

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département Génie de l'environnement

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie des procédés

Spécialité : Génie des Procédés de l'environnement

Par

- **DJEDDOU AMEL**
- **BELHADJ WISSAME**

Intitulé

Etude sur la valorisation des déchets informatiques (écrans LED)

Soutenu le : 29/06/2022

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>N. MAGHRAOUI</i>	<i>MAA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>A. BAHLOUL</i>	<i>Pr.</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>B. BAHLOUL</i>	<i>MCA</i>	<i>Co-encadreur</i>	<i>ENS – Bou Saada</i>
<i>M. ASSASSI</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude au professeur A.

Bahloul et docteur B. Bahloul pour leurs aides et pour leurs temps qu'ils nous ont consacré et même pour leurs supervisions éclairées tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Aux membres de jury Dr. M. Assassi et Dr. N. Meghraoui, que nous remercions pour l'acceptation de juger ce modeste travail, ainsi que pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour:
Inaccessible, à la mère des sentiments fragiles qui ma bénie par ces
prières "Rabia" ma mère.*

A mon support dans ma vie, qui m'a appris et m'a supporter.

Mon cher "Taher"

A mes chers frères et mes sœurs.

A tous les personnes de ma grande famille.

A mes amies.

(Belhadj Wissam)

Dédicace

Je dédie ce mémoire

*A Ma chère maman à la femme qui a souffert sans me laisser souffrir,
qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort
pour me rendre heureuse mon adorable mère "Leila"*

*A ma force de vie Mon grand-père que je souhaite une bonne santé et
que dieu lui donne une longue et joyeuse vie. "Zarouge"*

A l'homme qui doit ma vie, ma réussite mon cher père.

*A Ma sœur "Dounia" et mes frères "Oussama, Abderrahim qui m'ont
toujours encouragé durant ces années d'études.*

*A Mon bonheur, Pour ses encouragements, son amour, sa compréhension
et d'être toujours à mes côtés, Mon cher mari "Billel"*

*A Mes amies et Mes proches pour leurs amours mes chers, Rayane,
Zaineb, Chaima, Mimi, Imen, Asma, Khaoula.*

(Amel Djeddou)

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Recherche bibliographique	
I.1. Déchets solides.....	2
I.2. Types des déchets solides.....	2
I.2.1. Déchets plastiques.....	2
I.2.2. Déchets céramique et verre.....	2
I.2.3. Déchets d'équipements électriques et électroniques	2
I.3. . Classification des déchets solide.....	3
I.3.1. Déchets dangereux.....	3
I.3.2. Déchets solides non dangereux	4
I.4. Impact de traitement des déchets solides sur l'environnement.....	5
I.5. . Impact des déchets solides sur la santé	5
I.6. Procédés de traitement des déchets solides.....	6
I.6.1. Traitement .biologique	7
I.6.1.1. Traitement biologique en présence d'oxygène (aérob.....	7
I.6.1.2. Traitement biologique en absence d'oxygène (anaérobiose)	8
I.6.2. Traitement thermique	10
I.6.2.1. Pyrolyse (thermolyse)	10
I.6.2.2. Incinération	12
I.7. Déchets informatiques.....	13
I.7.1. Classement de déchets d'équipement électrique et électronique (DEEE ou D3E) ..	14
I.7.2. Impact des déchets d'équipement électrique et électronique sur l'environnement.	14
I.7.3. Métaux lourds dans les déchets d'équipement électrique et électronique	14
I.8. Traitement des déchets solides	16

I.9. Cadre juridique sur la valorisation et le recyclage des déchets solides en Algérie.	18
I.9. Propriétés des éléments (indium et étain).....	20
1.9.a. Chimie de l'indium.....	20
I.9.b. Chimie de l'étain (Sn).....	21
Chapitre II : Techniques d'analyse	
II.1. Voltampérométrie cyclique.....	23
II.2. Voltampérométrie à ondes carrées.....	25
II.3. Spectroscopie infrarouge.....	26
II.4. Spectroscopie UV-visible	27
Chapitre III :Résultats et discussion	
III.1. Extraction de l'indium et de l'étain à partir d'un écran LED.....	29
III.2. Caractérisation par spectroscopie infrarouge.....	30
III.3. Analyse morphologique par MEB couplée avec EDX.....	32
III.2. Analyse de la poudre la poudre d'oxyde d'indium/oxyde d'étain récupérée par les méthodes électrochimiques.....	34
III.2.a. Caractérisation par voltampérométrie cyclique.....	34
III.2.b. Caractérisation par voltampérométrie à ondes carrées.....	35
III.2.2. Spectroscopie UV-visible.....	37

La liste des figures

Figure.I.1 : Photo des déchets solides.....	2
Figure.I.2 : Impact des déchets solides sur l'environnement.....	3
Figure.I.3 : Impact des déchets solides sur la santé	4
Figure.I.4: Traitement biologique	5
Figure.I.5: Le principe du compostage de déchets organiques	
défini.	
Figure.I.6: : Les phases de la méthanisation	
Figure.I.7 :pyrolyse et incinération combinées dans un même four à étage.	
Figure.I.8: Incinérateur	
Figure.I.9:déchets informatiques	
Figure.I.10 :déchets des écrans	
Figure II.1 : Cellule électrochimique	
Figure II.2. : Potentiostat /galvanostat	
Figure II.3. : Voltampérogramme cyclique entre E_i et E_d d'un système rapide	25
Figure II.4 : Séquence de balayage de potentiel utilisée en SWV (gauche) et exemple de courbe courant-potentiel obtenue (droite).....	26
Figure II.5 : Spectrophotomètre infrarouge à transformée Fourier	26
FigureII 6 : Schéma d'un spectrophotomètre et spectrophotomètre UV-visible (UV 1700).....	27
Figure III.1: Plaques de l'écran LED	29
Figure III.2: Extraction de l'indium et de l'étain dans un bain ultrasons.	29
FigureIII.3. : Quantité d'oxyde d'indium et d'oxyde d'étain (In_2O_3/SnO_2)	30
FigureIII.4:Spectre infrarouge de la poudre récupéré $In_2O_3 SnO_2$ /.....	31
Figure III.5 : Images MEB de la poudre récupéré In_2O_3/SnO_2	32
Figure III.6 : Spectres EDX de la poudre récupéré In_2O_3/SnO_2	33
Figure III.7 : Voltampérogrammes cycliques relatifs à une solution de $H_3BO_3/NaOH$ en absence(1) et en présence(2) de 200mg/l de la poudre récupérée (In_2O_3/SnO_2).....	34
Figure III.8 : Courbes de voltampérométrie à ondes carrées relatifs à une solution de $H_3BO_3/NaOH$ (1M) pH =10, en présence de 200 mg/l de la poudre récupérée (In_2O_3/SnO_2).....	35

