{d}{3} \right) \times \left( \frac{8g_c RT}{\pi M} \right)^{0.5} \dots \dots (II. 15)$$

Où  $D_k$  est le coefficient de diffusion de Knudsen ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $d$  est le diamètre moyen des pores (cm),  $g$  est la constante gravitationnelle,  $R$  est la constante des gaz,  $T$  est la température, et  $M$  est le poids moléculaire du composé.

En supposant que ces mécanismes agissent en parallèle, le coefficient de diffusion poreux total est donné par :

$$D_p = \varepsilon_p / \tau \left( 1/D_k + 1/D_m \right)^{-1} \dots \dots (\text{II. 16})$$

Dans lequel,  $D_p$  est le coefficient de diffusion poreux ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ),  $\varepsilon_p$  est le taux de vide du charbon,  $\tau$  est le facteur de tortuosité des pores,  $D_m$  est la diffusivité moléculaire du composé dans la phase gazeuse. Afin d'évaluer l'importance de la diffusion dans les pores,  $\tau$  a été fixé à 1 pour donner la plus grande contribution diffusion dans les pores.

### II.2.5) Coefficient de diffusion de surface $D_s$ :

Le coefficient de diffusion de surface est normalement déterminé à partir de données expérimentales. Toutefois, Dobrzelewski (1985) a observé que le flux de surface est d'environ quelques fois un facteur constant le flux de pores pour un certain nombre de COV dans l'adsorption en phase aqueuse. En conséquence, la diffusivité de surface peut être calculée en multipliant le flux des pores par un facteur de correction (rapport de flux de diffusion poreux par rapport au flux de diffusion de surface, PSDFR) [64,67] :

$$D_s = \frac{D_m \varepsilon_p C_0}{\tau_p \rho_a K C_0^{1/n}} \times (\text{PSDFR}) \dots \dots (\text{II. 17})$$

Le PSDFR a été déterminée en utilisant des données provenant de l'usine pilote en phase gazeuse.

### II.3) Groupes adimensionnels pour les modèles de transfert de masse et leur impact sur les calculs de modèle :

Les solutions des équations du modèle sont en fonction des paramètres de transfert de masse et des paramètres physiques. Ces paramètres peuvent être combinés en groupes adimensionnels qui peuvent être utilisés pour contrôler le mécanisme.

Les groupes adimensionnels qui apparaissent dans le modèle DFHSDM sont discutés ci-dessous car la diffusion dans les pores a été jugée négligeable.

### II.3.1) Nombre de Biot Bi :

Le nombre de Biot est le rapport entre le taux de transfert de masse externe par rapport aux taux de transfert de masse intraparticulaire. Pour le nombre de Biot très grandes (plus de 30), le taux de transfert de masse intraparticulaire est beaucoup plus lent que le taux de transfert de masse externe et par conséquent, il contrôle le taux d'adsorption. Pour le nombre de Biot petites (moins de 0,5), le taux de transfert de masse externe contrôle le taux de transfert de masse. Le nombre de Biot qui est basé sur la diffusivité de surface (Bi) est :

$$Bi_s = \frac{k_f R(1 - \epsilon)}{D_s D_g \epsilon} \quad \dots \dots (II. 18)$$

Où **R** est le rayon des particules, et  $\epsilon$  est la fraction de vide de lit (porosité).

### II.3.2) Nombre de Stanton St :

Le nombre de Stanton est le rapport entre le transfert de masse de film et le transport par convection. Comme le nombre de St augmente, le taux de transport par convection contrôle plus de transport de transfert de film et la courbe de percée devient plus raide si le nombre de Biot est inférieur à environ 1,0. Le nombre de Stanton est donné par [68] :

$$St = \frac{k_f L(1 - \epsilon)}{V_s R \epsilon} \quad \dots \dots (II. 19)$$

Où **L** est la longueur de lit du CAG.

### II.3.3) Module de Diffusion Ed :

Le module de diffusion est le rapport entre le taux de transfert de masse de la phase intraparticulaire et le transport de masse par convection. Avec l'augmentation Ed, le taux de transport de masse par convection devient contrôlés et la courbe de percée devient plus raide si le nombre de Biot est supérieure à environ 30,0 le module de diffusion qui est basée sur la diffusivité de surface (Eds) est donnée par :

$$Ed_s = \frac{L D_s D_g}{V_s R^2} \quad \dots \dots (II. 20)$$

### II.3.4) Nombre de Peclet $Pe$ :

Le nombre de Peclet est le rapport de taux de transport axial par convection au transfert par diffusion. Comme le nombre de Peclet est proche de zéro ( $< 0,1$ ), la colonne devient complètement mixte ( $De = \infty$ ) et un nombre de Peclet de grande taille (supérieure à 100,0) correspond à un écoulement piston ( $De = 0$ ). Le nombre de Peclet est donné par [69,70] :

$$Pe_i = \frac{V_i L}{D_e} \quad \dots \dots (II. 21)$$

### II.3.5) Temps sans dimension:

Le temps sans dimension est basée sur le coefficient de partage soluté ou le coefficient de distribution,  $D_g$ .  $D_g$  est défini comme le rapport de la masse de l'adsorbant dans la phase solide à la masse de l'adsorbant dans la phase gazeuse dans des conditions d'équilibre et est donnée par l'expression de soluté unique d'adsorption :

$$D_g = \rho_a q_e (1 - \varepsilon) / (\varepsilon C_0) \quad \dots \dots (II. 22)$$

Où,  $\rho_a$  est la densité adsorbant qui comprend le volume des pores ( $g/cm^3$ ),  $q_e$  est la concentration de phase adsorbante à l'équilibre avec la concentration d'effluent en phase gazeuse ( $\mu mol/g$ ),  $\varepsilon$  est la fraction de vide de lit, et  $C_0$  est la concentration d'effluent en phase gazeuse ( $\mu mol/litre$ ). Pour solutés simples,  $\varepsilon(D_g+1)$  est égal au nombre de volumes de lit d'aliments contenant assez adsorbant pour saturer le GAC dans le lit. Cette valeur, appelée volumes de lit maximales de l'alimentation,  $BVF_{max}$ , suppose l'équilibre local à travers le lit. En conséquence,  $BVF_{max}$  est le nombre maximum de volumes de lit de gaz qui peuvent être traités par le GAC.

Le paramètre de distribution du soluté est également utilisée pour définir le débit massique, l'échelle de temps sans dimension, comme suit :

$$T = (tV_i) / L(D_g + 1) \quad \dots \dots (II. 23)$$

Où  $T$  est défini comme la masse de la charge rapporté à la masse requis pour saturer le lit de CAG,  $t$  est le temps écoulé,  $L$  est la profondeur du lit, et  $V_i$  est la vitesse interstitielle[67,71].

#### **II.4) Impact des paramètres d'isotherme sur les calculs des modèles :**

L'impact des paramètres isothermes sur les profils de concentration des effluents est importante et c'est pourquoi il est significatif que ces paramètres être déterminé aussi précisément que possible. Puisque le paramètre  $K$  d'isotherme, détermine la capacité des adsorbants, des erreurs importantes dans  $K$  feront la plus grande erreur dans l'utilisation des modèles. L'exposant d'isotherme  $1/n$ , affecte la forme de la courbe de percée et influence l'importance relative des mécanismes de transport de masse. Comme  $1/n$  augmente, la résistance de transfert de masse externe va devenir plus importante pour un  $Bi$  donné (Hand et al, 1984) [60].

### III.1) Logiciel utilisé pour le calcul des paramètres de transfert de masse :

L'annexe (A) contient les sous-routines utilisées dans le calcul pour déterminer les paramètres de transfert de masse des COV dans l'air par simulation à l'aide du logiciel FORTRAN 77, en utilisant les modèles de WILKE- LEE, WAKAO, et FUNAZKRI.

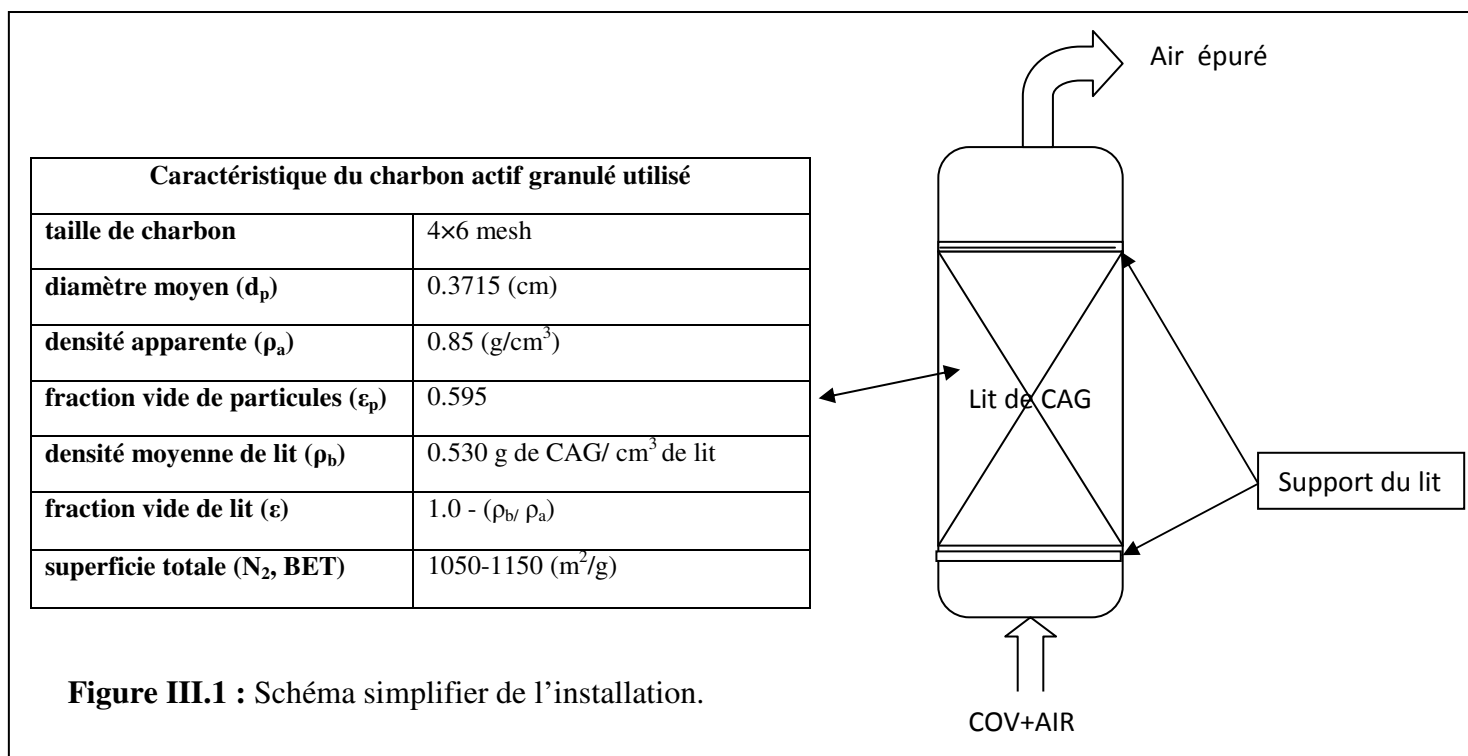
### III.2) Élimination des COV par le charbon actif granulé en système continu par simulation :

L'objectif de la partie expérimentale consiste en l'évaluation de l'élimination des composés organiques volatiles présents dans l'air. Le procédé est réalisé en système continu. L'influence de plusieurs paramètres tels que la concentration initiale de composé dans l'air, la température et vitesse superficielle de l'air sur l'adsorption sera présentée.

### III.3) Paramètres d'entrées :

Dans notre étude, nous avons choisi trois composés organiques volatiles suivantes : cis-dichloroéthylène « DCE », trichloroéthylène « TCE » et tétrachloroéthylène « PCE » [72] (Annexe F).

Paramètres d'entrées		composés organiques volatiles		
		DCE	TCE	PCE
Pression	atm	1	1	1
Température du gaz	°C	22,4	22,4	22,4
Masse moléculaire	g/mol	96,95	131,39	165,8
Volume molaire	cm <sup>3</sup> /gmol	86,2	89,99	101,72
Température d'ébullition	°C	60	87,2	121,1
Vitesse superficielle de l'air	cm/s	25	25	25
Diamètre du grain de charbon actif	cm	0,3715	0,3715	0,3715
densité moyenne du lit	g/cm <sup>3</sup>	0,530	0,530	0,530
densité apparente du grain	g/cm <sup>3</sup>	0,85	0,85	0,85
Porosité des particules		0,595	0,595	0,595
Concentration initial	µg/L	2	2	2
Rapport de flux de diffusion (surface/pores)		16	16	16
Temps de contact dans lit vide, EBCT	s	2,44	2,44	2,44



### III.4) Interprétations et discussions des résultats obtenus :

#### III.4.1) Calcul des paramètres de l'équation de Freundlich :

Comme les paramètres de Freundlich ( $k$  ;  $1/n$ ) sont variés avec la température et la concentration, alors nous les avons calculé par simulation en égalisant la pression de propagation prévue de l'équation de D-R (Annexe E), et nous avons trouvé les résultats suivantes :

Composés	Température (°C)	Concentration (µg/L)	$K[(\mu\text{mol/L})/(\mu\text{mol/L})^{1/n}]$	$1/n$
Cis-dichloroéthène	22,4	2	776,00	0,8208
		4	805,22	0,7674
		6	778,19	0,7418
	23	2	757,72	0,8252
	24	2	727,99	0,8326
Trichloroéthylène	22,4	2	2249,80	0,5171
		4	2227,90	0,4838
		6	2147,10	0,4680
	23	2	2220,1	0,5198
	24	2	2171,3	0,5244
Tétrachloroéthylène	22,4	2	3816,40	0,3561
		4	3680,20	0,3327
		6	3538,9	0,3217
	23	2	3784,7	0,3581
	24	2	3732,0	0,3613

### III.4.2) L'effet de la concentration sur l'adsorption :

#### III.4.2.1) Cis- dichloroéthylène :

Paramètres calculées	Concentration (µg/L)		
	2	4	6
Porosité du lit, VD	0,3765	0,3765	0,3765
Reynolds, Re	62,1501	62,1501	62,1501
Viscosité de l'air, VISAIR (g/cm s)	0,1783E-03	0,1783E-03	0,1783E-03
Densité de l'air, DENAIR (g/cm <sup>3</sup> )	0,1193E-02	0,1193E-02	0,1193E-02
Diffusivité moléculaire, DM (cm <sup>2</sup> /s)	0,9538E-01	0,9538E-01	0,9538E-01
Coefficient de transfert de film, KF (cm/s)	4,4217	4,4217	4,4217
Coefficient de diffusion extérieur (surfactive), DS (cm <sup>2</sup> /s)	0,6867E-06	0,6320E-06	0,6693E-06
Coefficient de diffusion intérieur (poreux), DP (cm <sup>2</sup> /s)	0,5675E-01	0,5675E-01	0,5675E-01
Paramètre de distribution du soluté, DG	2,1900E+06	2,3795E+06	2,2472E+06
Boit, BI	0,9045	0,9045	0,9045
Schmidt, SC	1,5667	1,5667	1,5667
Le nombre minimum de Stanton, STM	26,0716	13,9583	11,9701
EBCT minimum, ETMIN (s)	1,7565	0,9404	0,8065
EBCT minimum, ETLEN (cm)	43,9130	23,5103	20,1616
T à 95% du ZTM	1,2208	1,2208	1,2718
T à 5% du ZTM	0,8271	0,8271	0,7831
EBCT du ZTM, ETMTZ (s)	0,6915	0,3702	0,3941
La longueur du ZTM, EMTZL (cm)	17,2876	9,2555	9,8535

**III.4.2.2) Trichloroéthylène :**

Paramètres calculées	Concentration (µg/L)		
	2	4	6
Porosité du lit, VD	0,3765	0,3765	0,3765
Reynolds, Re	62,1501	62,1501	62,1501
Viscosité de l'air, VISAIR (g/cm.s)	0,1783E-03	0,1783E-03	0,1783E-03
Densité de l'air, DENAIR (g/cm <sup>3</sup> )	0,1193E-02	0,1193E-02	0,1193E-02
Diffusivité moléculaire, DM (cm <sup>2</sup> /s)	0,8365E-01	0,8365E-01	0,8365E-01
Coefficient de transfert de film, KF (cm/s)	4,0310	4,0310	4,0310
Coefficient de diffusion extérieur (surfaccique), DS (cm <sup>2</sup> /s)	0,5519E-07	0,6934E-07	0,8447E-07
Coefficient de diffusion intérieur (poreux), DP (cm <sup>2</sup> /s)	0,4977E-01	0,4977E-01	0,4977E-01
Paramètre de distribution du soluté, DG	2,3898E+07	1,9022E+07	1,5613E+07
Boit, BI	0,9402	0,9402	0,9402
Schmidt, SC	1,7865	1,7865	1,7865
Le nombre minimum de Stanton, STM	3,4504	3,1783	3,1262
EBCT minimum, ETMIN (s)	0,2550	0,2350	0,2310
EBCT minimum, ETLEN (cm)	6,3748	5,8721	5,7759
T à 95% du ZTM	1,3694	1,3694	1,3694
T à 5% du ZTM	0,6580	0,6580	0,6580
EBCT du ZTM, ETMTZ (s)	0,1815	0,1672	0,1644
La longueur du ZTM, EMTZL (cm)	4,5370	4,1791	4,1106

**III.4.2.3) Tétrachloroéthylène :**

Paramètres calculées	Concentration (µg/L)		
	2	4	6
Porosité du lit, VD	0,3765	0,3765	0,3765
Reynolds, Re	62,1501	62,1501	62,1501
Viscosité de l'air, VISAIR (g/cm.s)	0,17833E-03	0,1783E-03	0,1783E-03
Densité de l'air, DENAIR (g/cm <sup>3</sup> )	0,1193E-02	0,1193E-02	0,1193E-02
Diffusivité moléculaire, DM (cm <sup>2</sup> /s)	0,7510E-01	0,75010E-01	0,7510E-01
Coefficient de transfert de film, KF (cm/s)	3,7365	3,7365	3,7365
Coefficient de diffusion extérieur (surfactive), DS (cm <sup>2</sup> /s)	0,1282E-07	0,1903E-07	0,2501E-07
Coefficient de diffusion intérieur (poreux), DP (cm <sup>2</sup> /s)	0,4468E-01	0,4468E-01	0,4468E-01
Paramètre de distribution du soluté, DG	9,2370E+06	6,2207E+06	4,7336E+06
Boit, BI	0,9708	0,9708	0,9708
Schmidt, SC	1,9900	1,9900	1,9900
Le nombre minimum de Stanton, STM	2,7952	2,7344	2,7059
EBCT minimum, ETMIN (s)	0,2228	0,2180	0,2157
EBCT minimum, ETLEN (cm)	5,5714	5,4502	5,3933
T à 95% du ZTM	1,3048	1,2484	1,2484
T à 5% du ZTM	0,6876	0,7032	0,7032
EBCT du ZTM, ETMTZ (s)	0,1375	0,1189	0,1176
La longueur du ZTM, EMTZL (cm)	3,4386	2,9716	2,9406

### III.4.3) L'effet de température sur l'adsorption :

#### III.4.3.1) Cis- dichloroéthylène :

Paramètres calculées	Température (°C)		
	22,4	23	24
Porosité du lit, VD	0,3765	0,3765	0,3765
Reynolds, Re	62,150080	61,921241	61,542720
Viscosité de l'air, VISAIR (g/cm,s)	0,1783E-03	0,1786E-03	0,1791E-03
Densité de l'air, DENAIR (g/cm <sup>3</sup> )	0,1193E-02	0,1191E-02	0,11867E-02
Diffusivité moléculaire, DM (cm <sup>2</sup> /s)	0,9539E-01	0,95750820E-01	0,96361610E-01
Coefficient de transfert de film, KF (cm/s)	4,4217	4,4298	4,4433
Coefficient de diffusion extérieur (surfaique), DS (cm <sup>2</sup> /s)	0,6867E-06	0,7182E-06	0,7742E-06
Coefficient de diffusion intérieur (poreux), DP (cm <sup>2</sup> /s)	0,5675E-01	0,5697E-01	0,5733E-01
Paramètre de distribution du soluté, DG	2,1900E+06	2,1022E+06	1,9626E+06
Boit, BI	0,9045	0,9027	0,8997
Schmidt, SC	1,5667	1,5664	1,5661
Le nombre minimum de Stanton, STM	26,0716	28,0906	31,485
EBCT minimum, ETMIN (s)	1,7565	1,8891	2,1109
EBCT minimum, ETLEN (cm)	43,9130	47,227	52,7739
T à 95% du ZTM	1,2208	1,2208	1,2208
T à 5% du ZTM	0,8271	0,8271	0,8271
EBCT du ZTM, ETMTZ (s)	0,6915	0,7437	0,83104
La longueur du ZTM, EMTZL (cm)	17,2876	18,5927	20,7760

### III.4.3.2) Trichloroéthylène :

Paramètres calculées	Température (°C)		
	22,4	23	24
Porosité du lit	0,3765	0,3765	0,3765
Reynolds, Re	62,1501	61,9212	61,5427
Viscosité de l'air, VISAIR (g/cm.s)	0,17834E-03	0,1786E-03	0,1791E-03
Densité de l'air, DENAIR (g/cm <sup>3</sup> )	0,1193E-02	0,1191E-02	0,1187E-02
Diffusivité moléculaire, DM (cm <sup>2</sup> /s)	0,8365E-01	0,8397E-01	0,8451E-01
Coefficient de transfert de film, KF (cm/s)	4,0309	4,0383	4,0506
Coefficient de diffusion extérieur (surfaique), DS (cm <sup>2</sup> /s)	0,5519E-07	0,5678E-07	0,5956E-07
Coefficient de diffusion intérieur (poreux), DP (cm <sup>2</sup> /s)	0,4977E-01	0,4996E-01	0,5028E-01
Paramètre de distribution du soluté, DG	2,3898E+07	2,3318E+07	2,2371E+07
Boit, BI	0,94024	0,9383	0,9352
Schmidt, SC	1,7865	1,7862	1,7857
Le nombre minimum de Stanton, STM	3,4504	3,4835	3,5401
EBCT minimum, ETMIN (s)	0,2550	0,2570	0,2603
EBCT minimum, ETLEN (cm)	6,3748	6,4243	6,5089
T à 95% du ZTM	1,3694	1,3694	1,3694
T à 5% du ZTM	0,6577	0,6577	0,6577
EBCT du ZTM, ETMTZ (s)	0,1815	0,18290	0,1853
La longueur du ZTM, EMTZL (cm)	4,5370	4,5721	4,6323

### III.4.3.3) Tétrachloroéthylène :

Paramètres calculées	Température (°C)		
	22,4	23	24
Porosité du lit	0,3765	0,3765	0,3765
Reynolds, Re	62,1501	61,9212	61,5427
Viscosité de l'air, VISAIR (g/cm.s)	0,17834E-03	0,1786E-03	0,1791E-03
Densité de l'air, DENAIR (g/cm <sup>3</sup> )	0,1193E-02	0,1191E-02	0,1187E-02
Diffusivité moléculaire, DM (cm <sup>2</sup> /s)	0,7510E-01	0,7539E-01	0,7587E-01
Coefficient de transfert de film, KF (cm/s)	3,7365	3,7433	3,7548
Coefficient de diffusion extérieur (surfaique), DS (cm <sup>2</sup> /s)	0,1282E-07	0,1309E-07	0,1355E-07
Coefficient de diffusion intérieur (poreux), DP (cm <sup>2</sup> /s)	0,4468E-01	0,4485E-01	0,45144E-01
Paramètre de distribution du soluté, DG	9,2370E+07	9,0813E+07	8,8291E+07
Boit, BI	0,9708	0,9688	0,9656
Schmidt, SC	1,9900	1,9896	1,9890
Le nombre minimum de Stanton, STM	2,7952	2,7700	2,8077
EBCT minimum, ETMIN (s)	0,2228	0,2228	0,2227
EBCT minimum, ETLEN (cm)	5,5714	5,5706	5,5689
T à 95% du ZTM	1,3048	1,3048	1,3048
T à 5% du ZTM	0,6876	0,6876	0,6876
EBCT du ZTM, ETMTZ (s)	0,1375	0,1375	0,1375
La longueur du ZTM, EMTZL (cm)	3,4386	3,4381	3,4370

### III.4.4) L'effet de la vitesse superficielle :

#### III.4.4.1) Cis- dichloroéthylène :

Paramètres calculées	vitesse (cm/s)		
	25	50	70
Porosité du lit, VD	0,3765	0,3765	0,3765
Reynolds, Re	62,1501	124,3002	174,0202
Viscosité de l'air, VISAIR (g/cm.s)	0,1783E-03	0,1783E-03	0,1783E-03
Densité de l'air, DENAIR (g/cm <sup>3</sup> )	0,1193E-02	0,1193E-02	0,1193E-02
Diffusivité moléculaire, DM (cm <sup>2</sup> /s)	0,9538E-01	0,9538E-01	0,9538E-01
Coefficient de transfert de film, KF (cm/s)	4,4217	6,4372	7,7623
Coefficient de diffusion extérieur (surfacique), DS (cm <sup>2</sup> /s)	0,6867E-06	0,6867E-06	0,6867E-06
Coefficient de diffusion intérieur (poreux), DP (cm <sup>2</sup> /s)	0,5675E-01	0,5675E-01	0,5675E-01
Paramètre de distribution du soluté, DG	2,1900E+06	2,1900E+06	2,1900E+06
Boit, BI	0,9045	1,3167	1,5878
Schmidt, SC	1,5667	1,5667	1,5667
Le nombre minimum de Stanton, STM	26,07156	27,8162	28,9632
EBCT minimum, ETMIN (s)	1,7565	1,2873	1,1115
EBCT minimum, ETLEN (cm)	43,9130	64,3642	77,8082
T à 95% du ZTM	1,2208	1,2208	1,2208
T à 5% du ZTM	0,8271	0,8271	0,8271
EBCT du ZTM, ETMTZ (s)	0,6915	0,5068	0,4376
La longueur du ZTM, EMTZL (cm)	17,2876	25,3390	30,6315

### III.4.4.2) Trichloroéthylène :

Paramètres calculées	La vitesse (cm/s)		
	25	50	70
Porosité du lit	0,3765	0,3765	0,3765
Reynolds, Re	62,1501	124,3002	174,0202
Viscosité de l'air, VISAIR (g/cm.s)	0,17833E-03	0,1783E-03	0,1783E-03
Densité de l'air, DENAIR (g/cm <sup>3</sup> )	0,1193E-02	0,1193E-02	0,1193E-02
Diffusivité moléculaire, DM (cm <sup>2</sup> /s)	0,8365E-01	0,8365E-01	0,8365E-01
Coefficient de transfert de film, KF (cm/s)	4,0309	5,8775	7,0916
Coefficient de diffusion extérieur (surfaique), DS (cm <sup>2</sup> /s)	0,5519E-07	0,5519E-07	0,5519E-07
Coefficient de diffusion intérieur (poreux), DP (cm <sup>2</sup> /s)	0,4977E-01	0,4977E-01	0,4977E-01
Paramètre de distribution du soluté, DG	2,3898E+07	2,3898E+07	2,3898E+07
Boit, BI	0,9402	1,3710	1,654
Schmidt, SC	1,7865	1,7865	1,7864
Le nombre minimum de Stanton, STM	3,4504	3,7236	3,9032
EBCT minimum, ETMIN (s)	0,2550	0,1887	0,1640
EBCT minimum, ETLN (cm)	6,3748	9,4365	11,4776
T à 95% du ZTM	1,3694	1,3694	1,3694
T à 5% du ZTM	0,6577	0,6577	0,6577
EBCT du ZTM, ETMTZ (s)	0,1815	0,1343	0,1167
La longueur du ZTM, EMTZL (cm)	4,5369	6,7158	8,1685

### III.4.4.3) Tétrachloroéthylène :

Paramètres calculées	La vitesse (cm/s)		
	25	50	70
Porosité du lit	0,3765	0,3765	0,3765
Reynolds, Re	62,1501	124,3002	174,0202
Viscosité de l'air, VISAIR (g/cm.s)	0,1783E-03	0,1783E-03	0,1783E-03
Densité de l'air, DENAIR (g/cm <sup>3</sup> )	0,1193E-02	0,1193E-02	0,1193E-02
Diffusivité moléculaire, DM (cm <sup>2</sup> /s)	0,7510E-01	0,7510E-01	0,7510E-01
Coefficient de transfert de film, KF (cm/s)	3,7365	5,4549	6,5848
Coefficient de diffusion extérieur (surfaique), DS (cm <sup>2</sup> /s)	0,1282E-07	0,1282E-07	0,1282E-07
Coefficient de diffusion intérieur (poreux), DP (cm <sup>2</sup> /s)	0,4468E-01	0,4468E-01	0,4468E-01
Paramètre de distribution du soluté, DG	9,2370E+07	9,2370E+07	9,2370E+07
Boit, BI	0,9708	1,4173	1,7190
Schmidt, SC	1,9899	1,9899	1,9899
Le nombre minimum de Stanton, STM	2,7952	2,8739	2,9256
EBCT minimum, ETMIN (s)	0,2228	0,1569	0,1323
EBCT minimum, ETLEN (cm)	5,5714	7,8473	9,2649
T à 95% du ZTM	1,3048	1,3884	1,3885
T à 5% du ZTM	0,6876	0,6777	0,6777
EBCT du ZTM, ETMTZ (s)	0,1375	0,1115	0,9407E-01
La longueur du ZTM, EMTZL (cm)	3,4386	5,5774	6,5850

### III.4.5) Comparaison entre les trois composées :

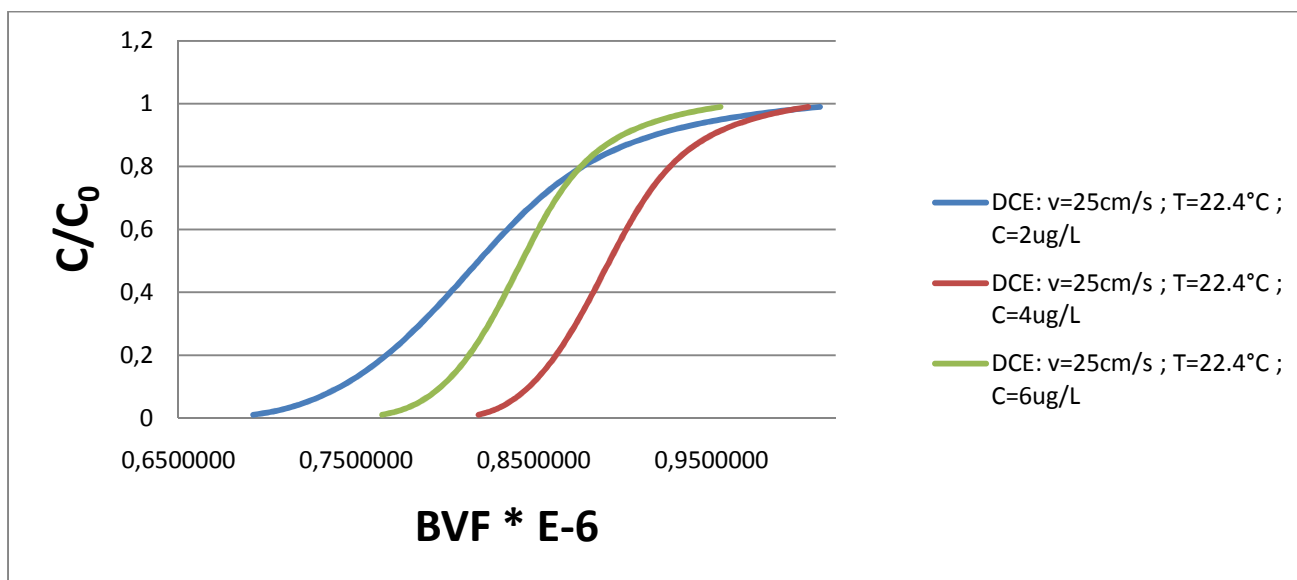
Vélocité superficielle de l'air = 25 cm/s

Paramètres calculées	composées organiques volatiles		
	DCE	TCE	PCE
Porosité du lit	0,3765	0,3765	0,3765
Reynolds, Re	62,1501	62,1501	62,1501
Viscosité de l'air, VISAIR (g/cm.s)	0,1783E-03	0,1783E-03	0,1783E-03
Densité de l'air, DENAIR (g/cm <sup>3</sup> )	0,1193E-02	0,1193E-02	0,1193E-02
Diffusivité moléculaire, DM (cm <sup>2</sup> /s)	0,9538E-01	0,8365E-01	0,7510E-01
Coefficient de transfert de film, KF (cm/s)	4,4217	4,0309	3,7365
Coefficient de diffusion extérieur (surfactive), DS (cm <sup>2</sup> /s)	0,7398E-06	0,5519E-07	0,1282E-07
Coefficient de diffusion intérieur (poreux), DP (cm <sup>2</sup> /s)	0,61142E-01	0,4977E-01	0,4468E-01
Paramètre de distribution du soluté, DG	2,1900E+07	2,3898E+07	9,2370E+07
Boit, BI	0,9045	0,9402	0,9708
Schmidt, SC	1,5667	1,7865	1,9900
Le nombre minimum de Stanton, STM	26,0716	3,4504	2,7952
EBCT minimum, ETMIN (s)	1,7565	0,2550	0,2228
EBCT minimum, ETLEN (cm)	43,9130	6,3748	5,5714
T à 95% du ZTM	1,2208	1,3694	1,3048
T à 5% du ZTM	0,8271	0,6577	0,6876
EBCT du ZTM, ETMTZ (s)	0,6915	0,1815	0,1375
La longueur du ZTM, EMTZL (cm)	17,2876	4,5369	3,4386

### III.4.6) Courbes caractéristiques :

#### III.4.6.1) Pour Cis-dichloroéthène :

##### III.4.6.1.1) L'Effet de concentration :



**Figure III.2 :** Courbes de percées pour différentes concentrations.

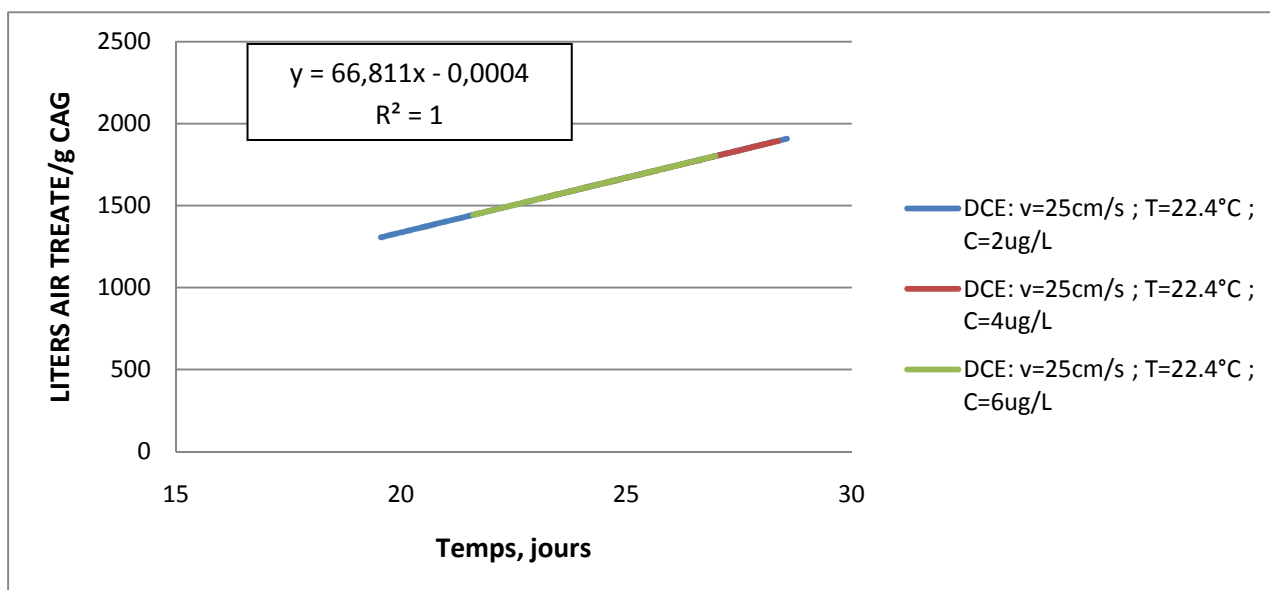
L'effet de la concentration initial sur la forme de courbe de percée a été examiné sur un charbon actif granulé avec, une vitesse de 25cm/s et une température de 22.4°C, et pour des concentrations initiales de 2, 4 et 6 µg/L.

