

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**UNIVERSITÉ de BLIDA 1**

**Faculté de Technologie  
Département de Génie des Procédés**



# **Mémoire**

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER EN GENIE DES PROCEDES**

**Spécialité : Génie Chimique**

## **Synthèse et Application des MBenes et MXenes dans l'adsorption du Bleu de Méthylène.**

Présenté par :

Belmadi Amira Souha

Mekchouche Abir

Encadré par :

Pr. Bouras Omar

Co-promotrice :

Mme. Benomar Hiba

Année universitaire :

2021-2022

## **REMERCIEMENT**

Tout d'abord , on tient à remercier le bon dieu le tout puissant de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce travail , également on remercie infiniment nos parents , qui nous ont encouragé et aidé à arriver à ces stade d'étude .

Ce travail a été réalisé dans le laboratoire 126 au niveau de département de génie des procédés de l'université Saad Dahleb à Blida.

Nous tenons à remercier particulièrement notre encadreur professeur Bouras Omar pour avoir proposé le sujet et dirigé ce travail, il a toujours par sa modestie été à l'écoute ; très disponible qu'il veuille trouver ici l'expression de ma sincère gratitude pour ces conseils, sa gentillesse et sa patience son encouragement durant la réalisation de ce mémoire ainsi pour le temps précieux qu'il a bien voulu nous consacrer et sans lui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Nous nous remercions également :

Madame Benamor Hiba pour son aides dans notre travail au laboratoire et tous ceux qui nous ont aidé et soutenus pendant l'accomplissement de ce travail

Nous tenons à remercier très vivement :

Mr nabil et notre amies Bennoui Sid Ahmed pour leur aides

Et tous les enseignants de département de génie des procédés de l'université de Saad Dahleb Blida. A tous les membres des organismes extra- universitaire qui ont participé chacun pour sa part à la réalisation de ce mémoire.

Enfin, nous nous remercions, tous nos collègues, toutes les personnes qui nous ont encouragé et soutenu de près ou de loin durant la réalisation de ce travail.

Leur respecte leur esprit solidaire.

## *Dédicace*

Avec ma gratitude et tout mon amour je dédie ce modeste travail :

### **À ma très chère mère**

Quoi je fasse ou quoi je dise ,je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

### **À mon très cher père**

Tu as été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.

J'espère que cet acte humble vous rendra fier de votre fille. Que Dieu prolonge votre vie et que vous garde pour moi.

### **À ma grande sœur Kenza**

La plus gentille qui m'a soutenu dans mes moments de faiblesse. Je ne trouverai jamais les mots pour décrire ma gratitude pour ce que vous avez fait pour moi. Que Dieu te garde toujours à mes côtés.

### **À ma grande mère**

Qui m'encourage et qui a prié pour moi.

### **À ma petite sœur Ichrak**

Qui m'encourage et qui m'a soutenu .

### **À mes deux chats Bicha et Macha**

Qui sont restés éveillés avec moi les nuits et m'ont soutenu en étant à mes côtés.

### **À tous mes amies :**

Pour tous les instants passés, les fous-rire et le désespoir, la colère et la joie qui ont accompagné ce travail, et même pour sa simple présence.

*Belmadi Amira Souha*

## *Dédicaces*

Je voudrais dédier ce modeste travail à :

Mes parents, merci pour votre soutien, vos prières, votre bienveillance et votre présence qui sont la source de ma force pour affronter les obstacles.

Mes chères sœur Bouchra, Rihab et Sirine qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et me soutenir tout au long de mes études.

Merci aussi à tous mes collègues de la promo 2022 pour leurs encouragements et à tous ceux qui me sont chers.

**Mekchouche Abir**

## Résumé

Les matériaux bidimensionnels (MXene et MBene) ont été utilisés comme principaux adsorbants pour éliminer les colorants synthétiques des eaux usées dans cette étude nous sommes proposées d'appliquer le procédé d'adsorption de bleu de méthylène sur les MXene Cr<sub>2</sub>CTx et MBene CrB pour étudier les propriétés physico-chimiques des adsorbants utilisés nous avons effectué plusieurs caractérisation en utilisant la diffraction des rayons X et un analyseur de potentiel éta et nous avons fait la cinétique et la modélisation d'adsorption du bleu de méthylène pour voire l'évaluation de la capacité des matériaux étudiés à adsorber les colorants.

Les mots clés : Adsorption, MXene, MBene, Cr<sub>2</sub>CTx ,CrB , bleu de méthylène.

## Abstract

Two-dimensional materials (MXene and MBene) were used as the main adsorbents to remove synthetic dyes from wastewater in this study we proposed to apply the methylene blue adsorption process on MXene Cr<sub>2</sub>CTx and MBene CrB to study the physicochemical properties of the adsorbents used, we carried out several characterizations using X-ray diffraction and a zeta potential analyzer and we did the kinetics and the adsorption modeling of methylene blue to even assess the ability of the materials studied to adsorb dyes.

Keywords : Adsorption, MXene, MBene, Cr<sub>2</sub>CTx,CrB, Methylene blue.

## ملخص

تم استخدام المواد ثنائية الأبعاد (MXene و MBene) كمادة ماصة رئيسية لإزالة الأصباغ الاصطناعية من مياه الصرف الصحي في هذه الدراسة ، اقترحنا تطبيق عملية امتصاص الميثيلين الأزرق على MXene Cr<sub>2</sub>CTx و MBene CrB لدراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية للممتصات المستخدمة ، أجرينا العديد من التوصيفات باستخدام حيود الأشعة السينية ومحلل جهد زيتا وقمنا بعمل الحركية ونمذجة امتزاز الميثيلين الأزرق حتى لتقييم قدرة المواد المدروسة على امتصاص الأصباغ.

الكلمات الرئيسية: الامتزاز ، MXene ، MBene ، Cr<sub>2</sub>CTx ، CrB ، الميثيلين الأزرق.

## Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Table des matières	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction générale.....	1
<b>CHAPITRE 1 : Synthèse bibliographique</b>	
I.Partie I : Adsorption .....	4
I.1 Définition de l'adsorption.....	4
I.2 Types d'adsorption .....	4
I.2.1 Adsorption physique (ou physisorption).....	4
I.2.2 Adsorption chimique (ou chimisorption).....	4
I.3 Nature de l'adsorption.....	5
I.4 Mécanisme d'adsorption d'un colorant .....	6
I.5 Les facteurs influenÇent des paramètres d'adsorption .....	7
I.6 Domaine d'application de l'adsorption.....	7
I.7 les facteurs d'adsorption.....	8
I.7.1 les facteurs liés à l'adsorbant.....	8
I.7.2 les facteurs liés à l'adsorption .....	8
I.7.3 les facteurs extérieurs.....	8
I.8 Adsorbants le plus utilisés.....	8
I.9 Principaux adsorbants industriels.....	9

II .Partie II : Présentation générale des phases MAX et MAB.....	9
II.1 Introduction.....	9
II.2 Structure des phases MAX et MAB .....	10
II.2.1 Structure des phase MAX.....	10
II.2.2 Structure des phases MAB.....	13
II.3 Méthode d'élaboration des phases MAX et MAB.....	15
II.3.1 Méthodes conventionnelles (avec atmosphères contrôlés ).....	15
A.La technique« HP hot pressing».....	15
B.La technique SPS «spark plasma sintering».....	16
C.La technique HIP« hot isostatic pressing».....	16
II.3.2 Méthode de sel fondu.....	17
Partie III : Recherche Bibliographique sur les MXénes et MBénes.....	19
III.1 Définition des MXéns et MBénes .....	19
III.2 Propriétés de Cr <sub>2</sub> AlC.....	20
III.3 Application des MXénes dans l'environnement .....	21
III.4 Application des MXénes dans l'adsorption .....	21

## **CHAPITRE 2 : Partie expérimentale**

Introduction.....	24
I. Synthèse des phases MAX et MAB.....	24
I.1.Préparation de Cr <sub>2</sub> AlC.....	24
I.2.Préparation de Cr <sub>2</sub> AlB <sub>2</sub> .....	25
II. Synthèse des MXénes et MBénes.....	26
II.1. Préparation de Cr <sub>2</sub> CTx.....	26
II.2. Préparation de CrB.....	27
III. Préparation de colorant et la courbe d'étalonnage .....	30
IV. Caractérisation des MBénes .....	31
IV.1. Détermination de pH <sub>pz</sub> c .....	31

IV.2. Analyse par diffraction de rayon X (DRX).....	32
IV.3. spectrophotométrie d'adsorption UV-Visible.....	34
IV.4. . Étude par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier.....	35
V. Principaux facteurs influençant l'adsorption.....	36
V.1 Cinétiques d'adsorption de BM sur les MBènes.....	36
V.2 Isothermes d'adsorption.....	37
VI. Modélisation des cinétiques d'adsorption .....	38
VI.1 Modèle de pseudo premier ordre .....	38
VI.2 Modèle de pseudo second ordre .....	39
VII. Classification des isothermes d'adsorption.....	39
VIII. Modélisation des isothermes d'adsorption.....	40
VIII.1 Modèle de Freundlich.....	40
VIII.2 Modèle de Langmuir.....	41

### **CHAPITRE 3 : Résultats et discussions**

#### Introduction

#### I. Caractérisation des phases MAB et des MBènes

##### I.1 La diffraction des rayons X

##### I.1.1 La phase $\text{Cr}_2\text{AlB}_2$

#### I.3 Étude de l'adsorption du MB en system batch

Résultats de l'analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de fourier (IRTF).

Propriétés acido-basiques de surface (pHpzc).

#### I.4 Modélisation des cinétiques d'adsorption.

#### I.5 Modélisation des équilibres d'adsorption.

##### I.5.1 Isotherme de Langmuir.

##### I.5.2 Isotherme de Freundlich.

#### I.6 Conclusion général

## Liste des tableaux

**Tableau 1** : comparaison entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique.

**Tableau 2** : les propriétés de  $\text{Cr}_2\text{AlC}$  .

**Tableau 3** : conditions opératoires utilisées pour l'étude des cinétiques d'adsorption de BM.

**Tableau 4** : Experimental data de  $2 \Theta$ .

**Tableau 5** : Valeur expérimentale de  $\text{pH}_{\text{pzc}}$  de MBene.

**Tableau 6** : Paramètres cinétiques de l'adsorption de MB sur le MBene.

**Tableau 7** : Valeurs des coefficients de corrélation et les paramètres des modèles étudiés.

## Liste des figures

**Figure 1** : Schéma du mécanisme de transport d'un adsorbat au sein d'un grain.

**Figure 2** : Localisation dans le tableau périodique des éléments constitutifs des phases MAX et liste des différentes phases thermodynamiquement stables .

**Figure 3** : (a) Structures cristallines des phases MAX ou  $n=1, 2, \text{ ou } 3$ . Les atomes de l'élément M (en rouge), X (en noir) et A (en bleu). (b) L'empilement des couches atomiques des phases.

**Figure 4** : la structure orthorhombique.

**Figure 5** : La structure cristalline de la phase MAB.

**Figure 6** : Structure cristalline des phases MAB, (a) type MA1B, (b) type  $M_2AlB_2$ .

**Figure 7** : Récapitulatif simplifié de la méthode de synthèse par sels fondus protégés.

**Figure 8** : Photographie numérique montrant le mélange des poudres (Cr,Al,C).

**Figure 9** : Photographie numérique montrant la poudre de (MAB) compactée et encapsulée.

**Figure 10** : Illustration de la synthèse de MXéne type ( $Cr_2CT_x$ ).

**Figure 11** : Système de filtration.

**Figure 12** : Filtration de la solution.

**Figure 13** : MBéne après filtration.

**Figure 14** : Récupération de la poudre Mbéne du papier filtre.

**Figure 15** : Courbe d'étalonnage de bleu méthylène.

**Figure 16** : Schéma explicatif de la DRX présentant les différents angles pris en compte .

**Figure 17** : Diffractomètre de Rayons X, Panalytical X'pert Pro, D8, CRTI, Chéraga.

**Figure 18** : schéma représentatif du spectrophotomètre UV-Visible de type SHIMADZU-170.

**Figure 19** : Spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF).

**Figure 20** : secoueur.

**Figure 21** : Classification des isothermes d'adsorption selon Giles et al.

**Figure 22** : Diffractogramme des rayons X de la phase MAB.

**Figure 23 :** Cinétiques d'adsorption de colorant MB sur le charbon actif, le MBene, le MXene .

**Figure 24 :** Spectres IRTF de CrB.

**Figure 25 :** courbe de  $Q_S=f(\text{pH})$ .

**Figure 26 :** Modélisation de la cinétique par le modèle de Pseudo premier ordre pour le BM sur le MBene.

**Figure 27 :** Modélisation de la cinétique par le modèle de Pseudo-deuxième ordre pour le BM sur le MBène.

**Figure 28 :** Modélisation linéaire par le modèle de Langmuir de l'isotherme de l'isotherme de bleu de méthylène.

**Figure 29 :** Modélisation linéaire par le modèle de Freundlich de l'isotherme de bleu de méthylène.

## Introduction générale

L'adsorption est un phénomène physico-chimique d'interface, pouvant se manifester entre un solide et un gaz ou entre un solide et un liquide, c'est-à-dire entre l'adsorbat (soluté) et l'adsorbant (solide). C'est une opération physique de séparation des mélanges qui permet l'élimination d'une substance par une autre de la phase dans laquelle elle se trouve.