Figure III.9 : Courbes de voltampérométrie à ondes carrées relatifs à une solution de H3BO3/NaOH (1M) pH =10, en absence (1) et en présence (2) de 200 mg/l de la poudre récupérée (In2O3/SnO2).....	36
Figure III.10 : Courbes de voltampérométrie à ondes carrées relatifs à une solution de H3BO3/NaOH (1M) pH = 7.....	37
Figure III.11 : Dithizone.....	38
Figure III.12: Spectre UV-visible de la solution dithizon /H3BO3, NaOH (pH = 7)....	39
Figure III.13: Spectre UV-visible de la solution dithizon /H3BO3, NaOH (pH = 10)...	40
Figure III.14: Spectre UV-visible de la solution contenant In2O3/SnO2 récupérée/dithizone (20 ppm) éthanol (1) solutions standards à différentes concentration de SnCl2 en présence de 1ml de dithizone (20 ppm) éthanol.....	41
Figure III.14: Courbe d'étalonnage des ions Sn²⁺ à différentes concentrations.....	42

Introduction générales

Après l'explosion de la demande en indium suite à l'émergence de la technologie d'écrans LED ou LCD, le recyclage s'organise. Une étude estimait alors qu'environ 50% de la consommation d'ITO était issue du recyclage. Cependant, cette estimation globale est contrastée. En 2005, le Japon enregistrait un taux de 50 à 60% de la production d'oxyde d'étain et d'indium (ITO) provenant d'indium secondaire, 10% à partir du recyclage d'écrans. L'indium primaire est issu de l'exploitation minière de minerai, l'indium secondaire est issu du recyclage ; on distingue le recyclage effectué dans le processus de mise en œuvre de l'indium dans une filière industrielle, comme couche ITO des écrans, et le recyclage effectué à partir des déchets ultimes d'équipements électroniques (écrans LCD, téléphones portables, smartphones, tablettes,...).

Les fabricants d'écrans LED ou LCD ont développé plusieurs procédés pour récupérer l'indium à partir des déchets d'écrans. De nombreuses publications scientifiques sur le sujet montrent l'intérêt de recycler ces déchets longtemps considérés non rentables vu la faible quantité d'indium dans un écran. Un rapport fait état d'environ 39 mg d'indium dans un écran d'ordinateur portable de 15,4 pouces [1]. Ce même rapport estime qu'une filière de recyclage de dispositifs d'affichage tactiles pourrait retirer en moyenne 174 g d'indium par tonne de déchets d'écrans.

Le but de ce travail est de faire une étude sur le recyclage et la valorisation des déchets des écrans de type LED. Ce type des écrans sont considérés comme un déchet d'équipement électrique et électronique, ce type d'équipement possède un potentiel de valorisation. C'est pour ça que le recyclage des écrans est fortement encouragé par les états développés dans le monde. Pour le protocole de recyclage nous commencerons par le démontage, le coupage en morceaux et l'extraction dans un bain acide sous ultrasons. Nous finirons par le traitement chimique de l'extrait avec une base. Ce produit final sera caractérisé et revalorisé.

Ce mémoire est constitué par trois chapitres distincts ; le premier chapitre trace un portrait des connaissances actuelles en matière de récupération des éléments métalliques et tout particulièrement, de l'oxyde d'indium et l'oxyde d'étain à partir des écrans d'ordinateurs. Les hypothèses et objectifs de recherche sont aussi présentés à la fin de ce premier chapitre. Le deuxième chapitre décrit, pour sa part, la méthodologie utilisée au cours de cette étude. Le troisième chapitre regroupe l'ensemble des principaux résultats de ce projet de maîtrise. Finalement la dernière section vient présenter les conclusions et les recommandations associées à cette étude.

I.1. Déchets solides

Le déchet est défini comme un produit dont la valeur d'usage et la valeur d'échange sont nulles pour son détenteur ou son propriétaire. Les déchets solides sont des restes qui sont à l'état solide, par exemples : les papiers usagés, des bouteilles en plastique ou en verre, des boîtes en carton, déchets d'équipements électriques et électroniques (Figure I.1), ...etc. Ces déchets sont généralement produits dans les maisons, appartements, les bureaux ou les magasins. Il s'agit de déchets ménagers [1].



Figure I.1 : Photo des déchets solides [2].