Les différents résultats obtenus tracés sous forme des courbes  $C/C_0 = f(BVF)$  (Figure III.2) montrent que l'équilibre est atteint au bout de 28.55 jours de contact pour  $C_0= 2\text{µg/L}$ , 28.36 jours pour  $C_0= 4\text{µg/L}$  et 26.97 jours pour  $C_0= 6\text{µg/L}$ .

L'allure de ces courbes représentant les cinétiques d'adsorption de Cis-dichloroéthène ( $C_0= 2\text{µg/L}$ ,  $C_0= 4\text{µg/L}$ ,  $C_0= 6\text{µg/L}$ ), sur le charbon actif granulé, permet de mettre en évidence deux zones :

- La première partie des courbes révèle une adsorption importante avec des taux d'adsorption de l'ordre de 99 % pour les trois concentrations au bout de 19.55 jours pour  $C_0=2\text{µg/L}$ , 23.12 jours pour  $C_0=4\text{µg/L}$  et 21.59 jours pour  $C_0=6\text{µg/L}$ .
- La deuxième se présente sous forme d'un plateau où l'adsorption de Cis-dichloroéthène est maximale. A ce niveau, il y a un pseudo-équilibre entre la vitesse d'adsorption et de désorption et la cinétique d'adsorption devient relativement plus lente.

On constate que le temps nécessaire pour atteindre le point de percée est plus long pour les trois concentrations.



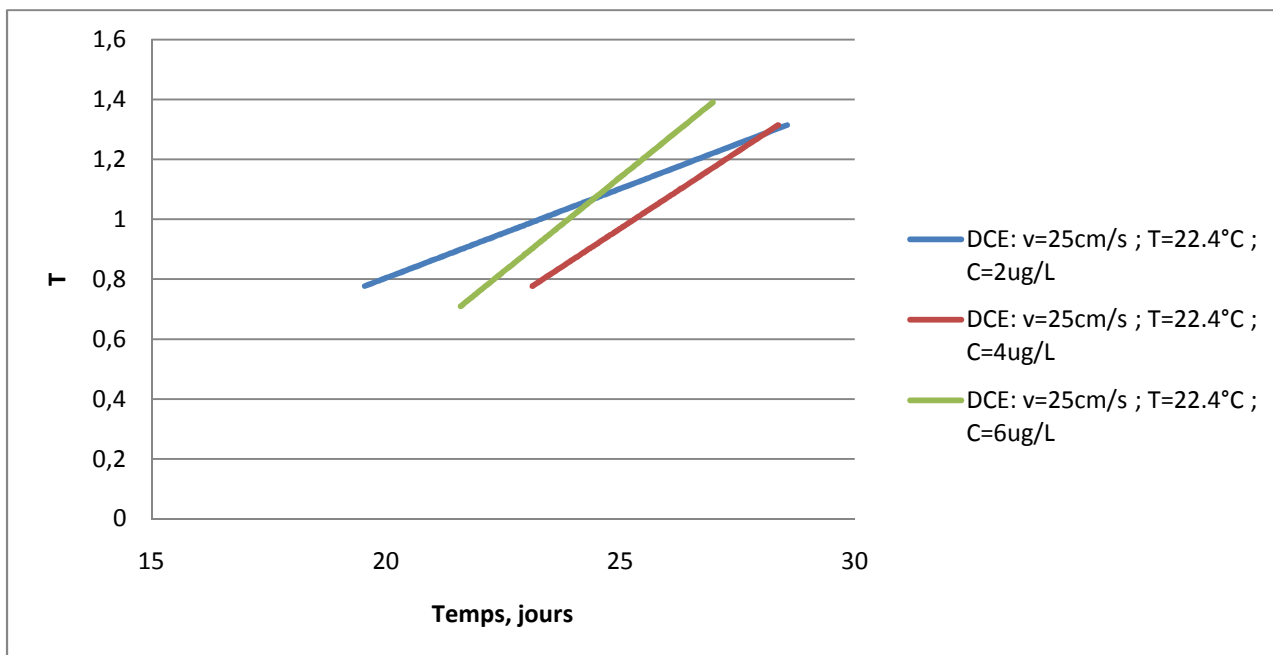
**Figure III.3 :** évolution de la quantité d'air traité par gramme de charbon actif granulé.

Les courbes de la figure III.3 représentent la quantité d'air traité par gramme de charbon actif granulé en fonction du temps.

Les résultats obtenus montrent l'évolution de la quantité d'air traité par un gramme de charbon actif granulé en fonction du temps de séjour, et d'après les tracés des courbes, on voit qu'elle est variée linéairement de forme  $y = a x + b$ .

On constate aussi que la quantité d'air traité par un gramme de charbon actif augmente avec le temps de contact pour les trois concentrations ( $C_0 = 2\mu\text{g/L}$ ,  $C_0 = 4\mu\text{g/L}$ ,  $C_0 = 6\mu\text{g/L}$ ) de Cis-dichloroéthène, l'allure de ces courbes donne des droites, avec des quantités d'air traitées variées d'une valeur de 1305.92 à 1907.75 pour  $C_0 = 2\mu\text{g/L}$  et pour une durée allant de 19.55 jours jusqu'à 28.55 jours, une quantité de 1544.97 à 1895.06 pour un temps de 23.12 à 28.36 jours pour  $C_0 = 4\mu\text{g/L}$ , et une quantité d'air traité de 1442.69 à 1802,05 pour une durée de 21.59 à 26.97 jours pour  $C_0 = 6\mu\text{g/L}$ .

Ces résultats montrent des différences plus ou moins marquées, selon la concentration initiale entre les quantités d'air traité par un gramme de charbon actif granulé.

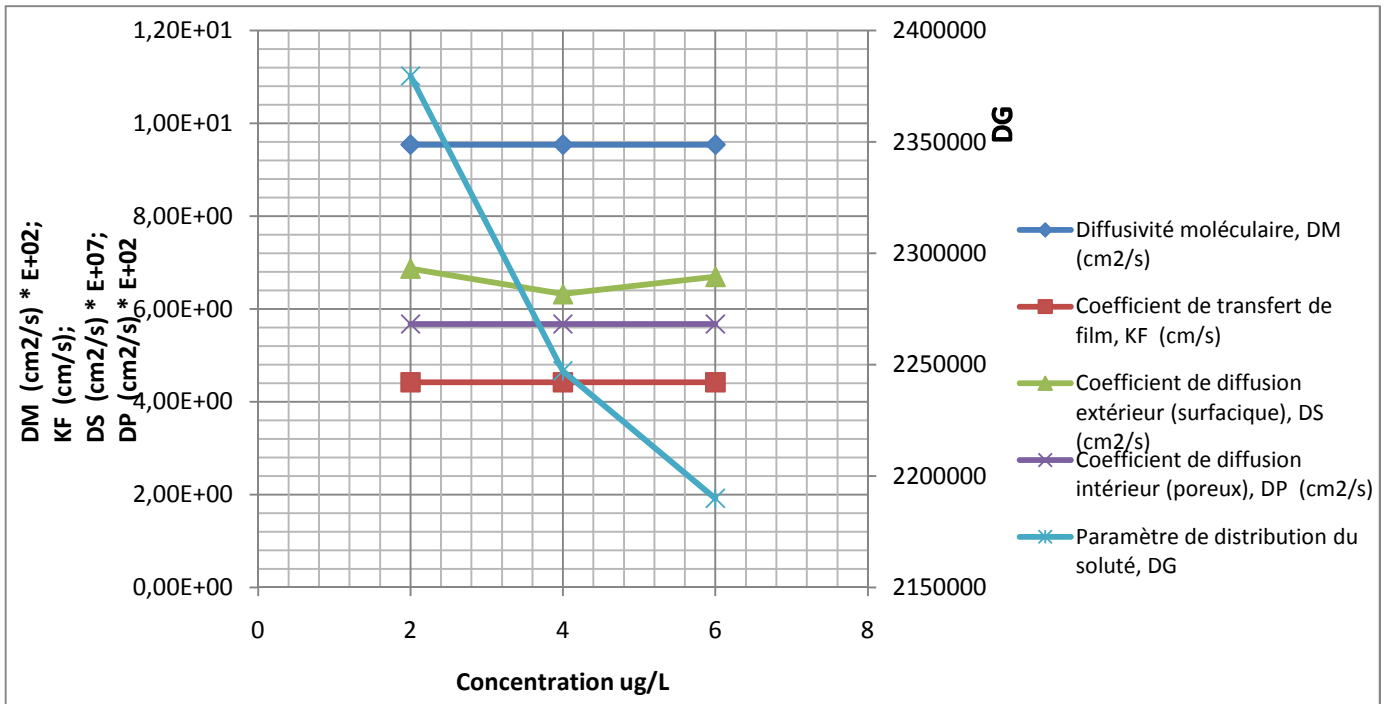


**Figure III.4** : évolution de la masse de la charge traitée par la masse requise pour saturer le CAG (taux d'adsorption) en fonction du temps.

Les résultats obtenus apparaissant sur la figure III.4, montrent l'évolution de taux d'adsorption en fonction du temps pour le Dichloroéthène, et pour des concentrations initiales de  $C_0 = 2, 4, \text{ et } 6 \mu\text{g/L}$ .

Ces courbes montrent que le temps influe notablement sur la masse de la charge traitée par la masse requise pour saturer le charbon actif granulé.

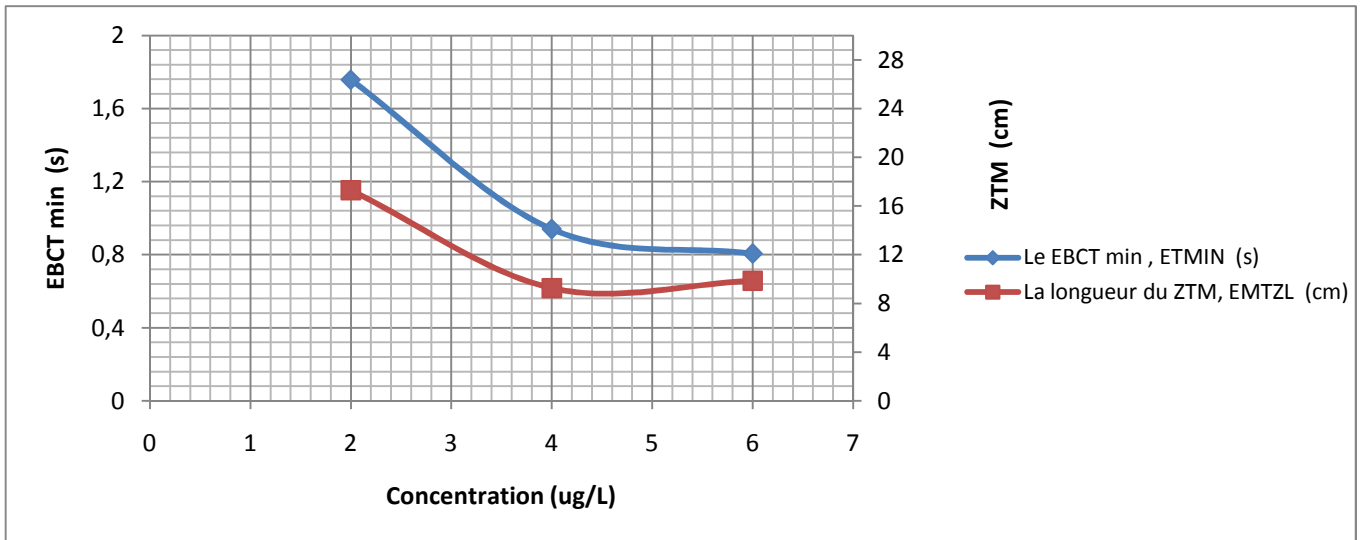
On constate d'après ces courbes que la masse du charge traitée par la masse requise pour saturer le CAG, c.-à-d. le taux d'adsorption en Cis-dichloroéthène croît avec le temps, et de façon linéaires et on trouve des droites de différentes pentes, ces courbes montrent des différences plus ou moins marquées, selon la concentration initiale, on observe que T varie de 0.777 jusqu'à 1.314 pour les deux concentrations  $C_0 = 2 \text{ et } 4 \mu\text{g/L}$ , et de 0.709 à 1.390 pour  $C_0 = 6 \mu\text{g/L}$ .



**Figure III.5** : évolution des paramètres de transfert de masse en fonction de la concentration.

D'après les courbes de figure III.5, on observe que les coefficients de diffusivité moléculaire  $D_M$ , de transfert de film  $K_F$ , et de diffusion intérieure  $D_P$ , restent constants pour les trois concentrations ( $C_0 = 2, 4, 6 \mu\text{g/L}$ ) pour le composé Cis-dichloroéthène, avec des valeurs de  $D_M = 0.095 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $K_F = 4.42 \text{ cm/s}$ , et  $D_P = 0,06 \text{ cm}^2/\text{s}$ . Ceci montre que ces coefficients de transfert de masse sont indépendants de concentration.

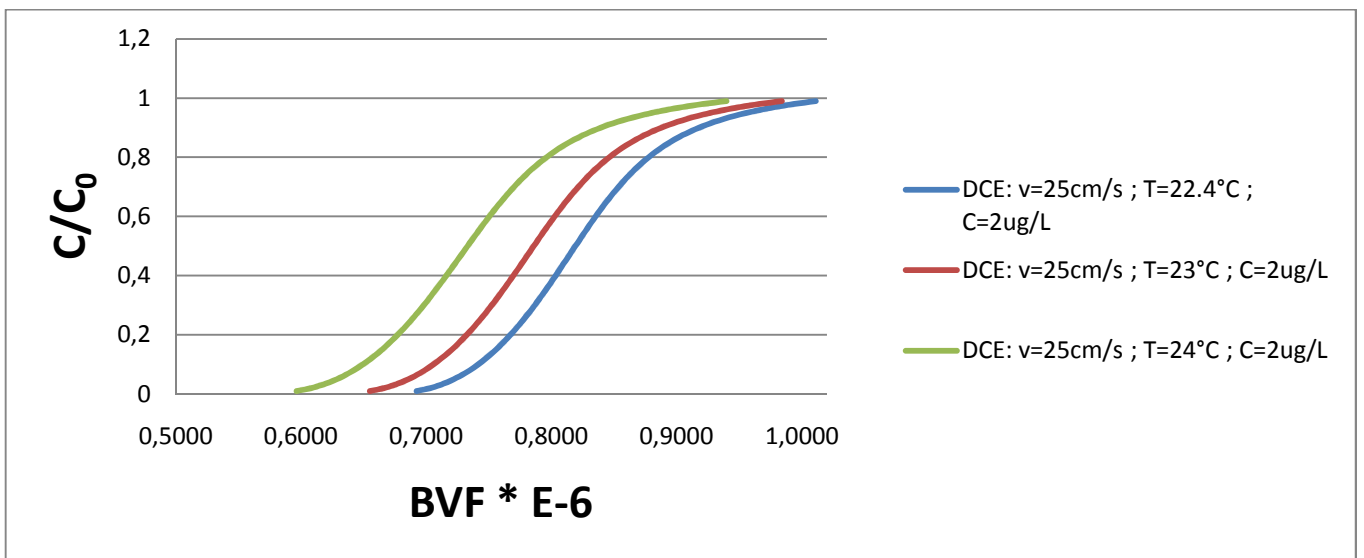
Pour le coefficient de diffusion extérieure  $D_S$ , un écart nettement significatif est observé pour les trois concentrations et on remarque aussi que le paramètre de distribution  $D_G$  diminue avec l'augmentation de concentration.



**Figure III.6 :** évolution de temps de contact et la longueur du ZTM en fonction de la concentration.

On constate d'après ces courbes (figure III.6) que le temps de contact minimum  $EBCT_{min}$ , et la longueur de la zone de transfert de masse ZTM pour le Cis-dichloroéthène diminuent avec l'augmentation de concentration, et nous avons  $EBCT_{min} = 1.74$  s,  $ZTM = 17.10$  cm à  $C_0 = 2$  µg/L,  $EBCT_{min} = 0.94$  s  $ZTM = 9.25$  cm pour  $C_0 = 4$  µg/L, et  $EBCT_{min} = 0.81$  s, avec une légère augmentation de  $ZTM = 9.85$  cm à  $C_0 = 6$  µg/L.

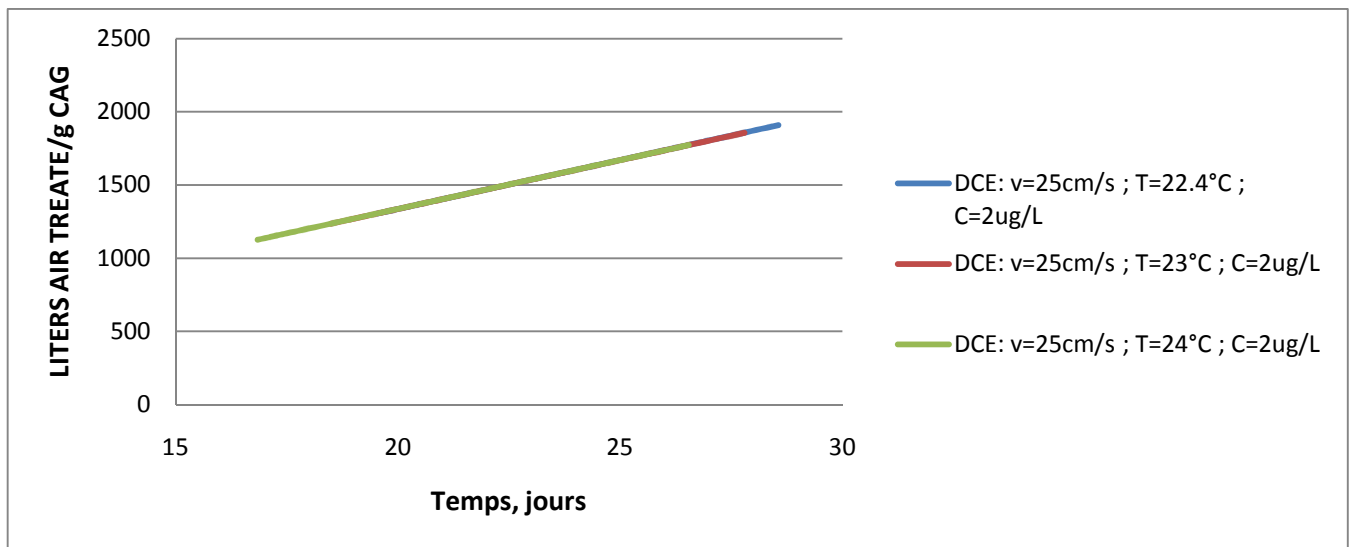
#### III.4.6.1.2) Effet de la température :



**Figure III.7 :** Courbes de percées pour différentes températures.

L'effet de la température sur la forme de courbe de percée a été examiné sur un charbon actif granulé avec, une vitesse de 25cm/s et une concentration de  $C_0 = 2\mu\text{g/L}$ , et pour des températures de 22.4, 23 et 24°C.

Les différents résultats obtenus tracés sous forme des courbes  $C/C_0 = f(\text{BVF})$  (Figure III.7) montrent l'augmentation de la teneur résiduelle de Cis-dichloroéthène en fonction du volume de la charge dans le lit (BVF), pour les trois températures jusqu'à l'obtention d'un palier de saturation où l'équilibre est atteint au bout de 28.55 jours pour une température de 22.4°C, 27.79 jours pour une température de 23°C, et 26.54 jours pour une température de 24°C.

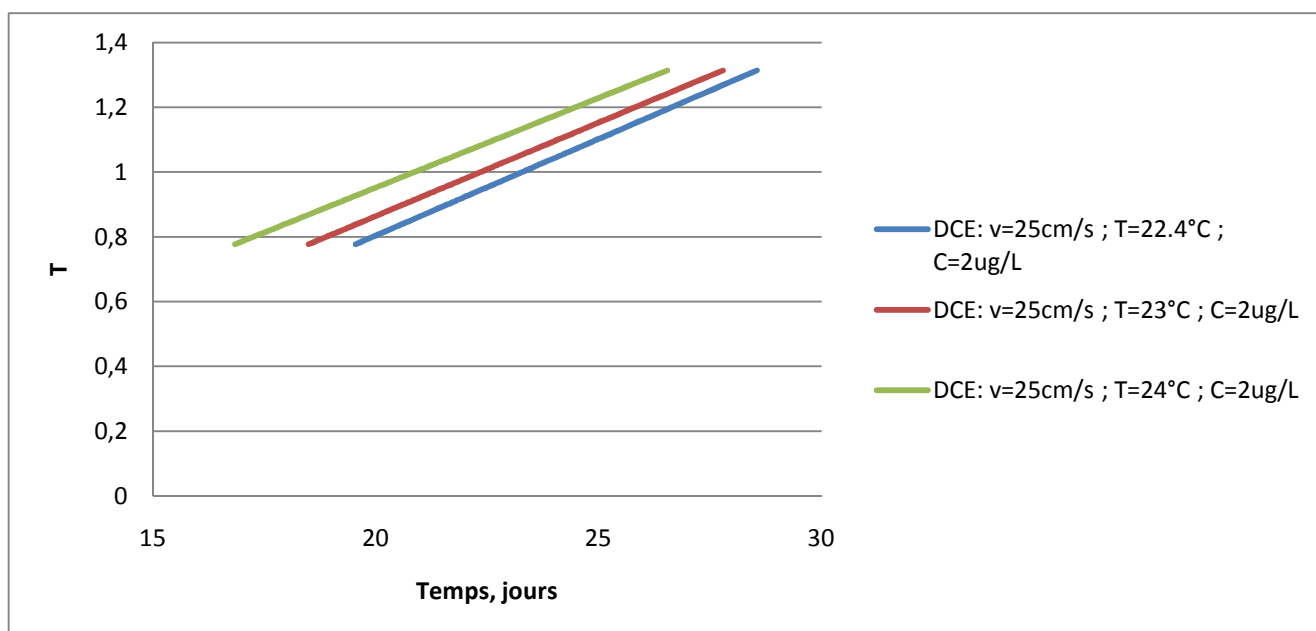


**Figure III.8:** évolution de la quantité d'air traité par gramme de charbon actif granulé.

Les courbes de la figure III.8 représentent la quantité d'air traité par un gramme de charbon actif granulé en fonction du temps à différentes températures (22.4, 23 et 24°C).

On observe d'après ces courbes que la quantité d'air traité par un gramme de charbon actif augmente avec le temps de contact pour les trois températures, l'allure de ces courbes donne des droites, avec des quantités d'air traités/g de CAG varies d'une valeur de 1305.92 à 1907.75 pour une température 22.4°C avec un temps allant de 19.55 jours jusqu'à 28.55 jours, une quantité de 1235.48 à 1856.77 pour une durée de 18.49 à 27.79 jours à  $T = 23^\circ\text{C}$ , et une quantité d'air traité de 1125.13 à 1773.27 pour une durée de 16.84 à 26.54 jours à une température 24°C.

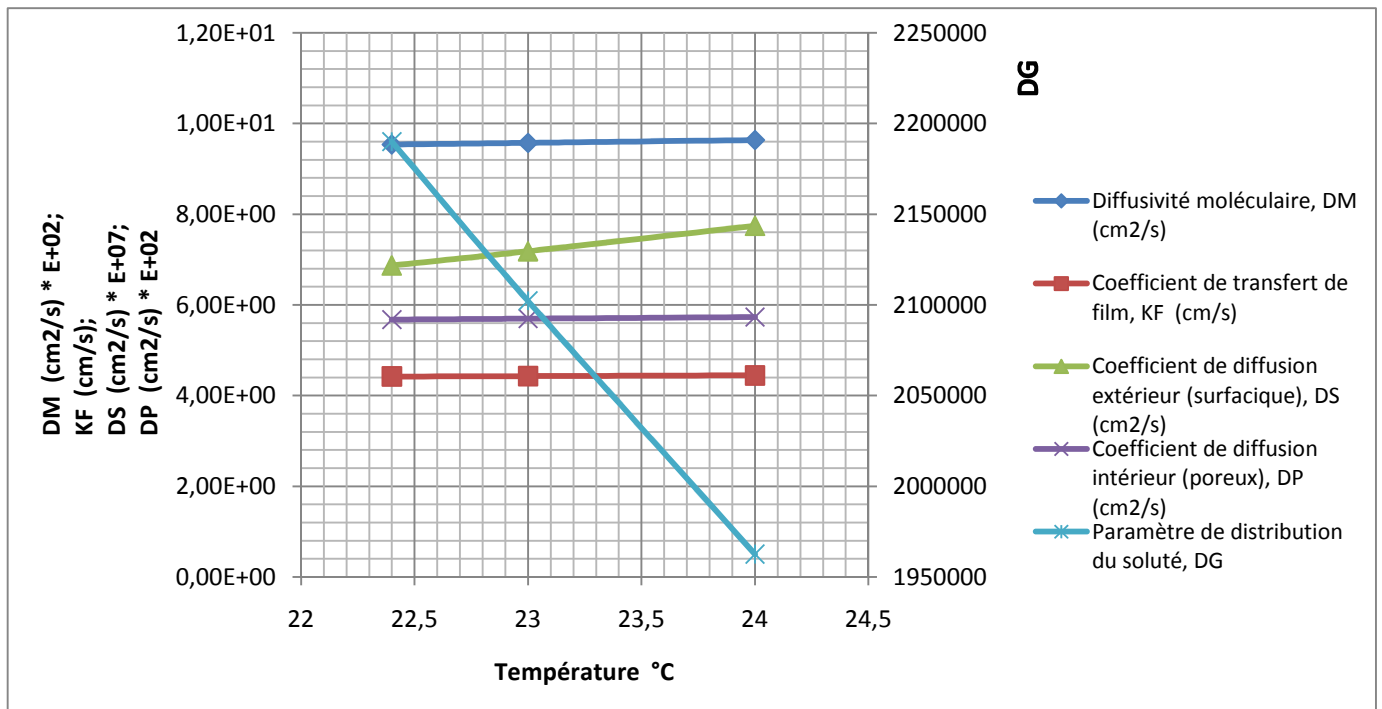
Ces résultats montrent des différences plus ou moins marquées, entre les quantités d'air traité par un gramme de charbon actif granulé pour différentes températures.



**Figure III.9** : évolution de la masse de la charge traitée par la masse requise pour saturer le CAG (taux d'adsorption) en fonction du temps.

Les résultats obtenus présentés sur la figure III.9, montrent l'évolution de la masse du charge traitée par la masse requise pour saturer le charbon actif granulé en fonction du temps pour le composé Dichloroéthène, pour des différentes températures de fonctionnement.

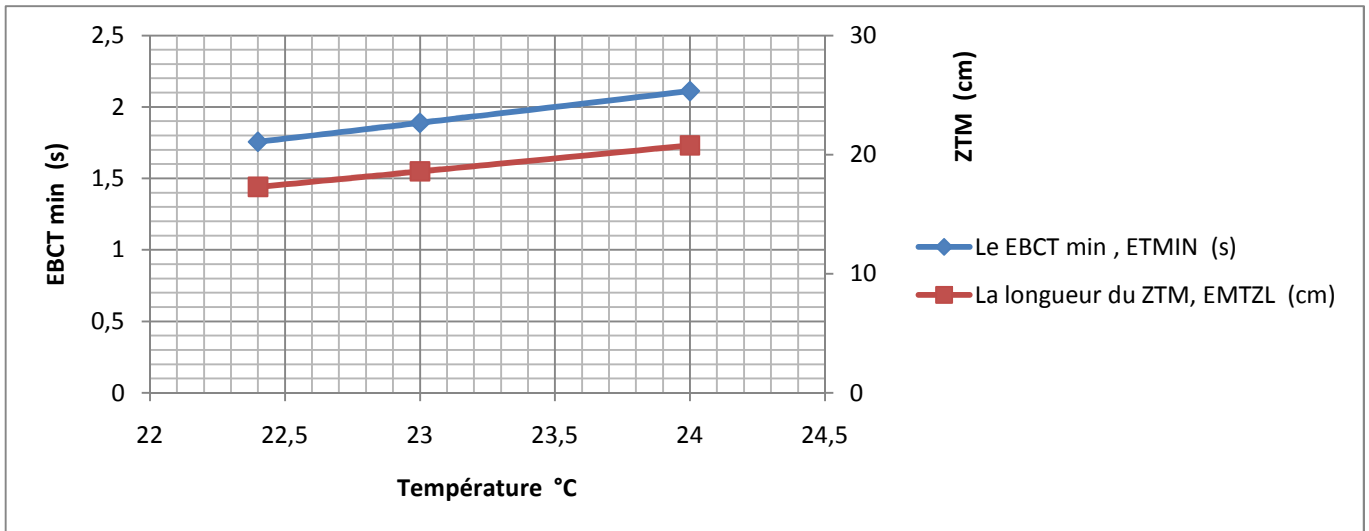
On constate d'après ces courbes que la masse du charge traitée par la masse requise pour saturer le CAG en Cis-dichloroéthène augmente avec le temps de façon linéaires et on trouve des droites en parallèles, avec des valeurs de la masse du charge traitée / la masse requise pour saturer le CAG identiques varies de 0.777 jusqu'à 1.314 pour les trois températures et à des temps différents varies de 19.55 à 28.55 jours pour une température  $22.4^\circ\text{C}$ , de 18.49 à 27.79 jours pour une température  $23^\circ\text{C}$ , et de 16.84 à 26.54 jours pour une température  $24^\circ\text{C}$ . L'étude comparative montre la supériorité de la courbe correspond à la température égale à  $24^\circ\text{C}$ .



**Figure III.10** : évolution des paramètres de transfert de masse en fonction de la température.

Les résultats obtenus montrent que les coefficients de diffusivité moléculaire  $D_M$ , de transfert de film  $K_F$ , et de diffusion intérieure  $D_P$ , pour le Cis-dichloroéthène restent presque constants, pour les trois températures ( $T = 22,4, 23, 24$  °C) avec des valeurs proches de  $D_M = 0,096$  cm<sup>2</sup>/s,  $K_F = 4,4$  cm/s, et  $D_P = 0,06$  cm<sup>2</sup>/s.

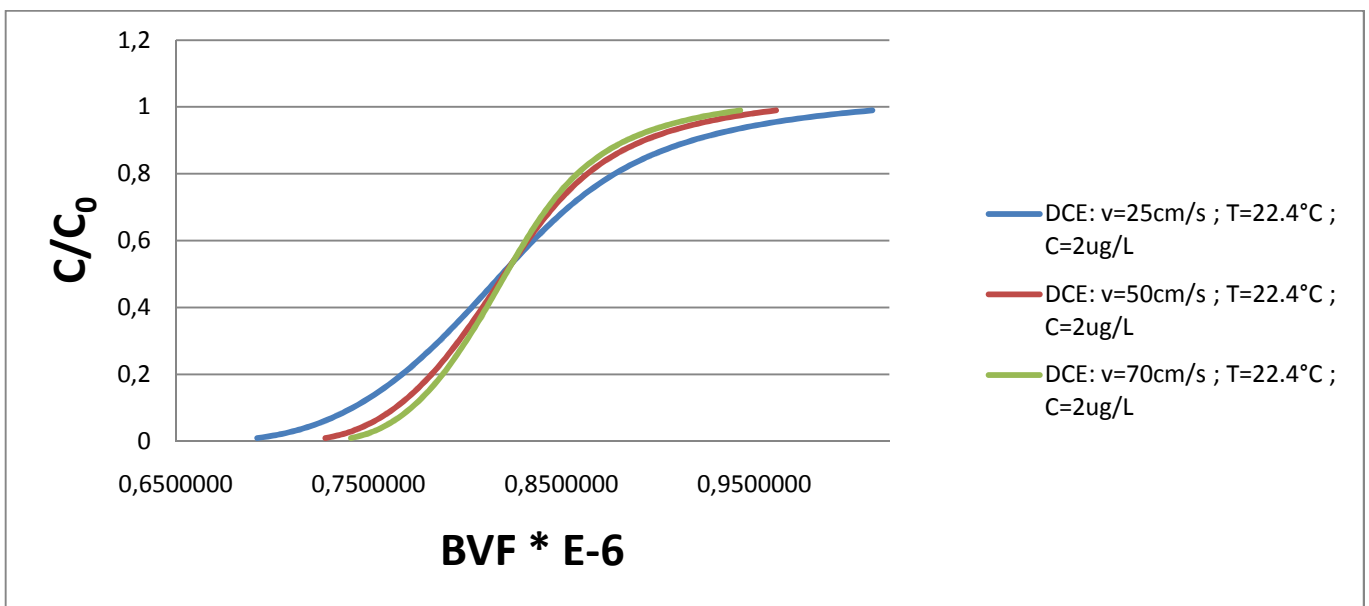
Une faible augmentation est observée pour le coefficient de diffusion extérieure  $D_S$  avec des valeurs égales à  $0,69 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s pour  $T = 22,3$ °C,  $0,72 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s pour  $T = 23$ °C et  $0,77 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s pour  $T = 24$ °C. Le paramètre de distribution du soluté  $D_G$  diminue avec la température et on trouve  $D_G = 2190036$  pour une température égale à  $22,3$ °C,  $D_G = 2102238,4$  pour  $T = 23$ °C et  $D_G = 1962573,1$  à  $T = 24$ °C.



**Figure III.11 :** évolution de temps de contact et la longueur du ZTM en fonction de la température.

On constate d'après ces courbes que le temps de contact minimum  $EBCT_{min}$ , et la longueur de la zone de transfert de masse ZTM pour le Cis-dichloroéthène augmentent avec l'augmentation de température, et on trouve  $EBCT_{min} = 1.76$  s,  $ZTM = 17.29$  cm pour une température  $22.3^{\circ}C$ ,  $EBCT_{min} = 1.89$  s,  $ZTM = 18.59$  cm pour  $T = 23^{\circ}C$ , et  $EBCT_{min} = 2.11$  s,  $ZTM = 20.78$  cm à  $T = 24^{\circ}C$ .