L'adsorption reste une technique relativement utilisée et facile à mettre en œuvre. L'application de la technique d'adsorption pour le traitement des colorants est très ancienne et reste la technique la plus répandue vue les avantages qu'elle présente par rapport aux autres techniques. Le charbon actif est l'adsorbant le plus utilisé en raison de sa grande capacité d'adsorption des matériaux organiques. Toutefois, il est confronté aux inconvénients liés au coût élevé et sa régénération difficile.

les céramiques et les métaux sont les matériaux les plus utilisés, Durant ces dernières années, les céramiques ternaires ont attirées une grande attention de la communauté scientifique, à cause de leurs grande résistance à l'usure et l'oxydation En revanche les céramiques présentent quelques désavantages tels que, la fragilité, la faible résistance au choc thermique, et surtout leur mauvaise usinabilité ce qui rend la fabrication des composants mécaniques avec une certaine complexité impossible.

Parmi ces céramiques on trouve les phases MAX et les phases MAB, qui sont des phases céramiques nano-lamellaires avec des propriétés intermédiaires entre celles des céramiques et celles des métaux Les phases MAB sont des borures ternaires, avec M : métal de transition, A : Al et B : Bore.

Ils présentent une combinaison de propriétés intéressantes comme : leur grand module de Young, leur conductivité thermique et électrique qui est proches de celle des métaux, résistants aux chocs thermiques, grande résistance à la présence de défauts, résistance à l'oxydation, et seulement pour les phases MAX, une bonne usinabilité.

La synthèse des phases MAX et MAB se font par frittage réactif métallurgique et céramique, sauf que ces méthodes utilisent du gaz protecteur (Argon).

La recherche d'un autre adsorbant efficace et moins couteux s'avère donc intéressante. C'est dans cette optique que beaucoup de chercheurs ont manifesté un grand intérêt pour les matériaux bidimensionnels comme les MBenes, les MXenes...etc. puisqu'ils se caractérisent par d'importantes propriétés physico-chimiques et se présentent donc comme une alternative prometteuse afin de remplacer le charbon actif.

Parmi ces matériaux, nous citons les nouvelles phases Cr<sub>2</sub>CTx et CrB ayant été découverts récemment. nous allons dans ce travail étudier le CrB autant que adsorbant puis le comparé avec Cr<sub>2</sub>CTx et le charbon actif.

Dans le présent travail, nous sommes principalement intéressés à ces deux phases (synthèse et caractérisation) ainsi qu'à leur application en tant que supports solides adsorbants envers le bleu de méthylène. Une étude comparative a été effectuée avec quelques phases MBenes en tant qu'adsorbants bidimensionnels.

Ce mémoire est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur l'adsorption, ainsi que ses principales applications. Dans cette partie seront abordées les diverses étapes gouvernant le processus d'adsorption, les modèles employés pour décrire la cinétique et les isothermes d'adsorption et les principaux facteurs influençant l'adsorption.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les différents produits chimiques, le matériel et les procédures mises en œuvre ainsi que les techniques d'analyse et de caractérisation utilisées pour la préparation des adsorbants.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des différents résultats obtenus ainsi qu'à leurs discussions.

Enfin, ce mémoire se termine par une conclusion générale relatant les principaux résultats de cette étude et les perspectives.

# **Chapitre I**

## **Synthèse**

### **Bibliographique**

## **I. Partie I : Adsorption**

### **I.1 Définition de l'adsorption**

C'est la capacité de toutes les substances solides à attirer à leur surface des molécules de gaz ou de solutions avec lesquelles elles sont en contact.

Les solides utilisés pour adsorber les gaz ou les substances dissoutes sont appelés adsorbants, les molécules adsorbées sont généralement appelées collectivement adsorbat [1].

L'adsorption fait référence à la collecte de molécules par la surface externe ou la surface interne (parois des capillaires ou crevasses) des solides ou par la surface des liquides [2].

L'absorption, avec laquelle elle est souvent confondue, se réfère à des processus par lesquels une substance pénètre à l'intérieur même de cristaux, de blocs de solides amorphes ou de liquides [3].

### **I.2 Types d'adsorption**

#### **I.2.1. Adsorption physique**

Dans le cas de l'adsorption physique, ou physisorption, les liaisons qui s'établissent entre la molécule adsorbée (adsorbat) et le solide (adsorbant) sont du type Van der Waals et sont donc faibles [4]. Les chaleurs d'adsorption observées sont alors de l'ordre de 1 à 20 kJ/mol. Du fait des faibles énergies mises en jeu, l'adsorption physique est rapide ( $10^{-3}$  à  $10^{-10}$  s) et facilement réversible [5].

#### **I.2.2. Adsorption chimique**

L'adsorption chimique est spécifique et présente les caractères d'une réaction chimique superficielle qui peut être réversible ou non, il s'établit alors de véritables liens chimiques entre le solide et les molécules adsorbées [6]. Les chaleurs d'adsorption sont de l'ordre de 40 à 200 kJ/mole.

Dans ce cas, la cinétique est relativement lente et possède une énergie d'activation non négligeable [7]. La chimisorption implique l'existence, à la surface du solide, d'un certain nombre de sites discrets d'adsorption, contrairement à la physisorption [8].

### I.3 Nature de l'adsorption

L'adsorption est parfois différenciée en adsorption physique et chimique

**Tableau 1** : Comparaison entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique [9].

Propriétés	Adsorption physique	Adsorption chimique
Types de liaison	Liaison de Van der Waals	Liaison chimique
Température du processus	Relativement faible comparée à la température d'ébullition de l'adsorbat	Plus élevée que la température d'ébullition de l'adsorbat
Individualité des molécules	L'individualité des molécules est conservée	Destruction de l'individualité des molécules
Désorption	Facile	Difficile
Cinétique	Rapide, indépendante de la Température	Très lente
Chaleur d'adsorption	Inférieure à 10 kcal/mole	Supérieure à 10 kcal/mole
Energies mises en jeu	Faibles	Elevées
Type de formation	Formation en multicouches et monocouche	Formation en mono-couche

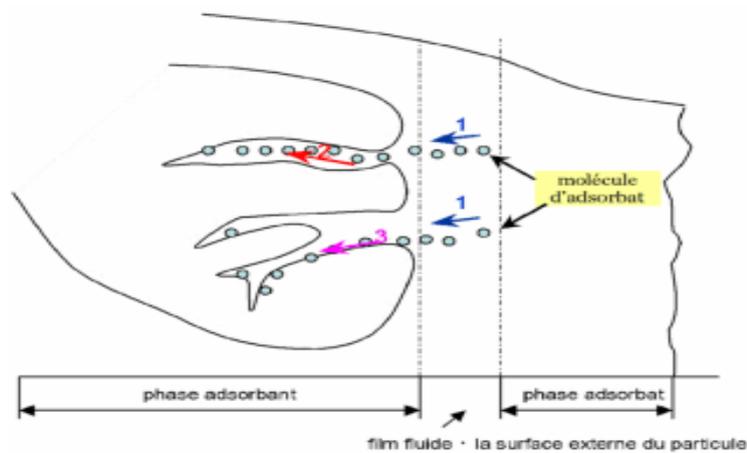
## I.4 Mécanisme d'adsorption d'un colorant

Au cours de l'adsorption d'une espèce sur un solide, le transfert de masse des molécules se fait de la phase fluide vers le centre de l'adsorbant. Ce processus s'opère au sein d'un grain d'adsorbant en plusieurs étapes (Figure 1).

1-Transfert de masse externe (diffusion externe) qui correspond au transfert du soluté du sein de la solution à la surface externe des particules.

2-Transfert de masse interne dans les pores (diffusion interne) qui a lieu dans le fluide remplissant les pores. En effet, les molécules se propagent de la surface des grains vers leur centre à travers les pores.

3-Diffusion de surface : pour certains adsorbants, il peut exister également une contribution de la diffusion des molécules adsorbées le long des surfaces des pores à l'échelle d'un grain d'adsorbant.



**Figure1:** Schéma du mécanisme de transport d'un adsorbat au sein d'un grain [10]

## **I.5 Facteurs influençant les paramètres d'adsorption**

L'adsorption dépend de nombreux facteurs dont les principaux sont :

- Les caractéristiques de l'adsorbant: polarité, volume poreux, surface spécifique et fonctions superficielles
- Les caractéristiques de l'adsorbat: polarité, solubilité et poids moléculaire ,Les paramètres L'adsorption qui s'avère comme un traitement efficace à l'industrie. En pratique, elle est utilisée physico-chimiques du milieu : Température et pH [11].

-

## **I.6 Domaine d'application de l'adsorption**

L'adsorption s'applique dans les cas suivants [12] :

- Séchage
- Traitement des huiles
- Traitement des gaz
- Industrie textile
- Décoloration et traitement des eaux

## I.7. Facteurs d'adsorption

### I.7.1. Facteurs liés à l'adsorbant

- La granulométrie influence la cinétique d'adsorption ainsi que l'accessibilité aux pores.
- L'indice d'iode est un indicateur global de la capacité d'adsorption vis-à-vis des petites molécules. Il s'agit de la masse de diode (en g) capable de se fixer sur les instaurations de 100g de matière. Plusil est élevé, plus grande sera la capacité du charbon.

### I.7.2. Facteurs liés à l'adsorption

- La solubilité est inversement proportionnelle à la capacité d'adsorption.
- L'augmentation de la masse moléculaire accroît la capacité d'adsorption. Cependant, si elle devient trop grosse, elle n'a plus accès aux micropores, donc cela va diminuer le nombre de sites possibles de façon conséquente.
- La structure de la molécule influence sa capacité d'adsorption. Plus une molécule se rapproche d'une structure symétrique ou coplanaire, plus elle sera adsorbable. De même pour la répartition des charges de façon homogène, par opposition aux molécules dont la charge est concentrée sur un atome.

-

### I.7.3. Facteurs extérieurs

Etant donné que le phénomène d'adsorption est exothermique, l'augmentation de la température entraine la diminution de la capacité d'adsorption [13].

## I.8. Adsorbants

Un bon adsorbant doit avoir les propriétés suivantes [14]:

- Une haute capacité d'adsorption
- Une grande efficacité pour adsorber des substances de faible concentration
- Une sélectivité élevée
- Une aptitude à être facilement régénéré et utiliser de nouveau
- Une grande inertie chimique

- Un prix peu élevé

### I.9. Principaux adsorbants industriels

Les principaux adsorbants industriels sont [15, 16] :

- Argiles et terre décolorantes :
- Gels de silice
- Alumine et bauxite activées
- Tamis moléculaires
- Charbon actif
- Noir animal (obtenu par la carbonisation d'os)

## Partie II : Phases MAX et MAB

### II.1 Introduction

Les céramiques et les métaux les plus utilisées, durant ces dernières années, sont les céramiques ternaires.

Ces matériaux ont attirés une grande attention de la communauté scientifique, à cause de leurs grandes résistances à l'usure et à l'oxydation [17,18].

Parmi ces céramiques, on trouve les phases MAX et les phases MAB qui sont des phases céramiques nano-lamellaires avec des propriétés intermédiaires entre celles des céramique et celles des métaux [19,20] .

Les phases MAB sont une nouvelle classe de matériaux ternaires en couches qui ont déjà montré un certain nombre de propriétés exceptionnelles étant donné que les phases MAB (où M est un métal de transition , A est un élément des groupes 13 à 16 et B est le bore) possèdent une bonne conductivité électrique , une oxydation à haute température et une résistance aux chocs [21-24] .

Les phases MAX sont des matériaux nanolaminés où  $n = 1 ; 2$  ou  $3$  , M est un métal de transition précoce , A est un groupe A élément (principalement des groupes 13 et 14 ) et X est C et / ou N [25] .

Les phases MAX appartiennent à un groupe de matériaux découverts en 1960 par le groupe de recherche dirigé par Hans Nowotny [26]. Ce sont des carbures et nitrures ternaires dont les propriétés remarquables n'ont réellement été découvertes que trente ans plus tard, dans les années 90, par l'équipe du professeur M.W Barsoum de l'université de Drexel (Philadelphie). Celui-ci a, en effet, entrepris la synthèse et la caractérisation systématique d'un grand nombre de ces composés [27] qui se sont avérés de très bons conducteurs thermiques et électrique [28], très stables chimiquement [29], résistant à l'oxydation et à la corrosion [30] se caractérisant par une très bonne aptitude à l'usinabilité avec les procédés conventionnelle de fabrication [31] .