I.2. Types des déchets solides

Les déchets solides peuvent inclure une variété d'articles trouvés dans notre ménage ainsi que des emplacements commerciaux et industriels. Les déchets solides sont généralement répartis selon les types suivants :

- **Déchets plastiques** : Il s'agit de sacs, de pots, de bouteilles et de nombreux autres produits que vous pouvez trouver dans votre foyer. Le plastique n'est pas biodégradable, mais de nombreux types de plastique peuvent être recyclés. Ces déchets ne doivent pas être mélangés avec d'autres ordures ménagères. Il faut les trier et les placer dans un bac de recyclage.
- **Déchets céramique et verre** : Ces articles peuvent facilement être recyclés. Utilisez des bacs de recyclage de verre spéciaux et des banques de bouteilles pour les entreposer.
- **Déchets d'équipements électriques et électroniques** : Cette catégorie de déchets constituée des équipements en fin de vie comme les ordinateurs, imprimantes,

téléphones portables, appareils photos numériques, réfrigérateurs, jeux électroniques, télévisions, etc.).

I.3. Classification des déchets solide

Les déchets solides peuvent être classés en deux groupes principaux :

- ✓ Déchets solides dangereux ;
- ✓ Déchets solides non dangereux.

I.3.1. Déchets dangereux :

Les déchets solides dangereux qui peuvent présenter un danger pour la santé publique ou l'environnement en raison de leurs propriétés corrosives, explosives ou toxiques.

On trouve différentes dénominations existant afin de sous-catégoriser les déchets dangereux, notamment en fonction du producteur :

- Les déchets industriels dangereux (DID), anciennement appelés déchets industriels spéciaux (DIS);
- Les déchets dangereux des ménages (DDM), anciennement appelés déchets ménagers spéciaux (DMS);
- Les déchets d'activités de soins (DAS).

Concrètement, les grands types de déchets dangereux sont les suivants :

- Boues de stations d'épuration industrielles ;
- Bois et sous-produits du bois traités ou souillés ;
- Chiffons et absorbants souillés ;
- Déchets contenant du mercure ;
- Déchets phytosanitaires ;
- Déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) ;
- Déchet dangereux diffus (DDD) et spécifiques (DDS) ;
- Emballages souillés ;
- Fluides de coupe ;
- Fluides frigorigènes ;
- Huiles usagées ;
- Mâchefers ;
- Munition immergée ;
- Déchets contenant des polychlorobiphényles-polychloroterphényles (PCB-PCT) ;
- Peintures ;

- Piles et accumulateurs ;
- Solvants ;
- Déchets issus de la dépollution des sols ;
- Sources radioactives ;
- Véhicules hors d'usage (VHU) non dépollués
- Déchets d'activités de soins à risques infectieux et assimilés (DASRIA) ;
- Déchets amiantés ;
- Résidus d'épuration des fumées d'incinération des ordures ménagères.

I.3.2. Déchets solides non dangereux :

Les déchets non dangereux, quant à eux, ne présentent pas de danger pour la santé ou l'environnement. Ceux-ci peuvent à leur tour être subdivisés en plusieurs catégories :

- **Déchets ordinaires**, ces déchets sont produits au cours de la routine quotidienne dans les foyers, les écoles, les bureaux ou les hôpitaux.
- **Déchets biodégradables**, ces déchets se caractérisent par leur capacité à se désintégrer ou à se dégrader rapidement, en devenant un autre type de matière organique (les restes de nourriture, les fruits et les légumes ...etc).
- **Déchets inertes**, ces déchets se caractérisent par le fait qu'ils ne se décomposent pas facilement dans la nature, mais prennent beaucoup de temps à se décomposer. Parmi ces déchets, on trouve le carton ou certains types de papier.
- **Déchets recyclables**, ces déchets peuvent subir des processus qui permettent de les réutiliser. Il s'agit notamment du verre, des tissus, de certains types de plastiques et du papier.

En plus de cette classification, les déchets solides peuvent également être regroupés en déchets organiques et inorganiques :

- **Déchets organiques**, cette classification regroupe les déchets biodégradables.
- **Déchets inorganiques**, il s'agit de déchets qui, en raison de leurs caractéristiques chimiques, subissent une désintégration naturelle très lente.

Nombre de ces déchets peuvent être recyclés par des méthodes complexes, comme les boîtes de conserve, certains plastiques, le verre ou le caoutchouc. Dans d'autres cas, leur recyclage ou leur transformation n'est pas possible, comme dans le cas des piles, qui sont dangereuses et polluants [3].

I.4. Impact de traitement des déchets solides sur l'environnement

Le traitement et l'élimination des déchets liés aux soins peuvent entraîner indirectement des risques pour la santé en raison du rejet d'agents pathogènes et de polluants toxiques dans l'environnement (Figure I.2). S'il n'est pas bien réalisé, l'enfouissement des déchets peut contaminer l'eau potable. Les déchetteries mal conçues, mal gérées ou mal entretenues représentent un risque pour ceux qui y travaillent. L'incinération des déchets a été largement pratiquée mais une incinération imparfaite ou l'incinération de matériaux inadaptés à ce mode d'élimination entraîne le rejet de polluants et de résidus de cendres dans l'atmosphère. L'incinération de matériaux contenant du chlore peut produire des dioxines et des furanes, cancérogènes pour l'homme et qui ont été associés à divers effets néfastes sur la santé. L'incinération des métaux lourds ou de matériaux contenant une grande quantité de métal (en particulier du plomb, du mercure ou du cadmium) peut entraîner le rejet de métaux toxiques dans l'environnement [4].