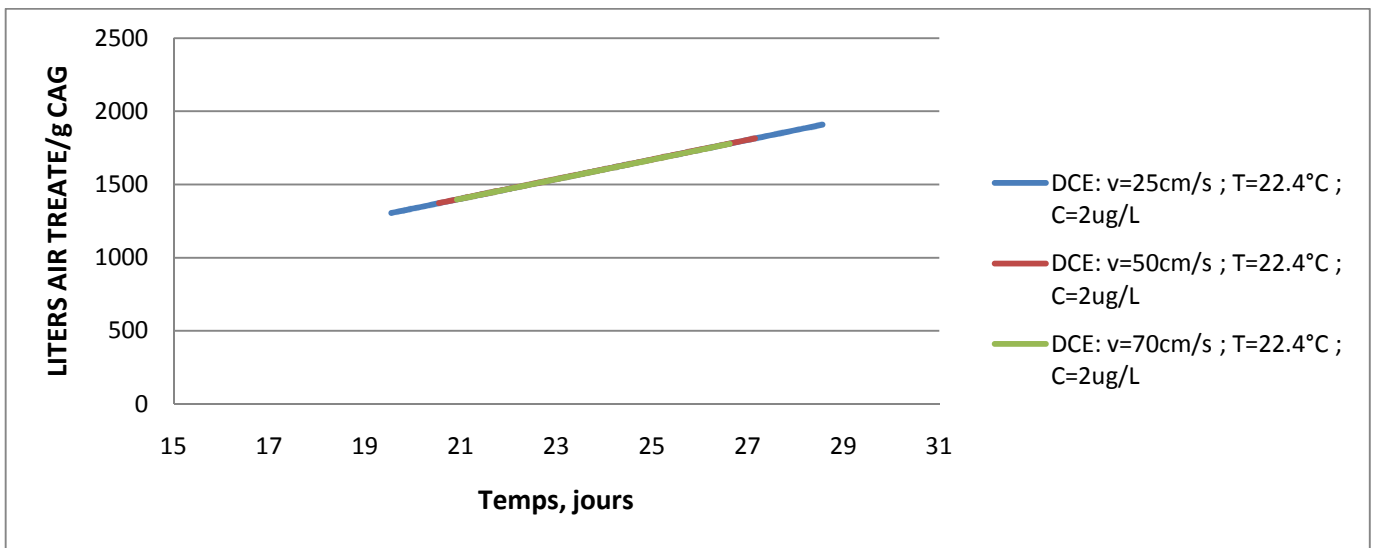
#### III.4.6.1.3) Effet de la vitesse :



**Figure III.12 :** Courbes de percées pour différentes vitesses.

L'effet de la vitesse sur la forme de courbe de percée a été examiné sur un charbon actif granulé avec, une concentration de  $C_0 = 2 \mu\text{g/L}$ , une température de  $22.4^\circ\text{C}$  et pour des vitesses de 25, 50, et 70 cm/s.

Les différents résultats obtenus tracés sous forme des courbes  $C/C_0 = f(\text{BVF})$  (Figure III.12) montrent l'augmentation de la teneur résiduelle de Cis-dichloroéthène en fonction du volume de la charge dans le lit (BVF), pour les trois vitesses jusqu'à l'obtention d'un palier de saturation où l'équilibre est atteint au bout de 28.55 jours pour une vitesse de 25cm/s, 27.15 jours pour une vitesse de 50cm/s, et 26.62 jours pour une vitesse de 70cm/s.

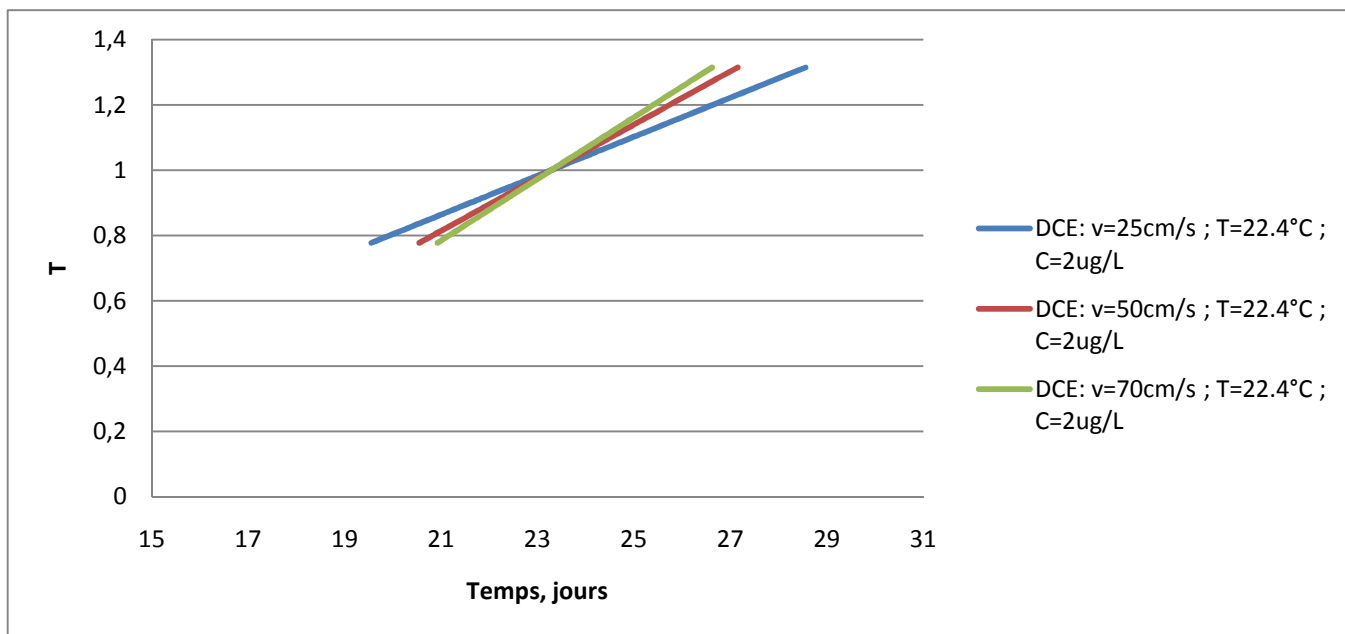


**Figure III.13** : évolution de la quantité d'air traité par gramme de charbon actif granulé.

Les courbes de la figure III.13 représentent la quantité d'air traité par un gramme de charbon actif granulé en fonction du temps pour différentes vitesses (25, 50, et 70 cm/s) pour le composé Cis-dichloroéthène.

On observe d'après ces courbes que la quantité d'air traité par un gramme de charbon actif augmente avec le temps de contact pour les trois vitesses, l'allure de ces courbes donne des droites, avec des quantités d'air traités/g de CAG varies d'une valeur de 1305.92 à 1907.75 pour une vitesse de 25cm/s avec un temps allant de 19.55 jours jusqu'à 28.55 jours, une quantité de 1372.63 à 1813.68 pour une durée de 20.54 à 27.15 jours à  $V = 50\text{cm/s}$ , et une quantité d'air traité de 1397.61 à 1778.45 pour une durée de 20.92 à 26.61 jours à une vitesse de 70cm/s.

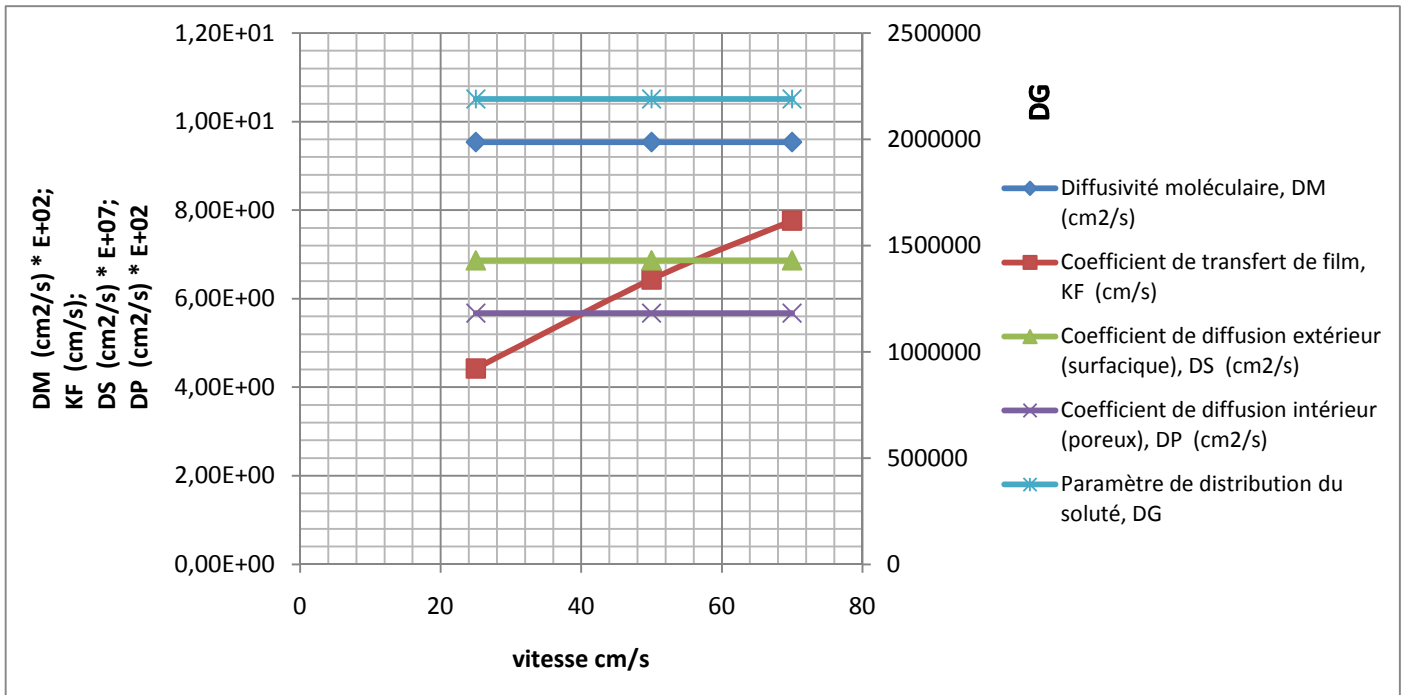
Ces résultats montrent des différences plus ou moins marquées, entre les quantités d'air traité / g de CAG pour différentes vitesses d'écoulement.



**Figure III.14 :** évolution de la masse de la charge traitée par la masse requise pour saturer le CAG (taux d'adsorption) en fonction du temps.

Les résultats obtenus présentés sur la figure III.14, montrent l'évolution de la masse du charge traitée par la masse requise pour saturer le charbon actif granulé (T) en fonction du temps pour le Cis-dichloroéthène, à différentes vitesses.

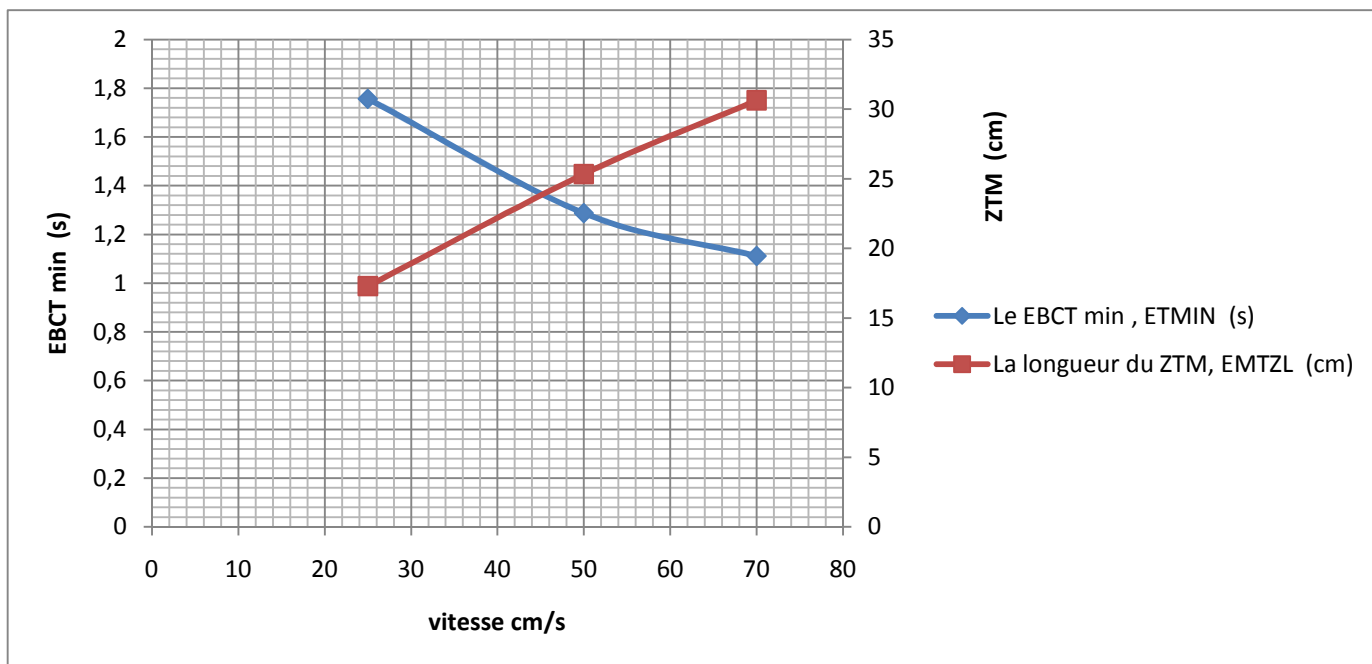
On constate d'après ces courbes que la masse du charge traitée par la masse requise pour saturer le CAG en Cis-dichloroéthène augmente avec le temps de façon linéaires et on trouve des droites, avec des valeurs de la masse du charge traitée/ la masse requise pour saturer le CAG identiques, varient de 0.777 jusqu'à 1.314 pour les trois vitesses et à des temps différents varient de 19.55 à 28.55 jours pour une vitesse 25cm/s, de 20.54 à 27.15 jours pour une vitesse 50cm/s, et de 20.92 à 26.61 jours pour une vitesse 70cm/s.



**Figure III.15** : évolution des paramètres de transfert de masse en fonction de la vitesse.

Les différents résultats obtenus montrent que les coefficients de diffusivité moléculaire  $D_M$ , de diffusion extérieur  $D_S$ , de diffusion intérieur  $D_P$ , et le paramètre de distribution du soluté  $D_G$  pour le Cis-dichloroéthène restent constants, pour les trois vitesses ( $V = 25, 50, 70$  cm/s) avec des valeurs de  $D_M = 0,095$  cm<sup>2</sup>/s,  $D_S = 0,69 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s, et  $D_P = 0,057$  cm<sup>2</sup>/s et  $D_G = 2190036$ . Ceci montre que la variation de la vitesse n'influe pas sur ces coefficients de transfert de masse.

Le coefficient de transfert de film  $K_F$  augmente avec augmentation de la vitesse et on trouve des valeurs égales à 4.42 cm/s pour  $V = 25$ cm/s, 6.44 cm/s pour une vitesse  $V = 50$  cm/s et 7.76 cm/s pour  $V = 70$  cm/s.



**Figure III.16** : évolution de temps de contact et la longueur du ZTM en fonction de la vitesse.

On constate d'après ces courbes que le temps de contact minimum de lit vide  $EBCT_{min}$ , diminue avec l'augmentation de la vitesse par contre la longueur de la zone de transfert de masse ZTM augmente d'une manière importante avec la vitesse pour le composé Cis-dichloroéthène, avec des valeurs  $EBCT_{min} = 1.76$  s,  $ZTM = 17.29$  cm pour une vitesse  $V = 25$  cm/s,  $EBCT_{min} = 1.29$  s,  $ZTM = 25.34$  cm pour  $V = 50$  cm/s, et  $EBCT_{min} = 1.11$  s,  $ZTM = 30.63$  cm à  $V = 70$  cm/s.

### III.4.6.2) Pour Trichloroéthylène :

#### III.4.6.2.1) Effet de concentration :

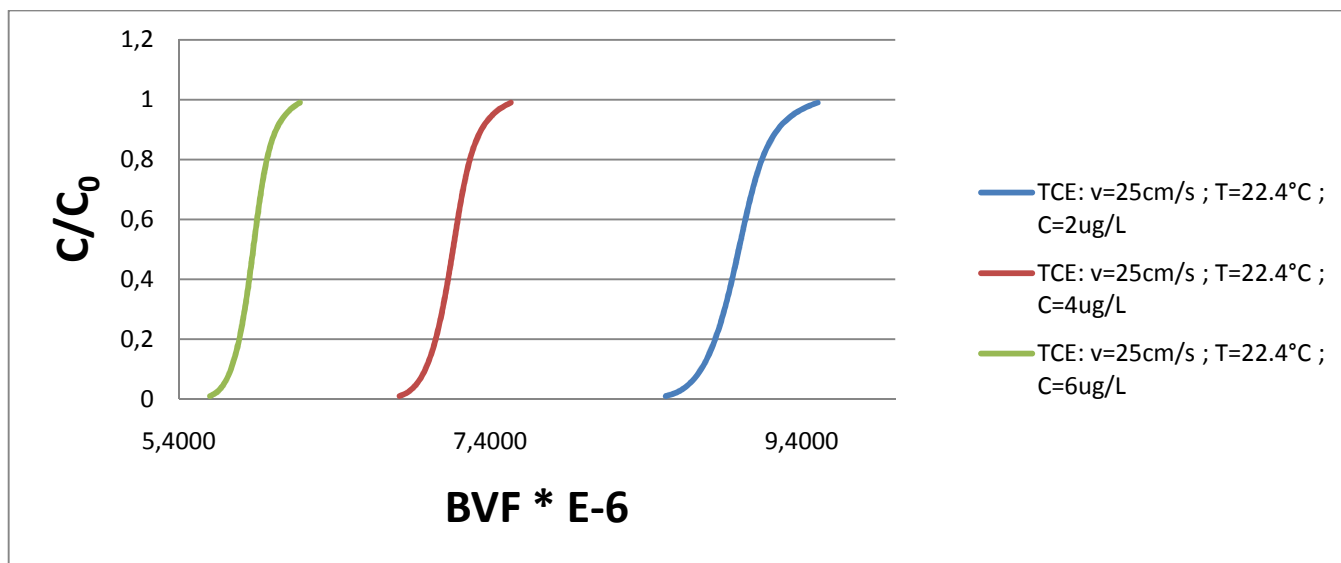


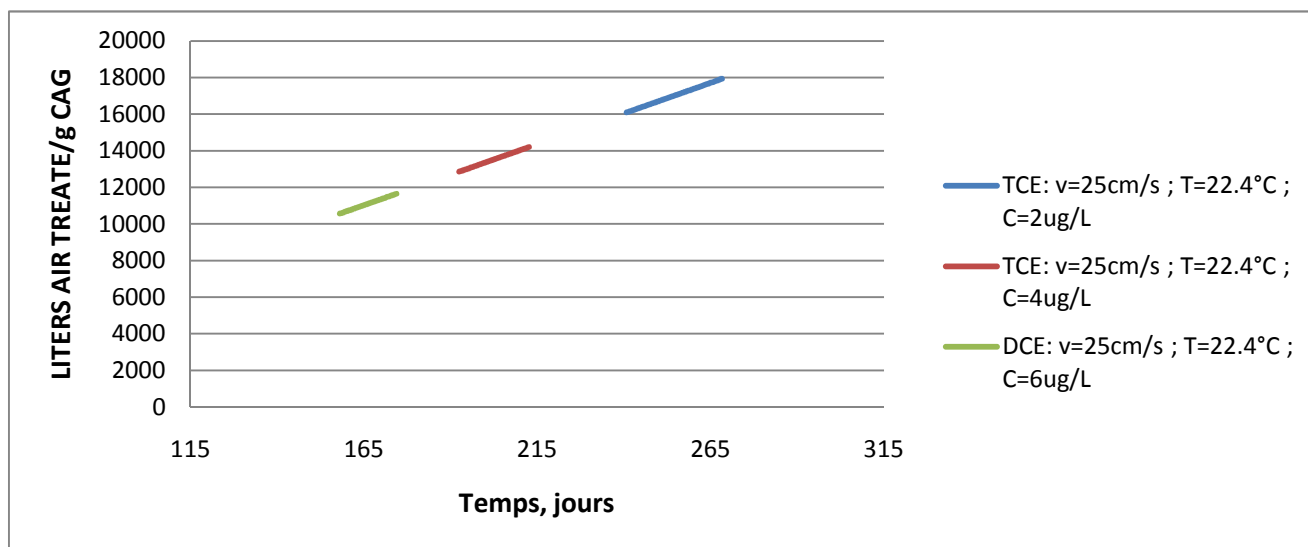
Figure III.17 : Courbes de percées pour différentes concentrations.

Les différents résultats obtenus tracés sous forme des courbes  $C/C_0 = f(BVF)$  (Figure III.17) montrent que l'équilibre est atteint au bout de 268.33 jours de contact pour  $C_0 = 2\mu\text{g/L}$ , 212.69 jours pour  $C_0 = 4\mu\text{g/L}$  et 174.43 jours pour  $C_0 = 6\mu\text{g/L}$ .

L'allure de ces courbes représentant les cinétiques d'adsorption de Trichloroéthylène ( $C_0 = 2\mu\text{g/L}$ ,  $C_0 = 4\mu\text{g/L}$ ,  $C_0 = 6\mu\text{g/L}$ ), sur le charbon actif granulé

Ces courbes révèle une adsorption importante avec des taux d'adsorption de l'ordre de 99 % pour les trois concentrations au bout de 240.78 jours pour  $C_0 = 2\mu\text{g/L}$ , 192.49 jours pour  $C_0 = 4\mu\text{g/L}$  et 158.13 jours pour  $C_0 = 6\mu\text{g/L}$ .

On constate que le temps nécessaire pour atteindre le point de percée est très long pour les trois concentrations.



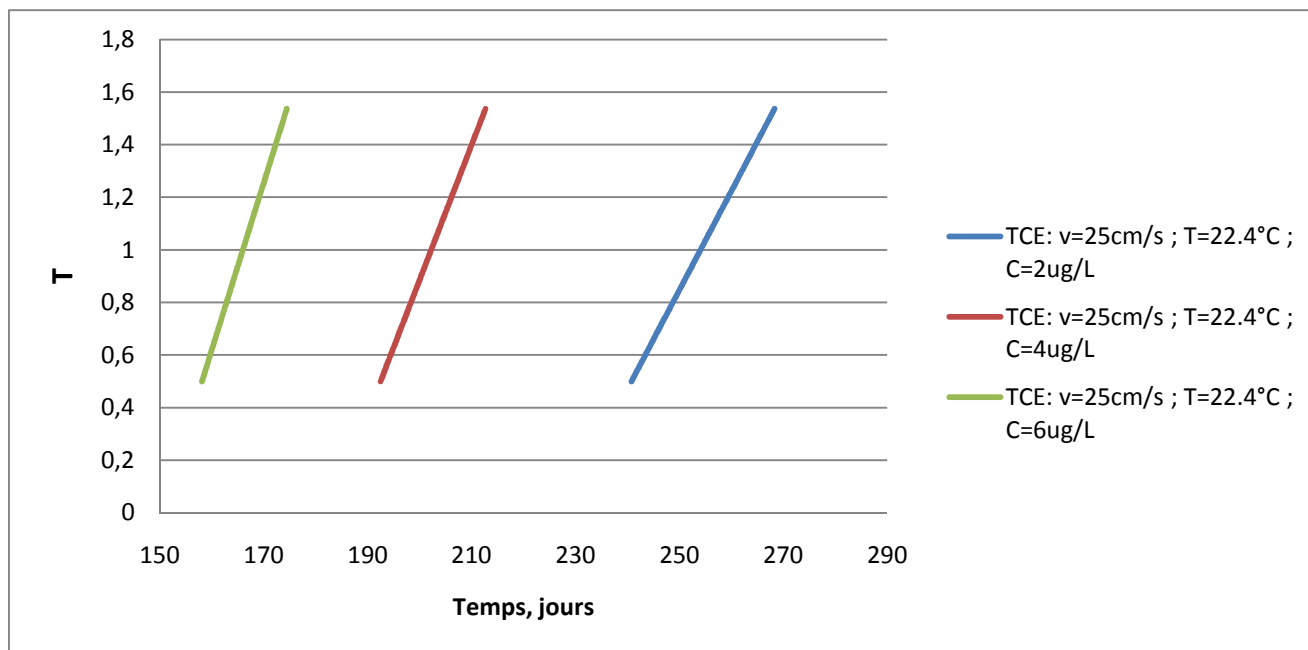
**Figure III.18** : évolution de la quantité d'air traité par gramme de charbon actif granulé.

Les courbes de la figure III.18 représentent la quantité d'air traité par un gramme de charbon actif granulé en fonction du temps.

Les résultats obtenus montrent l'évolution de la quantité d'air traité par un gramme de charbon actif granulé en fonction du temps de contact.

On constate d'après ces courbes que la quantité d'air traité par un gramme de charbon actif augmente avec le temps de contact pour les trois concentrations ( $C_0 = 2\mu\text{g/L}$ ,  $C_0 = 4\mu\text{g/L}$ ,  $C_0 = 6\mu\text{g/L}$ ) de Trichloroéthylène, l'allure de ces courbes donne des droites, avec des quantités d'air traités varies d'une valeur de 16086.83 à 17927.33 pour  $C_0 = 2\mu\text{g/L}$  et pour une durée allant de 240.78 jours jusqu'à 268.33 jours, une quantité de 12860.55 à 14210 pour un temps de 192.49 à 212.69 jours pour  $C_0 = 4\mu\text{g/L}$ , et une quantité d'air traité de 10564.69 à 11654.17 pour une durée de 158.13 à 174.43 jours pour  $C_0 = 6\mu\text{g/L}$ .

Ces résultats montrent des différences plus ou moins marquées, selon la concentration initiale entre les quantités d'air traité par un gramme de charbon actif granulé.

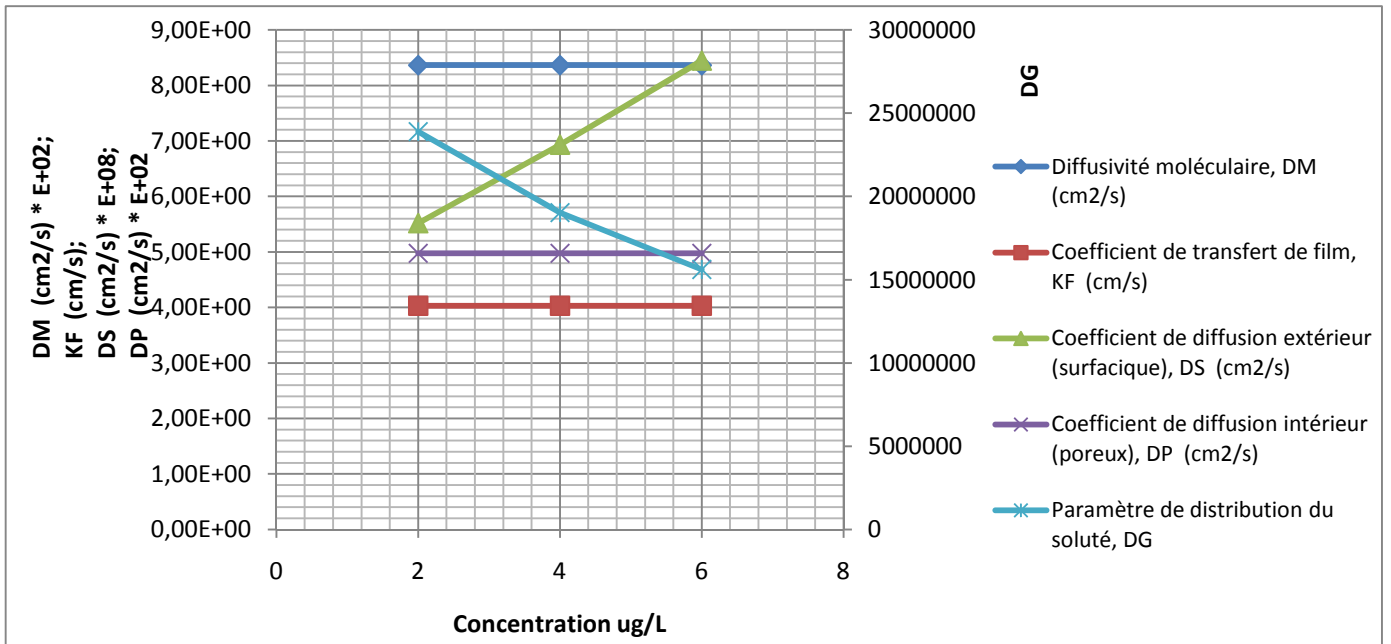


**Figure III.19** : évolution de la masse de la charge traitée par la masse requise pour saturer le CAG (taux d'adsorption) en fonction du temps.

Les résultats obtenus apparaissant sur la figure III.19, montrent l'évolution de la masse du charge traitée par la masse requise pour saturer le CAG en fonction du temps pour le Trichloroéthylène, et pour des concentrations initiales de  $C_0 = 2, 4, \text{ et } 6 \mu\text{g/L}$ .

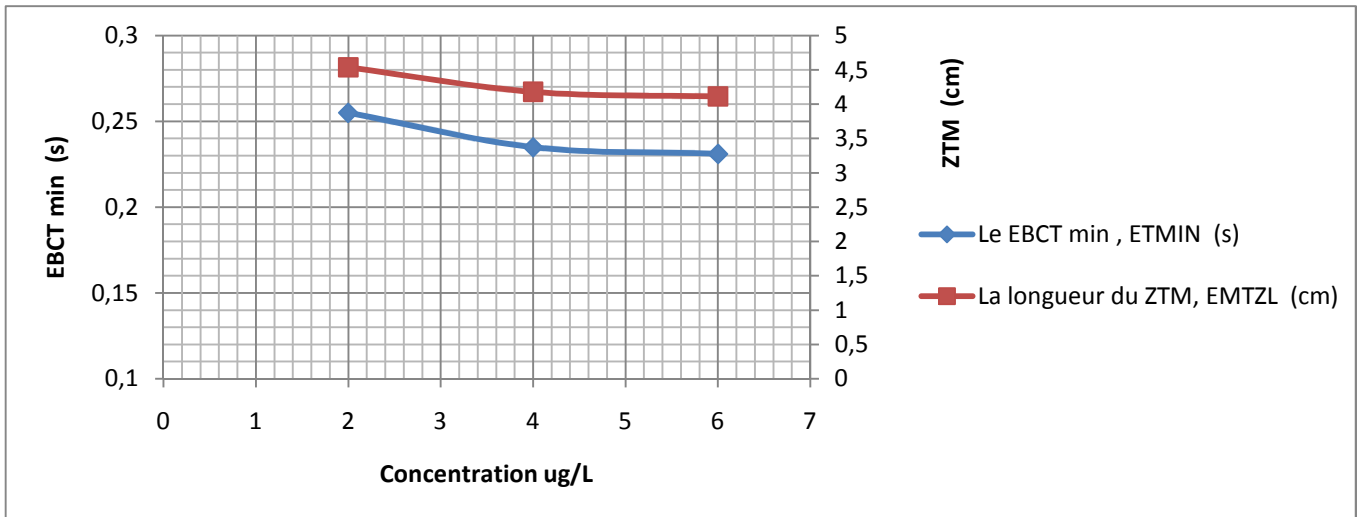
Ces courbes montrent que le temps influe notablement sur la masse de la charge traitée par la masse requise pour saturer le charbon actif granulé.

On constate d'après ces courbes que la masse du charge traitée par la masse requise pour saturer le CAG en Trichloroéthylène augmente avec le temps de façon linéaires et on trouve des droites, avec des valeurs de  $T$  varie de 0.499 jusqu'à 1.537. Ces valeurs ne changent pas pour les trois concentrations, avec des temps différents varies de 240.78 jusqu'à 268.33 jours pour une concentration  $C_0 = 2 \mu\text{g/L}$ , de 192.49 à 212.69 jours pour  $C_0 = 4 \mu\text{g/L}$ , et de 158.13 à 174.43 jours pour une concentration  $C_0 = 6 \mu\text{g/L}$ .



**Figure III.20** : évolution des paramètres de transfert de masse en fonction de la concentration.

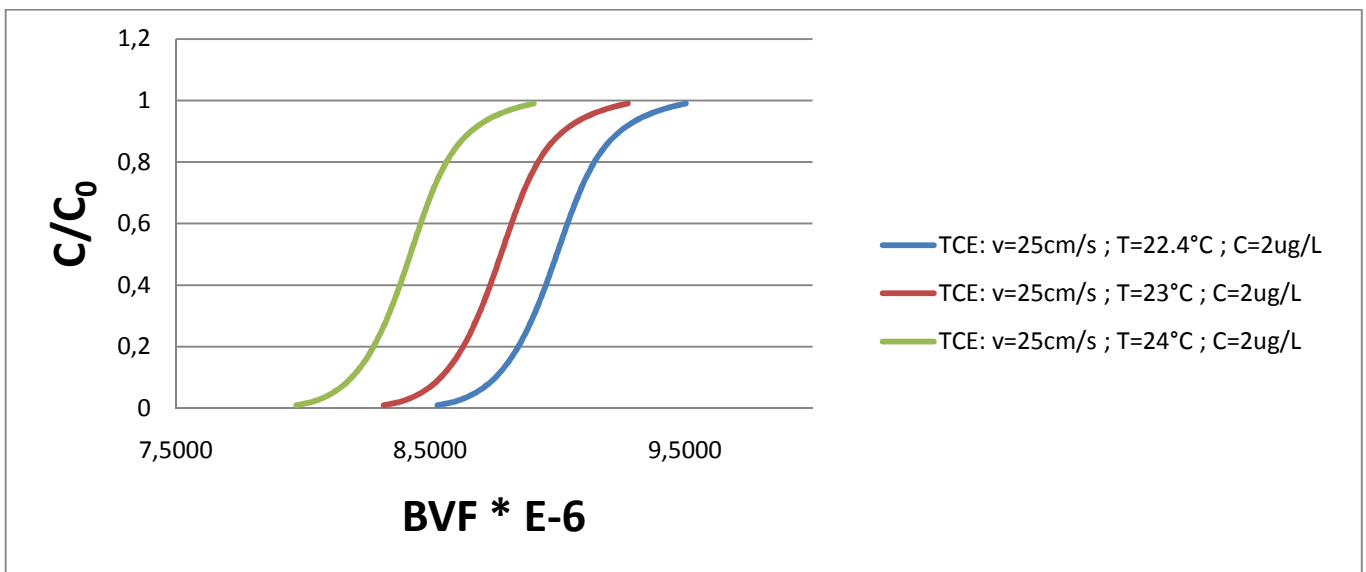
Les résultats obtenus montrent que les coefficients de diffusivité moléculaire  $D_M$ , de transfert de film  $K_F$ , et de diffusion intérieure  $D_P$ , pour le Trichloroéthylène ne changent pas avec la variation de la concentration ( $C_0 = 2, 4, 6 \mu\text{g/L}$ ), et on obtient des valeurs de  $D_M = 0,084 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $K_F = 4,03 \text{ cm/s}$ , et  $D_P = 0,049 \text{ cm}^2/\text{s}$ . Une augmentation de coefficient de diffusion extérieure  $D_S$ , et une diminution de paramètre de distribution du soluté  $D_G$  sont observées en fonction de la concentration, et on trouve des valeurs de  $D_S = 0,55 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $D_G = 23897742$  pour  $C_0 = 2 \mu\text{g/L}$ ,  $0,69 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $D_G = 19022120$  pour  $C_0 = 4 \mu\text{g/L}$ , et  $D_S = 0,84 \times 10^{-7}$ ,  $D_G = 15613340$  pour  $C_0 = 6 \mu\text{g/L}$ .



**Figure III.21** : évolution de temps de contact et la longueur du ZTM en fonction de la concentration.

D'après les courbes de la figure III.21, on constate que le temps de contact minimum de lit vide  $EBCT_{min}$ , et la longueur de la zone de transfert de masse ZTM diminuent avec un écart nettement significatif entre les trois concentrations pour le Trichloroéthylène et on obtient  $EBCT_{min} = 0.25$  s,  $ZTM = 4.54$  cm à  $C_0 = 2$  µg/L,  $EBCT_{min} = 0.23$  s,  $ZTM = 4.18$  cm pour  $C_0 = 4$  µg/L, et  $EBCT_{min} = 0.23$  s,  $ZTM = 4.11$  cm à  $C_0 = 6$  µg/L.