## II.2. Structure des phases MAX et MAB

### II.2.1. Structure des phases MAX

Les phases MAX tirent leur nom de leur composition chimique :  $M_{n+1}AX_n$  , avec M un métal de transition (titane, chrome, zircon...), A un élément du Groupe A (silicium, aluminium, étain...), et X l'azote ou le carbone. L'indice n varie de 1 à 3, et les structures  $M_2AX$ ,  $M_3AX_2$  et  $M_4AX_3$  correspondantes sont nommées respectivement 211, 312 et 413. Figure 2 montre les différents éléments utilisés, et donne la liste des phases thermodynamiquement stables [32]. Toutes n'ont pas été synthétisées à ce jour.

**M** Métal de transition    **A** Element du groupe A    **X** C et / ou N

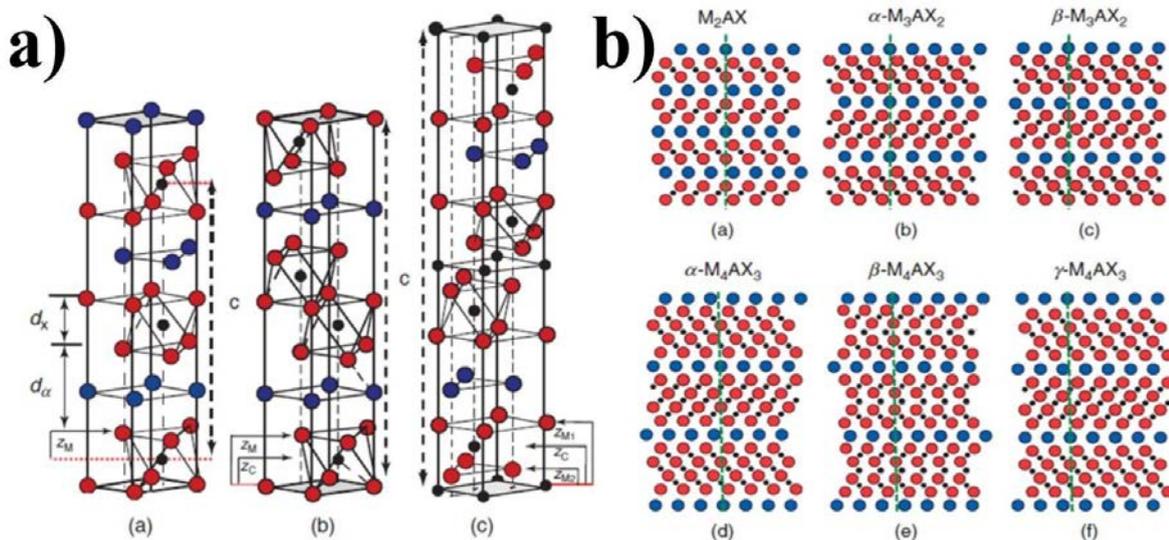
H																		He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ms	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo	

**Figure 2 :** Localisation des éléments constitutifs des phases MAX et liste des différentes phases thermodynamiquement stables dans le tableau périodique [33].

Les phases MAX ont une structure hexagonale dont la Figure (3) présente les différentes mailles élémentaires selon la valeur de n.

La structure 312 (Figure 3.b) peut être décrite comme la superposition de plans monoatomiques de l'élément A et de plans plus complexes formés à partir des éléments M et X.

Ces plans ont pour unité de base des groupements  $XM_6$ , qui sont des sites octaédriques du métal de transition M occupés par un atome de X. La répétition de deux de ces groupements partageant une liaison M-M constitue le plan en question. Les différentes structures de ces Céramiques sont lamellaires à l'échelle atomique [34].



**Figure 3:** (a) Structures cristallines des phases MAX ou n=1, 2, ou 3. Les atomes de l'élément M (en rouge), X (en noir) et A (en bleu). (b) L'empilement des couches atomiques des phases [35].

Les trois structures se différencient par leur nombre de couches octaèdres séparant les plans métalliques A.

Pour une phase  $M_2AX$  (211) on compte une couche d'octaèdres  $M_6X$ , deux couches pour une phase  $M_3AX_2$  (312), et trois couches pour une phase  $M_4AX_3$  (413), les qualifiant ainsi comme étant des matériaux nano-lamellaires.

## II.2.2. Structure des phases MAB

La cristallographie devient une partie d'une science plus vaste qui traite la structure de la physique condensée et plus précisément les nouveaux matériaux qui permet de faire évoluer d'une manière considérable la notion et les concepts des phases MAB qui s'appliquent à tout matériau quel que soit son type. En conséquence, les phases MAB ont une structure cristalline orthorhombique.

La phase MoAlB se cristallise dans un système orthorhombique où les atomes de Molybdène (Mo) forment un réseau prismatique trigonal englobant chaque atome de Bore (B), et où on trouve un atome de Bore (B) et l'Aluminium (Al) qui se situent à l'extérieur des faces rectangulaires du prisme trigonal [36]. Cet empilement donne l'aspect nano lamellaires aux phases MAB. La structure cristalline orthorhombique est la suivante :

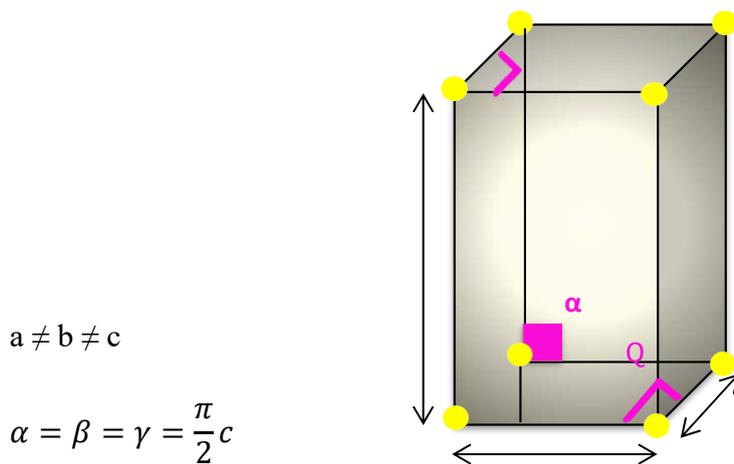


Figure 4 : structure orthorhombique[37]

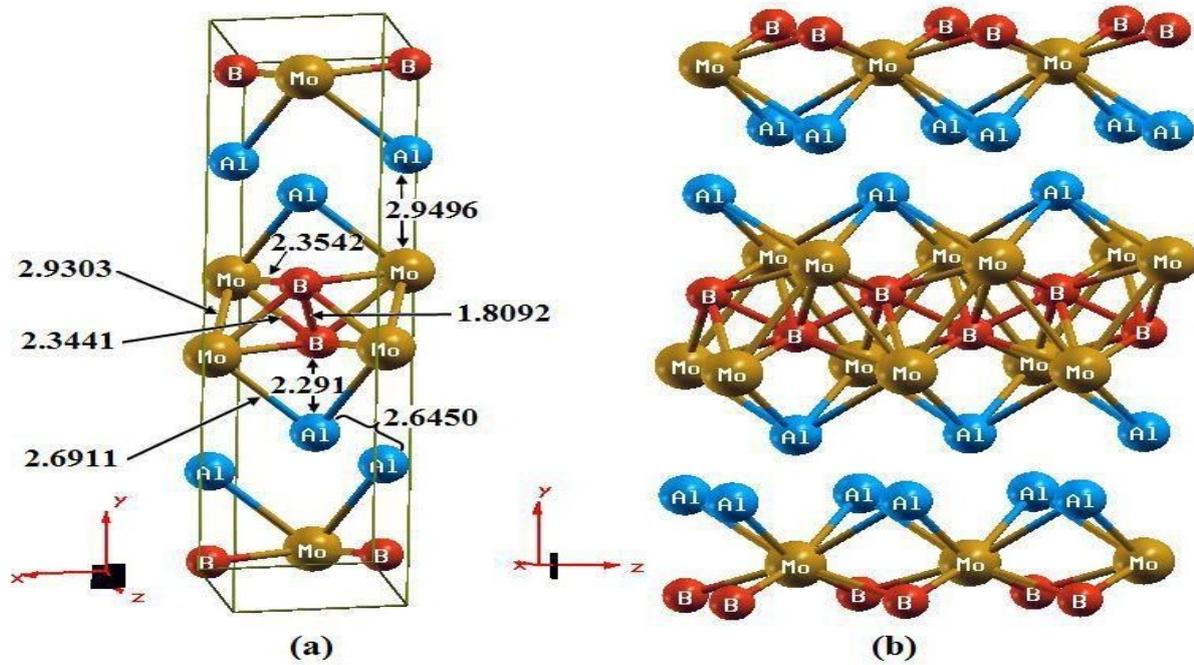


Figure 5 : structure cristalline de la phase MAB [38]

La structure cristalline  $M_2AlB_2$  a une structure cristalline orthorhombique d'un groupe d'espace Cmmm. Les sous mailles des éléments MB sont séparés par une couche monoatomique de l'élément Al alors que dans la structure  $MA_2B_2$ , (orthorhombique, groupe d'espace Cmc), les sous mailles des éléments MB sont séparés par deux couches monoatomique de l'élément Al [39,40].

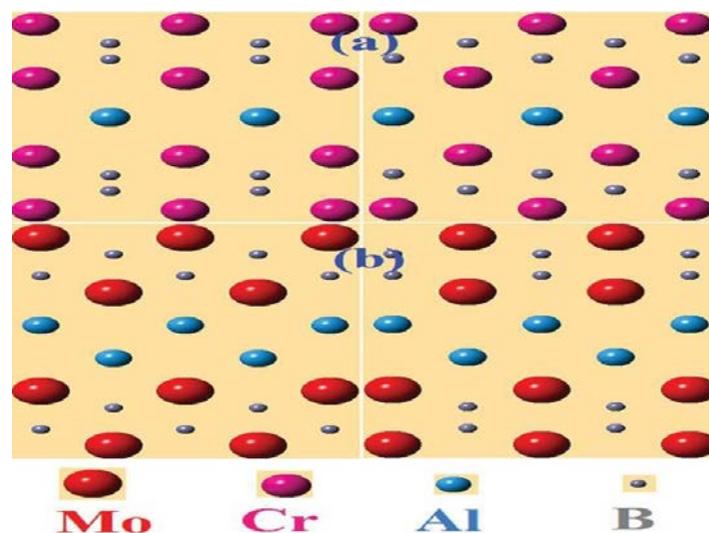


Figure 6 : Structure cristalline des phases MAB, (a) type  $MA_2B_2$ , (b) type  $M_2AlB_2$  [41].

## II.3. Méthode d'élaboration des phases MAX et MAB

### II.3.1.Méthodes conventionnelles (avec atmosphère contrôlée)

Divers chercheurs ont essayé de synthétiser des phases MAX en employant différentes méthodes de synthèses. Il est possible aujourd'hui d'élaborer des phases MAX sous plusieurs formes distinctes, sous forme de matériaux massif poly cristallins ou monocristallins ou bien sous forme de films minces.

Les échantillons massifs poly cristallins sont obtenus à partir de la métallurgie des poudres principalement par de nombreuses techniques parmi les quelles, on cite :

#### A. Technique HP « Hot pressing »

Le pressage à chaud (HP) est largement utilisé pour synthétiser les échantillons des phases MAX dense avec une pureté de phase élevée. La poudre de départ est versée dans une filière en graphite et est pressée uniaxialement entre deux poinçons en graphite, suivi d'un traitement thermique sous argon ou sous vide.

La pression uniaxiale est appliquée pendant tout le cycle thermique et la pression maximale dépend des caractéristiques du graphite, mais elle atteint généralement 50 MPa a des températures allant jusqu'à 1000 à 1200 °C, des pressions plus basses (5 à 10 MPa) sont utilisées pour favoriser la synthèse, tandis que des pressions plus élevées (jusqu'à 50 MPa) doivent être appliquées à des températures plus élevées pour favoriser la densification.

Les températures maximales (de maintien) se situent généralement entre 1200 et 1700 °C, tandis que la vitesse de chauffage atteint souvent 20 ° C / min avec des temps de maintien isotherme allant jusqu'à 10 heures à la température de maintien maximale.

Les échantillons denses contiennent généralement de gros grains (> 10-20  $\mu\text{m}$ ) orientés perpendiculairement à la pression appliquée. Le principal avantage est que le pressage à chaud (HP) conduit à une densification complète des phases MAX très pures.

Cependant, des géométries simples essentiellement des disques jusqu'à 4-5 mm de hauteur et 50 mm de diamètre - sont obtenues, nécessitant une étape supplémentaire de mise en forme avant utilisation [42].

### **B. Technique SPS « Spark Plasma Sintering »**

La préparation des échantillons est similaire au pressage à chaud (HP) mais la principale différence réside dans le cycle thermique. Le frittage flash (SPS) permet d'avoir des vitesses de chauffage plus rapides (50-200 ° C / min) et des temps de maintien plus courts

(<10 minutes) que (HP), ce qui limite la croissance des grains. En outre, des températures plus basses peuvent être utilisées afin d'obtenir des échantillons denses entre 1100 et 1400 °C Les échantillons conventionnels sont des disques de 4-5 mm de hauteur et 20-30 mm de diamètre, bien que des échantillons plus grands de 100 mm de diamètre soient également possibles.