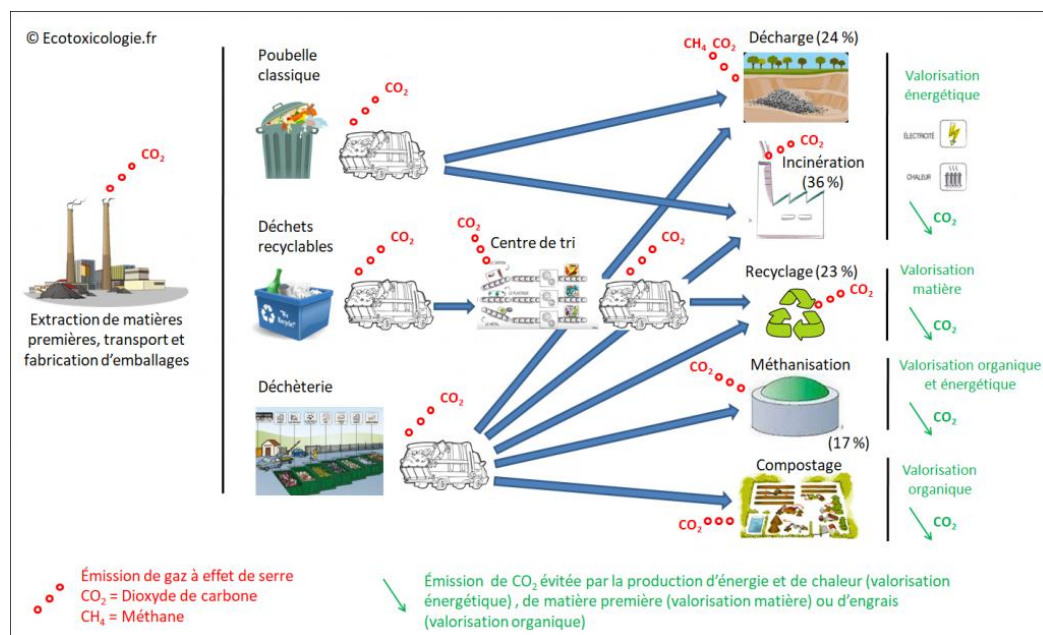


Figure I.2 : Impact des déchets sur l'environnement [5]

I.5. Impact des déchets solides sur la santé :

Les déchets liés aux soins de santé constituent un réservoir de micro-organismes susceptibles d'infecter les patients hospitalisés, les personnels de santé et le grand public. Les autres risques infectieux potentiels sont notamment le rejet dans l'environnement de micro-organismes pharmaco-résistants présents dans les établissements de soins. Les déchets et les

sous-produits peuvent également causer d'autres effets néfastes sur la santé (Figure I.3), par exemple: brûlures par irradiation; blessures causées par des objets pointus ou tranchants; intoxication et pollution dues au rejet de produits pharmaceutiques, en particulier d'antibiotiques et de médicaments cytotoxiques; pollution des eaux usées, intoxication par ces eaux et intoxication et pollution par des éléments ou des composés toxiques, tels que le mercure ou les dioxines libérées au cours d'une incinération.

Ils inhalent de la poussière ce qui porte atteinte à leur système respiratoire (toux, infection, suffocation, asthme) et ils souffrent d'irritation des yeux, Leur peau est fortement endommagée. Ils sont exposés à des métaux lourds qui sont cancérigènes (plomb, mercure, cadmium, PVC) et qui endommagent les systèmes nerveux, sanguin, reproductif, respiratoire, les reins et les os. Ils peuvent recevoir des chocs électriques lors du démantèlement des objets [6].

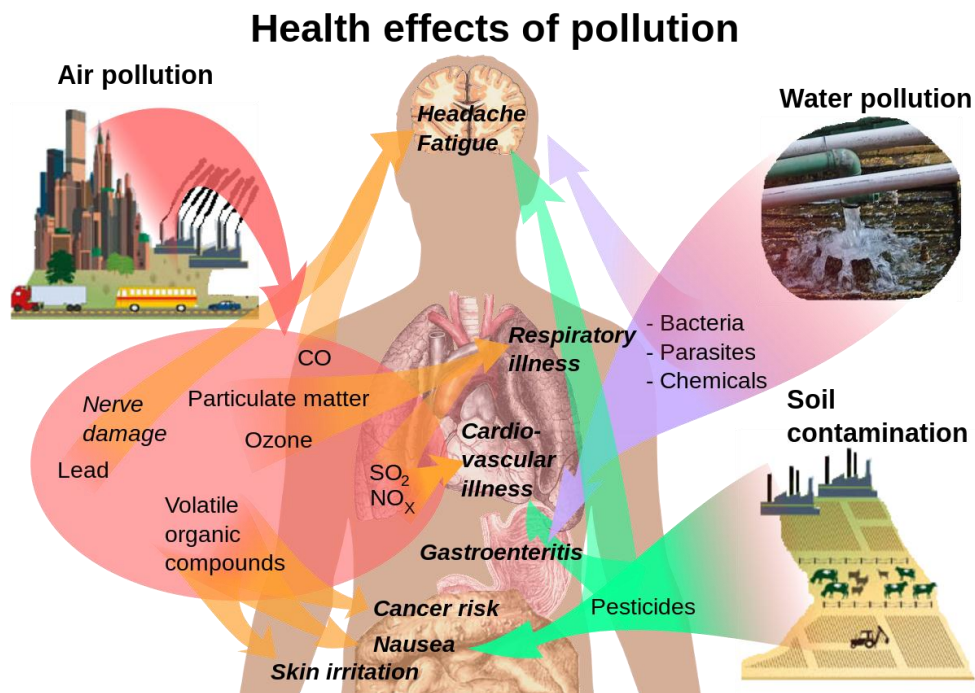


Figure I.3 : Impact des déchets solide sur la santé [7].

I.6. Procédés de traitement des déchets solides

Par traitement, tout processus qui tend à rendre les déchets moins volumineux et surtout moins polluants pour l'environnement et la santé. Le traitement des déchets est indispensable pour une raison élémentaire de salubrité. Aussi, traiter un déchet c'est lui permettre, d'une part, d'être enfoui pour ne pas générer des nuisances et d'être mis à l'écart des cycles pour ne pas les perturber, d'autre part, d'être rejeté dans le milieu environnant sans créer toutefois des pollutions supplémentaires. Si la matière du déchet finit forcément dans

l'une de ces voies, elle peut auparavant se réintroduire dans les circuits de production, de distribution ou de consommation, avant de redevenir déchet.