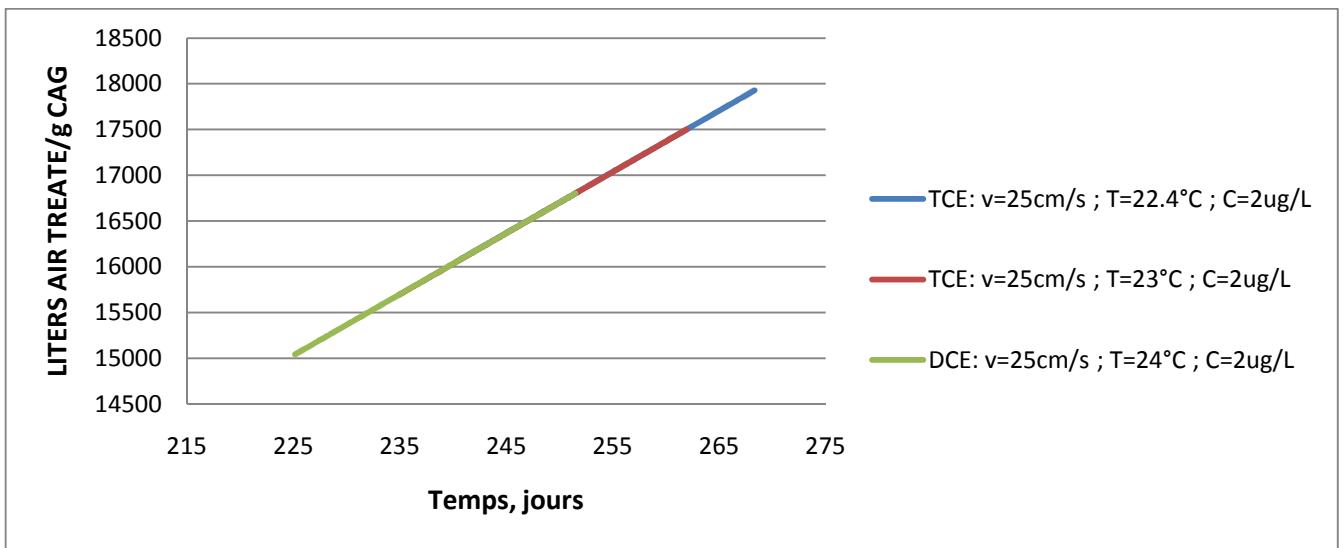
#### III.4.6.2.2) Effet de la température :



**Figure III.22** : Courbes de percées pour différentes températures.

Les différents résultats obtenus tracés sous forme des courbes  $C/C_0 = f(BVF)$  (Figure III.22) montrent l'augmentation de la teneur résiduelle de Trichloroéthylène en fonction du volume de la charge dans le lit (BVF), pour les trois températures jusqu'à l'obtention d'un palier de saturation où l'équilibre est atteint au bout de 268.33 jours pour une température de 22.4°C, 261.93 jours pour T égale à 23°C, et 251.46 jours pour une température de 24°C.

L'allure de ces courbes représentant les cinétiques d'adsorption de Trichloroéthylène sur le charbon actif granulé pour différentes température. Ces courbes montrent des différences plus ou moins marquées, selon la température de fonctionnement.

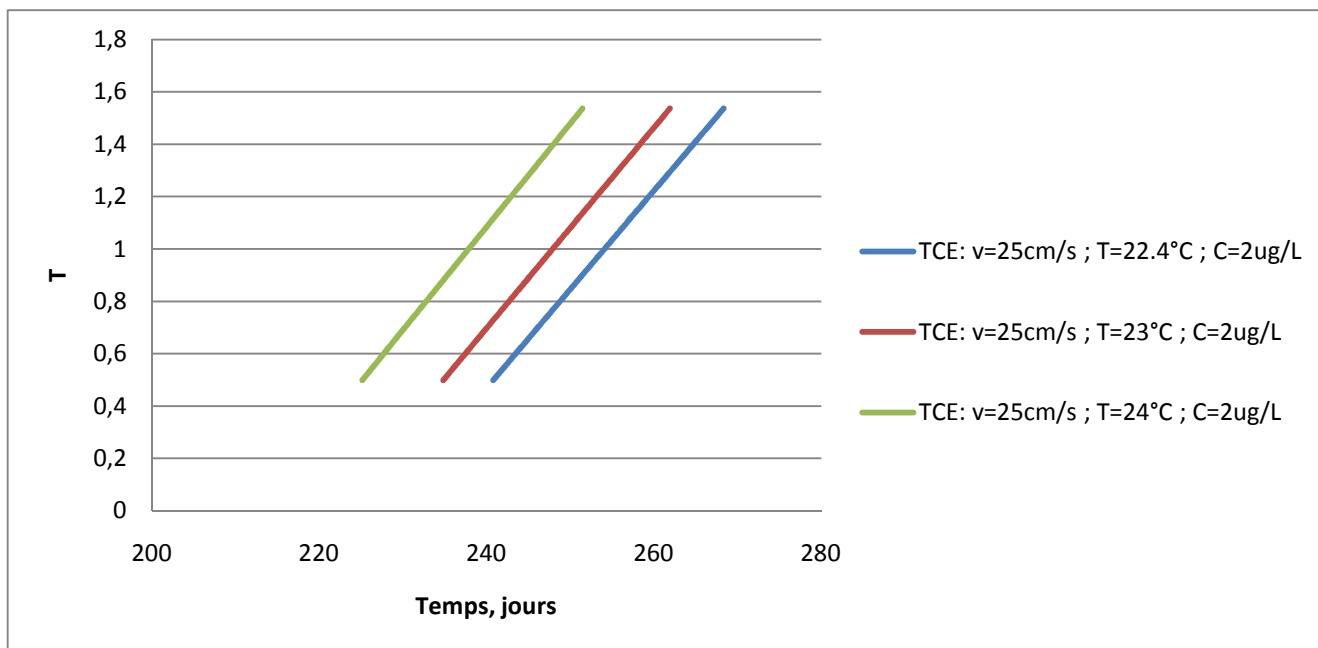


**Figure III.23** : évolution de la quantité d'air traité par gramme de charbon actif granulé.

Ces résultats montrent l'évolution de la quantité d'air traité par un gramme de charbon actif granulé en fonction du temps de contact pour le Trichloroéthylène.

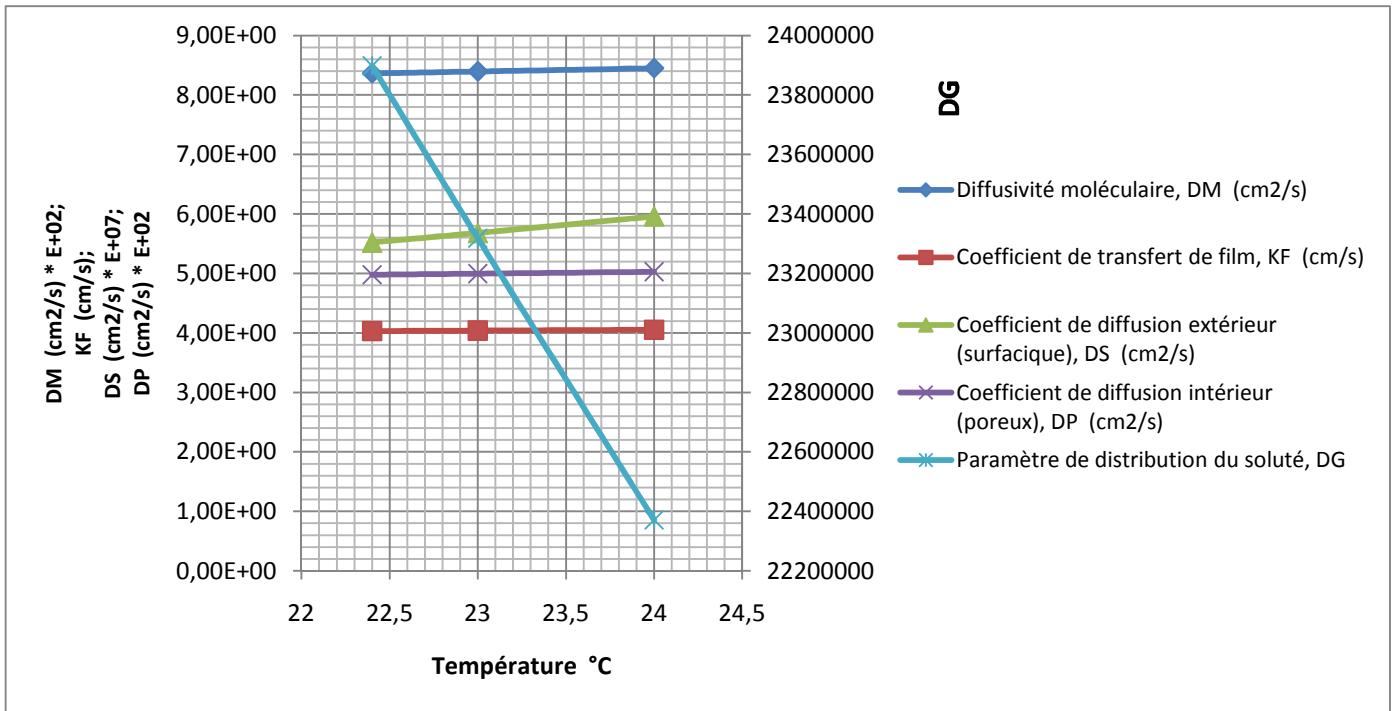
On observe d'après ces courbes que la quantité d'air traité par un gramme de charbon actif augmente avec le temps de contact pour les trois températures, l'allure de ces courbes donne des droites, avec des quantités d'air traités/g de CAG varies d'une valeur de 16086.83 à 17927.33 pour une température 22.4°C et pour une durée allant de 240.78 jours jusqu'à 268.33 jours, une quantité de 15690 à 17499.83 pour un temps de 234.84 à 261.93 jours pour T = 23°C, et une quantité d'air traité de 15041.53 à 16800.66 pour une durée de 225.13 à 251.46 jours pour T = 24°C.

Ces résultats montrent des différences plus ou moins marquées, entre les quantités d'air traité par un gramme de charbon actif granulé pour différentes températures.



**Figure III.24** : évolution de la masse de la charge traitée par la masse requise pour saturer le CAG (taux d'adsorption) en fonction du temps.

On constate d'après ces courbes que la masse de la charge traitée par la masse requise pour saturer le CAG en Trichloroéthylène augmente avec le temps de façon linéaire et on trouve des droites en parallèles, avec des valeurs de T varie de 0.499 jusqu'à 1.537. Ces valeurs ne changent pas pour les trois températures, avec des temps différents varies de 240.78 jusqu'à 268.33 jours pour une température 22.4°C, de 234.84 à 261.93 jours pour une température de 23°C, et de 225.13 à 251.46 jours pour température égale à 24°C.

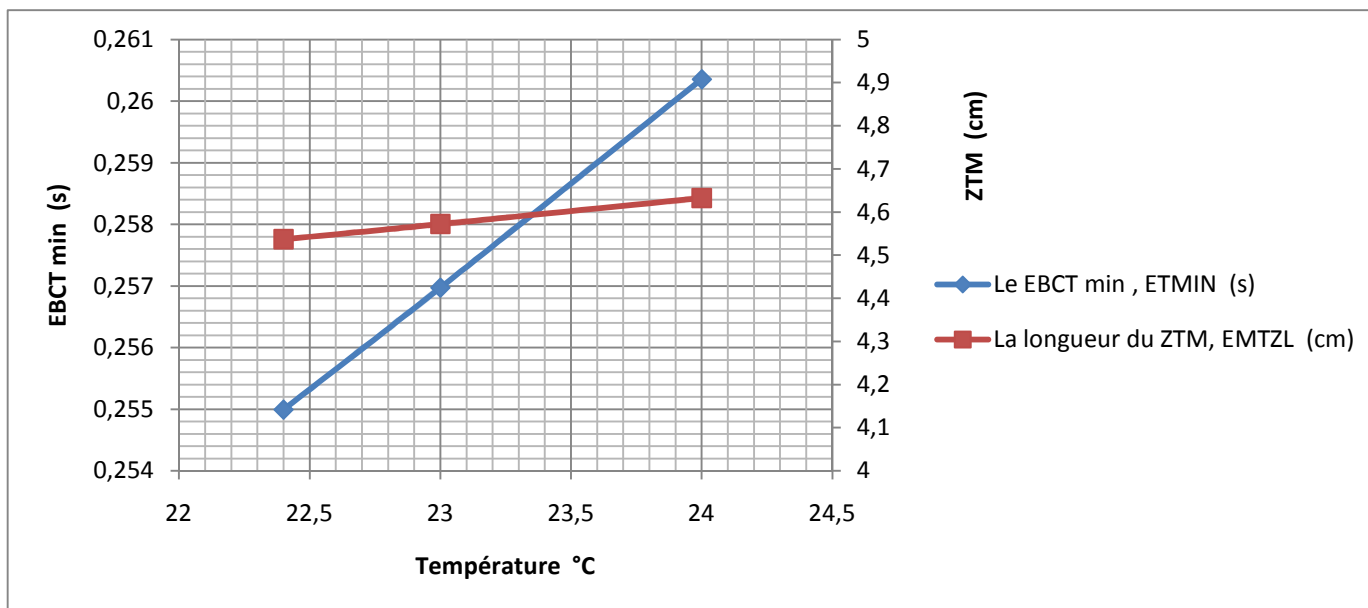


**Figure III.25** : évolution des paramètres de transfert de masse en fonction de la température.

Le tracé des courbes des coefficients de transfert de masse en fonction de la concentration montrent que les coefficients de diffusivité moléculaire  $D_M$ , de transfert de film  $K_F$ , et de diffusion intérieure  $D_P$ , pour le Trichloroéthylène restent presque constants, pour les trois températures ( $T = 22.4, 23, 24$  °C) avec des valeurs proches de  $D_M = 0.084$  cm<sup>2</sup>/s,  $K_F = 4.03$  cm/s, et  $D_P = 0,05$  cm<sup>2</sup>/s.

Une très faible augmentation est observée pour le coefficient de diffusion extérieure  $D_S$  avec des valeurs égales à  $0.55 \times 10^{-7}$  cm<sup>2</sup>/s pour  $T = 22.3$ °C,  $0.57 \times 10^{-7}$  cm<sup>2</sup>/s pour  $T = 23$ °C et  $0.59 \times 10^{-7}$  cm<sup>2</sup>/s pour  $T = 24$ °C.

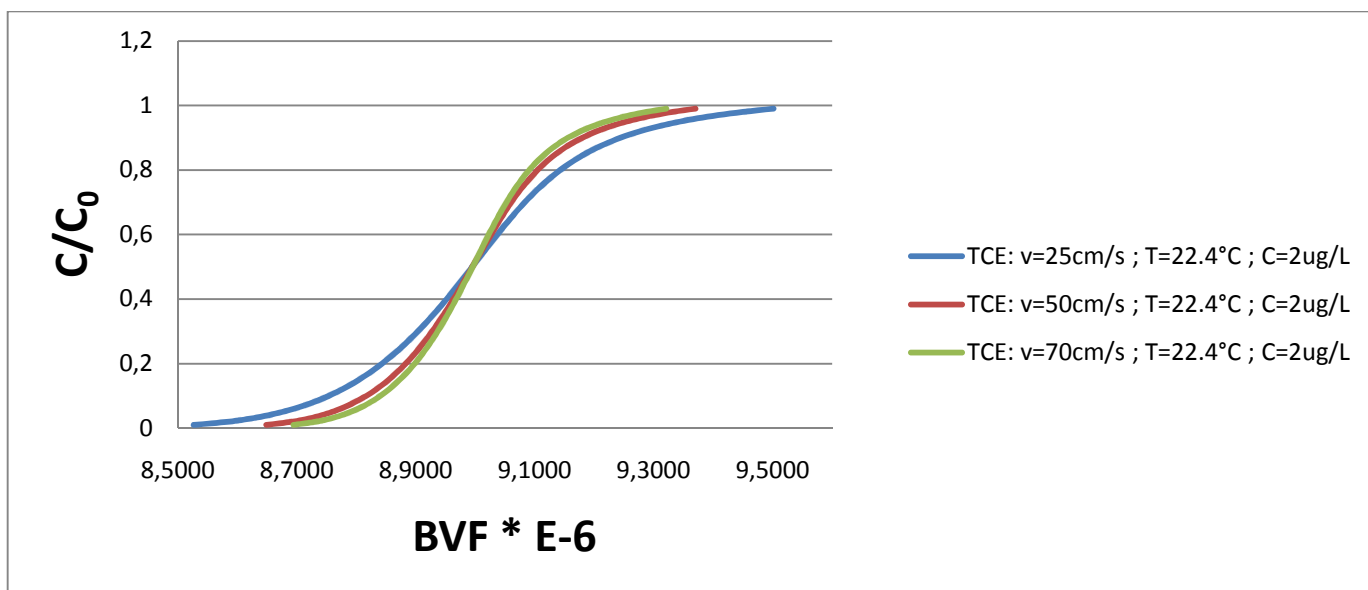
Le paramètre de distribution du soluté  $D_G$  diminue avec la température et on trouve  $D_G = 23897742$  pour une température égale à 22.3°C,  $D_G = 23318270$  pour  $T = 23$ °C et  $D_G = 22370880$  à  $T = 24$ °C.



**Figure III.26 :** évolution de temps de contact et la longueur du ZTM en fonction de la température.

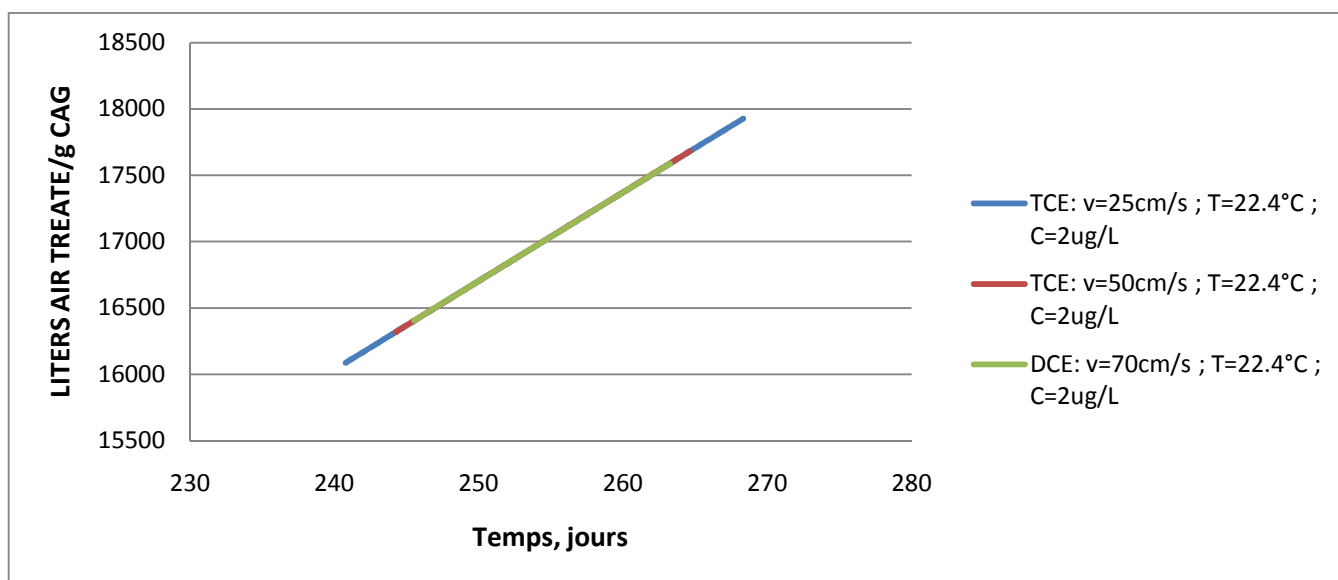
Ces courbes montrent une légère augmentation du temps de contact minimum de lit vide  $EBCT_{min}$  et la longueur de la zone de transfert de masse ZTM en fonction de la température pour le Trichloroéthylène. On trouve  $EBCT_{min} = 0.255$  s,  $ZTM = 4.54$  cm pour une température  $22.3^{\circ}C$ ,  $EBCT_{min} = 0.257$  s,  $ZTM = 4.57$  cm pour  $T = 23^{\circ}C$ , et  $EBCT_{min} = 0.260$  s,  $ZTM = 4.63$  cm à  $T = 24^{\circ}C$ .

### III.4.6.2.3) Effet de la vitesse :



**Figure III.27 :** Courbes de percées pour différentes vitesses.

Les différents résultats obtenus tracés sous forme des courbes  $C/C_0 = f(BVF)$  (Figure III.27) montrent l'augmentation de la teneur résiduelle de Trichloroéthylène en fonction du volume de la charge dans le lit (BVF), pour les trois vitesses jusqu'à l'obtention d'un palier de saturation où l'équilibre est atteint au bout de 268.32 jours pour une vitesse de 25cm/s, 264.62 jours pour une vitesse de 50cm/s, et 263.24 jours pour une vitesse de 70cm/s.

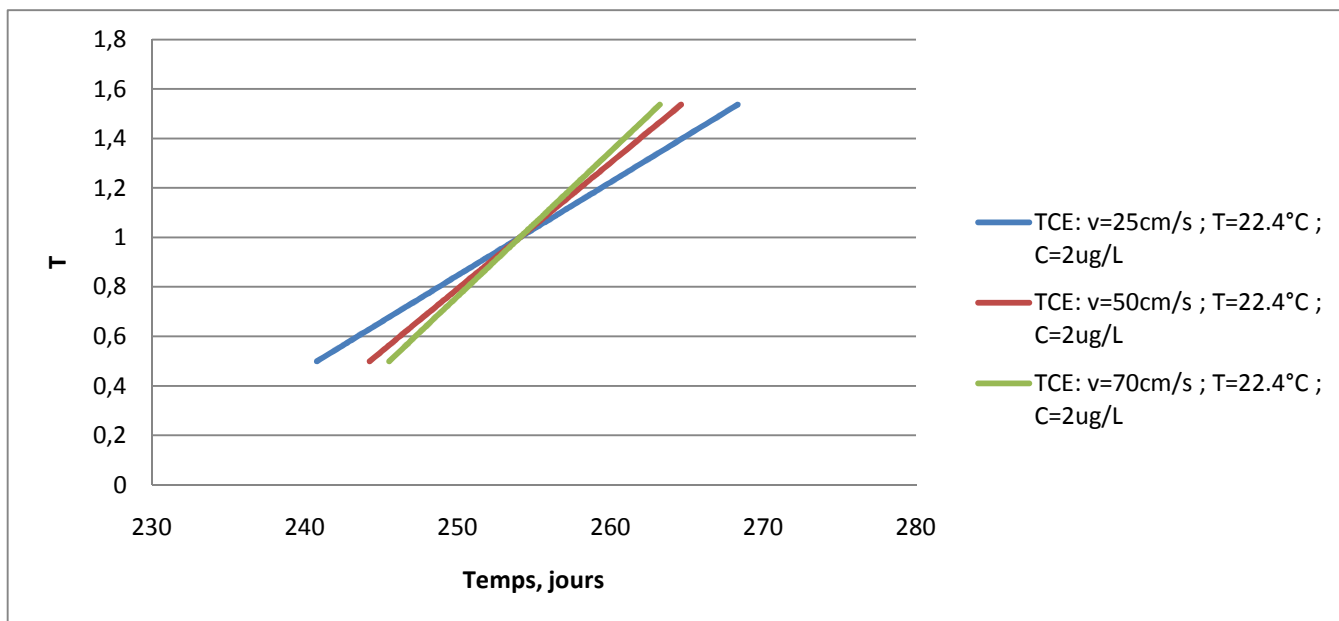


**Figure III.28** : évolution de la quantité d'air traité par gramme de charbon actif granulé.

Ces résultats montrent l'évolution de la quantité d'air traité par un gramme de charbon actif granulé en fonction du temps de contact pour le Trichloroéthylène.

On observe d'après ces courbes que la quantité d'air traité /g de CAG augmente avec le temps de contact pour les trois vitesses, l'allure de ces courbes donne des droites, avec des quantités d'air traités/g de CAG varies d'une valeur de 16086.83 à 17927.33 pour une vitesse de 25cm/s et pour une durée allant de 240.78 jours jusqu'à 268.33 jours, une quantité de 16317.66 à 17679.88 pour un temps de 244.24 à 264.62 jours pour  $V = 50\text{cm/s}$ , et une quantité d'air traité de 16403.92 à 17587.39 pour une durée de 245.53 à 263.24 jours pour  $V = 70\text{cm/s}$ .

Ces résultats montrent des différences plus ou moins marquées, entre les quantités d'air traité par un gramme de charbon actif granulé pour différentes vitesses.



**Figure III.29** : évolution de la masse de la charge traitée par la masse requise pour saturer le CAG (taux d'adsorption) en fonction du temps.

On constate d'après ces courbes que la masse de la charge traitée par la masse requise pour saturer le CAG en Trichloroéthylène augmente avec le temps de façon linéaire et on trouve des droites, avec des valeurs de T qui varient de 0.499 jusqu'à 1.537. Ces valeurs ne changent pas pour les trois vitesses, avec des temps différents qui varient de 240.78 jusqu'à 268.33 jours pour une vitesse de 25cm/s, de 244.24 à 264.62 jours pour une vitesse de 50cm/s, et de 245.53 à 263.24 jours pour une vitesse de 70cm/s.

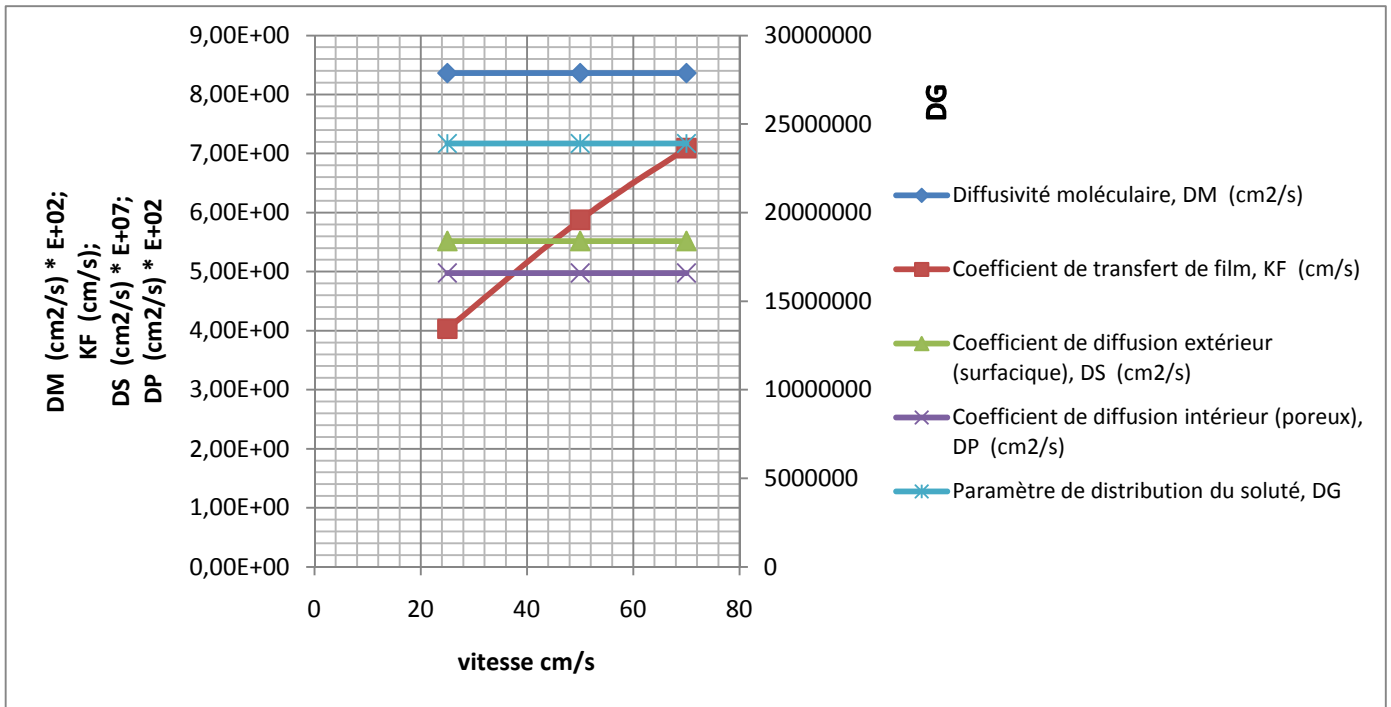
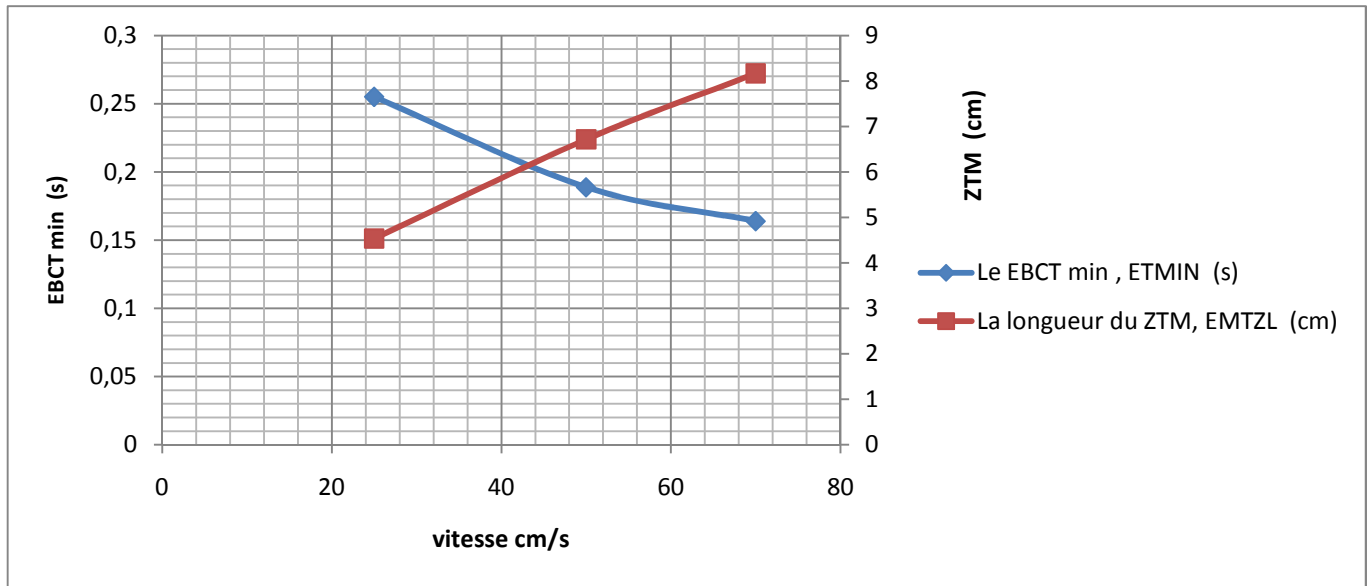


Figure III.30 : évolution des paramètres de transfert de masse en fonction de la vitesse.

Les différents résultats obtenus montrent que les coefficients de diffusivité moléculaire  $D_M$ , de diffusion extérieur  $D_S$ , de diffusion intérieur  $D_P$ , et le paramètre de distribution du soluté  $D_G$  pour le Trichloroéthylène restent constants, pour les trois vitesses ( $V = 25, 50, 70$  cm/s) avec des valeurs de  $D_M = 0.084$  cm<sup>2</sup>/s,  $D_S = 0.55 \times 10^{-7}$  cm<sup>2</sup>/s, et  $D_P = 0,05$  cm<sup>2</sup>/s et  $D_G = 23897742$ . Ceci montre que la variation de la vitesse n'influe pas sur ces coefficients de transfert de masse.

Le coefficient de transfert de film  $K_F$  augmente avec augmentation de la vitesse et on trouve des valeurs égales à 4.03 cm/s pour  $V = 25$  cm/s, 5.88 cm/s pour une vitesse  $V = 50$  cm/s et 7.09 cm/s pour  $V = 70$  cm/s.

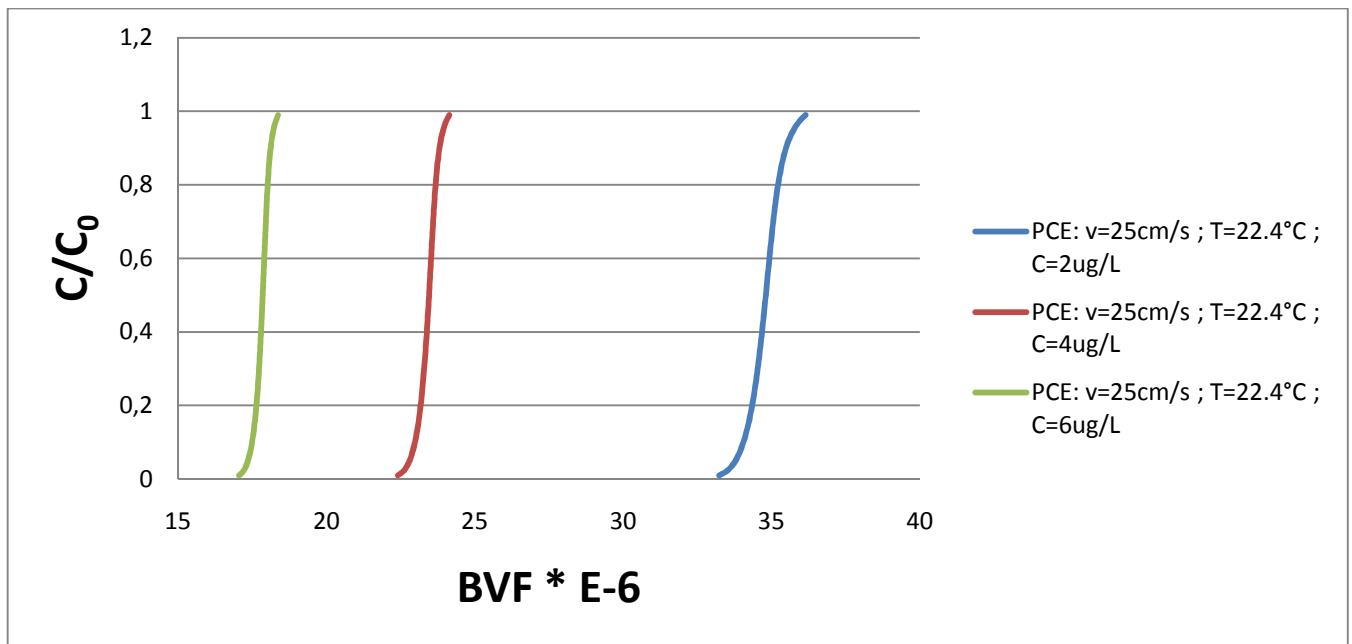


**Figure III.31** : évolution de temps de contact et la longueur du ZTM en fonction de la vitesse.

On constate d'après ces courbes que le temps de contact minimum de lit vide  $EBCT_{min}$ , diminue avec l'augmentation de la vitesse par contre la longueur de la zone de transfert de masse ZTM augmente d'une façon importante avec la vitesse, pour le composé Trichloroéthylène, avec des valeurs  $EBCT_{min} = 0.25$  s,  $ZTM = 4.54$  cm pour une vitesse  $V = 25$  cm/s,  $EBCT_{min} = 0.19$  s,  $ZTM = 6.72$  cm pour  $V = 50$  cm/s, et  $EBCT_{min} = 0.16$  s,  $ZTM = 8.17$  cm à  $V = 70$  cm/s.