Le principal avantage de SPS est la densification complète de phases MAX très pures avec des caractéristiques microstructurales contrôlées, des grains fins (<10 µm) aux gros grains. Cependant, la principale limitation est encore une fois la géométrie simple des échantillons produits [43].

### **C. Technique HIP « Hot Isostatic Pressing »**

Le Pressage isostatique à chaud (HIP) conduit à des phases MAX très pures et denses comme HP, mais sans orientation / texturation préférentielle des grains en raison des conditions de pression isostatique. Les microstructures isotropes peuvent être bénéfiques pour certaines applications spécifiques, mais le traitement et l'équipement sont plus complexes.

La poudre de départ doit être encapsulée dans un récipient en verre ou en métal approprié, suivi d'un traitement thermique sous argon à haute pression (100-300 MPa) pendant plusieurs heures. En conséquence, bien que la synthèse soit possible, HIP est rarement utilisé [44].

Ces techniques donnent des matériaux très denses de faible porosité et avec des tailles de grains de l'ordre du micron. Concernant les films minces, trois techniques de synthèse de phases MAX sont généralement utilisées [45] :

- Dépôts Physiques Par phase vapeur (PVD:Physical Vapor Déposition)
- Dépôts chimiques en phases vapeur (CVD: Chemical Vapor Deposition)
- Réactions de synthèse à l'état solide.

### II.3.2. Méthode de sel fondu

La synthèse de sels fondus de poudres céramiques est bien connue, mais pour composés non oxydés le processus a jusqu'à présent toujours été réalisé dans une atmosphère d'argon pour protéger le matériau de l'oxydation.

Ces méthodes sont efficaces mais coûteuses, limitant leur utilisation à l'échelle industrielle. Dans le MS<sup>3</sup> processus, nous utilisons le bromure de potassium (KBr) comme milieu réactionnel KBr a une ductilité élevée dans la pièce température et peut être pressée à froid à des densités supérieures à 95% de densité relative nous exploitons cette propriété de KBr pour obtenir une étanchéité aux gaz.

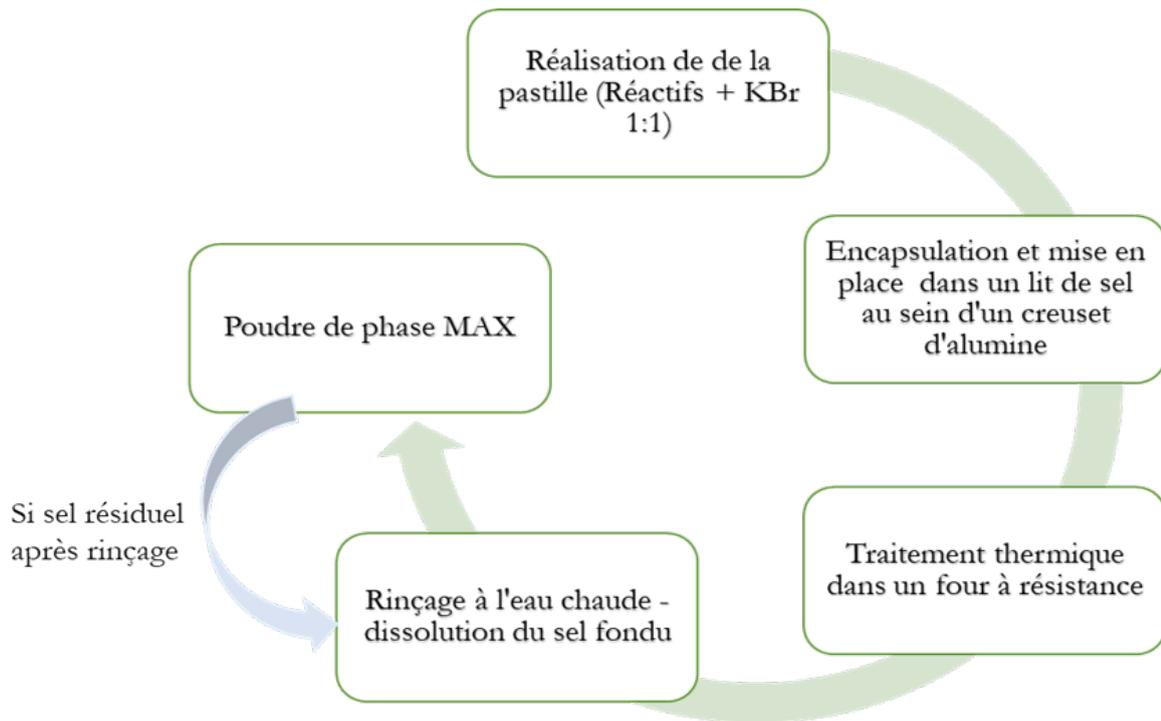
Les travaux de Dash et al. sur la phase MAX de type Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> [46] décrivent pour la première fois l'obtention sous air d'une poudre de phase MAX ne nécessitant pas de broyage ultérieur. Ces auteurs ont utilisé une méthode dite de sels fondus protégés noté MS<sup>3</sup> (molten salt shielded synthesis)

Cette méthode consiste à réaliser une pastille contenant un mélange de poudres élémentaires (Ti, Si, Al et C) et un sel (bromure de potassium (KBr)) qui sera ensuite encapsulée dans un conteneur plus large avec du KBr tout autour. La « coque » de KBr protégera donc la pastille vis-à-vis de l'atmosphère oxydante environnante.

La capsule ainsi obtenue est ensuite placée dans un lit de sel suffisant pour le recouvrir dans un creuset en alumine. Les échantillons sont ensuite disposés dans un four à résistance

(de 700 à 1300 °C ) avec une rampe de température de 5°C /min et un temps de palier de 1h. Les échantillons sont ensuite rincés à l'eau chaude pour dissoudre le sel (Figure 7).

Dash et al. ont obtenu une poudre de Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> pure à la précision de la DRX. Ainsi donc, les méthodes de sel fondu semblent constituer une bonne alternative pour répondre à la problématique de l'usinage et ainsi s'affranchir des différents sources de contamination associées.



**Figure 7** : Récapitulatif simplifié de la méthode de synthèse par sels fondus protégés [47]

Xue Guo et al. [48] ont préparé les poudres de  $Ti_3SiC_2$  par la méthode des sels fondus en utilisant du NaCl comme fondant.

Dans leurs études, les influences des températures de synthèse et du rapport massique flux/poudres sur la phase et la morphologie des poudres de  $Ti_3SiC_2$  ont été examinées. Les résultats ont indiqué que la température de synthèse de  $Ti_3SiC_2$  était inférieure d'environ  $150^\circ C$ . Les poudres de  $Ti_3SiC_2$  obtenues par la méthode des sels fondus à  $1200^\circ C$  étaient uniformes et la taille des particules était d'environ 1 à 2.

La teneur en  $Ti_3SiC_2$  augmenté à mesure que le rapport flux/poudres augmentait à 1 :1 tandis que l'augmentation supplémentaire du rapport faisait que le contenu diminuait évidemment.

De leur côté, Ying Wang et al. [49] ont rapporté un procédé de synthèse rapide de  $Cr_2AlB_2$  à partir de poudres élémentaires de Cr, Al et B. Les effets du rapport molaire Cr/Al/B dans les précurseurs, la température, la durée et le rapport massique du sel aux précurseurs sur la formation de  $Cr_2AlB_2$  ont été étudiés.

De plus, le processus de synthèse de  $Cr_2AlB_2$  est également discuté. Les résultats montrent que la température joue un rôle clé dans la formation de  $Cr_2AlB_2$ . Des poudres de  $Cr_2AlB_2$  bien

crystallines sont synthétisées avec succès à partir de précurseurs  $2Cr/2Al/2B$  et de sel fondu NaCl-KCl avec leur rapport massique de 1.1 à 1100 °C en 0.5 h.

La phase  $Cr_2AlB$  présente une structure nanolaminée avec une morphologie de grain en forme de plaque. La taille des particules de la poudre de  $Cr_2AlB_2$  obtenue est considérablement diminuée avec l'ajout de sel fondu de NaCl-KCl dans les précurseurs.

Pour leur part, Maharshi Dey et al.[50] ont rapporté la synthèse de poudres de  $Fe_2AlB_2$ ,  $Mn_2AlB_2$  et  $MoAlB$  en utilisant la synthèse / frittage de sels fondus protégés ( $MS^3$ ) un paradigme de traitement durable qui n'utilise pas de gaz inerte et des températures relativement basses pour synthétiser les poudres avec une composition chimique uniforme et une pureté de phase élevée.

Au cours de cette recherche, des poudres élémentaires ont été utilisées comme poudres précurseurs en présence de sels d'halogénures (NaCl, KBr et NaCl-KBr).

Initialement, les poudres étaient pressées à froid puis encapsulés par du sel. Les échantillons encapsulés ont été ensuite recouverts de sel et traités à une température relativement basse de 1000 °C. Ces auteurs ont observé que la synthèse de ces poudres était affectée par la sélection des sels et la stœchiométrie des poudres de départ.

Des poudres majoritairement monophasiques de poudres  $Fe_2AlB_2$  et  $Mn_2AlB_2$  ont été obtenues dans le milieu salin KBr en utilisant une composition de départ nominale  $T_2Al_{1,2}B_2$  ( $T = Fe, Mn$ ) sans utiliser de gaz de protection.

De même, des poudres de  $MoAlB$  ont été synthétisées en utilisant du NaCl comme milieu salin avec une composition nominal de  $MoAl_{1.2}B_2$  dans l'air.

Cette étude montre que différents types de céramiques ternaires non oxydes peuvent être synthétisés dans l'air en milieu salin sans utiliser de gaz de protection tout en favorisant la facilité et la durabilité de la production de céramiques non oxydes

### III. Phases MXenes et MBenes

#### III.1 Définition des MXenes et MBenes :

Les MXenes et les MBenes appartiennent d'une grande famille de carbures, nitrures, carbonitrures et borures de métaux de transition bidimensionnels (2D). Ils ont attiré une grande attention ces dernières années à cause de leurs diverses compositions élémentaires et de nombreuses propriétés physiques et chimiques fascinantes [51] les phases MAX puissent servir de précurseurs pour des systèmes 2D.

En 2011 Naguib et al. [52] rapportent la synthèse d'un nouveau matériau 2D obtenu après l'immersion d'une poudre de  $Ti_3AlC_2$  dans une solution d'acide fluorhydrique (HF) dosée à 50%. C

traitement chimique a pour conséquence d'éliminer l'élément A de la phase MAX tout en préservant la structure des couches MX. Le résultat est un empilement de feuillets 2D de carbures de titane ( $Ti_3C_2$ ) passivés par des terminaisons de surface T résultant du traitement chimique.

Les MBenes ont été utilisé pour souligner la perte de l'élément du groupe A des phases MAB mères et pour mettre en évidence la nature 2D.

En 2018 Haiming Zhang et al. [53] ont préparées les nanofeuilles 2D CrB en gravant sélectivement des couches d'Al à partir de  $Cr_2AlB_2$  en immergeant le  $Cr_2AlB_2$  poudres dans une solution diluée de HCl à température ambiante.

Les nanofeuilles de CrB 2D telles que préparées sont examinées par diffraction des rayons X et microscopie électronique à balayage et spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS).

En 202, Otitoaleke Akinola et al. [54] ont développé la synthèse de la phase  $Cr_2C$  à partir de sa phase mère  $Cr_2AlC$  MAX et ont montré que la gravure est optimisée à l'aide de fluorure de sodium et de chlorure d'hydrogène avec une méthode modifiée de délaminage de couche minimalement intensive dans un environnement froid de 9°C.

Ces auteurs ont optimisé l'intercalation et le délaminage en utilisant des méthodes de sonication et de lavage et le  $\text{Cr}_2$  résultant la structure cristalline du C a été caractérisé. Ces résultats proposent le  $\text{Cr}_2\text{C}$  à l'étude expérimentale y compris ses propriétés magnétiques émergentes prédites tout en développant des lignes directrices pour la synthèse de nouveaux matériaux MXenes .

### III.2. Propriétés de $\text{Cr}_2\text{AlC}$

Le Tableau 2 rassemble les propriétés  $\text{Cr}_2\text{AlC}$  [55-58]

**Tableau 2 :** Propriétés de  $\text{Cr}_2\text{AlC}$  [55-58]

Paramètre de maille (Å)	a = 2.86, c = 12.82
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	5.1 - 5.24
Dureté Vickers (GPa)	5.5 ± 0.4
Module d'Young (GPa)	288
Résistance à la flexion (MPa)	483
Résistance à la compression (MPa)	1159
Résistivité électrique ( $\mu\Omega\text{m}$ )	0.71 - 0.74
Coefficient de dilatation thermique (K <sup>-1</sup> )	1.26 X 10 <sup>-05</sup>

### III.3. Application des MXenes dans l'environnement

En raison de leurs bonnes stabilités structurelles et chimiques, leurs surfaces hydrophiles, leurs conductivités électriques exceptionnelles, leur nature respectueuse de l'environnement, les composés MXenes sont aujourd'hui développés et étudiés à différentes fins [59,60].