I.6.1. Traitement biologique :

Le traitement biologique a pour effet de transformer les matières fermentescibles en un produit plus stable (Figure I.4). Le compost, susceptible d'être utilisé en tant qu'amendement organique ou support de culture, deux modes de dégradation de la matière organique sont possible :

- En présence d'oxygène (aérobiose), il s'agit de compostage
- En absence d'oxygène (anaérobiose), il s'agit de méthanisation.

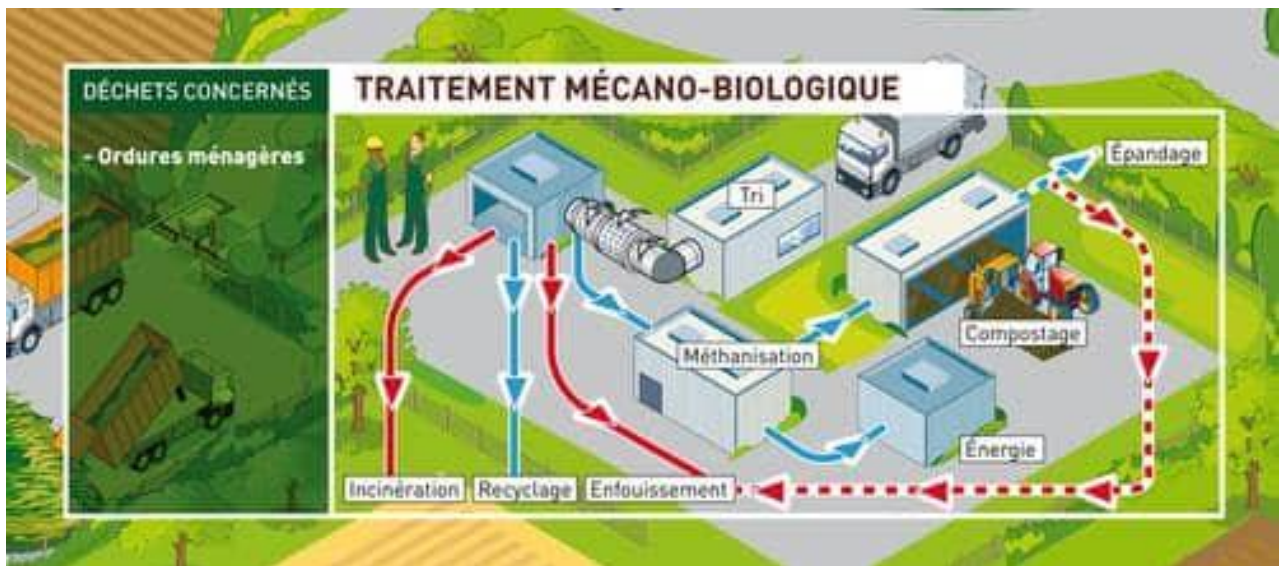


Figure I.4 : Traitements mécano-biologiques [8]

I.6.1.1. Traitement biologique en présence d'oxygène (aérobiose) :

Le traitement biologique en présence d'oxygène (aérobiose) ou le compostage (Figure I.5) est un processus biologique qui facilite et accélère l'oxydation de la matière organique par fermentation aérobie qui s'effectue sous l'action d'enzymes sécrétés par des microorganismes préexistants dans les déchets, le principe du compostage de déchets organiques se divise en deux grandes phases principales (oxydative et maturation) [9]:

- La phase oxydative se caractérise par la dégradation aérobie de la matière organique fraîche. Ce qui engendre une production intense de chaleur et élève ainsi la température du compost. Afin d'assurer cette étape, un maintien minimal de la température à 60°C pendant 4 jours est préconiser pour éliminer les germes pathogènes contenus dans le flux de matières organiques. L'activation microbienne

et l'élévation de la température entraînent une consommation importante d'oxygène et d'eau, donc pour satisfaire les besoins microbiens, il faut effectuer un arrosage périodique et une aération de la matière à traiter.

- La phase de maturation constructive où apparaissent lentement des éléments précurseurs de l'humus. La dégradation lente des composés résistants ne nécessite ni arrosage ni aération. Il se traduit par la synthèse d'un produit stable : le compost.