### III.4.6.3) Pour Tétrachloroéthylène :

#### III.4.6.3.1) Effet de concentration :



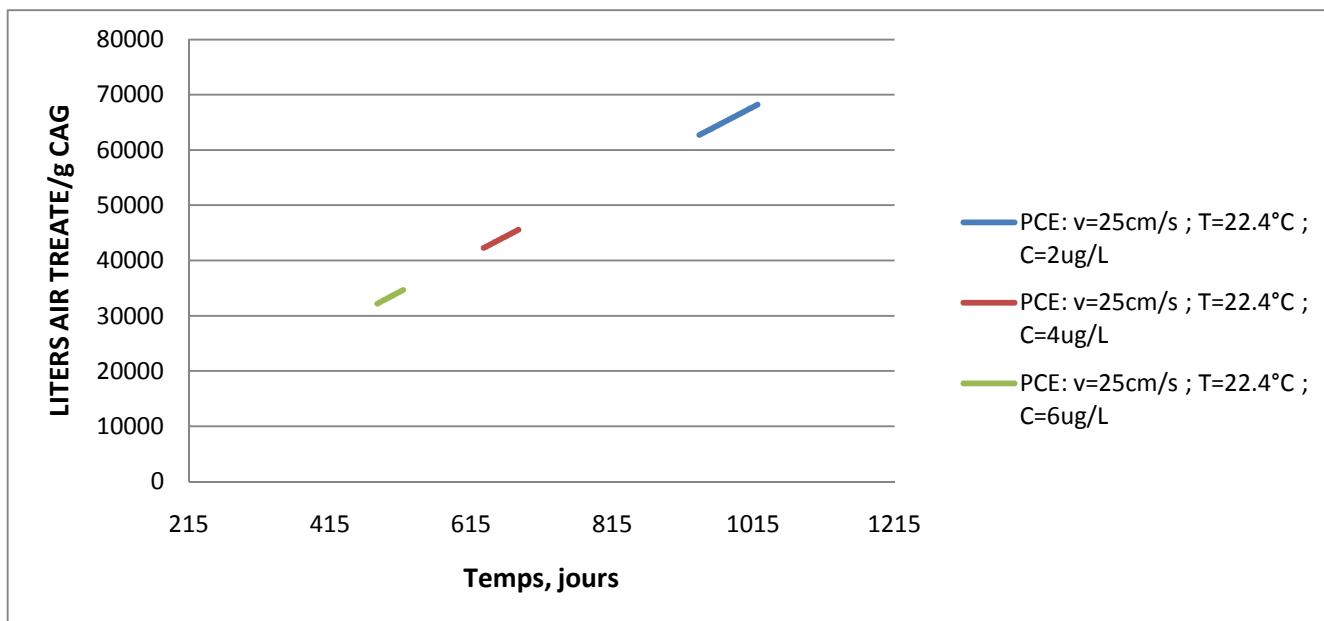
**Figure III.32** : Courbes de percées pour différentes concentrations.

Les différents résultats obtenus tracés sous forme des courbes  $C/C_0 = f(BVF)$  (Figure III.32) montrent que l'équilibre est atteint au bout de 1020.79 jours de contact pour  $C_0= 2\mu\text{g/L}$ , 681.91 jours pour  $C_0= 4\mu\text{g/L}$  et 518.73 jours pour  $C_0= 6\mu\text{g/L}$ .

L'allure de ces courbes représentant les cinétiques d'adsorption de Tétrachloroéthylène ( $C_0= 2\mu\text{g/L}$ ,  $C_0= 4\mu\text{g/L}$ ,  $C_0= 6\mu\text{g/L}$ ), sur le charbon actif granulé.

Ces courbes révèle une adsorption importante avec des taux d'adsorption de l'ordre de 99 % pour les trois concentrations au bout de 938.50 jours pour  $C_0=2\mu\text{g/L}$ , 632.60 jours pour  $C_0=4\mu\text{g/L}$  et 481.60 jours pour  $C_0=6\mu\text{g/L}$ .

On constate que le temps nécessaire pour atteindre le point de percée est très long pour les trois concentrations.

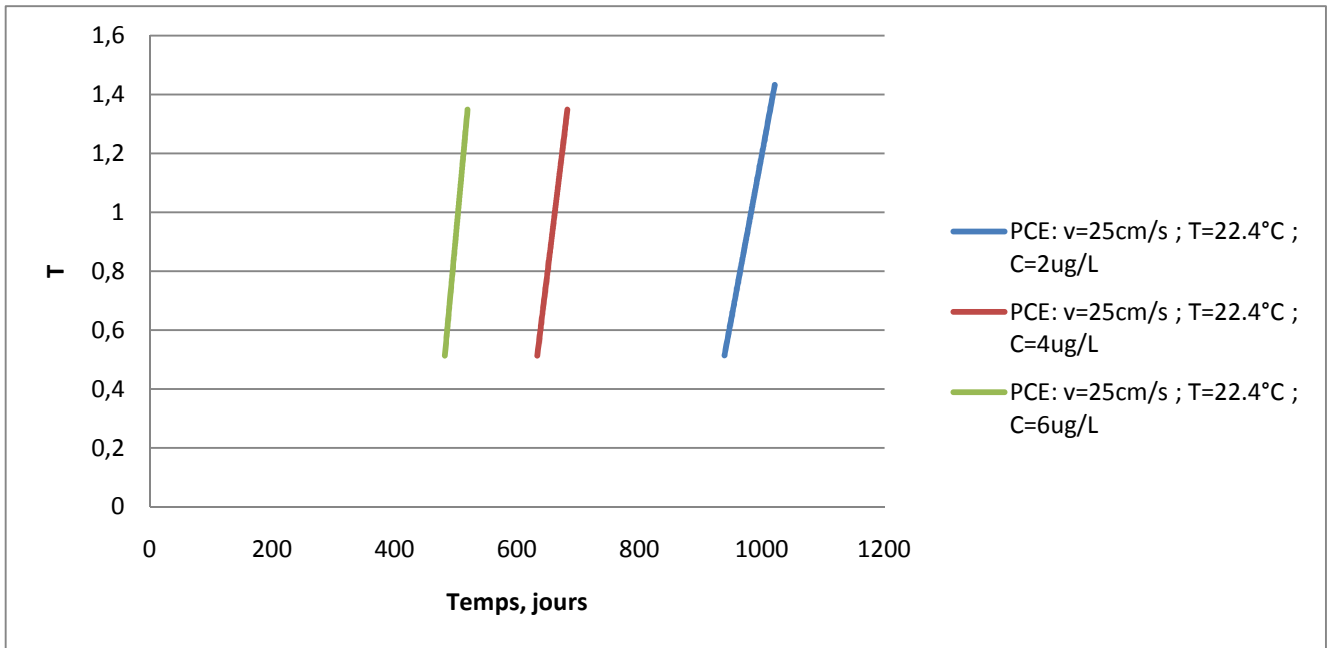


**Figure III.33** : évolution de la quantité d'air traité par gramme de charbon actif granulé.

Les résultats obtenus montrent l'évolution de la quantité d'air traité par un gramme de charbon actif granulé en fonction du temps.

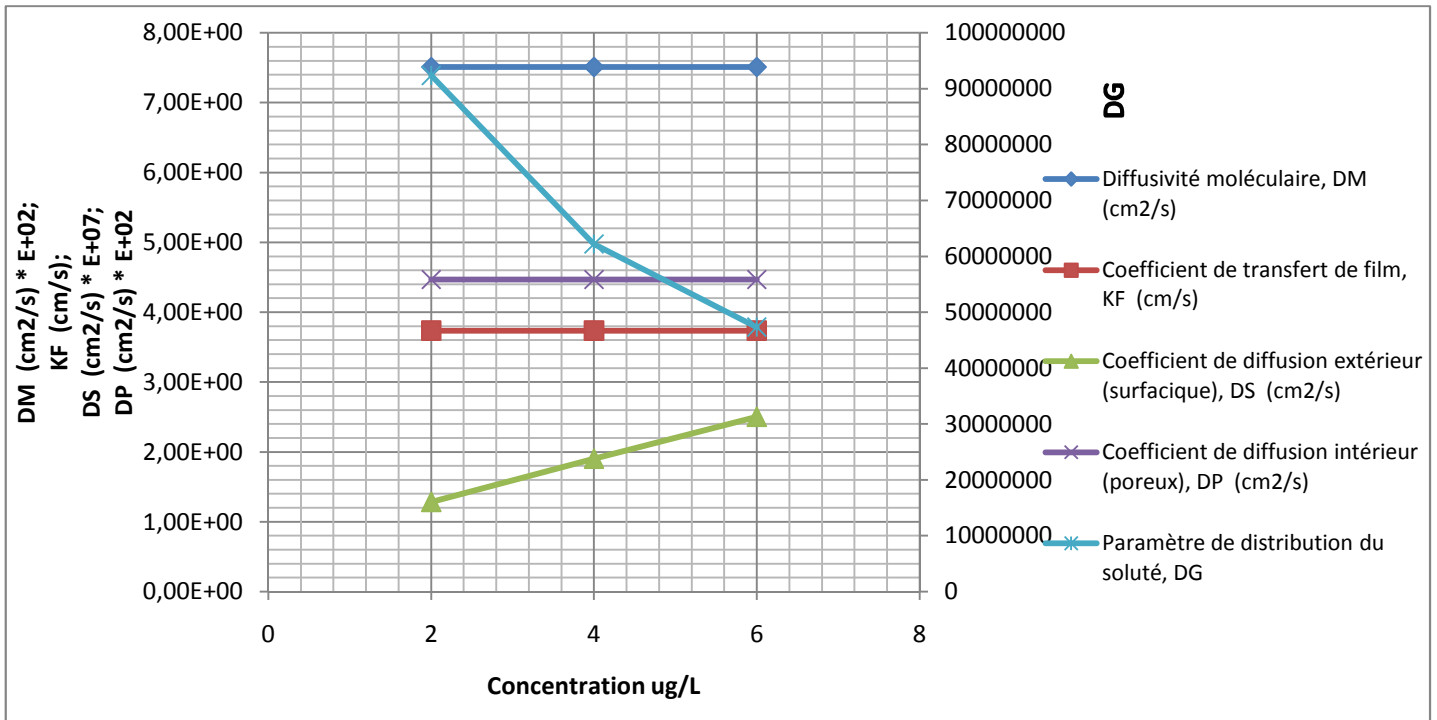
On constate d'après ces courbes que la quantité d'air traité par un gramme de charbon actif augmente avec le temps de contact pour les trois concentrations de Tétrachloroéthylène, l'allure de ces courbes donne des droites, avec des quantités d'air traités varies d'une valeur de 62702.32 à 68200 pour  $C_0=2\mu\text{g/L}$  et pour une durée allant de 938.50 jours jusqu'à 1020.79 jours, une quantité de 42264.98 à 45559.46 pour un temps de 632.60 à 681.91 jours pour  $C_0=4\mu\text{g/L}$ , et une quantité d'air traité de 32176.19 à 34656.91 pour une durée de 481.60 à 518.73 jours pour  $C_0=6\mu\text{g/L}$ .

Ces résultats montrent des différences plus ou moins marquées, selon la concentration initiale entre les quantités d'air traité par un gramme de charbon actif granulé.



**Figure III.34** : évolution de la masse de la charge traitée par la masse requise pour saturer le CAG (taux d'adsorption) en fonction du temps.

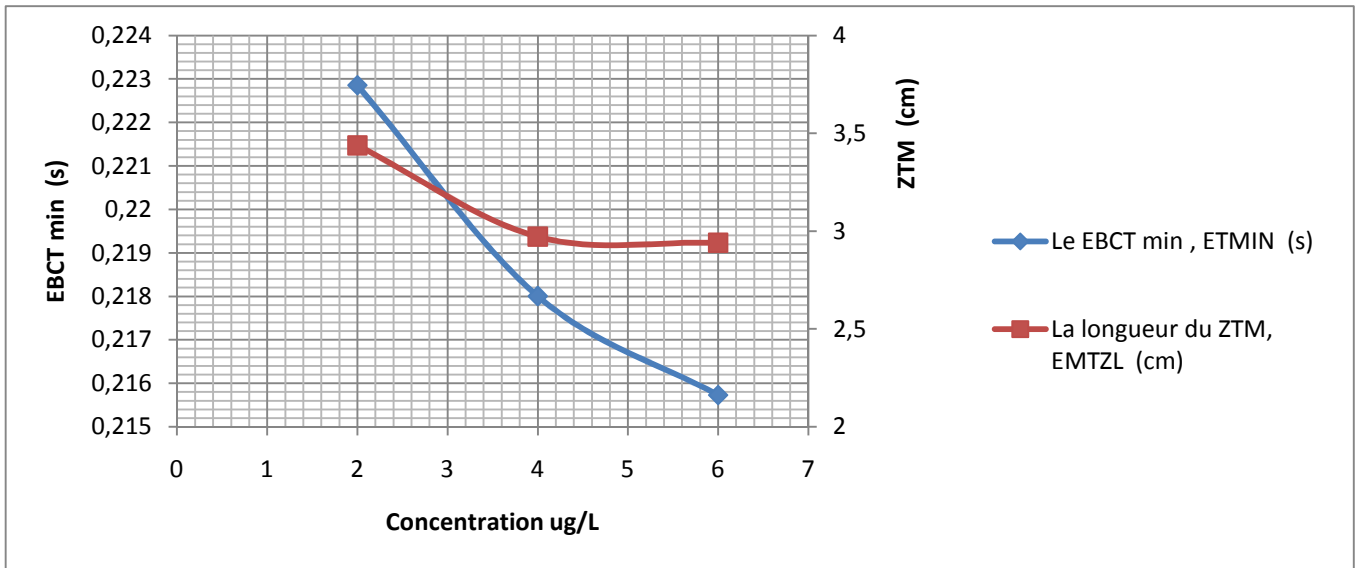
On constate d'après ces courbes que la masse de la charge traitée par la masse requise pour saturer le CAG en Tétrachloroéthylène augmente avec le temps de façon linéaires et on trouve des droites, avec des valeurs de T presque constantes pour les trois concentrations, varient de 0.514 jusqu'à 1.432 pour concentration  $C_0 = 2\mu\text{g/L}$  durant un temps allant de 938.50 jusqu'à 1020.79 jours, et de 0.513 jusqu'à 1.348 pour les deux concentrations 4 et  $6\mu\text{g/L}$ , et avec des temps varient de 632.60 jusqu'à 681.91 jours et de 481.60 jusqu'à 518.73 jours pour des concentration  $C_0 = 4\mu\text{g/L}$ , et  $C_0 = 6\mu\text{g/L}$  respectivement.



**Figure III.35** : évolution des paramètres de transfert de masse en fonction de la concentration.

On constate d'après ces résultats que les coefficients de diffusivité moléculaire  $D_M$ , de transfert de film  $K_F$ , et de diffusion intérieure  $D_P$ , pour le Tétrachloéthylène ne changent pas avec la variation de la concentration ( $C_0 = 2, 4, 6 \mu\text{g/L}$ ), et on obtient des valeurs de  $D_M = 0.075 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $K_F = 3.74 \text{ cm/s}$ , et  $D_P = 0,045 \text{ cm}^2/\text{s}$ .

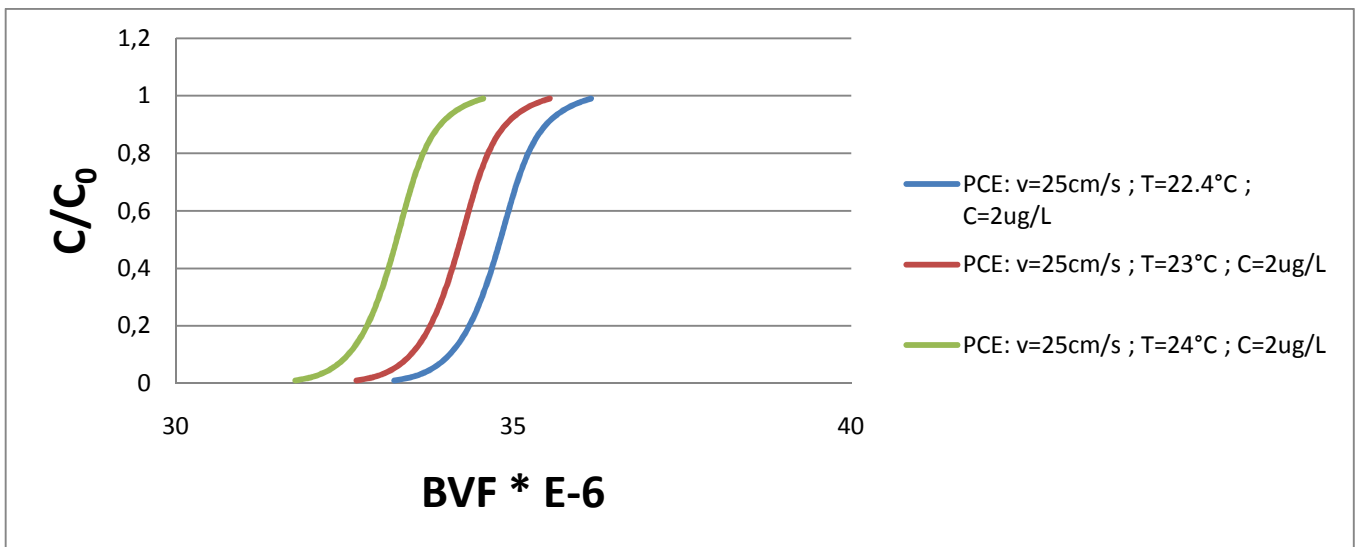
Le coefficient de diffusion extérieure  $D_S$  augmente avec l'augmentation de la concentration, tendit que le paramètre de distribution du soluté  $D_G$  diminue, et on trouve des valeurs de  $D_S = 0.13 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $D_G = 92369743$  pour  $C_0 = 2 \mu\text{g/L}$ ,  $0.19 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $D_G = 62207490$  pour  $C_0 = 4 \mu\text{g/L}$ , et  $D_S = 0.25 \times 10^{-7}$ ,  $D_G = 47335884$  pour  $C_0 = 6 \mu\text{g/L}$ .



**Figure III.36 :** évolution de temps de contact et la longueur du ZTM en fonction de la concentration.

Les résultats obtenues montrent que le temps de contact minimum de lit vide  $EBCT_{min}$ , et la longueur de la zone de transfert de masse ZTM diminuent avec un écart nettement significatif entre les trois concentrations pour le Tétrachloéthylène et on obtient  $EBCT_{min} = 0.223$  s,  $ZTM = 3.44$  cm à  $C_0 = 2 \mu\text{g/L}$ ,  $EBCT_{min} = 0.218$  s  $ZTM = 2.97$  cm pour  $C_0 = 4 \mu\text{g/L}$ , et  $EBCT_{min} = 0.216$  s,  $ZTM = 2.94$  cm à  $C_0 = 6 \mu\text{g/L}$ .

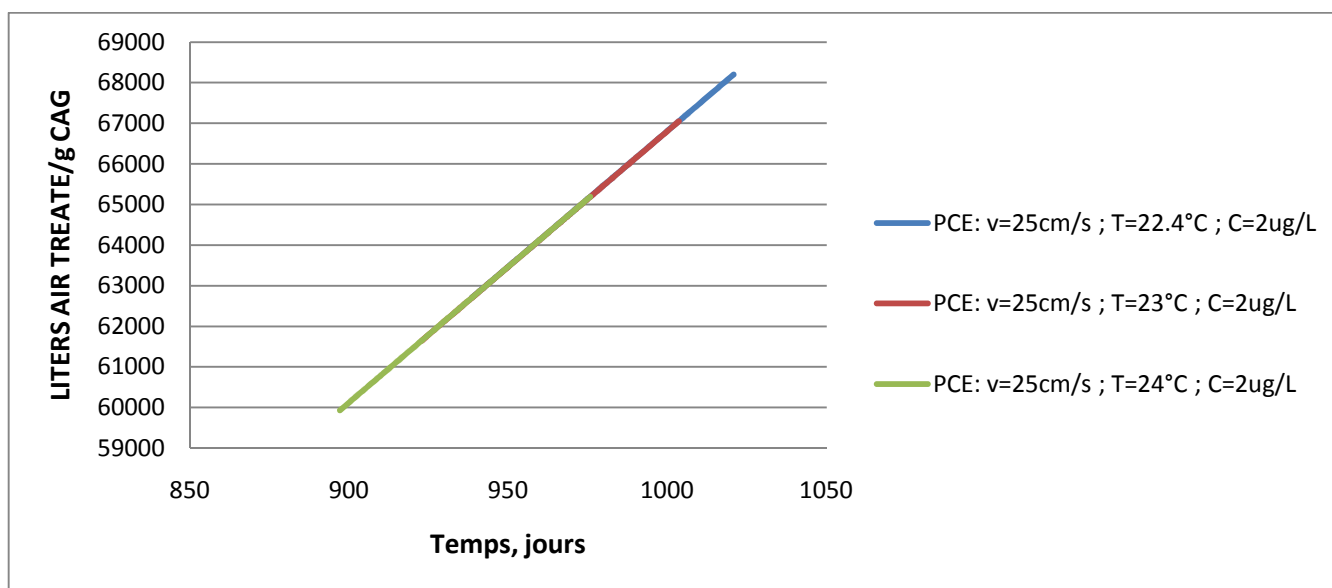
#### III.4.6.3.2) Effet de la température :



**Figure III.37 :** Courbes de percées pour différentes températures.

Les différents résultats obtenus tracés sous forme des courbes  $C/C_0 = f(\text{BVF})$  (Figure III.37) montrent l'augmentation de la teneur résiduelle de Tétrachloroéthylène en fonction du volume de la charge dans le lit (BVF), pour les trois températures jusqu'à l'obtention d'un palier de saturation où l'équilibre est atteint au bout de 1020.79 jours pour une température de 22.4°C, 1003.58 jours pour T égale à 23°C, et 975.70 jours pour une température de 24°C.

L'allure de ces courbes représentant les cinétiques d'adsorption de Tétrachloroéthylène sur le charbon actif granulé pour différentes température. Ces courbes montrent des différences plus ou moins marquées, selon la température de fonctionnement.

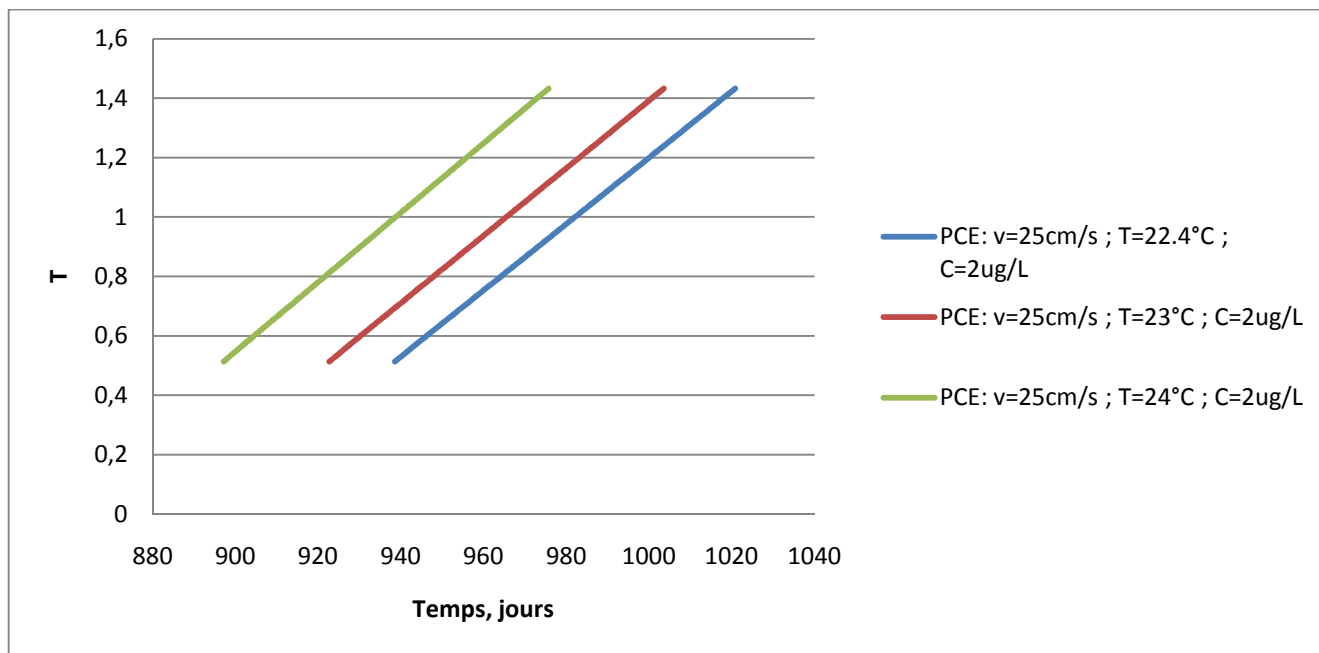


**Figure III.38** : évolution de la quantité d'air traité par gramme de charbon actif granulé.

Ces résultats montrent l'évolution de la quantité d'air traité par un gramme de charbon actif granulé en fonction du temps de contact pour le Tétrachloroéthylène.

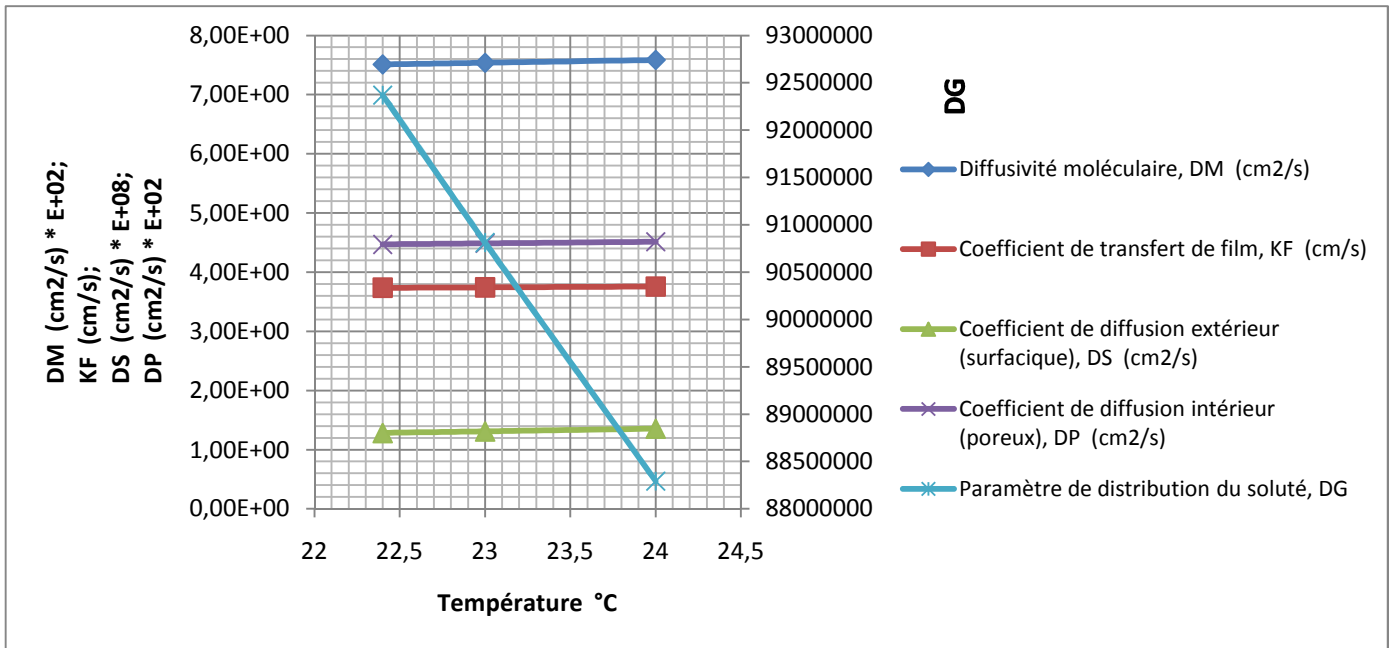
On observe d'après ces courbes que la quantité d'air traité par un gramme de charbon actif augmente avec le temps de contact pour les trois températures, l'allure de ces courbes donne des droites, avec des quantités d'air traités/g de CAG varies d'une valeur de 62702.32 à 68200 pour une température 22.4°C et pour une durée allant de 938.50 jusqu'à 1020.79 jours, une quantité de 61645.82 à 67050 pour un temps de 922.69 à 1003.57 jours pour T = 23°C, et une quantité d'air traité de 59934.97 à 65187.58 pour une durée de 897.1 à 975.70 jours pour T = 24°C.

Ces résultats montrent des différences plus ou moins marquées, entre les quantités d'air traité par un gramme de charbon actif granulé pour différentes températures.



**Figure III.39** : évolution de la masse de la charge traitée par la masse requise pour saturer le CAG (taux d'adsorption) en fonction du temps.

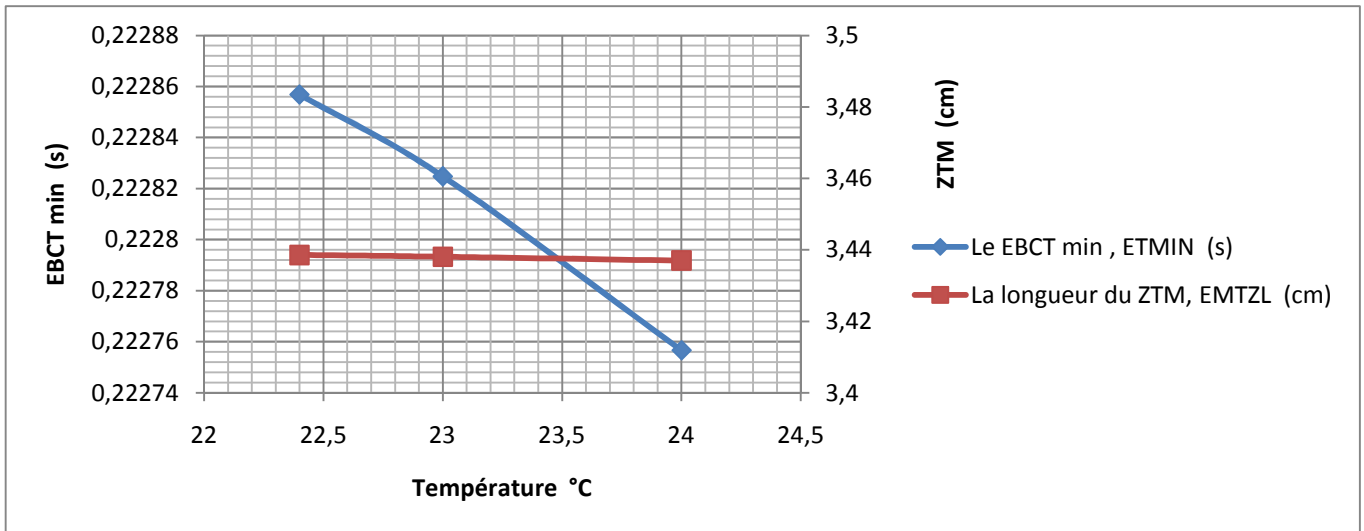
On constate d'après les courbes de Figure III.39 que la masse du charge traitée par la masse requise pour saturer le CAG en Tétrachloroéthylène augmente avec le temps de façon linéaire et on trouve des droites en parallèles, avec des valeurs de T varie de 0.514 jusqu'à 1.432. Ces valeurs ne changent pas pour les trois températures, avec des temps différents varies de 938.50 jusqu'à 1020.79 pour une température 22.4°C, de 922.69 à 1003.57 jours pour une température de 23°C, et de 897.1 à 975.70 jours pour température égale à 24°C.



**Figure III.40** : évolution des paramètres de transfert de masse en fonction de la température.

Les différents résultats obtenus présentés dans la figure III.40 montrent que les coefficients de diffusivité moléculaire  $D_M$ , de transfert de film  $K_F$ , de diffusion intérieure  $D_P$ , et de diffusion extérieure  $D_S$  pour le tétrachloroéthylène restent presque constants, pour les trois températures ( $T = 22,4, 23, 24$  °C), avec  $D_M = 0,075 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $K_F = 3,74 \text{ cm/s}$ ,  $D_P = 0,045 \text{ cm}^2/\text{s}$ , et  $D_S = 0,13 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ .

On constate que le paramètre de distribution du soluté  $D_G$  diminue avec la température et on trouve  $D_G = 92369743$  pour une température égale à  $22,3^\circ\text{C}$ ,  $D_G = 90812752$  pour  $T = 23^\circ\text{C}$  et  $D_G = 88291191$  à  $T = 24^\circ\text{C}$ .

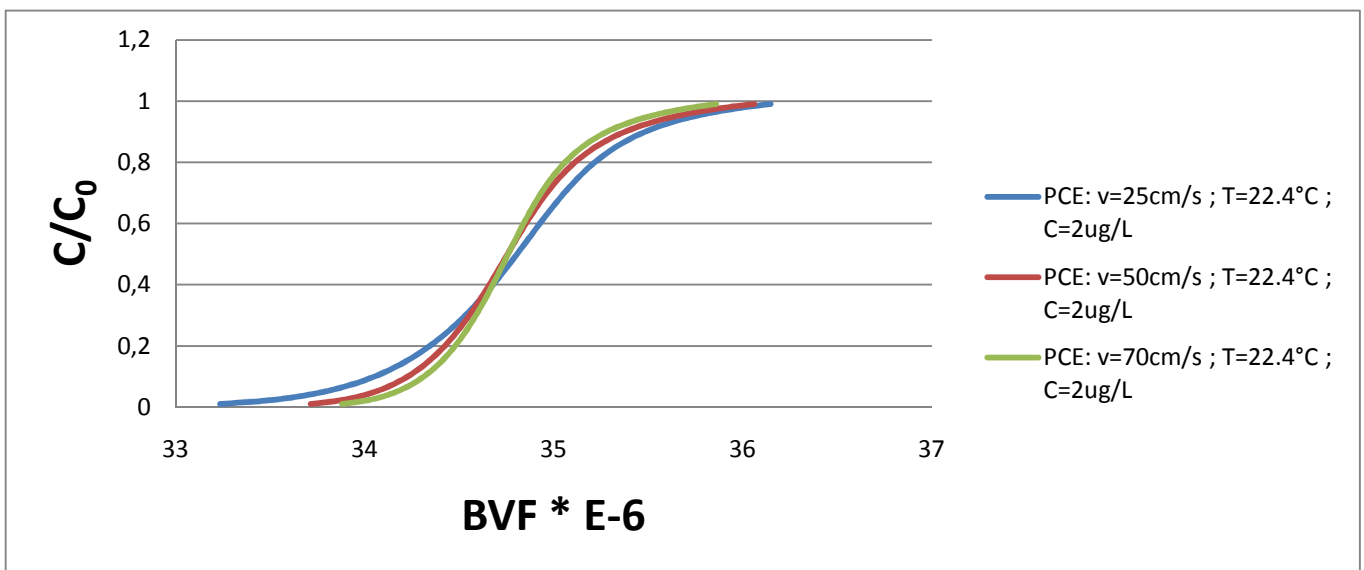


**Figure III.41** : évolution de temps de contact et la longueur du ZTM en fonction de la température.

Ces courbes montrent une très faible diminution du temps de contact minimum de lit vide  $EBCT_{min}$  pour le Tétrachloéthylène et on trouve  $EBCT_{min} = 0.22285s$  pour une température  $22.3^{\circ}C$ ,  $EBCT_{min} = 0.22282 s$  pour  $T = 23^{\circ}C$ , et  $EBCT_{min} = 0.22275 s$  à  $T = 24^{\circ}C$ .