Les composés MAX, comme les matériaux 2D, ont montré une grande variété d'applications dans l'industrie avec des propriétés intéressantes.

Ils sont utilisés dans des domaines tels que les captures chimiques et biologiques [61-63], l'activité biologique et antibactérienne [64,65], les membranes pour le traitement de l'eau [66], l'élimination des métaux lourds, les applications photocatalytiques, la purification de l'eau et l'adsorption.

### III.4 Application des MXenes dans l'adsorption

La pollution par les métaux lourds dans l'environnement, notamment dans l'eau potable et d'autres sources, constitue un grave problème.

Ces dernières décennies, le traitement par adsorption a attiré beaucoup d'attention en raison de son coût approprié et de sa simplicité d'utilisation.

Par rapport aux autres contreparties de sorption, les matériaux bidimensionnels (2D) [67] ont deux vertus évidentes, de grandes surfaces et des sites actifs abondants. Ces matériaux 2D sont devenus des adsorbants idéaux pour le traitement des eaux.

En 2018 Zheng Wei et al. ont étudiés la modification du MXene par inter alcalin pour augmenter l'espacement entre les couches de  $Ti_3C_2Tx$  et pour accorder ses groupes fonctionnels de surface [68].

Après en 2019 Byung-Moon Jun et al. ont utilisés le MXene et le MOF dans l'adsorption de MB et AB80 dans les eaux usées, les résultats montre que la capacité d'adsorption de MB et 140mg/g et 200mg/g pour AB80. Les phases MXene et MOF se sont avérées économiques et pratiques pour le traitement des eaux usées contenant des polluants organiques [69].

Par la suite en 2020, Xiaofang Feng et al .ont utilisés du carbure de titane comme plate – forme 2D. L’adsorbant 2D/2D à l’échelle atomique alk-MXene/LDH a été construit par auto – assemblage mécanique in situ et intercalation au niveau alcalin pour éliminer le  $\text{Ni}^{2+}$

En raison de sa structure en couches unique, les groupes fonctionnels oxydés et les sites de liaison actifs disponibles des nanoplaquettes de MXene constituent un adsorbant unique pour éliminer les métaux lourds dans l’eau. La capacité d’adsorption de l’adsorbant alk-MXene/LDH pour le  $\text{Ni}^{2+}$  était de 222.717mg/g [70].



# **Chapitre II**

## **Matériel et Méthodes**

### **Introduction**

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'ensemble de matériels et méthodes utilisés dans notre travail pour préparer des matériaux bidimensionnels CrB et Cr<sub>2</sub>CTx.

Ces matériaux bidimensionnels sont synthétisés à partir des phases MAX (Cr<sub>2</sub>AlC) et MAB (Cr<sub>2</sub>AlB<sub>2</sub>).

Ce chapitre aborde donc les protocoles utilisés pour caractériser ces matériaux 2D, ainsi que leur emploi en tant que matériaux adsorbants dans l'élimination du colorant MB.

L'étude de l'adsorption est réalisée en effectuant les études cinétiques ainsi que les isothermes d'adsorption.

Par la suite, une modélisation est effectuée par emploi de quelques modèles théoriques classiques pour décrire les résultats expérimentaux obtenus.

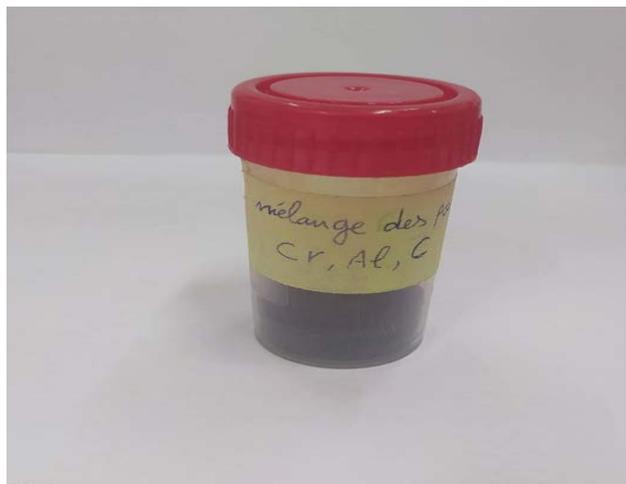
### **I. Synthèse des phases MAX et MAB**

#### **I.1. Préparation de la phase Cr<sub>2</sub>AlC**

Les poudres ont été préparé par frittage sans pression d'Al (taille de particule : -300mesh, pureté de 99,5%) et C (taille de particule : -300mesh, pureté de 99 %) et Cr (taille de particule : -300 mesh, pureté 99,5%) avec des stœchiométries de (Cr = 2, Al = 1.2, C = 1).

Les poudres de départ ont été mélangées pendant 24 h, puis pressées à froid dans un moule en acier inoxydable à 20 MPa pour former des compacts d'un diamètre de 20 mm et d'une hauteur d'environ 5 mm.

Les compacts ont été placés dans un creuset en alumine et les échantillons ont été chauffés dans un four sous vide pendant 1h à 1300 °C.



**Figure 8:** Photographie numérique montrant le mélanges des poudres (Cr,Al,C)

### **I.2. Préparation de $\text{Cr}_2\text{AlB}_2$**

La poudres ont été préparé par frittage sans pression d'Al (Taille de particule : -300 mesh, Pureté de 99.5%) et B (Pureté 98 %) et C (Taille de particule : -300 mesh, Pureté de 99%) avec des stœchiométries de {2. 2.2} ont été homogénéisées à l'aide d'un mortier en agathe.

La préparation consiste à effectuer les opérations suivantes :

- La poudre finale a été pressée à froid dans un moule en acier à 20 Mpa pour former des compactes de diamètre de 20 mm et d'une hauteur d'environ 5 mm.
- L'échantillon compacté a été placé dans un creuset en alumine,
- Les échantillons ont été chauffés dans un four à une température de 1100 °C avec un temps de 1h .



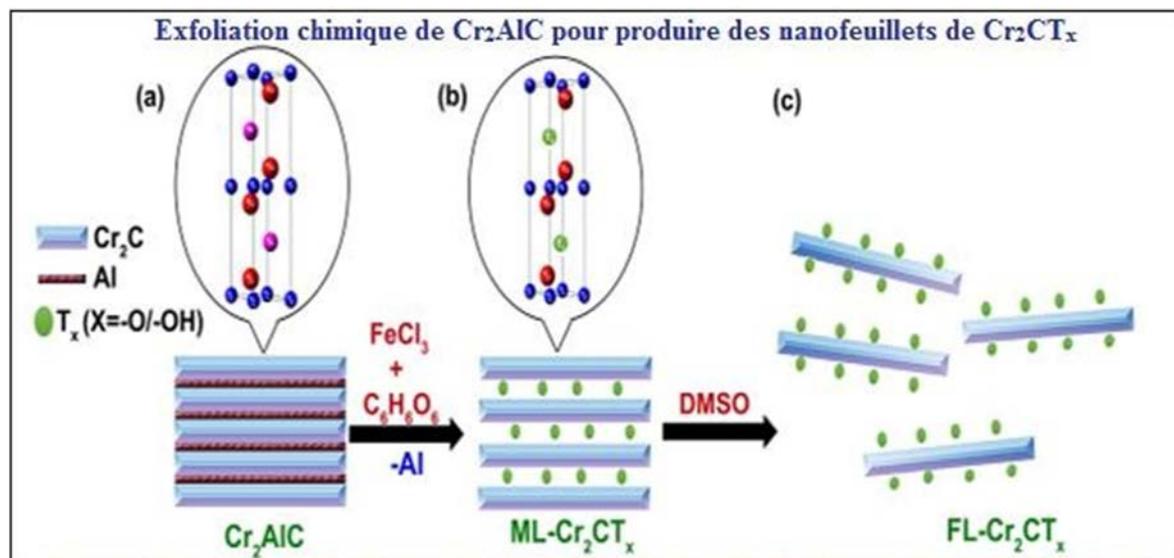
**Figure 9** : Photographie numérique montrant la poudre de (MAB) compactée et encapsulée

## II. Synthèse des MXenes et MBenes

### II.1. Préparation de la phase Cr<sub>2</sub>CTX

Dans ce travail, nous avons suivi la méthode de Bhuvanewari Soundiraraju [71] selon les opérations suivantes :

- Une masse de 1 g de Cr<sub>2</sub>AlC a été immergée dans une solution de chlorure ferrique (FeCl<sub>3</sub>) préparée avec 1,15 g de FeCl<sub>3</sub> dans 10 mL d'eau déminéralisée suivi d'une sonication pendant 5 min.,
- L'acide tartrique dissous dans 10 mL d'eau désionisée est ajouté au mélange suivi d'une sonication pendant 3 h dans l'obscurité.
- Au bout de 3h, le mélange est centrifugé 5 min à 3500 rpm et le surnageant est éliminé.
- Le solide obtenu est prélavé avec de l'acide tartrique (5 mL de solution d'acide tartrique à 4 %) puis récupéré par centrifugation.
- Ce processus d'addition d'acide tartrique et de centrifugation a été répété quatre fois, suivi d'un lavage à l'eau désionisée jusqu'à ce que le surnageant atteigne un pH neutre.
- Le solide ainsi obtenu après lavage à l'eau a été filtré sous vide puis séché sous vide à 70 °C pendant 0,5 h pour obtenir ML-Cr<sub>2</sub>CTx.



**Figure 10** : Illustration de la synthèse de MXene type ( $\text{Cr}_2\text{CT}_x$ )

## II.2. Préparation de la phase CrB

La préparation de ce matériaux CrB bidimensionnel nécessite d'effectuer successivement les opérations suivantes :

- ❖ Une masse de 3.44 g de  $\text{Cr}_2\text{AlB}_2$  (phase MAB) est immergée dans une solution 8,2 mL HCl 37%
- ❖ L'ensemble est laissé sous homogénéisation pendant une durée de 7 jours.

Le solide est ensuite lavé avec de l'eau distillée (filtration) jusqu'au la neutralité du milieu  $\text{pH} = 7$ .

- ❖ Le produit solide final obtenu est séché sous vide dans une étuve à  $50\text{ }^\circ\text{C}$  pendant 24 h.



**Figure 11** : Photographie montrant le système de filtration



**Figure 12** : Photographie montrant la filtration de la solution



**Figure 13** : Photographie montrant la phase MBene après filtration.



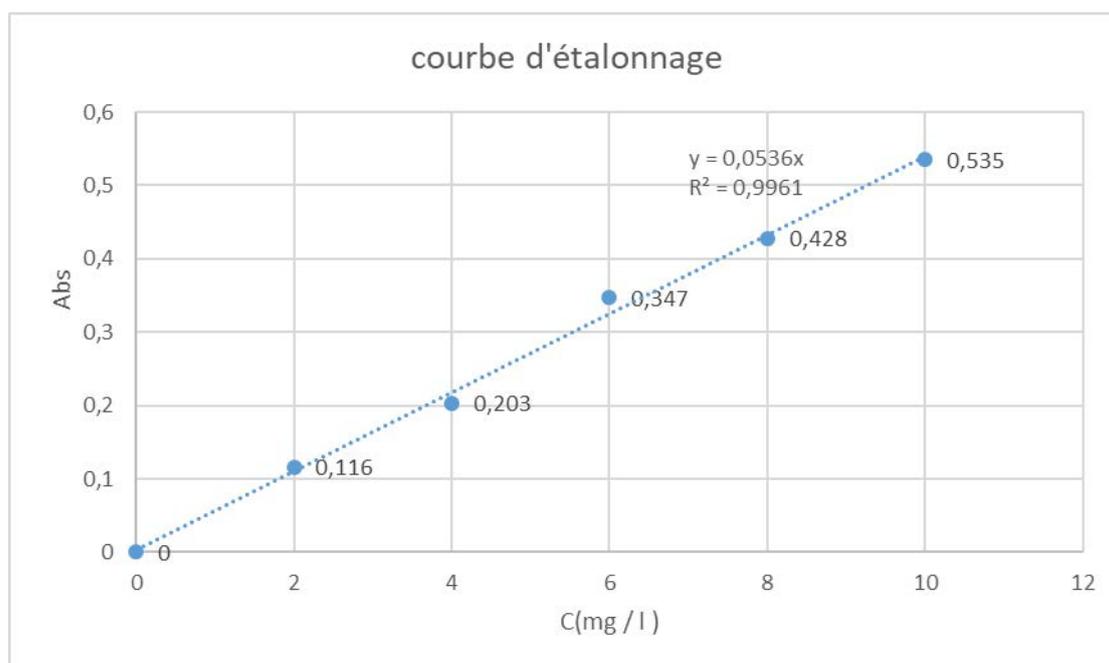
**Figure 14** : Photographies montrant la récupération de la poudre MBene.