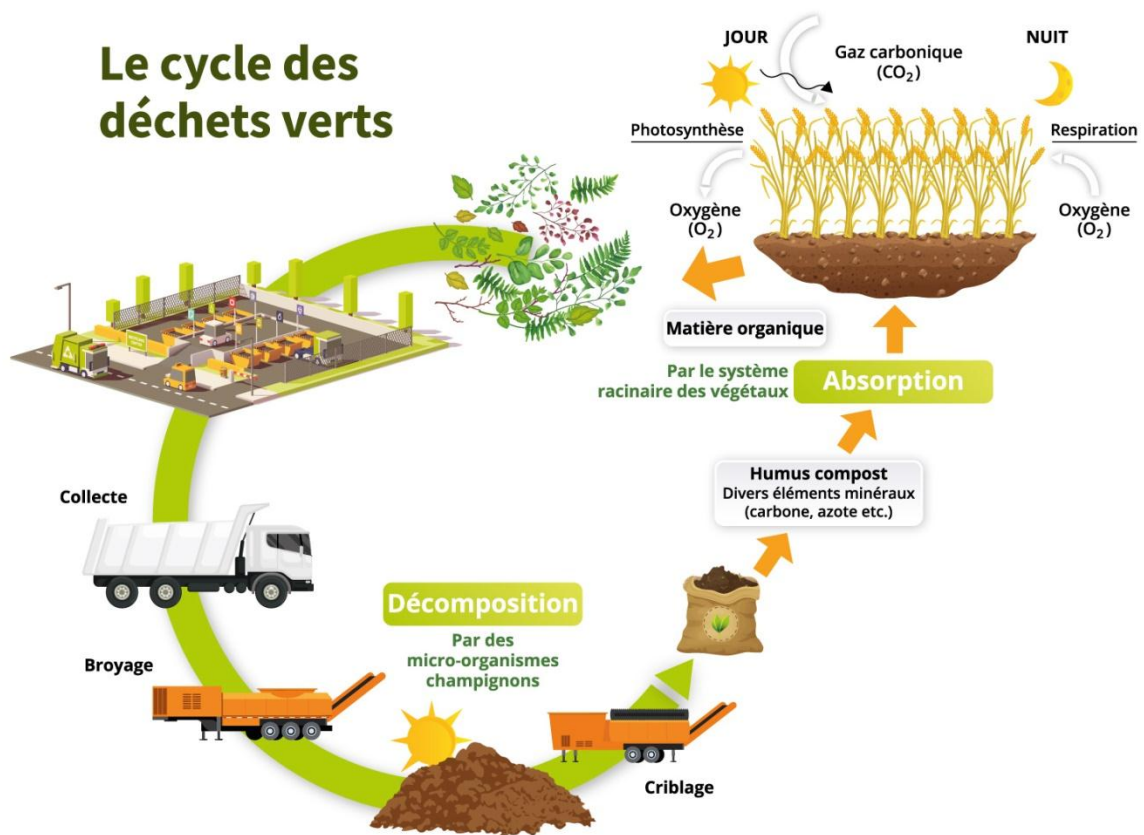


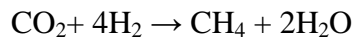
Figure I.5 : Le principe du compostage de déchets organiques [10]

I.6.1.2. Traitement biologique en absence d'oxygène (anaérobiose)

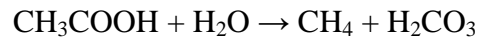
Le traitement biologique en absence d'oxygène (anaérobiose) ou la méthanisation consiste à la décomposition anaérobie des déchets organiques, fraction fermentescibles : ordures ménagères, déchets verts, déchets de l'agro-alimentaire, et qui permet de produire un biogaz combustible composé majoritairement du méthane (CH₄) [11]. La méthanisation s'opère en quatre phases [12] (Figure I.6) :

- Avec l'hydrolyse, les polymères se dégradent en monomères, des petites molécules solubles assimilables par les bactéries apparaissent : la cellulose se transforme en glucose et cellobiose ;
- La transformation des monomères en gaz carbonique et acide organique constitue l'acidogénèse ou fermentation, il apparaît alors les acétates, de l'éthanol, de l'ammoniaque, de l'hydrogène et des acides gras volatils comportant de 2 à 5 atomes de carbone ;
- Au niveau de l'acétogénèse, les micro-organismes transforment les acides gras volatils et alcools de l'étape précédente en hydrogène, gaz carbonique et acétates, l'hydrogène sulfuré se trouve généré lors de cette phase de transformation ;
- Les bactéries méthanogènes interviennent ensuite pour élaborer le méthane (méthanogénèse) à partir d'hydrogène de gaz carbonique et des acétates suivant les réactions :

- De réduction de CO₂, (30%) :



- De décarboxylation de l'acide acétique, (70%) :