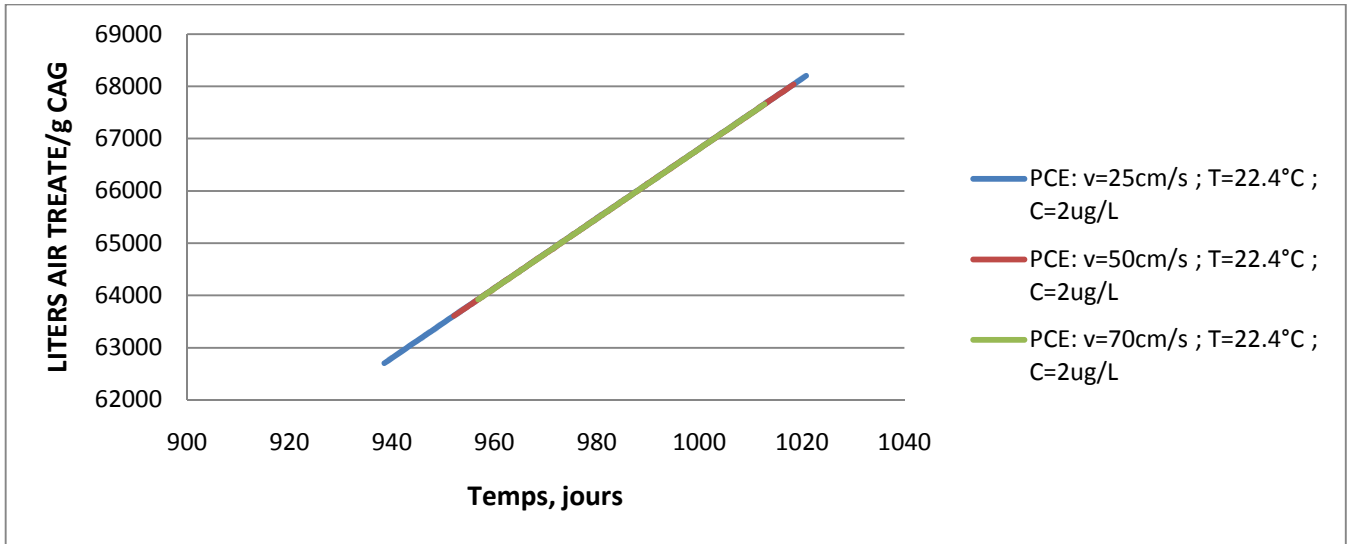
La longueur de la zone de transfert de masse ZTM reste constante avec la variation de température on obtient  $ZTM = 3.44 cm$ .

**III.4.6.3.3) Effet de la vitesse :**



**Figure III.42** : Courbes de percées pour différentes vitesses.

Les différents résultats obtenus tracés sous forme des courbes  $C/C_0 = f(BVF)$  (Figure III.42) montrent l'augmentation de la teneur résiduelle de Tétrachloroéthylène en fonction du volume de la charge dans le lit (BVF), pour les trois vitesses jusqu'à l'obtention d'un palier de saturation où l'équilibre est atteint au bout de 1020.79 jours pour une vitesse de 25cm/s, 1018.37 jours pour une vitesse de 50cm/s, et 1012.68 jours pour une vitesse de 70cm/s.

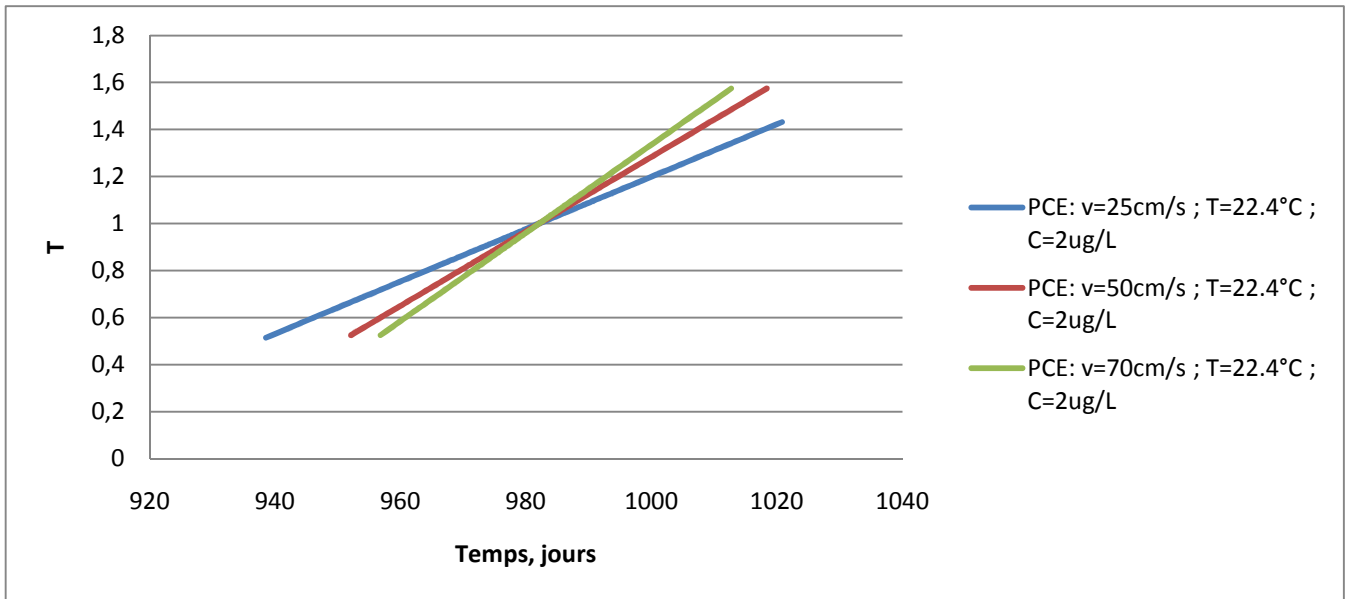


**Figure III.43** : évolution de la quantité d'air traité par gramme de charbon actif granulé.

Ces résultats montrent l'évolution de la quantité d'air traité par un gramme de charbon actif granulé en fonction du temps de contact pour le Tétrachloroéthylène.

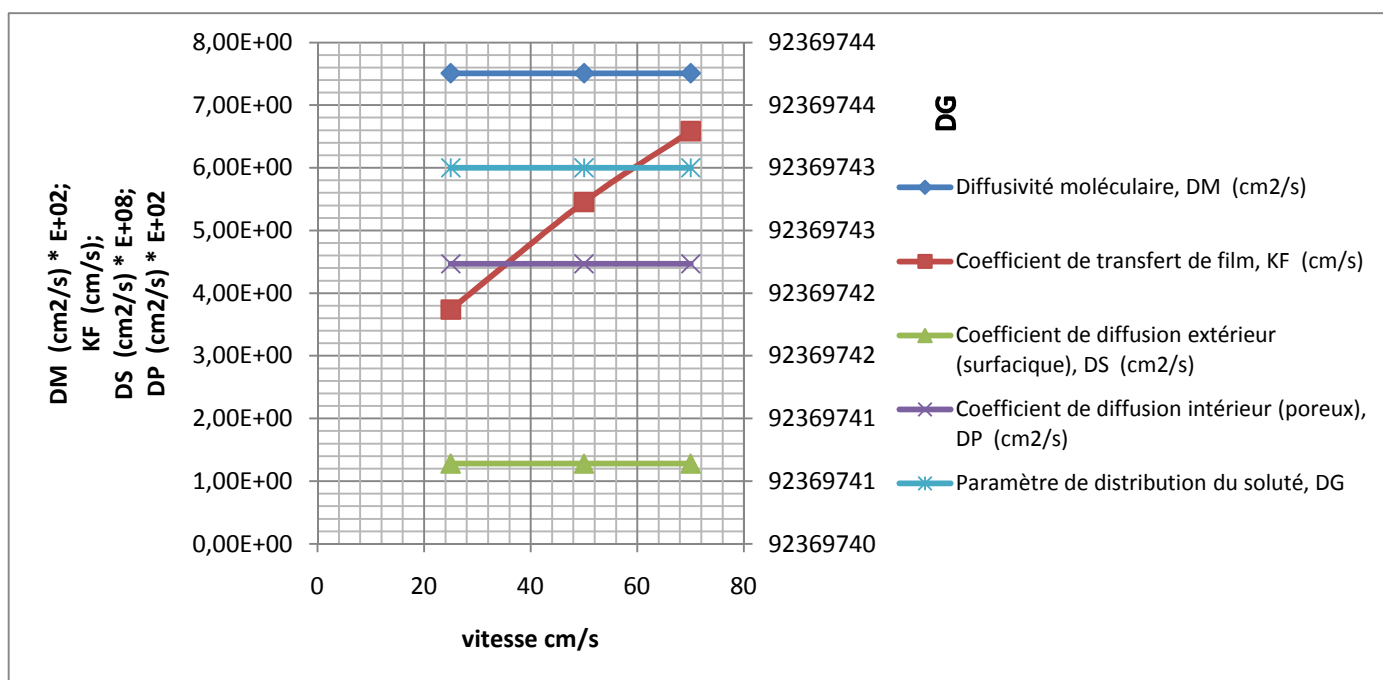
On observe d'après ces courbes que la quantité d'air traité /g de CAG augmente avec le temps de contact pour les trois vitesses, l'allure de ces courbes donne des droites, avec des quantités d'air traités/g de CAG varies d'une valeur de 62702.32 à 68200 pour une vitesse de 25cm/s et pour une durée allant de 938.50 jusqu'à 1020.79 jours, une quantité de 63608.24 à 68038.34 pour un temps de 952.1 1018.37 jours pour  $V = 50\text{cm/s}$ , et une quantité d'air traité de 63922.22 à 67658.22 pour une durée de 956.76 à 1012.68 jours pour  $V = 70\text{cm/s}$ .

Ces résultats montrent des différences plus ou moins marquées, entre les quantités d'air traité par un gramme de charbon actif granulé pour différentes vitesses.



**Figure III.44** : évolution de la masse de la charge traitée par la masse requise pour saturer le CAG (taux d'adsorption) en fonction du temps.

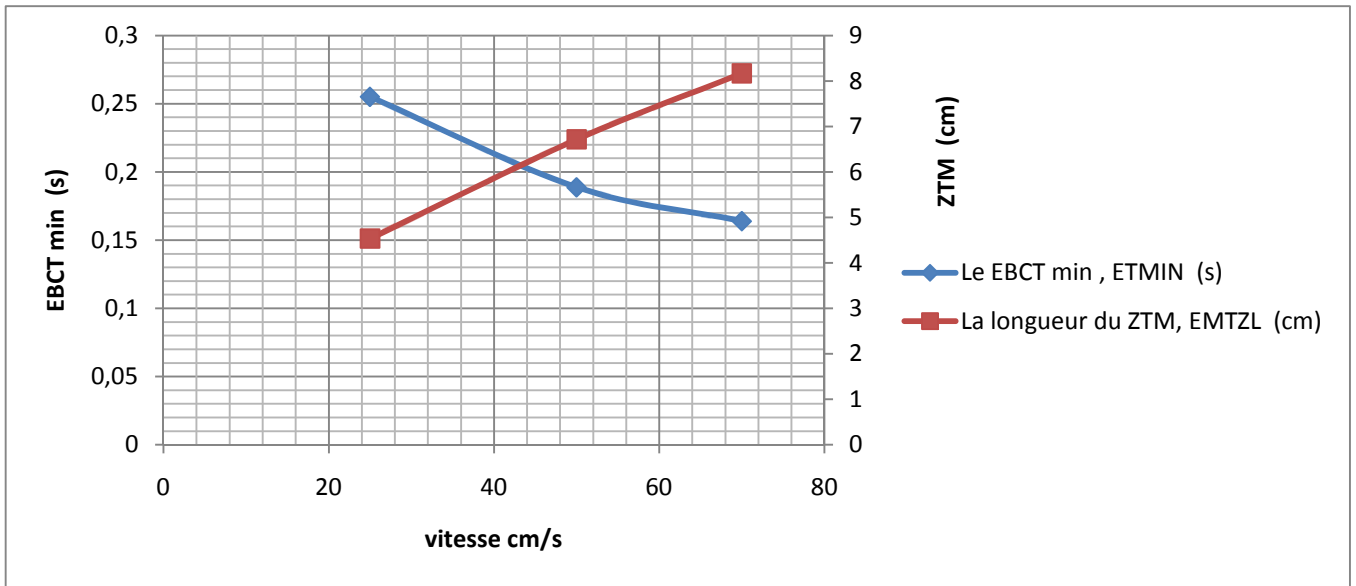
On constate d'après les courbes de la figure III.44 que la masse de la charge traitée par la masse requise pour saturer le CAG en Tétrachloroéthylène augmente avec le temps de façon linéaire et on trouve des droites, avec des valeurs de T presque identiques pour les trois vitesses, variées de 0.514 jusqu'à 1.432 pour une vitesse de 25cm/s durant un temps allant de 938.50 jusqu'à 1020.79 jours, et de 0.525 jusqu'à 1.575 pour les deux vitesses 50 et 75 cm/s, et avec des temps variés de 952.1 1018.37 jours pour 50cm/s et de 956.76 à 1012.68 jours pour une vitesse 75cm/s.



**Figure III.45** : évolution des paramètres de transfert de masse en fonction de la vitesse.

Les différents résultats obtenus montrent que les coefficients de diffusivité moléculaire  $D_M$ , de diffusion extérieur  $D_S$ , de diffusion intérieur  $D_P$ , et le paramètre de distribution du soluté  $D_G$  pour le Tétrachloéthylène restent constants, pour les trois vitesses ( $V = 25, 50, 70 \text{ cm/s}$ ) avec des valeurs de  $D_M = 0,075 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $D_S = 0,13 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ , et  $D_P = 0,045 \text{ cm}^2/\text{s}$  et  $D_G = 92369743$ . Ceci montre que la variation de la vitesse n'influe pas sur ces coefficients de transfert de masse.

Le coefficient de transfert de film  $K_F$  augmente avec augmentation de la vitesse et on trouve des valeurs égales à  $3,74 \text{ cm/s}$  pour  $V = 25 \text{ cm/s}$ ,  $5,45 \text{ cm/s}$  pour une vitesse  $V = 50 \text{ cm/s}$  et  $6,58 \text{ cm/s}$  pour  $V = 70 \text{ cm/s}$ .



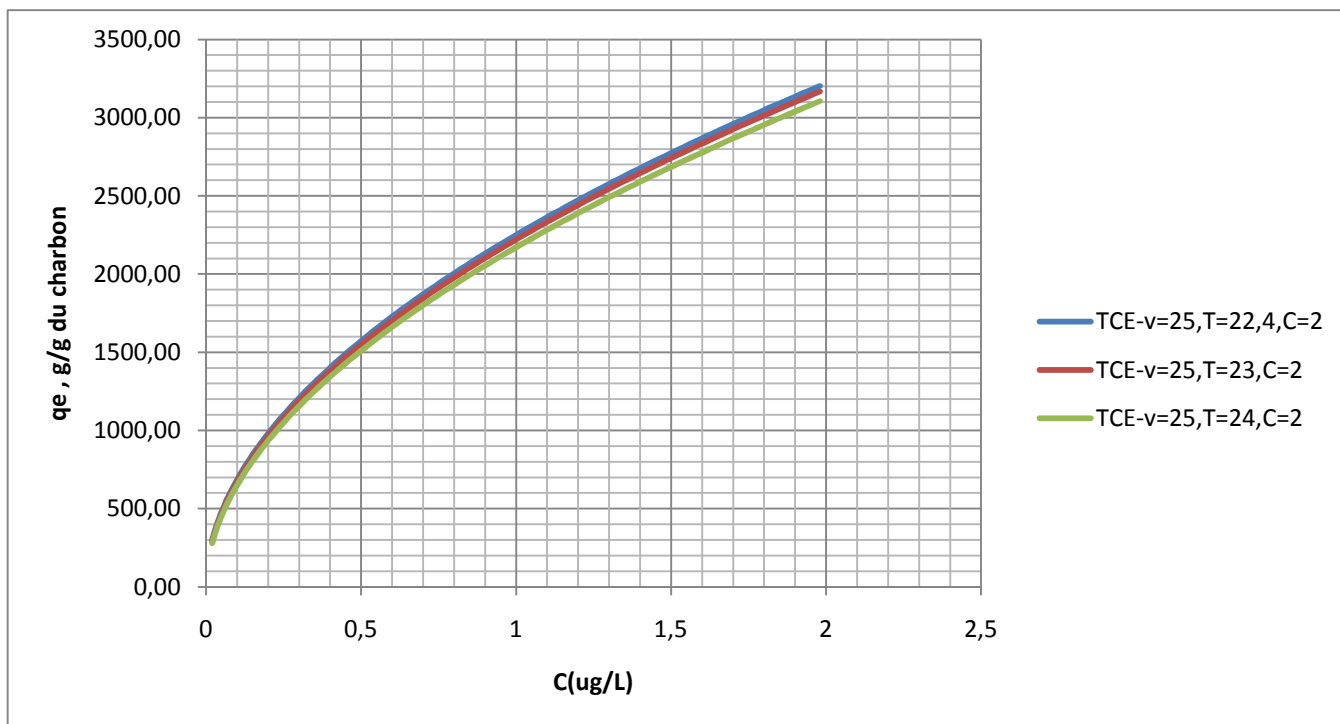
**Figure III.46 :** évolution de temps de contact et la longueur du ZTM en fonction de la vitesse.

On constate d'après ces courbes que le temps de contact minimum de lit vide  $EBCT_{min}$ , diminue avec l'augmentation de la vitesse par contre la longueur de la zone de transfert de masse ZTM augmente avec l'augmentation de la vitesse, pour le composé Tétrachloéthylène, avec des valeurs  $EBCT_{min} = 0,22$  s,  $ZTM = 3,44$  cm pour une vitesse  $V = 25$  cm/s,  $EBCT_{min} = 0,16$  s,  $ZTM = 5,58$  cm pour  $V = 50$  cm/s, et  $EBCT_{min} = 0,13$  s,  $ZTM = 6,58$  cm à  $V = 70$  cm/s.

#### III.4.6.4) Effet de température sur l'isotherme de Freundlich :

Dans la nature, les phénomènes d'adsorption sont généralement exothermiques alors que la désorption est endothermique. De ce fait, on peut admettre qu'une augmentation de la température affecte beaucoup plus l'adsorption physique que chimique. De nombreuses études de l'influence de la température sur l'adsorption des composés organiques ont été réalisées [72]. Ces études ont montré que la relation entre la température et l'adsorption dépend essentiellement du couple adsorbant/adsorbat.

L'équation de Freundlich est de forme suivante :  $qe = K_f \cdot Ce^{1/n}$

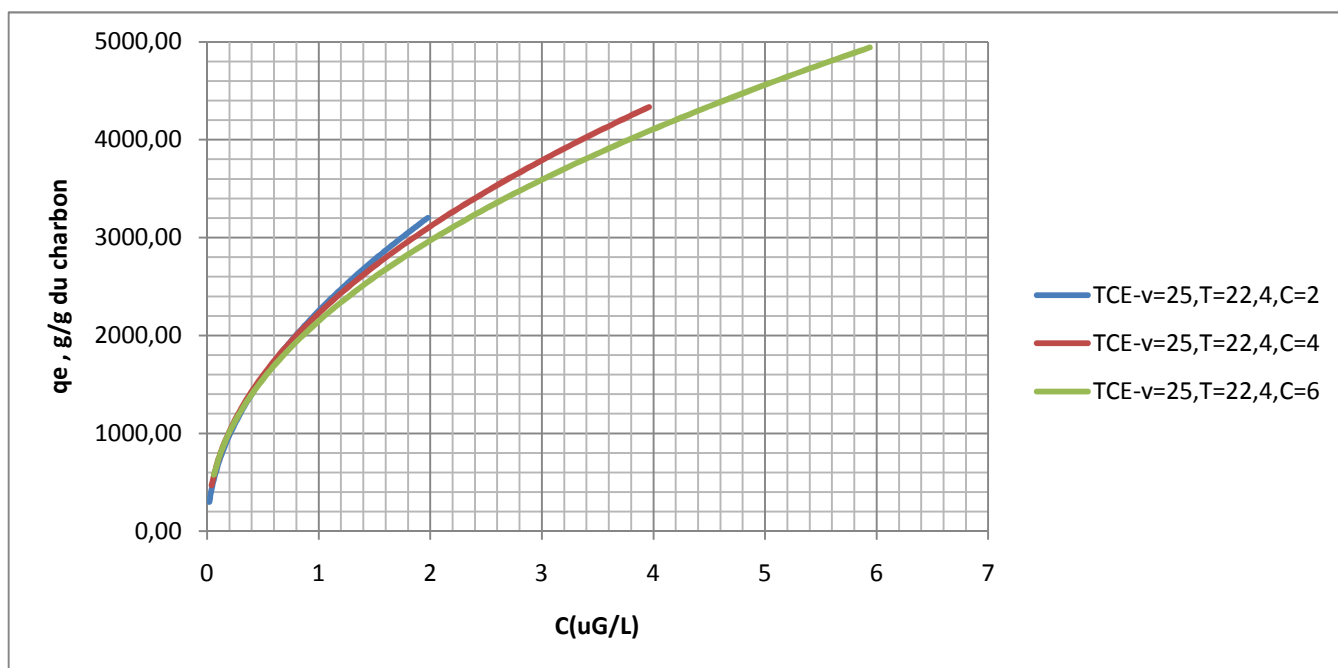


**Figure III.47** : Evolution de quantité du COV adsorbée par gramme de charbon actif en fonction de la concentration d'équilibre pour différentes températures.

Les résultats obtenus ont été représentés par un modèle de Freundlich (figure III.47) montre que l'isotherme d'adsorption de Trichloroéthylène par le charbon actif granulé présente une allure classique d'isotherme de type I.

Une augmentation rapide de la quantité adsorbée pour les concentrations faibles puis une stabilisation aux concentrations élevées, c.-à-d. que la saturation des sites d'adsorption se fait progressivement jusqu'à atteindre un palier de saturation et on trouve des courbes identiques pour les trois températures ( $T = 22.4, 23, 24^\circ\text{C}$ ).

**III.4.6.5) Effet de concentration sur l'isotherme de Freundlich :**

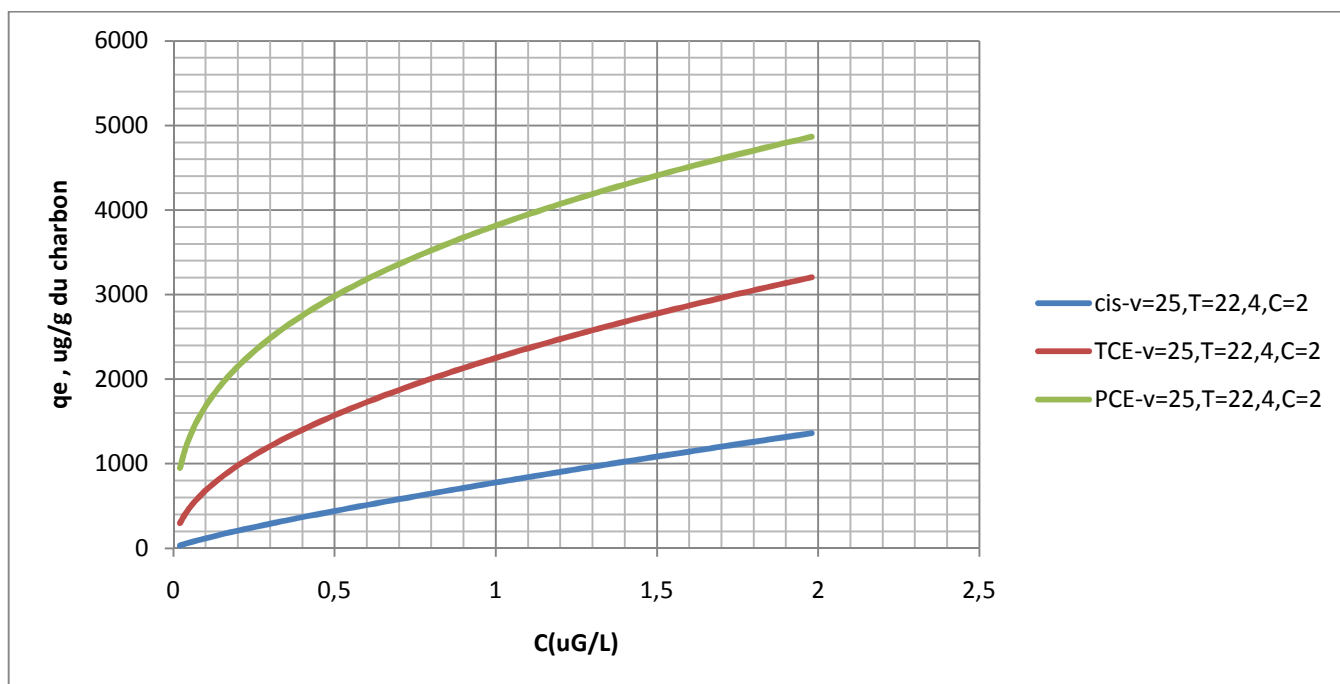


**Figure III.48 :** Evolution de quantité du COV adsorbée par gramme de charbon actif en fonction de la concentration d'équilibre pour différentes concentrations.

L'isotherme d'adsorption de Trichloroéthylène présente une allure d'isotherme de type I, pour différentes concentrations ( $C_0 = 2, 4, 6 \mu\text{g/L}$ ). La saturation des sites d'adsorption se fait progressivement jusqu'à atteindre un palier de saturation. Ce type d'isotherme est généralement caractéristique d'un charbon microporeux.

Un premier domaine, pour des faibles concentrations, dans lequel la quantité adsorbée de Trichloroéthylène augmente en fonction de la concentration à l'équilibre. Ensuite, un palier pour lequel la quantité adsorbée est constante quelle que soit la concentration. Et on trouve une quantité de Trichloroéthylène adsorbé égale à 3202.95g/g de CAG pour  $C_0 = 2 \mu\text{g/L}$  avec  $K_F = 2249.8$ ,  $1/n = 0.5171$ , et  $q_e = 4335,71$  pour  $C_0 = 4 \mu\text{g/L}$  avec  $K_F = 2227.9$ ,  $1/n = 0.4838$ , et une quantité  $q_e = 4942.93$ , avec  $K_F = 2147.1$ ,  $1/n = 0.46803$  pour  $C_0 = \mu\text{g/L}$ .

## III.4.6.6) Comparaison entre trois composés :



**Figure III.49 :** Evolution de quantité du COV adsorbée par gramme de charbon actif en fonction de la concentration d'équilibre pour trois composés.

Ces courbes représentant les isothermes d'adsorption de trois composés (Cis-dichloroéthène, Trichloroéthylène, Tétrachloroéthylène), étudiées dans les mêmes conditions de température, vitesse, et de concentration initiale, par gramme de charbon actif en fonction de la concentration d'équilibre. On remarque pour toutes les substances organiques étudiées que la quantité de composé organique adsorbé augmente avec la concentration d'équilibre jusqu'à la stabilisation, à cause de la saturation de sites de l'adsorption à travers le processus d'adsorption. On constate que pour le Cis-dichloroéthène la saturation est atteinte rapidement avec une quantité de Cis-dichloroéthène adsorbé faible par rapport au Trichloroéthylène et Tétrachloroéthylène.

L'adaptation du modèle de Freundlich pour tous les composés est représentée sur la figure III.49. Les résultats d'adsorption ont été traités à l'aide de la relation de Freundlich avec des constantes  $K_F = 776.0$  et  $1/n = 0.8208$  pour le Cis-dichloroéthène,  $K_F = 2249.8$  et  $1/n = 0.5171$  pour le Trichloroéthylène, et  $K_F = 3816.4$  et  $1/n = 0.3561$  pour le Tétrachloroéthylène.

# CONCLUSION

Cette présente étude a pour objectif principal la réduction des rejets de COV dans l'atmosphère, en vue de l'élimination par adsorption sur charbon actif granulé en lit fixe de certains composés organiques volatils (COV) susceptibles d'être présents dans l'air. Elle nous a permis de dégager quelques conclusions importantes sur l'utilisation des charbons actifs granulés et d'indiquer leurs développements possibles.

Nous avons envisagé l'élimination de composés chlorés : cis-dichloroéthylène, trichloréthylène et tétrachloroéthylène souvent présents dans les rejets industriels.

L'étude a été divisée en deux parties :

- la première, de proposer un programme de simulation en utilisant simulateur FORTRAN77, en vue de faire un calcul rapide, en suite on a pu déterminer les paramètres de transfert de masse de ces COV.
- La deuxième partie, consacrée à l'utilisation de CAG pour piéger ces COV en utilisant le mode continu (lit fixe).

Nous avons étudié l'influence de plusieurs paramètres tels que la température, la concentration initiale du soluté, et la vitesse superficielle de l'air sur le taux d'adsorption et sur les paramètres de transfert de masse.

Nous avons pu montrer la possibilité de traiter ces effluents gazeux par adsorption sur le CAG. Le CAG présente des performances d'adsorption satisfaisantes pour ces effluents. Cette étude a révélé que la capacité d'adsorption de ces substances dépend directement de leurs propriétés physiques et chimiques aussi bien que sur le milieu environnementale. En outre, nous avons constaté que le PCE est plus adsorbé que le TCE et le DCE. Il apparaît clairement notre matériau permet une bonne rétention des COV chlorées.

Enfin, cette étude se voulait une source importante d'informations sur le CAG et sur les logiciels de simulation, mais la complexité du sujet laisse la voie libre à une poursuite de travaux tels que :

- Un programme de simulation en tenant compte la régénération de CAG après son utilisation pour améliorer la capacité d'adsorption.
- Un programme de simulation pour plusieurs COV adsorbés sur CAG.
- d'utiliser d'autres isothermes d'adsorptions a fin de prévoir et de vérifier le modèle le plus efficace.
- des essais d'adsorption supplémentaires sur d'autres effluents tel que Toluène, Benzène, Xylène et voir l'influence de la variation d'autres paramètres, tels que le pH, l'humidité de l'air, la granulométrie de charbon ... sur le taux d'adsorption et sur les paramètres de transfert de masse.

Cette étude a permis de montrer que le charbon actif granulé, peut être utilisé dans le traitement de l'air pollué, et ce pour préserver un environnement sain et vivable.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Le Cloirec. P, « Les Composés organiques volatils (COV) dans l'environnement », Lavoisier Tec & Doc, 163 -184 Paris, (2004).
- [2] Techniques d'ingénieur, « Traitement des composés organiques volatils (COV) ».
- [3] Bouscaren R, Chapitre 3, « Nature et sources de COV: Les composés organiques volatils dans l'environnement », t. d. Lavoisier, Paris, 59, (1998).
- [4] Dusserre. G, Cabridenc. R, Le Cloirec. P, Chapitre 6, « Ecotoxicologie des composés organiques volatils (COV) dans l'environnement, t. d. Lavoisier, 165, (1998).
- [5] Lauwerys. R, « Toxicologie industrielle et intoxications professionnelles », 3<sup>ème</sup> édition, e. Masson, Paris, (1992).
- [6] Franck Lalanne, Thèse de doctorat, « Etude Des Potentialites du Lavage Biologique pour Le Traitement d'un Melange Complexe de complexes organiques volatils », (2006).
- [7] Das. M, Bhargava. S.K, Kumar. A, Khan. A, Bharti R.S, Pangtey. B.S, Rao. G.S and Pandya K.P, « An investigation of environmental impact on health at retrail petrol pumps », Ann. Occup. Hyg, 35, 347-352, (1991).
- [8] Hill G.A, M.E Tomusiak, B Quail, K.M. Van Cleave, « Bioreactor design effects on biodegradation capabilities of VOC in wastewater, Environmental Progress », 10,147, (1991).
- [9] Okeke. O, « Critical assessment of conventional and emerging VOC abatement technologies, dans: Proceeding Conference VOC in the Environment », London, 3-10, (1995).
- [10] J.L Fanlo, C Guy, S Vigneron, Les techniques d'abattement en fin de ligne, Eurodeur 97, (1997).
- [11] Institut National de Recherche et de la Sécurité, Fiche toxicologique et environnementales des substances chimiques. Édition de l'INRS, <http://www.inrs.fr/htm/1,2-dichloroéthylène.html>, fichier pdf, (1997).
- [12] N. Bonnard, M. Faly, D. Jargot, E. Pasquier, Fiche toxicologique, établie par les services techniques et médicaux de l'INRS, Édition, (2011).
- [13] ATSDR - Toxicological Profile for 1,2-dichloroethene. U.S. Departement of Health and Human Services. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxpro2.html>, (1996).
- [14] US EPA - Dermal exposure assessment : principes and applications. EPA/600/8- 91/011B. <http://www.epa.gov/epahome/search.html>, (1992).

- [15] Fiche de Données de Sécurité conformément au Règlement (CE) No 22, Trichloréthylène, Version 16, (2011). <http://www.inrs.fr/accueil/produits/bdd/recherche-fichetox-criteres.html>.  
<http://www.inrs.fr/default/dms/inrs/FicheToxicologique/TI-FT-22/ft22.pdf>.
- [16] Bohnet, M. et al, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 7th. Wiley InterScience (John Wiley & Sons). <http://www3.interscience.wiley.com>, (2003).
- [17] ATSDR - Toxicological profile for trichloroethylene. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. U.S. Department of Health and Human Services. Public Health Service. Atlanta, Georgia, USA, (1997). <http://www.atsdr.cdc.gov/toxpro2.html>.
- [18] Mertens J.A - Trichloroethylene. Encyclopedia of chemical Technology. New York, NY, Wiley-Interscience. J. I. Kroschwitz and M. Howe-Grant Wiley\_Interscience, (1993).
- [19] Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques. Tétrachloroéthylène, (2005), <http://www.ineris.fr/>.
- [20] Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Toxicological profile for tetrachloroethylene (update). Atlanta : ATSDR. (1997). <http://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp18.pdf>,  
<http://www.atsdr.cdc.gov/>
- [21] Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999) : règlement sur le tétrachloroéthylène (utilisation pour le nettoyage à sec et rapports), p. 886-912, SOR/DORS/2003-79, (2003), <http://canadagazette.gc.ca/partII/2003/20030312/html/sor79-f.html>.
- [22] Louis Robert, Techniques de l'ingénieur, « Adsorption : Aspects théoriques », Génie de procédé, Opération unitaire, J 2730.
- [23] F.L Slejeko, « Adsorption Technology », Marcel Dekker, New York, (1985).
- [24] A Dabrowski, « Adsorption- from theory to practice », Advances in Colloid and Interface Science, 93,1-3, 135, 224, (2001).
- [25] P Mochot, Thèse de Doctorat, « Adsorption de composés organiques volatils sur charbon actif, Régénération in situ du charbon par chauffage par induction électromagnétique », (1994).
- [26] F. Rodriguez-Reinoso, Carbon, (1998).
- [27] Ebie K, Li F, Azuma Y, Yuasa A, Hagishita T. Pore distribution effect of activated carbon in adsorbing organic micropollutants from natural water, pp.167- 179, (2001).
- [28] Termoul M, Préparation d'un charbon actif à partir de noyaux d'olive pour l'adsorption du bleu de méthylène; phénol et 4-chlophenol, thèse de magister, Université de Mostaganem, (2006).