### III. Préparation de la solution du Bleu de Méthylène

Les solutions utilisées sont préparées à des concentrations inférieures à leurs solubilités, dans des flacons teintés ou sombres.

La courbe d'étalonnage est une méthode générale pour déterminer la concentration inconnue d'une substance dans un échantillon inconnu en comparant l'inconnu à un ensemble d'échantillons standard de concentrations connues .

Pour établir la courbe d'étalonnage, nous avons préparé d'abord une solution mère de bleu méthylène (BM) de concentration ( $1 \text{ g.L}^{-1}$ ) à partir de laquelle plusieurs solutions filles de concentrations (allant de 2 à  $10 \text{ mg.L}^{-1}$ ) au même pH sont préparées par dilutions successives.



**Figure 15** : Courbe d'étalonnage de bleu méthylène

## IV. Caractérisation des MBenes

### IV.1. Détermination du pH<sub>pzc</sub>

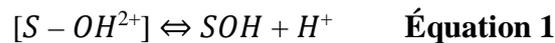
Les propriétés acido-basiques des MBenes ont été déterminées par titrage potentiométrique selon le protocole de Kummert et Stumm [72].

Le titrage est réalisé à l'aide des solutions d'acide chlorhydrique HCl (0,01 M) et d'hydroxyde de sodium NaOH (0,01 M).

La solution à titrer (100 mL d'eau distillée contenant 0.1g de MBene) est dosée d'abord par la solution HCl puis séparément par la solution NaOH. Le suivi du pH a été effectué à l'aide d'un pH-mètre (Hanna HI pH-211).

Les constantes d'acidité de surface ont été déterminées selon le modèle de complexations de surface. Ce modèle, basé sur la théorie de la double couche de Gouy et Chapman, montre que la charge électrostatique de surface du solide résulte de réactions acido-basiques de surface.

Ces réactions sont décrites uniquement par l'équation de conservation de masse basée sur les réactions des groupements hydroxyles de surface, déterminées par analogie avec les composés amphotères [73,74].



Avec :

$$KA1 = [H^+]. [SOH] / [S - OH^+] \quad \text{Équation 3}$$

$$KA2 = [H^+]. [SO^-] / [S - OH^+] \quad \text{Équation 4}$$

Le nombre total de sites de surface :

$$[S]_{tot} = [S - OH_2^+] + [S - OH] + [S - O^-] \quad (5)$$

Il est alors possible de déterminer le pH pour lequel la charge du solide est globalement nulle, pH<sub>pzc</sub>

$$pH_{pzc} = 1/2 (pka1 + pka2) \quad (6)$$

Pour chaque point de titrage acido-basique, on obtient la charge de surface QS selon l'équation suivant :

$$QS = \frac{(ca - cb + [OH^-] - [H^+])}{m} \quad (7)$$

Où les paramètres suivants représentent :

Qs : Charge de surface en mol. g<sup>-1</sup>.

Ça : Concentration d'acide ajoutée en mol. L<sup>-1</sup>.

Cb : Concentration de base ajoutée en mol. L<sup>-1</sup>.

M : Prise d'essai en g.

Soit respectivement pour un ajout d'acide ou de base :

$$QS = \frac{(ca + [OH^-] - [H^+])}{m} \quad (8)$$

$$QS = \frac{(-cb + [OH^-] - [H^+])}{m} \quad (9)$$

On peut donc obtenir la charge moyenne de surface du solide en fonction du pH [75].

### IV.2. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X (DRX) est une technique d'identification de phases présentes dans un matériau donné.

Le rayonnement électromagnétique des rayons X dont les longueurs d'onde sont collectées à partir de la réflexion des plans atomiques séparés par une distance d dans un réseau cristallin, permet d'identifier le matériau en question en utilisant la loi de Bragg :  $n \lambda = 2 d \sin \theta$ .

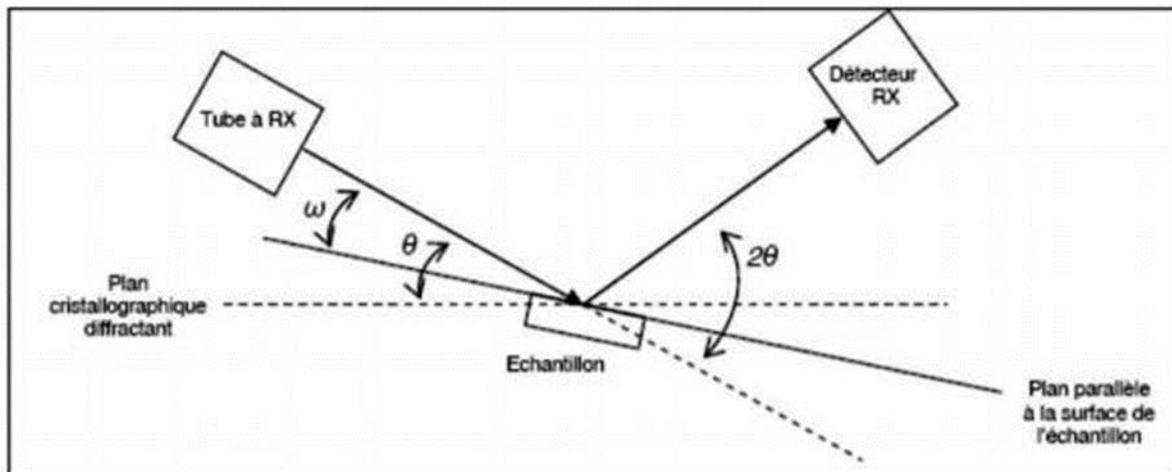
Où les paramètres suivants représentent:

n : ordre de diffraction,

d : distance entre deux plans cristallographiques,

$\lambda$  : longueur d'onde des rayons X,

$\theta$  : Angle de Bragg demi-angle de déviation (moitié de l'angle entre le faisceau incident et la direction du détecteur) [76,77,78].



**Figure 16** : Schéma explicatif de la DRX présentant les différents angles pris en compte [79]

Lorsque les rayons X entrent en contact avec la matière, plusieurs phénomènes peuvent se produire :

- L'adsorption
- La transmission
- La diffusion
- La fluorescence

Le diffractogramme est un enregistrement de l'intensité diffractée en fonction de l'angle  $2\theta$  formé avec le faisceau direct. Le système est constitué d'un goniomètre  $\theta$ -  $2\theta$  totalement automatisé est commandé par un logiciel. Le mode d'enregistrement consiste à mesurer l'intensité diffractée par un déplacement pas à pas l'échantillon et du détecteur.

En d'autres termes, un balayage de l'angle de diffraction est obtenu à l'aide du goniomètre où l'échantillon effectue une rotation avec un mouvement uniforme de vitesse angulaire  $\theta$ , tandis que le détecteur, avec sa fente réceptrice placée sur le point de focalisation tourne autour de l'échantillon avec angle de  $2\theta$ . Le diffractomètre utilisé est du type (PanalyticalX'pert Pro) avec des radiations Cu- $\alpha$  (1.54 Å) et un pas de 0.02°.

Pour faire cette caractérisation, nous avons suivi le mode opératoire suivant :

1. Aplanir la poudre CrB dans une coupelle.
2. bombarder l'échantillon par les rayons X .
3. Mesurer l'intensité des rayons X selon la direction par le le détecteur

L'appareil utilisé est montré dans la Figure 17 suivante :



**Figure 17** : Diffractomètre de Rayons X, PanalyticalX'pert Pro, D8, CRTI, Chéraga.

Le but de cette expérience est de déterminer les différentes phases dans la poudre de la phase MAB.

### IV.3. Spectrophotométrie d'absorption UV-Visible

La spectrophotométrie est une méthode d'analyse qui permet de déterminer l'absorbance d'une substance chimique en solution, c'est-à-dire sa capacité à absorber la lumière qui la traverse.

L'absorbance d'une substance chimique dépend de la nature et de la concentration de cette substance ainsi que de la longueur d'onde à laquelle on l'étudie [80].

L'appareil donne l'absorbance ( $A$ ) selon la formule suivante :

$$A = \log I_0/I \quad (10)$$

$I$  : Intensité lumineuse à la sortie ( sans unité)

$I_0$  : Intensité lumineuse à l'entrée ( sans unité)

## Chapitre 2 : Partie Expérimentale

La loi de Beer-Lambert permet de déterminer l'absorbance qui est proportionnelle à la concentration d'une solution, du moins lorsque la concentration est inférieure à  $10^{-2}\text{mol.L}^{-1}$ .

Les mesures de l'absorbance permettent de déterminer les concentrations des différentes solutions.

Selon la loi de Beer – Lambert et pour une longueur d'onde donnée :

$$A_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} * l * C \quad (11)$$

$\varepsilon_{\lambda}$  : Coefficient d'extinction molaire en  $\text{L.mol}^{-1}.\text{cm}^{-1}$

$l$  : Longueur du trajet optique dans la solution traversée en cm

$C$  : Concentration molaire de la solution en  $\text{mol.L}^{-1}$

Dans notre travail, les mesures ont été effectuées à l'aide d'une spectrophotométrie UV-Visible de type SHIMADZU-1700 en utilisant des cuves en quartz ( $c = 1 \text{ cm}$ ).



**Figure 18** : Photographie montrant le spectrophotomètre UV-Visible de type SHIMADZU-170.

### IV.4. Étude par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

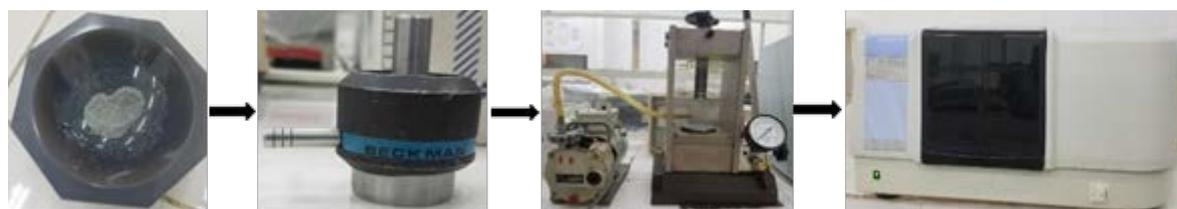
L'analyse par spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) est une méthode qui complète bien celle de la diffraction des rayons X.

Cette technique est sensible aux énergies de vibration des liaisons moléculaires. Elle constitue une méthode d'analyse des environnements locaux quel que soit l'état physique du système étudié .

Les spectres d'absorption ont été réalisés à l'aide d'un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier de type « SHIMADZU FTIR-8900 ».

Pour réaliser cette analyse, nous avons suivi les étapes suivantes :

1. Mélange de la poudre de CrB avec le bromure de potassium (70% KBr + 30% poudre).
2. Mise de l'échantillon dans le moule pastille.
3. Mettre le moule dans la pastilleuse.
4. Analyse de la pastille dans le spectromètre infrarouge à transformée de fourrier .



**Figure 19:** Photographies montrant le Spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) ainsi que ces accessoires

### V. Principaux facteurs influençant l'adsorption

#### V.1. Cinétiques d'adsorption de BM sur les MBenes

En systèmes discontinus, les cinétiques d'adsorption permettent, non seulement, d'évaluer les temps de pseudo-équilibre, mais aussi, les capacités de rétention de BM par les MBenes.

Cette étude cinétique est effectuée de la manière suivante :

Dans une série de flacons (capacité : 200 mL) en verre sombres fermés sont introduites des masses identiques ( $m = 0.1\text{g}$ ) de MBene auxquelles sont ajoutés séparément des volumes identiques ( $V = 50\text{ mL}$ ) de la solution de BM de concentration initiale ( $C_0$ ).

Le pH du milieu de tous les échantillons est contrôlé durant toute la durée de l'opération

L'ensemble (Échantillons/Table oscillante Ikalabortechnik KS 501) est soumis à des agitations de 225 cpm (coups par minute) à la température ambiante ( $20 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ ).

Des prélèvements sont ainsi effectués à différents intervalles de temps allant de 5 min à 24 heures de contact.

Les solutions de BM ainsi obtenues après séparation des mélanges (MBene/solution BM) sont analysées directement par spectrophotomètre UV-Visible à la longueur d'onde appropriée.

Les conditions expérimentales utilisées sont résumées dans le Tableau 3 suivant :

**Tableau 3** : Conditions opératoires utilisées pour l'étude des cinétiques d'adsorption de BM.

Paramètres	Conditions
$C_0$ (mg.L <sup>-1</sup> )	8
T (°C)	20±2
V (mL)	50
$m_{\text{MBene}}$ (g)	0.1
$\lambda_{\text{Max}}$ (nm)	311

### V.2. Isothermes d'adsorption

Les tests expérimentaux d'adsorption de BM ont été effectués sur les MBenes en utilisant le protocole suivant :

Des masses de MBene variant de 0.01 à 0.1 g sont mélangées avec des mêmes volumes de la solution de BM ( $V = 50 \text{ mL}$  ;  $C_0 = 8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) dans des flacons sombres et fermés à bouchons.