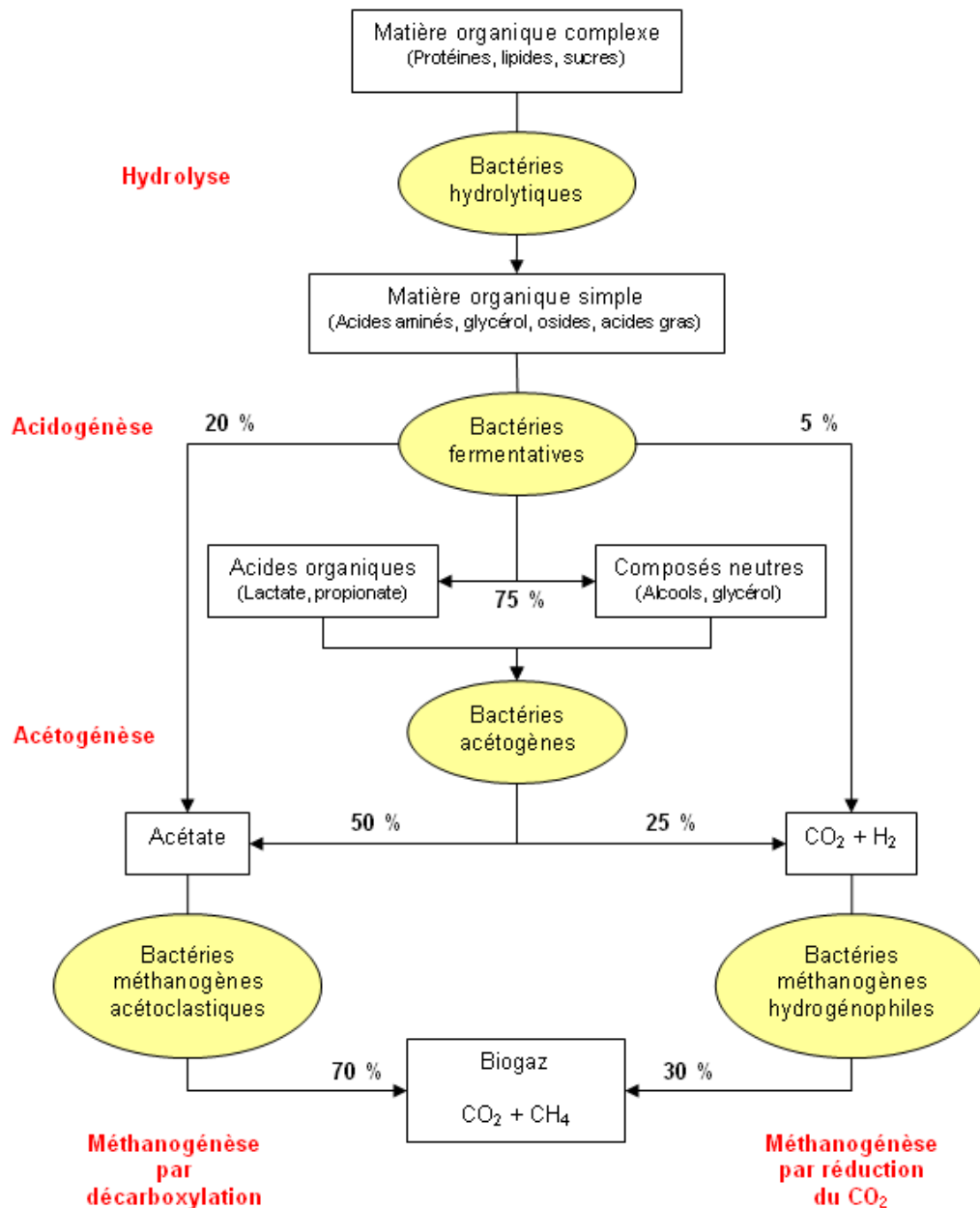


Figure I.6 : Les phases de la méthanisation [13].

I.6.2. Traitement thermique :

I.6.2.1. Pyrolyse (thermolyse) :

Le procédé qui tend à être de plus en plus utilisé consiste en un traitement thermique (500-800 °C) du déchet dans une atmosphère exempte d'oxygène. Il en résulte des réactions de dégradation thermique, de dépolymérisation, de craquage, éventuellement de combustion très incomplète, conduisant à la formation de gaz, de liquides, et de solides résiduaux [14]. La thermolyse et la pyrolyse produisent un résidu minéral composé des cendres minérales telles qu'elles existent en incinération dédiée auxquelles s'ajoutent le carbone fixé, l'ensemble

est appelé « char ». Les rendements thermiques des deux procédés sont similaires, en revanche, ils se différencient par les technologies mises en œuvre [15] :

- **La thermolyse** : implique dans la plupart des procédés un réacteur de type tambour rotatif à double enveloppe, l'apport calorifique se faisant exclusivement au travers de cette double enveloppe ;
- **La pyrolyse** : telle que décrite s'effectue généralement dans les fours verticaux à étages (à soles superposées).

Pour la thermolyse et la pyrolyse, le traitement du char se fait dans un réacteur indépendant sauf lorsque la pyrolyse s'effectue dans un four à étages où le traitement du char peut également y être réalisé.

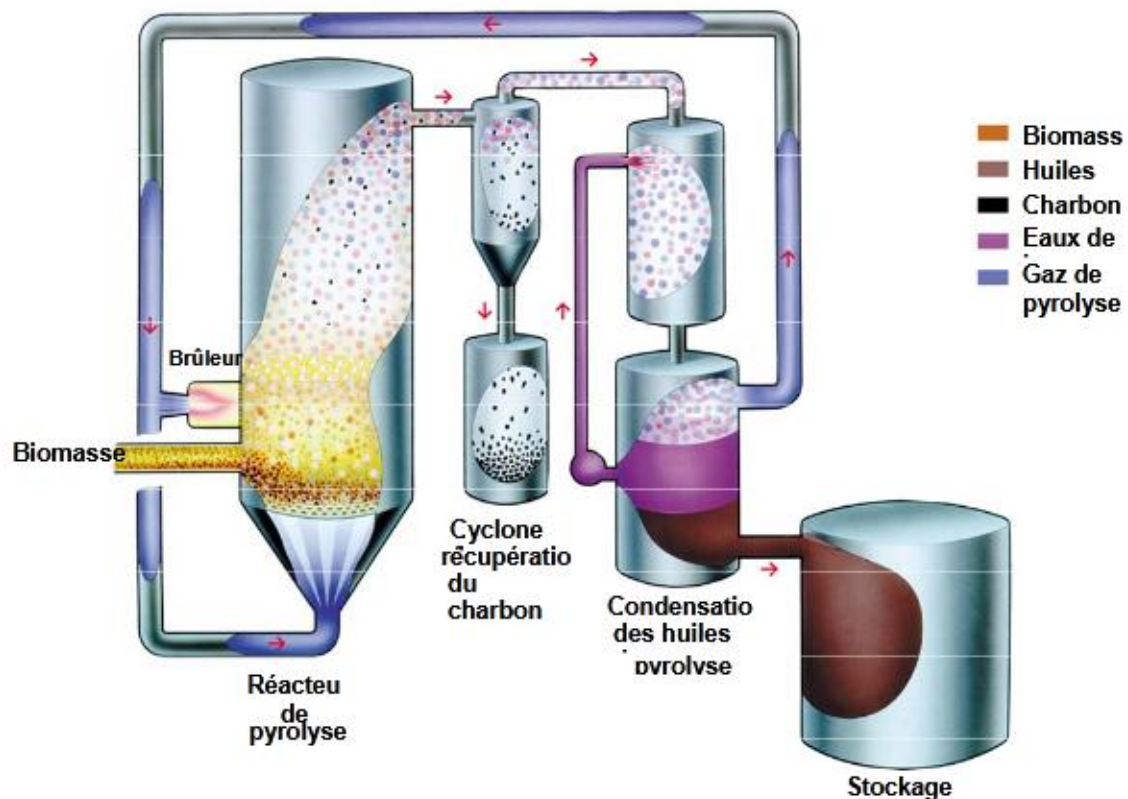


Figure I.7 : Incinération par pyrolyse [16]

Les principales caractéristiques des procédés de pyrolyse rapides sont [12] (Figure I.7) :

- des vitesses de transfert de chaleur très rapides qui nécessitent pour la grande majorité des réacteur mis en œuvre à ce jour un broyage fin de la biomasse avant introduction dans le réacteur,
- un contrôle précis de la température de pyrolyse, vers 500°C, avec des temps de séjour des vapeurs courts, typiquement moins de 2 secondes,

- un refroidissement rapide des gaz de pyrolyse pour maximiser les liquides par rapport aux gaz.