- [29] Hong S, and R. S Summers, « Impact of Backwashing and Desorption on GAC Breakthrough of Natural Organic Matter, » Proc. AWWA Ann. Conf, New York, NY, (1994).
- [30] Newcombe G, Drikas M, Hayes R. Influence of characterised natural organic matter on activated carbon adsorption: Effect on pore volume distribution and adsorption of 2- methylisoborneol, pp.1065-1073, (1997).
- [31] P.Le Cloirec, Procédés de dépollution des émissions gazeuses industrielles, Techniques de l'Ingénieur, Référence J3921, (2005).
- [32] A. Subrenat, P. Le Cloirec, J. Environ. Engn, (2004).
- [33] M.C. Huang . C.H. Chou, H. Teng, AlChE J, (2002).
- [34] M.A. Lillo-Ródenas, D. Cazorla-Amoros, A. Linares-Solanao, Carbon, (2005).
- [35] J.L. Fanlo, C. Gracian, P. Le Cloirec, Traitements des odeurs - Procédés curatifs, Techniques de l'Ingénieur, Référence G2971, (2003).
- [36] S. Haydar, M.A. Ferro-García, J. Rivera-Utrilla, J.P. Joly, Carbon, (2003).
- [37] P. Burg, P. Fydrych, J. Bimer, P.D. Salbut, A. Jankowska, Carbon, (2002).
- [38] A. J. Groszek, C. Aharoni, Langmuir, (1999).
- [39] F. Delage, P. Pré, P. Le Cloirec, J. Environ. Eng, (1999).
- [40] A. Dubray, J. Vanderschuren, Sep. Purif. Technol, (2004).
- [41] E. Alper, B. Wichtendahl, W.D. Deckwer, Chem. Eng. Sci, (1980).
- [42] J. Kluytmans, G. van Wachem, B. Kuster, J. Schouten, Chem. Eng. Sci, (2003).
- [43] L.R. Radovic, C. Moreno-Castilla, J. Rivera-Utrilla, Carbon materials as adsorbents in aqueous solutions, Chemistry and Physics of Carbon, Vol. 27, New York, (2000).
- [44] M.C. Ching-Ju, S. Li-Chieh, T. Hen-Je, L. Ta-Kang, Carbon, (2007).
- [45] C. Moreno-Castilla, J. Rivera-Utrilla, M. V. Lopez-Ramon, F. Carrasco-Marín, Carbon.
- [46] La loi de Lundelius est une loi semi-quantitative à but prédictif déclarant que l'adsorption augmente avec la solubilité décroissante du corps dissous dans le solvant. W.J Weber, Physicochemical Processes for Water Quality Control, John Wiley & Sons : NY, (1972).
- [47] C.O Ania, B Canal, C Pevida, A Arenillas, J.B Parra, F Rubiera, J.J. Pis, Appl. Surf. Sci, (2007).
- [48] Simgen H, « Adsorption techniques for gas purification », AIP Conf. Proc, 785, 121-129, (2005).
- [49] Welty, James R; Wicks, Charles E; Wilson, Robert Elliott. Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer (2 ed), (1976).
- [50] Taylor. R; Krishna. R, « Multicomponent Mass Transfer », Wiley, (1993).

- [51] Hand D.W, J.C Crittenden, W.E Thacker, « Batch Reactor Solutions to the Homogeneous Surface Diffusion Model », *Journal of Environmental Engineering*, (1983).
- [52] Kornegay B. H, « Control of Synthetic Organic Chemicals by Activated Carbon Theory, Application, and Regeneration Alternatives », *Control of Organic Chemicals in Drinking Water*, USEPA, (1979).
- [53] Crittenden, J.C, B.W Wong, W.E Thacker, V.L Snoeyink, and R.L Hinrichs, « Mathematical Model of Sequential Loading in Fixed-Bed Adsorbers », (1980).
- [54] Friedman Gary, « Mathematical Modeling of Multicomponent Adsorption in Batch and Fixed-Bed Reactors », the Degree of Master of Science, (1984).
- [55] Dobrzelewski M, « Determination and Prediction of Surface Diffusivities of Volatile Organic Compounds Found in Drinking Water », Master of Science, (1985).
- [56] Fleck, R.D.Jr., D.J. Kirwan, and K.R. Hall, « Mixed-Resistance Diffusion Kinetics in Fixed-Beds Under Constant Pattern Conditions », *Industrial and Engineering Chemistry*, (1975).
- [57] Gammie L, G Giesbrecht, « Full-Scale Operation of GAC Contactors at Regina/Moose Jaw, Saskatchewan » *Proc AWWA Annual Conf.*, Denver, CO, (1986).
- [58] Fritz, W., W. Merk, and E.U. Schlunder, « Competitive Adsorption of Two Dissolved Organic onto Activated Carbon », *Chemical Engineering Science*, (1980).
- [59] Vernon L. Snoeyink, Ph.D, R. Scott Summers, Ph.D, « Adsorption of organic compounds », chapter 13.
- [60] Hand D.W, J.C Crittenden, W.E Tbacker, « Simplified models for design of fixed-bed adsorption systems », (1984).
- [61] Wakao, N, T. Funazukri, « Effect of fluid despersion coefficient on particle to fluid mass transfer coefficient », *Chem. Eng. Sci*, (1973).
- [62] Wilke C.R, C.Y Lee, « Estimation of Diffusion Coefficients for Gases and Vapors », *Ind. Ene. Chem*, (1955).
- [63] Miyauchi T, T Kikuchi, « Axial dispersion in packed beds », *Chem. Eng. Sci.* 30, 343, (1975).
- [64] Dobrzelewski M, « Determination and Prediction of Surface Diffusivities of Volatile Organic Compounds Found in Drinking Water », Master of Science, (1985).
- [65] Dunod, Emilian Koller « Traitement des pollutions industrielles: eau, air, déchets, sols, boues », *Aide-mémoire Génie chimique 3ème édition*, (2004).
- [66] Juhola A.J, E.G Wiig, « Pore Structure in Activated Charcoal. I. Determination of Micro Pore Size Distribution », *J. AHK Chem. Soc*, 71, (1949).

- [67] Javed, K.H, « Mass transfer coefficients, interfacial effects, and surface renewal. In : Science and practice of liquid-liquid extraction », Vol 1, Ed. John D. Thornton, Clarendon Press, Oxford, (1992).
- [68] M. Hamdi AYED, Docteur de l'école nationale d'ingénieurs de Tunis en génie hydraulique « Analyse expérimentale et modélisation du transfert de matière et du mélange dans une couche cisailée à bulles », (2007).
- [69] Pohorecki R, « Effectiveness of interfacial area for mass transfer in two-phase flow in microreactors », Chemical Engineering Science, (2007).
- [70] Bel F'dhila R, Duineveld P.C, « The effect of surfactant on the rise of spherical bubble at high Reynolds and Peclet numbers », Phys. Fluids pp 310-321, (1996).
- [71] Aspen Physical Property System, Physical Property Models Copyright, by Aspen Technology, Inc. All rights reserved, (2009).
- [72] John Crittenden, al, « Report Research, Subject Area: water treatment and operations », Department of Civil Engineering Michigan Technological University Houghton, An evaluation of the technical feasibility of the air stripping solvent recovery process, Submitted to American Water Works Association (AWWA) Research Foundation, June (1987).

**Annexe A : Les Subroutines utilisées dans les calculs :**

```

CALCULE LE COEFFICIENT DE DIFFUSION UTILISANT LE MODELES DE WILE-LEE
  CALL DIFCOF(DM)
CALCULE LA MASSE VOLUMIQUE ET LA VISCOSITE DE LAIR
  TEMPK=TEMPC+273,0
  DENAIR=(28,964*ATM)/(0,08216*TEMPK*1000,0)
  VISAIR=1,7E-6*TEMPK**0,818
CALCULE LE NOMBRE DE REYNOLDS ET LE NOMBRE DE SCHIMIDT POUR LA CORELATION DE WAKAO
  RE=(DENAIR*VEL*DIA)/VISAIR
  SC=(VISAIR)/(DENAIR*DM)
CALCULE LE COEFFICIENT DU TRANSFERT DE MASSE
  KF=(DM/DIA)*(2,0+1,1*RE**0,6*SC**0,333333)
CALCULER LE COEFFICIENT DE DIFFUSION DES PORE ET SURFACE
  CM=C/WT
  Q=K*CM**N
  DP=DM*PVD
  DS=((DP*CM)/(Q*DEN*1000,0))*CF
CALCULE LA CONCENTRATION D'EQUILBRE SUR LE CHARBON ET DANS LE GAZ IN MICROMOLES
  BVF=1000,0*DEN*(1,0-VD)*CM**(N-1,0)*K
CALCULE LE COEFFICIENT DE PARTITION
  DG=(DEN*Q*(1,0-VD)*1000,0)/(VD*CM)
CALCULER LE NOMBRE DE BIOT
  BI=(KF*DIA/2,0*(1,0-VD))/(DG*DS*VD)
CALCULE LE NOMBRE DE STANTON MINIMUM ET EBCT MIN
  STM=STMIN(BI,N)
  ETMIN=(STM*DIA/2,0)/(KF*(1,0-VD))
  EMLN=VEL*ETMIN
  TAUMIN=VD*ETMIN/60,0
  TAUACT=VD*EBCT/60,0
CALCULER LE RAPPORT MASSIQUE POUR 5 % ET 95 % DE COURBE DE PERCE ET TROUVER LE EBCT
POUR LA ZONE DE TRANSFERT DE MASSE
  CALL TPUT(N,BI,A0,A1,A2,A3,A4)
  T95=A0+A1*(0,95**A2)+A3/(1,01-0,95**A4)
  T05=A0+A1*(0,05**A2)+A3/(1,01-0,05**A4)
  ETMTZ=ETMIN*(T95-T05)
  EMTZL=ETMTZ*VEL
CALCULER LE PROFIL D'UN SYSTEME DE SIMPLE SOLUTE
  CC(1)=0,01
  DO 135 I=1,99
    T(I)=A0+A1*(CC(I)**A2)+A3/(1,01-CC(I)**A4)
    CC(I+1)=CC(I)+0,01
    TMIN(I)=TAUMIN*(DG+1,)*T(I)

```

```

TACT(I)=TMIN(I)+(TAUACT-TAUMIN)*(DG+1,)
TMIN(I)=TMIN(I)/1440,
B(I)=TACT(I)*VD/(TAUACT)
TACT(I)=TACT(I)/1440,
USAGE(I)=B(I)/(RHOPB*1000,)
CE QUI SUIT EST LE SUBROUTINE POUR CALCULER LE COEFFITON DE DIFFUSION
SUBROUTINE DIFCOF(DIF)
LIRE LES DONNEES D'ENTRES
COMMON TEMPC,DM,ATM,WT,VOL,BP
BPK=BP+273,0
PRESS=ATM*101,3
TEMPK=TEMPC+273,0
CALCULE LA SEPARATION MOLECULAIRE A LA COLLOSION
RAIR=0,3711
VOLA=VOL/1000,0
RCOM=1,18*VOLA**0,3333333
RAB=(RAIR+RCOM)/2,0
CALCULER L'ENERGIE D'ATTRACTION MOLECULAIRE
EAIR=78,6
ECOM=1,21*BPK
EAB=SQRT(EAIR*ECOM)
TKE=TEMPK/EAB
CALCULE LA FONCTION DE COLLOSION
E=ALOG10(TKE)
ARG=-0,14329-0,48343*E+0,19390*E**2+0,13612*E**3-0,20578*E**4+0,083899*E**5-
0,011491*E**6
FE=10**ARG
CALCULER LE COEFFICIENT DE DIFFUSION
WTAIR=28,964
DIF=(0,0001*(1,084-0,249*SQRT(1,0/WTAIR+1,0/WT))*TEMPK**1,5*SQRT(1,0/WTAIR+1,0/WT))/
(PRESS*RAB**2*FE)
DIF=10,0*DIF
DM=DIF

```

## Annexe B : Les résultats des variations de la concentration initiale.

Annexe B-1 : Cis-dichloroéthène, concentration initiale  $C_0=2\mu\text{g/L}$ .

T (m charge/ m requise pour saturer CAG)	C/C <sub>0</sub>	Temps (jours)	Volume du charge dans le lit,BVF	C( $\mu\text{g/L}$ )	qté d'air traité en L/ g de charbon
0,777	0,010	19,546500	0,69213831E+06	0,020	1305,9213
0,795	0,020	19,848370	0,70282740E+06	0,040	1326,0894
0,808	0,030	20,063844	0,71045740E+06	0,060	1340,4860
0,818	0,040	20,237560	0,71660860E+06	0,080	1352,0920
0,827	0,050	20,385772	0,72185681E+06	0,100	1361,9940
0,835	0,060	20,516500	0,72648593E+06	0,120	1370,7282
0,842	0,070	20,634360	0,73065931E+06	0,140	1378,6030
0,848	0,080	20,742280	0,73448074E+06	0,160	1385,8130
0,854	0,090	20,842264	0,73802112E+06	0,180	1392,4930
0,860	0,100	20,935730	0,74133080E+06	0,200	1398,7373
0,865	0,110	21,023742	0,74444724E+06	0,220	1404,6180
0,870	0,120	21,107114	0,74739943E+06	0,240	1410,1880
0,875	0,130	21,186483	0,75020990E+06	0,260	1415,4903
0,879	0,140	21,262370	0,75289690E+06	0,280	1420,5601
0,884	0,150	21,335174	0,75547500E+06	0,300	1425,4250
0,888	0,160	21,405260	0,75795662E+06	0,320	1430,1070
0,892	0,170	21,472910	0,76035212E+06	0,340	1434,6270
0,896	0,180	21,538370	0,76267012E+06	0,360	1439,0003
0,900	0,190	21,601860	0,76491831E+06	0,380	1443,2421
0,903	0,200	21,663562	0,76710312E+06	0,400	1447,3650
0,907	0,210	21,723632	0,76923030E+06	0,420	1451,3780
0,910	0,220	21,782220	0,77130470E+06	0,440	1455,2920
0,914	0,230	21,839441	0,77333100E+06	0,460	1459,1151
0,917	0,240	21,895420	0,77531310E+06	0,480	1462,8550
0,920	0,250	21,950241	0,77725443E+06	0,500	1466,5180
0,924	0,260	22,004011	0,77915840E+06	0,520	1470,1102
0,927	0,270	22,056810	0,78102793E+06	0,540	1473,6380
0,930	0,280	22,108710	0,78286560E+06	0,560	1477,1050
0,933	0,290	22,159774	0,78467400E+06	0,580	1480,5170
0,936	0,300	22,210081	0,78645530E+06	0,600	1483,8780
0,939	0,310	22,259681	0,78821162E+06	0,620	1487,1920
0,942	0,320	22,308633	0,78994510E+06	0,640	1490,4624
0,945	0,330	22,356990	0,79165731E+06	0,660	1493,6931
0,948	0,340	22,404800	0,79335030E+06	0,680	1496,8873
0,950	0,350	22,452110	0,79502540E+06	0,700	1500,0480
0,953	0,360	22,498960	0,79668440E+06	0,720	1503,1781
0,956	0,370	22,545400	0,79832880E+06	0,740	1506,2810
0,959	0,380	22,591461	0,79995990E+06	0,760	1509,3582
0,961	0,390	22,637190	0,80157912E+06	0,780	1512,4140
0,964	0,400	22,682622	0,80318793E+06	0,800	1515,4490
0,967	0,410	22,727800	0,80478760E+06	0,820	1518,4671

## Annexes

0,969	0,420	22,772750	0,80637924E+06	0,840	1521,4703
0,972	0,430	22,817512	0,80796440E+06	0,860	1524,4611
0,975	0,440	22,862123	0,80954400E+06	0,880	1527,4420
0,977	0,450	22,906620	0,81111960E+06	0,900	1530,4143
0,980	0,460	22,951032	0,81269231E+06	0,920	1533,3820
0,983	0,470	22,995400	0,81426331E+06	0,940	1536,3460
0,985	0,480	23,039754	0,81583390E+06	0,960	1539,3093
0,988	0,490	23,084140	0,81740543E+06	0,980	1542,2750
0,991	0,500	23,128580	0,81897912E+06	1,000	1545,2440
0,993	0,510	23,173120	0,82055640E+06	1,020	1548,2200
0,996	0,520	23,217800	0,82213840E+06	1,040	1551,2050
0,999	0,530	23,262660	0,82372674E+06	1,060	1554,2020
1,001	0,540	23,307730	0,82532281E+06	1,080	1557,2130
1,004	0,550	23,353061	0,82692810E+06	1,100	1560,2420
1,007	0,560	23,398710	0,82854431E+06	1,120	1563,2912
1,010	0,570	23,444700	0,83017293E+06	1,140	1566,3641
1,012	0,580	23,491094	0,83181574E+06	1,160	1569,4640
1,015	0,590	23,537944	0,83347480E+06	1,180	1572,5940
1,018	0,600	23,585310	0,83515174E+06	1,200	1575,7580
1,021	0,610	23,633240	0,83684900E+06	1,220	1578,9604
1,024	0,620	23,681800	0,83856860E+06	1,240	1582,2050
1,027	0,630	23,731060	0,84031281E+06	1,260	1585,4960
1,030	0,640	23,781090	0,84208443E+06	1,280	1588,8390
1,033	0,650	23,831970	0,84388610E+06	1,300	1592,2380
1,036	0,660	23,883783	0,84572081E+06	1,320	1595,7000
1,039	0,670	23,936630	0,84759210E+06	1,340	1599,2303
1,042	0,680	23,990594	0,84950300E+06	1,360	1602,8360
1,045	0,690	24,045800	0,85145774E+06	1,380	1606,5241
1,049	0,700	24,102360	0,85346050E+06	1,400	1610,3030
1,052	0,710	24,160400	0,85551581E+06	1,420	1614,1810
1,056	0,720	24,220071	0,85762870E+06	1,440	1618,1674
1,060	0,730	24,281540	0,85980531E+06	1,460	1622,2742
1,063	0,740	24,344980	0,86205160E+06	1,480	1626,5124
1,067	0,750	24,410581	0,86437470E+06	1,500	1630,8960
1,071	0,760	24,478580	0,86678240E+06	1,520	1635,4384
1,075	0,770	24,549213	0,86928360E+06	1,540	1640,1580
1,080	0,780	24,622770	0,87188824E+06	1,560	1645,0722
1,084	0,790	24,699571	0,87460780E+06	1,580	1650,2033
1,089	0,800	24,779972	0,87745480E+06	1,600	1655,5750
1,094	0,810	24,864391	0,88044393E+06	1,620	1661,2150
1,100	0,820	24,953300	0,88359230E+06	1,640	1667,1552
1,105	0,830	25,047252	0,88691910E+06	1,660	1673,4322
1,111	0,840	25,146880	0,89044681E+06	1,680	1680,0883
1,117	0,850	25,252930	0,89420200E+06	1,700	1687,1740
1,124	0,860	25,366270	0,89821540E+06	1,720	1694,7460
1,131	0,870	25,487940	0,90252362E+06	1,740	1702,8750
1,139	0,880	25,619173	0,90717070E+06	1,760	1711,6430
1,148	0,890	25,761450	0,91220870E+06	1,780	1721,1490

## Annexes

1,157	0,900	25,916570	0,91770131E+06	1,800	1731,5120
1,167	0,910	26,086740	0,92372720E+06	1,820	1742,8820
1,178	0,920	26,274700	0,93038262E+06	1,840	1755,4390
1,191	0,930	26,483861	0,93778920E+06	1,860	1769,4140
1,205	0,940	26,718603	0,94610131E+06	1,880	1785,0970
1,221	0,950	26,984550	0,95551850E+06	1,900	1802,8652
1,239	0,960	27,289100	0,96630260E+06	1,920	1823,2130
1,260	0,970	27,642230	0,97880662E+06	1,940	1846,8050
1,285	0,980	28,057540	0,99351270E+06	1,960	1874,5523
1,314	0,990	28,554370	0,10111053E+07	1,980	1907,7460

### Annexe B-2 : Cis-dichloroéthène, concentration initiale $C_0=4\mu\text{g/L}$ .

T (m charge/ m requise pour saturer CAG)	C/C <sub>0</sub>	Temps (jours)	Volume du charge dans le lit, BVF	C(μg/L)	qté d'air traité en L/ g de charbon
0,777	0,010	23,124542	0,81883620E+06	0,040	1544,9740
0,795	0,020	23,300140	0,82505412E+06	0,080	1556,7060
0,808	0,030	23,425490	0,82949260E+06	0,120	1565,0804
0,818	0,040	23,526540	0,83307081E+06	0,160	1571,8320
0,827	0,050	23,612754	0,83612374E+06	0,200	1577,5920
0,835	0,060	23,688802	0,83881660E+06	0,240	1582,6730
0,842	0,070	23,757362	0,84124424E+06	0,280	1587,2534
0,848	0,080	23,820140	0,84346724E+06	0,320	1591,4480
0,854	0,090	23,878301	0,84552670E+06	0,360	1595,3334
0,860	0,100	23,932670	0,84745193E+06	0,400	1598,9660
0,865	0,110	23,983870	0,84926481E+06	0,440	1602,3864
0,870	0,120	24,032370	0,85098220E+06	0,480	1605,6270
0,875	0,130	24,078540	0,85261700E+06	0,520	1608,7114
0,879	0,140	24,122680	0,85418010E+06	0,560	1611,6610
0,884	0,150	24,165031	0,85567980E+06	0,600	1614,4902
0,888	0,160	24,205800	0,85712340E+06	0,640	1617,2140
0,892	0,170	24,245151	0,85851681E+06	0,680	1619,8431
0,896	0,180	24,283233	0,85986530E+06	0,720	1622,3873
0,900	0,190	24,320170	0,86117310E+06	0,760	1624,8550
0,903	0,200	24,356060	0,86244400E+06	0,800	1627,2530
0,907	0,210	24,391002	0,86368140E+06	0,840	1629,5880
0,910	0,220	24,425081	0,86488812E+06	0,880	1631,8650
0,914	0,230	24,458370	0,86606681E+06	0,920	1634,0883
0,917	0,240	24,490930	0,86721974E+06	0,960	1636,2640
0,920	0,250	24,522821	0,86834910E+06	1,000	1638,3950
0,924	0,260	24,554101	0,86945670E+06	1,040	1640,4843
0,927	0,270	24,584812	0,87054412E+06	1,080	1642,5361
0,930	0,280	24,615001	0,87161312E+06	1,120	1644,5531
0,933	0,290	24,644710	0,87266512E+06	1,160	1646,5380
0,936	0,300	24,673971	0,87370130E+06	1,200	1648,4930

## Annexes

0,939	0,310	24,702830	0,87472300E+06	1,240	1650,4210
0,942	0,320	24,731302	0,87573131E+06	1,280	1652,3233
0,945	0,330	24,759431	0,87672740E+06	1,320	1654,2030
0,948	0,340	24,787242	0,87771212E+06	1,360	1656,0610
0,950	0,350	24,814762	0,87868662E+06	1,400	1657,8994
0,953	0,360	24,842020	0,87965170E+06	1,440	1659,7202
0,956	0,370	24,869030	0,88060830E+06	1,480	1661,5251
0,959	0,380	24,895824	0,88155710E+06	1,520	1663,3153
0,961	0,390	24,922430	0,88249900E+06	1,560	1665,0930
0,964	0,400	24,948854	0,88343481E+06	1,600	1666,8582
0,967	0,410	24,975140	0,88436543E+06	1,640	1668,6141
0,969	0,420	25,001283	0,88529131E+06	1,680	1670,3610
0,972	0,430	25,027322	0,88621331E+06	1,720	1672,1010
0,975	0,440	25,053274	0,88713231E+06	1,760	1673,8350
0,977	0,450	25,079154	0,88804874E+06	1,800	1675,5640
0,980	0,460	25,104991	0,88896362E+06	1,840	1677,2900
0,983	0,470	25,130802	0,88987760E+06	1,880	1679,0144
0,985	0,480	25,156602	0,89079112E+06	1,920	1680,7380
0,988	0,490	25,182420	0,89170531E+06	1,960	1682,4630
0,991	0,500	25,208271	0,89262070E+06	2,000	1684,1900
0,993	0,510	25,234182	0,89353824E+06	2,040	1685,9212
0,996	0,520	25,260171	0,89445860E+06	2,080	1687,6580
0,999	0,530	25,286270	0,89538250E+06	2,120	1689,4010
1,001	0,540	25,312490	0,89631093E+06	2,160	1691,1530
1,004	0,550	25,338860	0,89724470E+06	2,200	1692,9150
1,007	0,560	25,365410	0,89818493E+06	2,240	1694,6890
1,010	0,570	25,392162	0,89913231E+06	2,280	1696,4761
1,012	0,580	25,419151	0,90008793E+06	2,320	1698,2791
1,015	0,590	25,446410	0,90105300E+06	2,360	1700,1000
1,018	0,600	25,473960	0,90202860E+06	2,400	1701,9410
1,021	0,610	25,501840	0,90301581E+06	2,440	1703,8034
1,024	0,620	25,530090	0,90401612E+06	2,480	1705,6910
1,027	0,630	25,558740	0,90503080E+06	2,520	1707,6052
1,030	0,640	25,587844	0,90606140E+06	2,560	1709,5500
1,033	0,650	25,617443	0,90710943E+06	2,600	1711,5273
1,036	0,660	25,647583	0,90817670E+06	2,640	1713,5410
1,039	0,670	25,678323	0,90926520E+06	2,680	1715,5950
1,042	0,680	25,709720	0,91037681E+06	2,720	1717,6921
1,045	0,690	25,741830	0,91151393E+06	2,760	1719,8380
1,049	0,700	25,774730	0,91267890E+06	2,800	1722,0360
1,052	0,710	25,808492	0,91387450E+06	2,840	1724,2920
1,056	0,720	25,843204	0,91510362E+06	2,880	1726,6110
1,060	0,730	25,878960	0,91636970E+06	2,920	1729,0000
1,063	0,740	25,915863	0,91767643E+06	2,960	1731,4650
1,067	0,750	25,954030	0,91902780E+06	3,000	1734,0150
1,071	0,760	25,993580	0,92042831E+06	3,040	1736,6572
1,075	0,770	26,034670	0,92188340E+06	3,080	1739,4030
1,080	0,780	26,077461	0,92339860E+06	3,120	1742,2614

## Annexes

1,084	0,790	26,122140	0,92498050E+06	3,160	1745,2463
1,089	0,800	26,168910	0,92663660E+06	3,200	1748,3710
1,094	0,810	26,218011	0,92837550E+06	3,240	1751,6520
1,100	0,820	26,269731	0,93020690E+06	3,280	1755,1074
1,105	0,830	26,324384	0,93214212E+06	3,320	1758,7590
1,111	0,840	26,382340	0,93419430E+06	3,360	1762,6310
1,117	0,850	26,444030	0,93637862E+06	3,400	1766,7521
1,124	0,860	26,509960	0,93871324E+06	3,440	1771,1572
1,131	0,870	26,580734	0,94121943E+06	3,480	1775,8860
1,139	0,880	26,657073	0,94392262E+06	3,520	1780,9862
1,148	0,890	26,739840	0,94685330E+06	3,560	1786,5160
1,157	0,900	26,830072	0,95004843E+06	3,600	1792,5443
1,167	0,910	26,929063	0,95355370E+06	3,640	1799,1580
1,178	0,920	27,038400	0,95742520E+06	3,680	1806,4630
1,191	0,930	27,160072	0,96173370E+06	3,720	1814,5920
1,205	0,940	27,296623	0,96656890E+06	3,760	1823,7150
1,221	0,950	27,451330	0,97204710E+06	3,800	1834,0511
1,239	0,960	27,628490	0,97832020E+06	3,840	1845,8872
1,260	0,970	27,833910	0,98559400E+06	3,880	1859,6114
1,285	0,980	28,075492	0,99414862E+06	3,920	1875,7521
1,314	0,990	28,364503	0,10043824E+07	3,960	1895,0612

### Annexe B-3 : Cis-dichloroéthène, concentration initiale $C_0=6\mu\text{g/L}$ .

T (m charge/ m requise pour saturer CAG)	C/C <sub>0</sub>	Temps (jours)	Volume du charge dans le lit, BVF	C(μg/L)	qté d'air traité en L/ g de charbon
0,709	0,010	21,593560	0,76462440E+06	0,060	1442,6880
0,737	0,020	21,812560	0,77237900E+06	0,120	1457,3190
0,756	0,030	21,962520	0,77768910E+06	0,180	1467,3380
0,771	0,040	22,080253	0,78185820E+06	0,240	1475,2042
0,783	0,050	22,178764	0,78534643E+06	0,300	1481,7860
0,794	0,060	22,264320	0,78837581E+06	0,360	1487,5020
0,804	0,070	22,340463	0,79107212E+06	0,420	1492,5890
0,812	0,080	22,409430	0,79351420E+06	0,480	1497,1970
0,820	0,090	22,472713	0,79575510E+06	0,540	1501,4250
0,828	0,100	22,531380	0,79783240E+06	0,600	1505,3442
0,835	0,110	22,586200	0,79977362E+06	0,660	1509,0070
0,841	0,120	22,637780	0,80160000E+06	0,720	1512,4530
0,847	0,130	22,686574	0,80332790E+06	0,780	1515,7130
0,853	0,140	22,732960	0,80497031E+06	0,840	1518,8120
0,859	0,150	22,777230	0,80653793E+06	0,900	1521,7700
0,864	0,160	22,819640	0,80803960E+06	0,960	1524,6030
0,869	0,170	22,860382	0,80948231E+06	1,020	1527,3251
0,874	0,180	22,899644	0,81087262E+06	1,080	1529,9484
0,879	0,190	22,937570	0,81221550E+06	1,140	1532,4821
0,884	0,200	22,974290	0,81351570E+06	1,200	1534,9353
0,888	0,210	23,009910	0,81477700E+06	1,260	1537,3151

## Annexes

0,893	0,220	23,044530	0,81600310E+06	1,320	1539,6290
0,897	0,230	23,078250	0,81719681E+06	1,380	1541,8810
0,901	0,240	23,111122	0,81836100E+06	1,440	1544,0773
0,905	0,250	23,143232	0,81949800E+06	1,500	1546,2230
0,909	0,260	23,174642	0,82061030E+06	1,560	1548,3212
0,913	0,270	23,205404	0,82169950E+06	1,620	1550,3764
0,917	0,280	23,235570	0,82276760E+06	1,680	1552,3920
0,921	0,290	23,265182	0,82381624E+06	1,740	1554,3703
0,924	0,300	23,294290	0,82484693E+06	1,800	1556,3150
0,928	0,310	23,322930	0,82586112E+06	1,860	1558,2290
0,932	0,320	23,351142	0,82686010E+06	1,920	1560,1134
0,935	0,330	23,378960	0,82784493E+06	1,980	1561,9720
0,939	0,340	23,406410	0,82881700E+06	2,040	1563,8060
0,942	0,350	23,433530	0,82977731E+06	2,100	1565,6180
0,945	0,360	23,460340	0,83072670E+06	2,160	1567,4090
0,949	0,370	23,486873	0,83166631E+06	2,220	1569,1820
0,952	0,380	23,513160	0,83259710E+06	2,280	1570,9380
0,955	0,390	23,539220	0,83351990E+06	2,340	1572,6790
0,959	0,400	23,565080	0,83443550E+06	2,400	1574,4070
0,962	0,410	23,590760	0,83534481E+06	2,460	1576,1223
0,965	0,420	23,616281	0,83624862E+06	2,520	1577,8280
0,968	0,430	23,641674	0,83714781E+06	2,580	1579,5242
0,972	0,440	23,666960	0,83804310E+06	2,640	1581,2133
0,975	0,450	23,692150	0,83893512E+06	2,700	1582,8970
0,978	0,460	23,717273	0,83982480E+06	2,760	1584,5750
0,981	0,470	23,742360	0,84071290E+06	2,820	1586,2510
0,984	0,480	23,767420	0,84160024E+06	2,880	1587,9250
0,987	0,490	23,792472	0,84248750E+06	2,940	1589,5991
0,991	0,500	23,817550	0,84337560E+06	3,000	1591,2750
0,994	0,510	23,842670	0,84426500E+06	3,060	1592,9530
0,997	0,520	23,867860	0,84515700E+06	3,120	1594,6360
1,000	0,530	23,893142	0,84605224E+06	3,180	1596,3250
1,003	0,540	23,918540	0,84695160E+06	3,240	1598,0220
1,007	0,550	23,944080	0,84785593E+06	3,300	1599,7282
1,010	0,560	23,969790	0,84876630E+06	3,360	1601,4460
1,013	0,570	23,995700	0,84968362E+06	3,420	1603,1770
1,016	0,580	24,021830	0,85060900E+06	3,480	1604,9230
1,020	0,590	24,048220	0,85154350E+06	3,540	1606,6860
1,023	0,600	24,074901	0,85248831E+06	3,600	1608,4690
1,027	0,610	24,101910	0,85344462E+06	3,660	1610,2730
1,030	0,620	24,129283	0,85441393E+06	3,720	1612,1020
1,034	0,630	24,157060	0,85539743E+06	3,780	1613,9580
1,037	0,640	24,185281	0,85639681E+06	3,840	1615,8431
1,041	0,650	24,213994	0,85741360E+06	3,900	1617,7614
1,045	0,660	24,243253	0,85844962E+06	3,960	1619,7163
1,048	0,670	24,273111	0,85950690E+06	4,020	1621,7111
1,052	0,680	24,303623	0,86058731E+06	4,080	1623,7500
1,056	0,690	24,334860	0,86169340E+06	4,140	1625,8370

## Annexes

1,060	0,700	24,366890	0,86282750E+06	4,200	1627,9770
1,064	0,710	24,399790	0,86399240E+06	4,260	1630,1744
1,069	0,720	24,433640	0,86519112E+06	4,320	1632,4361
1,073	0,730	24,468550	0,86642720E+06	4,380	1634,7683
1,078	0,740	24,504611	0,86770430E+06	4,440	1637,1780
1,082	0,750	24,541950	0,86902640E+06	4,500	1639,6724
1,087	0,760	24,580694	0,87039831E+06	4,560	1642,2611
1,092	0,770	24,621000	0,87182540E+06	4,620	1644,9540
1,098	0,780	24,663020	0,87331340E+06	4,680	1647,7612
1,103	0,790	24,706950	0,87486900E+06	4,740	1650,6962
1,109	0,800	24,753011	0,87650010E+06	4,800	1653,7740
1,115	0,810	24,801443	0,87821500E+06	4,860	1657,0100
1,122	0,820	24,852533	0,88002412E+06	4,920	1660,4230
1,129	0,830	24,906604	0,88193874E+06	4,980	1664,0360
1,136	0,840	24,964040	0,88397243E+06	5,040	1667,8730
1,144	0,850	25,025280	0,88614100E+06	5,100	1671,9642
1,152	0,860	25,090850	0,88846280E+06	5,160	1676,3450
1,161	0,870	25,161363	0,89095980E+06	5,220	1681,0562
1,170	0,880	25,237570	0,89365800E+06	5,280	1686,1472
1,181	0,890	25,320343	0,89658912E+06	5,340	1691,6780
1,192	0,900	25,410780	0,89979150E+06	5,400	1697,7200
1,205	0,910	25,510200	0,90331193E+06	5,460	1704,3621
1,219	0,920	25,620260	0,90720912E+06	5,520	1711,7154
1,234	0,930	25,743030	0,91155640E+06	5,580	1719,9180
1,252	0,940	25,881150	0,91644712E+06	5,640	1729,1460
1,272	0,950	26,038051	0,92200310E+06	5,700	1739,6290
1,295	0,960	26,218261	0,92838431E+06	5,760	1751,6690
1,321	0,970	26,427862	0,93580630E+06	5,820	1765,6722
1,353	0,980	26,675260	0,94456660E+06	5,880	1782,2011
1,390	0,990	26,972394	0,95508810E+06	5,940	1802,0531

**Annexe C : Les résultats des variations de la température.****Annexe C-1 : Cis-dichloroéthène, température = 22,4 °C, Voir Annexe B-1****Annexe C-2 : Cis-dichloroéthène, température = 23 °C.**