Ceux-ci sont placés sur un agitateur à oscillations horizontales (Ikalabor Technik KS 501) fonctionnant avec une vitesse d'agitation 225 cpm pendant un temps de contact allant jusqu'à une durée de 24 heures.

Après 24 h d'agitation, les différentes suspensions utilisées ont été soumises à des séparations (solide/liquide) par filtration sur membrane de porosité  $0,2 \mu\text{m}$ .

Les filtrats des différentes solutions utilisées sont analysés dans les mêmes conditions par spectrophotométrie UV-Visible à la même longueur d'onde  $\lambda_{\text{max}} = 311 \text{ nm}$ .



**Figure 20** : Photographie montrant le secoueur utilisé

### VI. Modélisation des cinétiques d'adsorption

La cinétique d'adsorption décrit la diminution de la concentration de l'adsorbat dans la solution en fonction du temps de contact avec l'adsorbant.

Elle fournit des informations relatives au mécanisme d'adsorption et sur le mode de transfert des solutés de la phase liquide à la phase solide. Plusieurs modèles cinétiques ont été proposés dans la littérature parmi lesquels nous présentons :

- Le modèle de pseudo –premier ordre [81].
- Le modèle de pseudo –second ordre [82].

#### VI.1. Modèle de pseudo premier ordre

La constante de vitesse d'adsorption du premier ordre est déduite à partir du modèle établi par Lagergren [83].

Cette équation sous sa forme non linéaire s'écrit :

$$Q_t = Q_e (1 - e^{-k_1 t}) \quad (12)$$

Où :

$Q_e$  et  $Q_t$  ( $\text{mg.g}^{-1}$ ) : sont les quantités de l'adsorbat adsorbée à l'équilibre et à l'instant  $t$  (min) respectivement

$K_1$  : est la constante de vitesse d'adsorption de pseudo de premier ordre ( $\text{min}^{-1}$ )

#### VI.2. Modèle de pseudo second ordre

L'équation du pseudo second ordre est souvent utilisée avec succès pour décrire la cinétique de la réaction de fixation des polluants sur l'adsorbant [84].

Ce modèle irréversible permet de caractériser les cinétiques d'adsorption en prenant en compte, à la fois, le cas d'une fixation rapide des solutés sur les sites les plus réactifs et celui d'une fixation lente sur les sites d'énergie faible.

L'équation de modèle peut être écrite sous la forme suivante :

$$Q_t = \frac{Q_e^2 K_2 t}{(1 + Q_e K_2 t)} \quad (13)$$

Où :

$K_2$  : est la constante de vitesse d'adsorption de pseudo –second ordre ( $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ).

$Q_e$  et  $Q_t$  : sont les quantités du soluté adsorbées à l'équilibre et à l'instant  $t$  (min) respectivement .

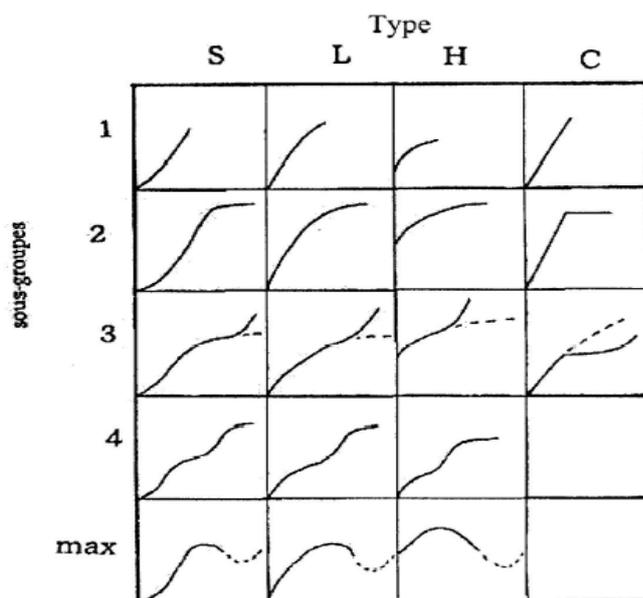
### VII. Classification des isothermes d'adsorption

Les capacités des adsorbants à adsorber les différents constituants d'un mélange constituent le facteur le plus déterminant pour les performances de la majorité des procédés d'adsorption.

Il est par conséquent essentiel de bien connaître les propriétés d'équilibre adsorbat –adsorbant pour pouvoir concevoir et dimensionner correctement les procédés d'adsorption [85].

Expérimentalement, on distingue quatre classes principales nommées :

- **S** ( Sigmoide )
- **L** ( Langmuir )
- **H** ( Haute affinité )
- **C** ( Partition Constante )



**Figure 21** : Classification des isothermes d'adsorption selon Giles et al. [86].

### VIII. Modélisation des isothermes d'adsorption :

Plusieurs modèles sont utilisés dans la littérature scientifique pour décrire l'adsorption de molécule à l'interface solide – solution [87].

Parmi les modèles représentant la relation à l'équilibre entre la quantité adsorbée  $Q_e$  et la concentration du soluté en solution  $C_e$ , nous pouvons citer deux modèles classiques :

- Modèle de Langmuir
- Modèle de Freundlich

### VIII.1. Modèle de Freundlich

Le modèle simple et empirique de Freundlich est le plus communément utilisé.

On considère qu'il s'applique à de nombreux cas, notamment dans le cas de l'adsorption en multicouches avec possibles interactions entre les molécules adsorbées selon l'équation suivante :

$$Q_e = K_f \cdot C_e^n \quad (14)$$

Où les paramètres suivants représentent :

$K_f$  : constante relative à la capacité d'adsorption

$C_e$  : concentration de l'adsorbat à l'équilibre (en  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )

$Q_e$  : quantité adsorbée à l'équilibre exprimé (en  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )

La constante  $n$ , donne une indication sur l'intensité de l'adsorption. Il est généralement admis que des faibles valeurs de  $n$  ( $0.1 < n < 0.5$ ) sont caractéristiques d'une bonne adsorption, alors que celles les plus élevées révèlent une adsorption modérée ( $0.5 < n < 1$ ) ou faible ( $n > 1$ )

La constante  $n$  est très souvent remplacé par  $1/n$  qui désigne aussi le facteur d'hétérogénéité [88].

### VIII.2 Modèle de Langmuir :

Le modèle d'isotherme proposé par Langmuir (eq 15) est le plus simple. Il repose sur l'hypothèse où chaque site donne lieu à l'adsorption d'une molécule d'adsorbat.

Dans ce modèle, l'équation est réversible puisque le nombre de molécules qui arrivent à la surface est égal à celui qui la quittent [89]

$$Q_e = Q_{max} \frac{k_1 \cdot C_e}{1 + k_1 \cdot C_e} \quad (15)$$

Où les paramètres suivants représentent :

$Q_e$  : Quantité adsorbée expérimentale par unité de masse ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )

$Q_{\text{max}}$  : Quantité maximale d'adsorption après extrapolation ( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )

$K$  : Constante d'équilibre de l'adsorption ( $\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$ )

$C_e$  : Concentration à l'équilibre du soluté dans la phase liquide ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )

# **Chapitre III**

## **Résultats et discussion**

## CHAPITRE 3 : Résultats et discussions

### Introduction

Dans ce chapitre, nous regroupons les interprétations des résultats relatifs à la caractérisation de MBene utilisée dans l'adsorption du MB. L'objectif primordial étant d'examiner et d'étudier leurs capacités d'adsorption en système batch.

### I. Caractérisation de la phase MBene et MXene

#### I.1. Diffraction des Rayons X

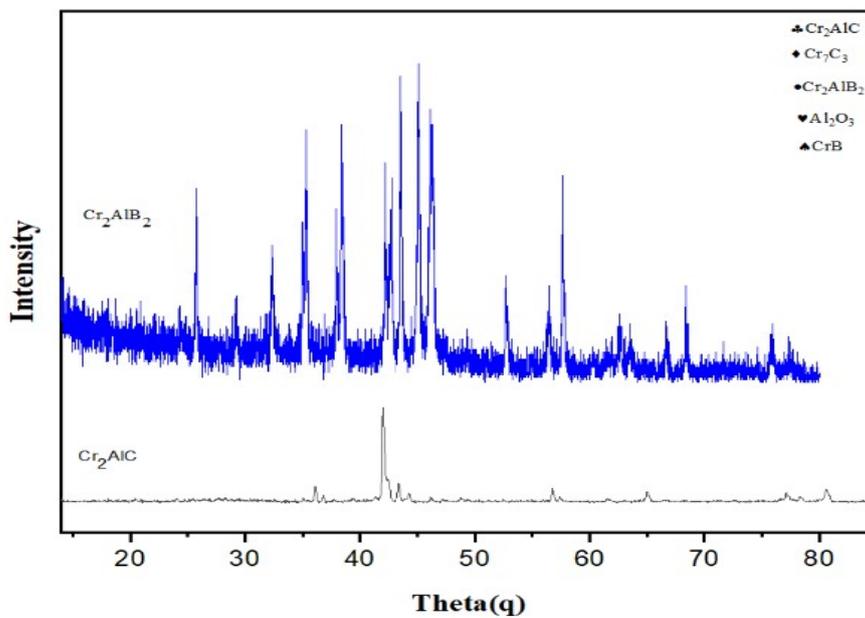


Figure 22 : Diffractogramme de la phase MAB

D'après les résultats de DRX nous avons pas la forme de MXene et MBene (on peut pas interprété ces résultats )

### I.3. Propriétés acido-basiques de surface (pHpzc)

La Figure 24 présente la courbe relative aux propriétés acido-basiques Q en fonction du pH.

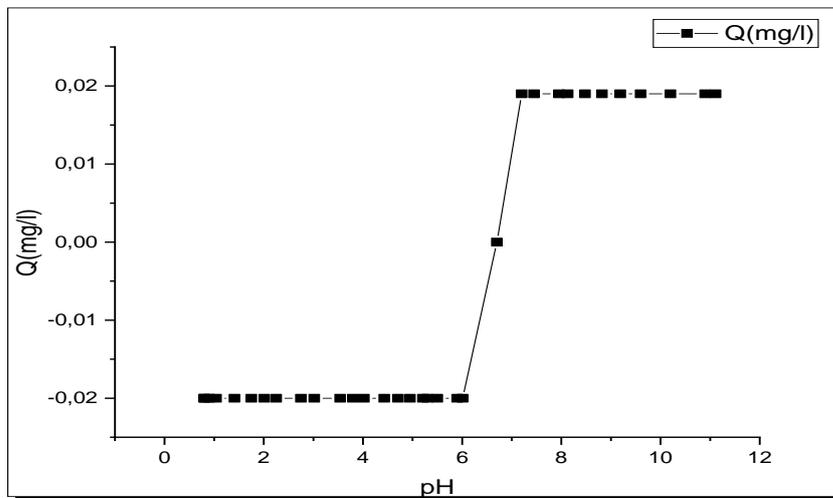


Figure 24 : courbe de  $Q_S = f(\text{pH})$

Le point de charge nulle est défini comme étant le pH de la suspension aqueuse dans laquelle le solide existe avec un potentiel électrique neutre.

Dans notre cas, la connaissance du pHpzc de la phase MBene permet de déterminer leurs caractères acides et/ou basiques.

Tableau 4 : Valeur expérimentale de pHpzc de MBene

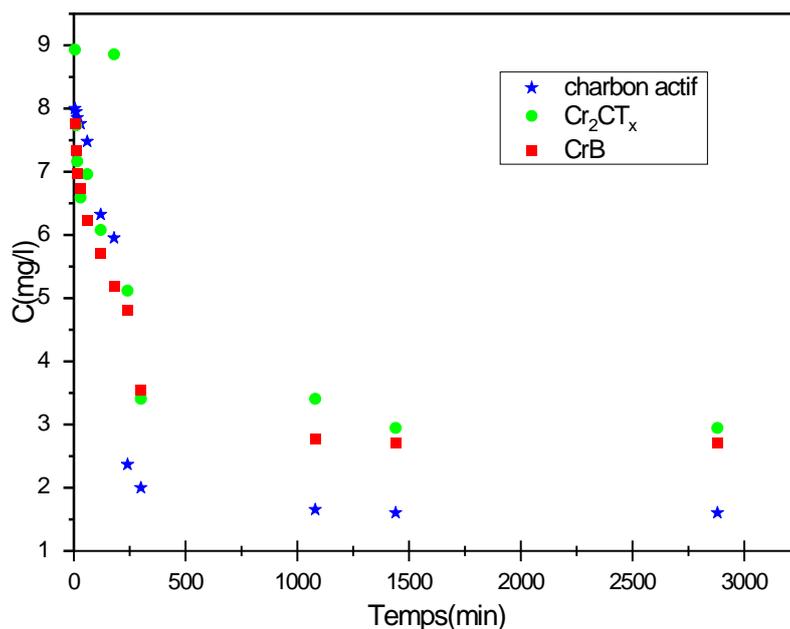
Échantillon	pHpzc
CrB	6

L'examen de cette Figure montre que l'évolution de la charge de surface des adsorbants en fonction du pH donne des valeurs de pHpzc 6. Ceci signifie que les charges de surface sont positives au-dessous de cette valeur et négatives lorsque le pH est supérieur à cette valeur.