T (m charge/ m requise pour saturer CAG)	C/C <sub>0</sub>	Temps (jours)	Volume du charge dans le lit, BVF	C(µg/L)	qté d'air traité en L/ g de charbon
0,777	0,010	18,492122	0,65480300E+06	0,020	1235,4774
0,795	0,020	18,803754	0,66583790E+06	0,040	1256,2980
0,808	0,030	19,026210	0,67371481E+06	0,060	1271,1600
0,818	0,040	19,205540	0,68006500E+06	0,080	1283,1420
0,827	0,050	19,358550	0,68548300E+06	0,100	1293,3642
0,835	0,060	19,493510	0,69026193E+06	0,120	1302,3811
0,842	0,070	19,615180	0,69457031E+06	0,140	1310,5101
0,848	0,080	19,726594	0,69851550E+06	0,160	1317,9540
0,854	0,090	19,829811	0,70217031E+06	0,180	1324,8500
0,860	0,100	19,926301	0,70558710E+06	0,200	1331,2963
0,865	0,110	20,017162	0,70880443E+06	0,220	1337,3670
0,870	0,120	20,103231	0,71185212E+06	0,240	1343,1173
0,875	0,130	20,185170	0,71475350E+06	0,260	1348,5920
0,879	0,140	20,263510	0,71752740E+06	0,280	1353,8253
0,884	0,150	20,338670	0,72018893E+06	0,300	1358,8471
0,888	0,160	20,411022	0,72275090E+06	0,320	1363,6810
0,892	0,170	20,480860	0,72522390E+06	0,340	1368,3470
0,896	0,180	20,548440	0,72761693E+06	0,360	1372,8621
0,900	0,190	20,613990	0,72993790E+06	0,380	1377,2413
0,903	0,200	20,677682	0,73219331E+06	0,400	1381,4970
0,907	0,210	20,739700	0,73438931E+06	0,420	1385,6402
0,910	0,220	20,800180	0,73653090E+06	0,440	1389,6810
0,914	0,230	20,859252	0,73862270E+06	0,460	1393,6280
0,917	0,240	20,917040	0,74066890E+06	0,480	1397,4890
0,920	0,250	20,973640	0,74267310E+06	0,500	1401,2700
0,924	0,260	21,029150	0,74463862E+06	0,520	1404,9790
0,927	0,270	21,083652	0,74656870E+06	0,540	1408,6202
0,930	0,280	21,137230	0,74846581E+06	0,560	1412,2000
0,933	0,290	21,189952	0,75033270E+06	0,580	1415,7221
0,936	0,300	21,241884	0,75217162E+06	0,600	1419,1920
0,939	0,310	21,293090	0,75398481E+06	0,620	1422,6130
0,942	0,320	21,343630	0,75577431E+06	0,640	1425,9893
0,945	0,330	21,393550	0,75754200E+06	0,660	1429,3250
0,948	0,340	21,442903	0,75928970E+06	0,680	1432,6220
0,950	0,350	21,491741	0,76101900E+06	0,700	1435,8850
0,953	0,360	21,540110	0,76273180E+06	0,720	1439,1170
0,956	0,370	21,588050	0,76442924E+06	0,740	1442,3194
0,959	0,380	21,635602	0,76611320E+06	0,760	1445,4970
0,961	0,390	21,682813	0,76778490E+06	0,780	1448,6510
0,964	0,400	21,729720	0,76944570E+06	0,800	1451,7844

## Annexes

0,967	0,410	21,776353	0,77109710E+06	0,820	1454,9001
0,969	0,420	21,822760	0,77274030E+06	0,840	1458,0010
0,972	0,430	21,868970	0,77437662E+06	0,860	1461,0880
0,975	0,440	21,915030	0,77600750E+06	0,880	1464,1651
0,977	0,450	21,960960	0,77763400E+06	0,900	1467,2340
0,980	0,460	22,006811	0,77925760E+06	0,920	1470,2973
0,983	0,470	22,052614	0,78087943E+06	0,940	1473,3580
0,985	0,480	22,098410	0,78250090E+06	0,960	1476,4170
0,988	0,490	22,144220	0,78412320E+06	0,980	1479,4780
0,991	0,500	22,190101	0,78574781E+06	1,000	1482,5430
0,993	0,510	22,236083	0,78737610E+06	1,020	1485,6152
0,996	0,520	22,282210	0,78900931E+06	1,040	1488,6970
0,999	0,530	22,328520	0,79064910E+06	1,060	1491,7910
1,001	0,540	22,375050	0,79229681E+06	1,080	1494,9000
1,004	0,550	22,421850	0,79395400E+06	1,100	1498,0264
1,007	0,560	22,468970	0,79562243E+06	1,120	1501,1744
1,010	0,570	22,516450	0,79730381E+06	1,140	1504,3470
1,012	0,580	22,564350	0,79899981E+06	1,160	1507,5470
1,015	0,590	22,612714	0,80071250E+06	1,180	1510,7784
1,018	0,600	22,661610	0,80244374E+06	1,200	1514,0450
1,021	0,610	22,711090	0,80419590E+06	1,220	1517,3510
1,024	0,620	22,761222	0,80597112E+06	1,240	1520,7003
1,027	0,630	22,812074	0,80777180E+06	1,260	1524,0980
1,030	0,640	22,863730	0,80960080E+06	1,280	1527,5490
1,033	0,650	22,916252	0,81146070E+06	1,300	1531,0580
1,036	0,660	22,969743	0,81335481E+06	1,320	1534,6320
1,039	0,670	23,024300	0,81528660E+06	1,340	1538,2770
1,042	0,680	23,080010	0,81725940E+06	1,360	1541,9990
1,045	0,690	23,137000	0,81927731E+06	1,380	1545,8062
1,049	0,700	23,195390	0,82134490E+06	1,400	1549,7073
1,052	0,710	23,255310	0,82346662E+06	1,420	1553,7110
1,056	0,720	23,316913	0,82564810E+06	1,440	1557,8270
1,060	0,730	23,380370	0,82789500E+06	1,460	1562,0661
1,063	0,740	23,445860	0,83021393E+06	1,480	1566,4420
1,067	0,750	23,513584	0,83261220E+06	1,500	1570,9664
1,071	0,760	23,583780	0,83509781E+06	1,520	1575,6563
1,075	0,770	23,656703	0,83767993E+06	1,540	1580,5283
1,080	0,780	23,732641	0,84036893E+06	1,560	1585,6020
1,084	0,790	23,811923	0,84317631E+06	1,580	1590,8990
1,089	0,800	23,894930	0,84611550E+06	1,600	1596,4444
1,094	0,810	23,982080	0,84920140E+06	1,620	1602,2670
1,100	0,820	24,073863	0,85245150E+06	1,640	1608,3991
1,105	0,830	24,170854	0,85588600E+06	1,660	1614,8792
1,111	0,840	24,273710	0,85952793E+06	1,680	1621,7510
1,117	0,850	24,383190	0,86340462E+06	1,700	1629,0654
1,124	0,860	24,500192	0,86754774E+06	1,720	1636,8830
1,131	0,870	24,625800	0,87199543E+06	1,740	1645,2750
1,139	0,880	24,761280	0,87679281E+06	1,760	1654,3261

## Annexes

1,148	0,890	24,908163	0,88199393E+06	1,780	1664,1400
1,157	0,900	25,068300	0,88766430E+06	1,800	1674,8382
1,167	0,910	25,243980	0,89388510E+06	1,820	1686,5760
1,178	0,920	25,438013	0,90075581E+06	1,840	1699,5393
1,191	0,930	25,653950	0,90840200E+06	1,860	1713,9661
1,205	0,940	25,896284	0,91698312E+06	1,880	1730,1570
1,221	0,950	26,170840	0,92670500E+06	1,900	1748,5001
1,239	0,960	26,485240	0,93783790E+06	1,920	1769,5054
1,260	0,970	26,849790	0,95074670E+06	1,940	1793,8620
1,285	0,980	27,278540	0,96592850E+06	1,960	1822,5070
1,314	0,990	27,791440	0,98409040E+06	1,980	1856,7744

### Annexe C-3 : Cis-dichloroéthène, température = 24°C.

T (m charge/ m requise pour saturer CAG)	C/C <sub>0</sub>	Temps (jours)	Volume du charge dans le lit, FED	C(µg/L)	qté d'air traité en L/ g de charbon
0,777	0,010	16,840503	0,59631950E+06	0,020	1125,1312
0,795	0,020	17,165603	0,60783120E+06	0,040	1146,8513
0,808	0,030	17,397670	0,61604850E+06	0,060	1162,3560
0,818	0,040	17,584750	0,62267300E+06	0,080	1174,8550
0,827	0,050	17,744370	0,62832520E+06	0,100	1185,5192
0,835	0,060	17,885160	0,63331050E+06	0,120	1194,9260
0,842	0,070	18,012090	0,63780512E+06	0,140	1203,4060
0,848	0,080	18,128320	0,64192070E+06	0,160	1211,1711
0,854	0,090	18,235992	0,64573350E+06	0,180	1218,3651
0,860	0,100	18,336652	0,64929781E+06	0,200	1225,0903
0,865	0,110	18,431440	0,65265424E+06	0,220	1231,4232
0,870	0,120	18,521230	0,65583370E+06	0,240	1237,4221
0,875	0,130	18,606710	0,65886043E+06	0,260	1243,1330
0,879	0,140	18,688430	0,66175412E+06	0,280	1248,5930
0,884	0,150	18,766840	0,66453070E+06	0,300	1253,8320
0,888	0,160	18,842320	0,66720331E+06	0,320	1258,8742
0,892	0,170	18,915172	0,66978320E+06	0,340	1263,7420
0,896	0,180	18,985680	0,67227962E+06	0,360	1268,4521
0,900	0,190	19,054050	0,67470081E+06	0,380	1273,0210
0,903	0,200	19,120500	0,67705381E+06	0,400	1277,4600
0,907	0,210	19,185200	0,67934462E+06	0,420	1281,7823
0,910	0,220	19,248290	0,68157874E+06	0,440	1285,9980
0,914	0,230	19,309920	0,68376093E+06	0,460	1290,1150
0,917	0,240	19,370200	0,68589560E+06	0,480	1294,1430
0,920	0,250	19,429244	0,68798640E+06	0,500	1298,0880
0,924	0,260	19,487152	0,69003690E+06	0,520	1301,9564
0,927	0,270	19,544013	0,69205024E+06	0,540	1305,7552
0,930	0,280	19,599903	0,69402940E+06	0,560	1309,4900
0,933	0,290	19,654910	0,69597693E+06	0,580	1313,1640

## Annexes

0,936	0,300	19,709081	0,69789531E+06	0,600	1316,7840
0,939	0,310	19,762500	0,69978690E+06	0,620	1320,3530
0,942	0,320	19,815220	0,70165370E+06	0,640	1323,8750
0,945	0,330	19,867300	0,70349770E+06	0,660	1327,3542
0,948	0,340	19,918790	0,70532093E+06	0,680	1330,7943
0,950	0,350	19,969734	0,70712500E+06	0,700	1334,1982
0,953	0,360	20,020193	0,70891180E+06	0,720	1337,5694
0,956	0,370	20,070203	0,71068262E+06	0,740	1340,9110
0,959	0,380	20,119813	0,71243924E+06	0,760	1344,2250
0,961	0,390	20,169063	0,71418320E+06	0,780	1347,5160
0,964	0,400	20,217992	0,71591581E+06	0,800	1350,7850
0,967	0,410	20,266643	0,71763850E+06	0,820	1354,0350
0,969	0,420	20,315053	0,71935270E+06	0,840	1357,2692
0,972	0,430	20,363264	0,72105981E+06	0,860	1360,4902
0,975	0,440	20,411310	0,72276110E+06	0,880	1363,7001
0,977	0,450	20,459230	0,72445790E+06	0,900	1366,9020
0,980	0,460	20,507060	0,72615162E+06	0,920	1370,0980
0,983	0,470	20,554841	0,72784360E+06	0,940	1373,2900
0,985	0,480	20,602611	0,72953510E+06	0,960	1376,4813
0,988	0,490	20,650410	0,73122750E+06	0,980	1379,6750
0,991	0,500	20,698270	0,73292240E+06	1,000	1382,8724
0,993	0,510	20,746240	0,73462093E+06	1,020	1386,0772
0,996	0,520	20,794360	0,73632474E+06	1,040	1389,2921
0,999	0,530	20,842664	0,73803531E+06	1,060	1392,5200
1,001	0,540	20,891210	0,73975430E+06	1,080	1395,7630
1,004	0,550	20,940032	0,74148310E+06	1,100	1399,0250
1,007	0,560	20,989190	0,74322362E+06	1,120	1402,3090
1,010	0,570	21,038721	0,74497762E+06	1,140	1405,6182
1,012	0,580	21,088690	0,74674693E+06	1,160	1408,9570
1,015	0,590	21,139142	0,74853360E+06	1,180	1412,3280
1,018	0,600	21,190150	0,75033970E+06	1,200	1415,7353
1,021	0,610	21,241770	0,75216750E+06	1,220	1419,1840
1,024	0,620	21,294070	0,75401943E+06	1,240	1422,6782
1,027	0,630	21,347120	0,75589793E+06	1,260	1426,2230
1,030	0,640	21,401000	0,75780590E+06	1,280	1429,8230
1,033	0,650	21,455800	0,75974624E+06	1,300	1433,4840
1,036	0,660	21,511600	0,76172220E+06	1,320	1437,2120
1,039	0,670	21,568510	0,76373740E+06	1,340	1441,0140
1,042	0,680	21,626630	0,76579543E+06	1,360	1444,8970
1,045	0,690	21,686082	0,76790062E+06	1,380	1448,8691
1,049	0,700	21,746992	0,77005743E+06	1,400	1452,9390
1,052	0,710	21,809503	0,77227093E+06	1,420	1457,1151
1,056	0,720	21,873770	0,77454660E+06	1,440	1461,4090
1,060	0,730	21,939970	0,77689062E+06	1,460	1465,8314
1,063	0,740	22,008290	0,77930980E+06	1,480	1470,3960
1,067	0,750	22,078940	0,78181162E+06	1,500	1475,1163
1,071	0,760	22,152170	0,78440470E+06	1,520	1480,0090
1,075	0,770	22,228240	0,78709840E+06	1,540	1485,0913

## Annexes

1,080	0,780	22,307460	0,78990350E+06	1,560	1490,3840
1,084	0,790	22,390171	0,79283230E+06	1,580	1495,9100
1,089	0,800	22,476762	0,79589843E+06	1,600	1501,6951
1,094	0,810	22,567680	0,79911770E+06	1,620	1507,7692
1,100	0,820	22,663430	0,80250824E+06	1,640	1514,1670
1,105	0,830	22,764614	0,80609120E+06	1,660	1520,9270
1,111	0,840	22,871904	0,80989040E+06	1,680	1528,0950
1,117	0,850	22,986120	0,81393460E+06	1,700	1535,7260
1,124	0,860	23,108180	0,81825681E+06	1,720	1543,8810
1,131	0,870	23,239212	0,82289662E+06	1,740	1552,6352
1,139	0,880	23,380550	0,82790131E+06	1,760	1562,0780
1,148	0,890	23,533780	0,83332712E+06	1,780	1572,3154
1,157	0,900	23,700832	0,83924260E+06	1,800	1583,4770
1,167	0,910	23,884103	0,84573220E+06	1,820	1595,7211
1,178	0,920	24,086523	0,85289981E+06	1,840	1609,2450
1,191	0,930	24,311790	0,86087640E+06	1,860	1624,2951
1,205	0,940	24,564594	0,86982824E+06	1,880	1641,1854
1,221	0,950	24,851010	0,87997012E+06	1,900	1660,3210
1,239	0,960	25,179000	0,89158420E+06	1,920	1682,2343
1,260	0,970	25,559301	0,90505062E+06	1,940	1707,6430
1,285	0,980	26,006572	0,92088843E+06	1,960	1737,5253
1,314	0,990	26,541640	0,93983510E+06	1,980	1773,2740

**Annexe D : Les résultats des variations de vitesse.****Annexe D-1: Cis-dichloroéthène, vitesse superficielle de l'air=25 cm/s, Voir Annexe B-1****Annexe D-2 : Cis-dichloroéthène, vitesse superficielle de l'air = 50 cm/s.**

T (m charge/ m requise pour saturer CAG)	C/C <sub>0</sub>	Temps (jours)	Volume du charge dans le lit,BVF	C(µg/L)	qté d'air traité en L/ g de charbon
0,777	0,010	20,544950	0,72749320E+06	0,020	1372,6290
0,795	0,020	20,766172	0,73532680E+06	0,040	1387,4090
0,808	0,030	20,924090	0,74091850E+06	0,060	1397,9594
0,818	0,040	21,051400	0,74542643E+06	0,080	1406,4650
0,827	0,050	21,160020	0,74927270E+06	0,100	1413,7221
0,835	0,060	21,255823	0,75266520E+06	0,120	1420,1230
0,842	0,070	21,342200	0,75572370E+06	0,140	1425,8940
0,848	0,080	21,421290	0,75852431E+06	0,160	1431,1780
0,854	0,090	21,494560	0,76111890E+06	0,180	1436,0734
0,860	0,100	21,563060	0,76354440E+06	0,200	1440,6500
0,865	0,110	21,627561	0,76582840E+06	0,220	1444,9592
0,870	0,120	21,688661	0,76799190E+06	0,240	1449,0413
0,875	0,130	21,746830	0,77005160E+06	0,260	1452,9280
0,879	0,140	21,802440	0,77202070E+06	0,280	1456,6430
0,884	0,150	21,855794	0,77391012E+06	0,300	1460,2080
0,888	0,160	21,907160	0,77572881E+06	0,320	1463,6394
0,892	0,170	21,956740	0,77748440E+06	0,340	1466,9520
0,896	0,180	22,004711	0,77918320E+06	0,360	1470,1570
0,900	0,190	22,051240	0,78083081E+06	0,380	1473,2660
0,903	0,200	22,096460	0,78243193E+06	0,400	1476,2870
0,907	0,210	22,140481	0,78399081E+06	0,420	1479,2280
0,910	0,220	22,183420	0,78551112E+06	0,440	1482,0970
0,914	0,230	22,225353	0,78699612E+06	0,460	1484,8984
0,917	0,240	22,266374	0,78844870E+06	0,480	1487,6391
0,920	0,250	22,306554	0,78987143E+06	0,500	1490,3240
0,924	0,260	22,345960	0,79126681E+06	0,520	1492,9562
0,927	0,270	22,384653	0,79263690E+06	0,540	1495,5413
0,930	0,280	22,422690	0,79398370E+06	0,560	1498,0830
0,933	0,290	22,460113	0,79530893E+06	0,580	1500,5830
0,936	0,300	22,496980	0,79661440E+06	0,600	1503,0460
0,939	0,310	22,533332	0,79790160E+06	0,620	1505,4750
0,942	0,320	22,569210	0,79917190E+06	0,640	1507,8720
0,945	0,330	22,604644	0,80042670E+06	0,660	1510,2391
0,948	0,340	22,639682	0,80166743E+06	0,680	1512,5802
0,950	0,350	22,674350	0,80289510E+06	0,700	1514,8964
0,953	0,360	22,708690	0,80411093E+06	0,720	1517,1910
0,956	0,370	22,742720	0,80531600E+06	0,740	1519,4642
0,959	0,380	22,776480	0,80651131E+06	0,760	1521,7194
0,961	0,390	22,809993	0,80769812E+06	0,780	1523,9590
0,964	0,400	22,843290	0,80887710E+06	0,800	1526,1832

## Annexes

0,967	0,410	22,876400	0,81004943E+06	0,820	1528,3952
0,969	0,420	22,909340	0,81121593E+06	0,840	1530,5961
0,972	0,430	22,942144	0,81237760E+06	0,860	1532,7880
0,975	0,440	22,974840	0,81353531E+06	0,880	1534,9724
0,977	0,450	23,007450	0,81468993E+06	0,900	1537,1510
0,980	0,460	23,040000	0,81584243E+06	0,920	1539,3254
0,983	0,470	23,072511	0,81699390E+06	0,940	1541,4980
0,985	0,480	23,105020	0,81814490E+06	0,960	1543,6700
0,988	0,490	23,137542	0,81929660E+06	0,980	1545,8430
0,991	0,500	23,170112	0,82044981E+06	1,000	1548,0190
0,993	0,510	23,202760	0,82160574E+06	1,020	1550,2000
0,996	0,520	23,235500	0,82276512E+06	1,040	1552,3870
0,999	0,530	23,268373	0,82392924E+06	1,060	1554,5840
1,001	0,540	23,301404	0,82509893E+06	1,080	1556,7910
1,004	0,550	23,334630	0,82627540E+06	1,100	1559,0102
1,007	0,560	23,368080	0,82745980E+06	1,120	1561,2450
1,010	0,570	23,401784	0,82865331E+06	1,140	1563,4970
1,012	0,580	23,435790	0,82985731E+06	1,160	1565,7690
1,015	0,590	23,470123	0,83107320E+06	1,180	1568,0630
1,018	0,600	23,504831	0,83230220E+06	1,200	1570,3820
1,021	0,610	23,539960	0,83354600E+06	1,220	1572,7283
1,024	0,620	23,575544	0,83480620E+06	1,240	1575,1060
1,027	0,630	23,611644	0,83608443E+06	1,260	1577,5180
1,030	0,640	23,648313	0,83738290E+06	1,280	1579,9680
1,033	0,650	23,685600	0,83870330E+06	1,300	1582,4591
1,036	0,660	23,723573	0,84004781E+06	1,320	1584,9960
1,039	0,670	23,762302	0,84141920E+06	1,340	1587,5834
1,042	0,680	23,801850	0,84281960E+06	1,360	1590,2260
1,045	0,690	23,842310	0,84425212E+06	1,380	1592,9290
1,049	0,700	23,883760	0,84571990E+06	1,400	1595,6980
1,052	0,710	23,926294	0,84722612E+06	1,420	1598,5400
1,056	0,720	23,970024	0,84877462E+06	1,440	1601,4620
1,060	0,730	24,015073	0,85036981E+06	1,460	1604,4714
1,063	0,740	24,061563	0,85201600E+06	1,480	1607,5773
1,067	0,750	24,109643	0,85371850E+06	1,500	1610,7900
1,071	0,760	24,159480	0,85548310E+06	1,520	1614,1190
1,075	0,770	24,211240	0,85731610E+06	1,540	1617,5780
1,080	0,780	24,265150	0,85922490E+06	1,560	1621,1790
1,084	0,790	24,321432	0,86121793E+06	1,580	1624,9400
1,089	0,800	24,380353	0,86330431E+06	1,600	1628,8760
1,094	0,810	24,442220	0,86549500E+06	1,620	1633,0100
1,100	0,820	24,507381	0,86780231E+06	1,640	1637,3630
1,105	0,830	24,576234	0,87024040E+06	1,660	1641,9630
1,111	0,840	24,649250	0,87282574E+06	1,680	1646,8411
1,117	0,850	24,726970	0,87557781E+06	1,700	1652,0340
1,124	0,860	24,810030	0,87851900E+06	1,720	1657,5831
1,131	0,870	24,899194	0,88167640E+06	1,740	1663,5404
1,139	0,880	24,995372	0,88508200E+06	1,760	1669,9661

**Annexes**

1,148	0,890	25,099641	0,88877420E+06	1,780	1676,9324
1,157	0,900	25,213321	0,89279960E+06	1,800	1684,5280
1,167	0,910	25,338033	0,89721562E+06	1,820	1692,8600
1,178	0,920	25,475780	0,90209312E+06	1,840	1702,0630
1,191	0,930	25,629070	0,90752112E+06	1,860	1712,3040
1,205	0,940	25,801101	0,91361280E+06	1,880	1723,7980
1,221	0,950	25,996004	0,92051420E+06	1,900	1736,8193
1,239	0,960	26,219194	0,92841740E+06	1,920	1751,7310
1,260	0,970	26,477990	0,93758130E+06	1,940	1769,0213
1,285	0,980	26,782350	0,94835862E+06	1,960	1789,3560
1,314	0,990	27,146460	0,96125160E+06	1,980	1813,6822

**Annexe D-3 : Cis-dichloroéthane, vitesse superficielle de l'air = 70 cm/s.**

<b>T (m charge/ m requise pour saturer CAG)</b>	<b>C/C<sub>0</sub></b>	<b>Temps (jours)</b>	<b>Volume du charge dans le lit,BVF</b>	<b>C(µg/L)</b>	<b>qté d'air traité en L/ g de charbon</b>
0,777	0,010	20,918890	0,74073440E+06	0,020	1397,6120
0,795	0,020	21,109912	0,74749860E+06	0,040	1410,3750
0,808	0,030	21,246270	0,75232693E+06	0,060	1419,4850
0,818	0,040	21,356200	0,75621943E+06	0,080	1426,8292
0,827	0,050	21,449990	0,75954060E+06	0,100	1433,0954
0,835	0,060	21,532720	0,76246993E+06	0,120	1438,6230
0,842	0,070	21,607300	0,76511090E+06	0,140	1443,6054
0,848	0,080	21,675592	0,76752920E+06	0,160	1448,1683
0,854	0,090	21,738861	0,76976950E+06	0,180	1452,3953
0,860	0,100	21,798010	0,77186390E+06	0,200	1456,3470
0,865	0,110	21,853704	0,77383610E+06	0,220	1460,0681
0,870	0,120	21,906463	0,77570431E+06	0,240	1463,5931
0,875	0,130	21,956690	0,77748274E+06	0,260	1466,9490
0,879	0,140	22,004710	0,77918310E+06	0,280	1470,1570
0,884	0,150	22,050781	0,78081450E+06	0,300	1473,2350
0,888	0,160	22,095130	0,78238493E+06	0,320	1476,1981
0,892	0,170	22,137941	0,78390081E+06	0,340	1479,0582
0,896	0,180	22,179370	0,78536774E+06	0,360	1481,8260
0,900	0,190	22,219550	0,78679043E+06	0,380	1484,5103
0,903	0,200	22,258590	0,78817293E+06	0,400	1487,1190
0,907	0,210	22,296604	0,78951910E+06	0,420	1489,6590
0,910	0,220	22,333680	0,79083181E+06	0,440	1492,1360
0,914	0,230	22,369890	0,79211410E+06	0,460	1494,5550
0,917	0,240	22,405310	0,79336824E+06	0,480	1496,9212
0,920	0,250	22,440004	0,79459681E+06	0,500	1499,2393
0,924	0,260	22,474030	0,79580162E+06	0,520	1501,5130
0,927	0,270	22,507440	0,79698470E+06	0,540	1503,7450
0,930	0,280	22,540281	0,79814762E+06	0,560	1505,9390
0,933	0,290	22,572600	0,79929200E+06	0,580	1508,0981

## Annexes

0,936	0,300	22,604433	0,80041930E+06	0,600	1510,2250
0,939	0,310	22,635820	0,80153070E+06	0,620	1512,3221
0,942	0,320	22,666800	0,80262760E+06	0,640	1514,3920
0,945	0,330	22,697400	0,80371112E+06	0,660	1516,4361
0,948	0,340	22,727653	0,80478243E+06	0,680	1518,4580
0,950	0,350	22,757590	0,80584250E+06	0,700	1520,4580
0,953	0,360	22,787240	0,80689231E+06	0,720	1522,4383
0,956	0,370	22,816623	0,80793290E+06	0,740	1524,4020
0,959	0,380	22,845773	0,80896510E+06	0,760	1526,3492
0,961	0,390	22,874711	0,80998981E+06	0,780	1528,2830
0,964	0,400	22,903463	0,81100790E+06	0,800	1530,2040
0,967	0,410	22,932050	0,81202012E+06	0,820	1532,1140
0,969	0,420	22,960494	0,81302740E+06	0,840	1534,0140
0,972	0,430	22,988821	0,81403040E+06	0,860	1535,9064
0,975	0,440	23,017060	0,81503012E+06	0,880	1537,7930
0,977	0,450	23,045210	0,81602710E+06	0,900	1539,6740
0,980	0,460	23,073314	0,81702231E+06	0,920	1541,5520
0,983	0,470	23,101390	0,81801643E+06	0,940	1543,4273
0,985	0,480	23,129460	0,81901040E+06	0,960	1545,3030
0,988	0,490	23,157543	0,82000481E+06	0,980	1547,1790
0,991	0,500	23,185670	0,82100070E+06	1,000	1549,0580
0,993	0,510	23,213860	0,82199881E+06	1,020	1550,9412
0,996	0,520	23,242130	0,82299993E+06	1,040	1552,8302
0,999	0,530	23,270513	0,82400500E+06	1,060	1554,7264
1,001	0,540	23,299040	0,82501510E+06	1,080	1556,6323
1,004	0,550	23,327730	0,82603093E+06	1,100	1558,5490
1,007	0,560	23,356610	0,82705362E+06	1,120	1560,4790
1,010	0,570	23,385711	0,82808420E+06	1,140	1562,4230
1,012	0,580	23,415071	0,82912381E+06	1,160	1564,3850
1,015	0,590	23,444721	0,83017370E+06	1,180	1566,3654
1,018	0,600	23,474691	0,83123493E+06	1,200	1568,3680
1,021	0,610	23,505022	0,83230893E+06	1,220	1570,3942
1,024	0,620	23,535753	0,83339712E+06	1,240	1572,4480
1,027	0,630	23,566930	0,83450090E+06	1,260	1574,5300
1,030	0,640	23,598583	0,83562193E+06	1,280	1576,6452
1,033	0,650	23,630783	0,83676212E+06	1,300	1578,7970
1,036	0,660	23,663572	0,83792320E+06	1,320	1580,9871
1,039	0,670	23,697010	0,83910724E+06	1,340	1583,2213
1,042	0,680	23,731163	0,84031660E+06	1,360	1585,5030
1,045	0,690	23,766094	0,84155350E+06	1,380	1587,8370
1,049	0,700	23,801890	0,84282081E+06	1,400	1590,2280
1,052	0,710	23,838620	0,84412150E+06	1,420	1592,6821
1,056	0,720	23,876380	0,84545862E+06	1,440	1595,2050
1,060	0,730	23,915280	0,84683593E+06	1,460	1597,8040
1,063	0,740	23,955420	0,84825743E+06	1,480	1600,4860
1,067	0,750	23,996934	0,84972750E+06	1,500	1603,2600
1,071	0,760	24,039962	0,85125112E+06	1,520	1606,1342
1,075	0,770	24,084663	0,85283393E+06	1,540	1609,1210

## Annexes

1,080	0,780	24,131210	0,85448212E+06	1,560	1612,2304
1,084	0,790	24,179810	0,85620310E+06	1,580	1615,4780
1,089	0,800	24,230690	0,85800470E+06	1,600	1618,8770
1,094	0,810	24,284110	0,85989631E+06	1,620	1622,4460
1,100	0,820	24,340372	0,86188860E+06	1,640	1626,2050
1,105	0,830	24,399830	0,86399381E+06	1,660	1630,1771
1,111	0,840	24,462871	0,86622630E+06	1,680	1634,3892
1,117	0,850	24,529980	0,86860260E+06	1,700	1638,8730
1,124	0,860	24,601703	0,87114224E+06	1,720	1643,6650
1,131	0,870	24,678700	0,87386862E+06	1,740	1648,8090
1,139	0,880	24,761743	0,87680924E+06	1,760	1654,3571
1,148	0,890	24,851780	0,87999743E+06	1,780	1660,3730
1,157	0,900	24,949940	0,88347320E+06	1,800	1666,9310
1,167	0,910	25,057630	0,88728650E+06	1,820	1674,1260
1,178	0,920	25,176570	0,89149800E+06	1,840	1682,0720
1,191	0,930	25,308930	0,89618510E+06	1,860	1690,9152
1,205	0,940	25,457480	0,90144500E+06	1,880	1700,8400
1,221	0,950	25,625770	0,90740431E+06	1,900	1712,0840
1,239	0,960	25,818492	0,91422860E+06	1,920	1724,9600
1,260	0,970	26,041954	0,92214131E+06	1,940	1739,8894
1,285	0,980	26,304770	0,93144743E+06	1,960	1757,4481
1,314	0,990	26,619170	0,94258024E+06	1,980	1778,4533

**Annexe E : Les valeurs de K et 1/N obtenus par simulation**

COMPOUND - CIS-DICHLOROETHENE

THE ANTOINES EQTN, A IS ..... 7,02  
 THE ANTOINES EQTN, B IS ..... 1205,40  
 THE ANTOINES EQTN, C IS ..... 230,60  
 THE VALUE OF BETA IS ..... 0,64920  
 THE LIQUID DENSITY IN G/CC IS ..... 1,28000  
 THE MOLECULAR WEIGHT IS 96,95  
 THE SYSTEM PRESSURE IN MM HG IS ..... 760,00  
 THE SYSTEM TEMPERATURE IN DEG C IS ..... 22,40  
 INLET GAS CONCENTRATION IN UG/L IS ..... 0,20000E+01

CONC UG/L	Q0 UMOL/GRAM	N	SPREADING PRESSURE
0,10010E+00	0,46460E+01	0,11248E+01	0,48890E+01
0,11001E+01	0,33408E+02	0,13210E+01	0,40703E+02
0,21001E+01	0,33408E+02	0,13210E+01	0,40703E+02

THE SPREADING PRESSURE IS .....0,40703E+02  
**THE VALUE OF 1/N IS .....0,82078E+00**  
**THE VALUE OF XK IS.....0,77602E+03**

LOWER CONCENTRATION BOUNDS IS ..... 0,19990E+01 UG/L  
 D-R PREDICTED LOADING IN UMOL/G IS .....0,52011E+02  
 FREUNDLICH LOADING IN UMOL/G IS .....0,32095E+02

UPPER CONCENTRATION BOUNDS IS .....0,20010E+01 UG/L  
 D-R PREDICTED LOADING IN UMOL/G IS .....0,52011E+02  
 FREUNDLICH LOADING IN UMOL/G IS .....0,32095E+02

## Annexe F : Paramètres physico-chimiques des COV.

APPENDIX 16. Chemical and Physical Constants for Commonly Found VOCs.

Table A16-1. Physical and Chemical Parameters Which are Required to Determine Isotherm Capacity

Compound	Antoine's Constants A	Antoine's Constants B	Antoine's Constants C	Molecular Weight	Density [20 deg C] [g/cc]	Normal Boiling Point [deg C]	Refractive Index [25 deg C]	Affinity Coefficient	Molal Volume [M <sup>3</sup> /kgmol]
Trichloroethylene	7.72	1742.0	273.0	131.39	1.464	87.0	1.4773	0.8169	0.1073
Tetrachloroethylene	6.98	1386.9	217.5	165.83	1.631	121.2	1.5053	0.9716	0.1280
Carbon Tetrachloride	6.88	1212.0	226.4	153.82	1.590	76.7	1.4601	0.8534	0.1132
1,1,1 - Trichloroethane	8.64	2136.6	302.8	133.41	1.339	74.0	1.4379	0.8421	0.1145
1,2 - Dichloroethane	7.02	1271.3	222.9	98.96	1.235	83.5	1.4448	0.6864	0.0936
Vinyl Chloride	39.32	10698.0	273.0	62.5	0.911	-13.9	1.3700	0.5000	0.0653
Dichloroethane	7.41	1325.9	252.6	84.93	1.327	41.0	1.4242	0.5263	0.0505
1,1 - Dichloroethane	6.97	1099.4	237.2	96.95	1.218	37.0	1.4249	0.6353	0.0862
cis 1,2 - Dichloroethane	7.02	1205.4	230.6	96.95	1.280	60.0	1.4454	0.6492	0.0862
Benzene	6.90	1211.0	220.8	78.11	0.879	80.1	1.5011	0.8432	0.0960
Toluene	6.95	1344.8	219.5	92.14	0.867	110.6	1.4961	1.0000	0.1182
m - Xylene	7.01	1462.2	215.1	106.17	0.864	139.0	1.4972	1.1583	0.1404
Chlorobenzene	6.98	1431.0	217.6	112.56	1.106	132.0	1.5241	1.0029	0.1169
1,2 - Dichlorobenzene	7.14	1704.5	219.4	147.0	1.306	180.4	1.5515	1.1573	0.1378

Antoine's Equation Vapor Pressure (mm Hg) = 10.0 \* e<sup>(A - B / (T + C))</sup> (Temperature in deg C)

References: Antoine's Equation Constants, Boiling Point, Density - Langes, 'Handbook of Chemistry' Refractive Index - CRC Handbook 61 st Edition  
 MTU Henry's Constant Data in Paper by Head, Crittenden, and Gehin (1985)