## II. Adsorption du BM sur MB et charbon actif sur MBene et MXene

Cette partie est consacrée à l'emploi des phases MBene, MXene ainsi que le charbon actif commercial comme référence dans une série de tests d'adsorption, en mode discontinu, du bleu de méthylène choisi comme polluant modèle des colorants hydrosolubles.

Les résultats des cinétiques d'adsorption sont regroupés dans **la Figure 25**.



**Figure 25** : Cinétiques d'adsorption du colorant MB sur les matériaux utilisés

Nous avons étudié la cinétique d'adsorption du BM sur les phases MBene (CrB) et MXene (Cr<sub>2</sub>CT<sub>x</sub>) et sur charbon actif dans le but d'évaluer l'effet du temps de contact sur l'adsorption du BM. Les résultats correspondants sont exploités sous forme de courbes  $Q = f(t)$  et regroupés dans **la Figure 25**.

L'examen de ces résultats montre que l'équilibre d'adsorption de BM sur le charbon actif est atteint après 16h et l'équilibre d'adsorption sur le MBene et MXene sont atteints après 25h.

Les capacités d'adsorption du CrB et du Cr<sub>2</sub>CT<sub>x</sub> envers le BM sont de l'ordre de  $6.3 \text{ mg. g}^{-1}$  pour une concentration résiduelle à l'équilibre de  $6.1 \text{ mg. L}^{-1}$ . Ces résultats qui sont comparables avec ceux du charbon actif et d'autres matériaux de structure et de surface similaires suggèrent que les MXenes ayant des compositions et des chimies de surface adaptables et variées, s'avèrent des matériaux adsorbants en comparaison avec d'autres matériaux 2D [90] .

En particulier, l'adsorption rapide d'un polluant organique chargé positivement peut être l'un des avantages de l'utilisation du MBene comme adsorbant. Par la suite, le charbon actif a atteint un taux d'élimination de BM, et sa valeur était supérieure à celle du CrB pour l'élimination du BM.

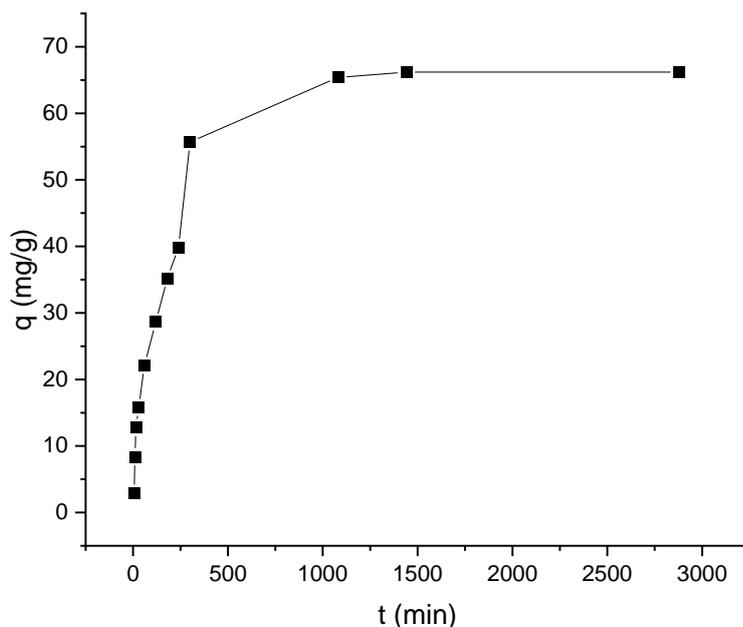
### III. Évolution de quantité en fonction de temps

Les résultats expérimentaux des cinétiques d'adsorption du bleu de méthylène sur les différents supports adsorbants utilisés ont été modélisés en appliquant les modèles cinétiques de pseudo-premier ordre et du pseudo-second ordre.

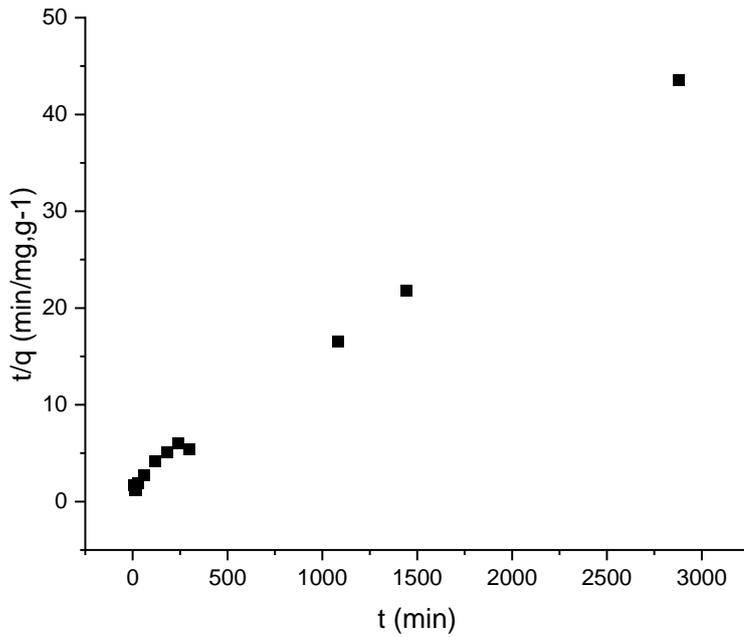
La plupart des études antérieures sur l'adsorption de différents ions métalliques [91, 92, 93] montrent que le modèle pseudo second ordre est plus fiable pour décrire la cinétique de l'adsorption.

En effet et comme le montre **la Figure 27**, l'application de modèle pseudo-second ordre aux résultats expérimentaux d'adsorption a donné des droites avec des coefficients de corrélation très élevés

(> 0,99). En revanche, l'application de modèle pseudo premier ordre n'a pas donné des formes linéaires.



**Figure 26** : Modélisation de la cinétique d'adsorption par le modèle de Pseudo premier ordre pour le BM sur le MBene



**Figure 27** : Modélisation de la cinétique par le modèle de Pseudo-deuxième ordre pour le BM sur le MBéne.

D'après les résultats obtenus indiqués dans le **Tableau 5** ci-dessous, le modèle du pseudo second ordre s'avère le plus fiable pour déterminer l'ordre de la cinétique d'adsorption du polluant puisque le coefficient de corrélation est proche de l'unité ( $R^2=1$ ).

De même, il a été constaté que la valeur de la capacité d'adsorption calculée est très proche de celle déterminée expérimentalement.

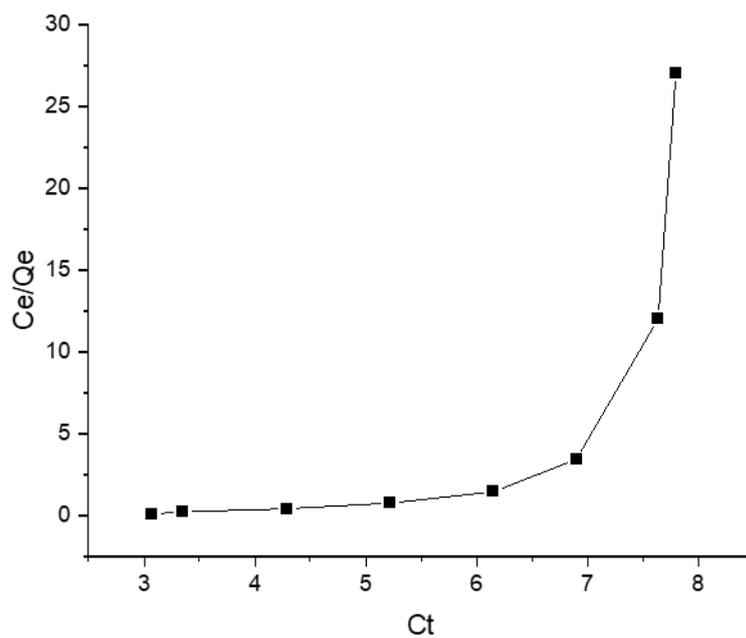
**Tableau 5** : Paramètres cinétiques de l'adsorption de MB sur le MBéne

	Modèle pseudo de premier ordre			Modèle pseudo de deuxième ordre		
	Qe (mg/g)	K <sub>1</sub> (min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	Qe (mg/g)	K <sub>2</sub> (min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
MBéne						
CrB	3.177	0.0206	0.581	69.44	1.26*10 <sup>-4</sup>	1

## V. Modélisation des isothermes d'adsorption

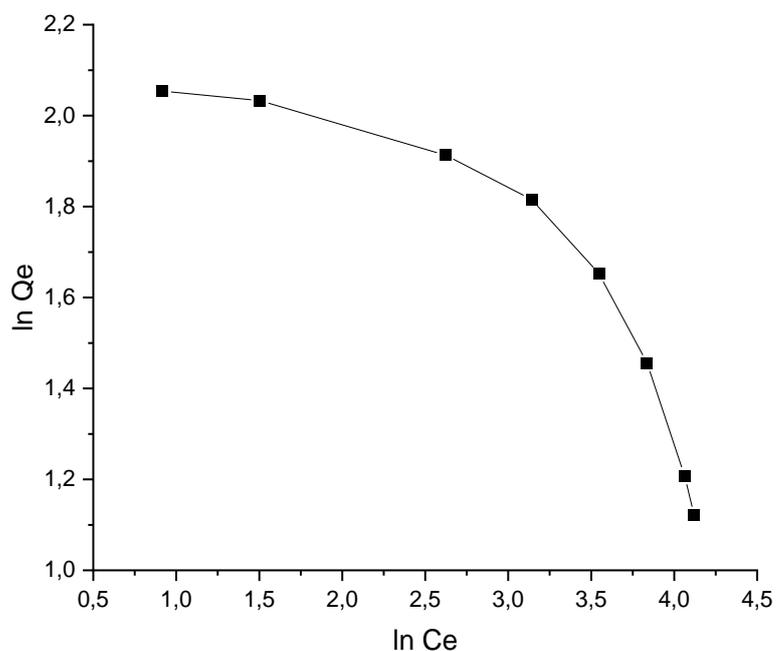
Pour la modélisation des isothermes d'adsorption, nous avons appliqué les deux modèles classiques Langmuir et Freundlich qui sont les fréquemment utilisés dans la littérature.

### V.1 Isotherme de Langmuir



**Figure 28** : Modélisation linéaire par le modèle de Langmuir de l'isotherme de l'isotherme de bleu de méthylène.

## I.6.2 Isotherme de Freundlich



**Figure 29 :** Modélisation linéaire par le modèle de Freundlich de l'isotherme de bleu de méthylène.

**Tableau 6 :** Valeurs des coefficients de corrélation et les paramètres des modèles étudiés

Modèle	Modèle de Langmuir			Modèle de Freundlich		
	$Q_{\max}$ (mg/g)	$R^2$	B	$K_F$ (L/mg)	$R^2$	n
CrB	2270.8	0.581	$1.44 \cdot 10^{-4}$	0.91	0.97	0.8

L'isotherme d'adsorption décrit la relation entre l'adsorbant et l'adsorbat c'est-à-dire le rapport entre la quantité adsorbée et celle qui reste dans la solution à l'équilibre.

D'après les résultats obtenus indiqués dans **le Tableau 6** ci-dessus, c'est le modèle Freundlich qui semble le mieux adapté pour décrire l'isotherme d'adsorption de bleu de méthylène sur le MBene puisque le coefficient de corrélation est proche de l'unité ( $R^2=1$ ).

## Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est de valoriser un matériau bidimensionnel à travers une étude expérimentale sur sa capacité d'adsorption du bleu de méthylène en solution aqueuse en vue d'une application dans le domaine du traitement des eaux.

Les résultats obtenus lors de notre étude ont pu mettre en évidence les constatations suivantes :

- La poudre de MBene préparée est un matériau bidimensionnel ayant des capacités d'adsorption intéressantes.
- L'équilibre d'adsorption sur le MXene Cr<sub>2</sub>CTx et MBene CrB est atteint après 25h.
- L'évolution de la charge de surface des adsorbants en fonction du pH donne des valeurs de pHPzc entre 6 et 8 (pHPzc ≈ 7).
- La surface des MBene est chargée positivement et les molécules de MB en solution sont chargées négativement.
- Les résultats de notre étude cinétique ont été bien caractérisés où le CrB et le Cr<sub>2</sub>CTx ont été utilisés comme adsorbants pour traiter les polluants organiques.
- L'adsorption du bleu de méthylène sur le MBene a montré que le pH initial et la masse de l'adsorbant donnent des pourcentages importants de la rétention du colorant.
- Le modèle de Freundlich décrit mieux le phénomène d'adsorption du bleu de méthylène sur les MBene (CrB).
- La modélisation de la cinétique de l'adsorption du BM est de second ordre.