Bien que de nombreux types de réacteurs aient été développés pour les procédés de pyrolyse rapide, la configuration en lits fluidisés est la plus développée. Cela provient du fait de leur simplicité d'emploi et de leur relative facilité de mise en échelle pour des développements industriels.

I.5.2.2. Incinération :

L'incinération vise la minéralisation totale des déchets par combustion de la phase organique dans des fours spéciaux adaptés à leur caractéristiques (hétérogène, pouvoir calorifique variable...) outre cette minéralisation quasi-totale des déchets, l'incinération permet une réduction de 70% environ de la masse des déchets entrants et de 90% de volume. Les sous-produits solides générés, mâchefers sont des déchets ultimes, toutefois, les mâchefers peuvent sous condition, faire l'objet d'une utilisation comme substitut de granulats naturels. L'incinération, comme tout traitement thermique, doit être menée dans des conditions optimales, à proximité de la capacité nominale des équipements et être assortie d'un traitement des gaz (dépoussiérages, neutralisation, piégeage des métaux lourds) pour éviter un transfert de pollution significatif vers l'atmosphère (Figure I.8) [17].

La chaleur dégagée par les incinérateurs peut être récupérée sous forme de vapeur, par passage des fumées à travers des tubules des chaudières. La vapeur ainsi produite est utilisée de trois façons [18, 15] :

- Alimenter un réseau de chauffage;
- Alimenter un turbo alternateur produisant de l'électricité;
- Pour la cogénération qui consiste à la fois de la chaleur et de l'électricité [19].



Figure I.8 : Incinérateur [20].

I.6. Déchets informatiques

Les déchets informatiques se sont une catégorie de déchets constituée des équipements en fin de vie fonctionnant à l'électricité ou via des champs électromagnétiques ainsi que les équipements de production, de transfert et de mesure de ces courants et champs (ce sont surtout des ordinateurs, imprimantes téléphones portables, appareils photos numériques jeux électroniques, télévisions, etc...) (Figure I.9). Ces déchets ont une empreinte écologique très élevée en raison des importantes quantités de ressources en eau, métaux, et énergies mobilisées par la conception, la fabrication, le transport, l'utilisation et le recyclage des composants et objets électriques et électroniques [21].



Figure I.9 : Déchets informatiques [22, 23]

I.6.1. Classement de déchets d'équipement électrique et électronique (DEEE ou D3E) :

Les déchets d'équipement électrique et électronique sont classés en différentes catégories selon leurs types [6], on trouve :

- Catégorie 1 : Gros appareils ménagers froid et hors froid (GEM),
- Catégorie 2 : petits appareils ménagers (PAM),
- Catégorie 3 : Equipements Informatiques et de télécommunications comme les écrans, ordinateurs, imprimantes, téléphones,..etc
- Catégorie 4 : Matériel grand public comme les télévisions, vidéoprojecteurs, webcam,..etc
- Catégorie 5 : Matériel d'éclairage,
- Catégorie 6 : Outils électriques et électronique,
- Catégorie 7 : Jouets, équipements de loisir et de sports
- Catégorie 8 : Dispositifs médicaux,
- Catégorie 9 : Instruments de surveillance et de contrôle,
- Catégorie 10 : Distributeurs automatiques,
- Catégorie 11 : Panneaux photovoltaïques.

I.6.2. Impact des déchets d'équipement électrique et électronique sur l'environnement :

Le stockage des déchets pollue les sols, les sous-sols, l'air et l'eau (nappe phréatique, cours d'eau) et rend impropre à la consommation les aliments issus de la chaîne alimentaire (lait, produits issus de l'agriculture...). L'atteinte à l'environnement s'avère nocive lors des phases de démantèlement, de récupération et d'élimination finale des matériaux dangereux car les substances toxiques sont directement déchargées dans les sols. Le brûlage des fils électriques contribue à polluer l'air ambiant et à former des amas de cendres polluants. Les combustibles (pneus, mousse isolante) toxiques polluent les sites d'incinération par le rejet de substances qui appauvrissent la couche d'ozone et qui contribuent à produire des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les matériaux qui ne sont pas utiles sont enfouis sous terre ou abandonnés ce qui contribue à polluer l'environnement [24].

I.6.3. Métaux lourds dans les déchets d'équipement électrique et électronique

Le plomb incorporé au verre du tube à rayons cathodiques protège l'utilisateur des radiations. La quantité de plomb varie entre 0,4 et 3 kg pour un écran, selon la taille et l'année

de fabrication, la moyenne classique étant de 1,36 kg17. Les écrans plats ne renferment pas de plomb et consomment 33 % moins d'énergie qu'un écran cathodique de même surface d'affichage. Par contre, chaque écran plat renferme entre 0,12 mg et 5 mg de **mercure** servant au rétroéclairage, de même que de l'arsenic utilisé pour prévenir la formation de défauts (bulles d'oxygène) pendant la production du verre. Du côté des téléphones cellulaires, ce sont davantage l'arsenic, le cadmium, le plomb et les retardateurs de flammes présents dans le plastique de l'appareil qui représentent un danger (Figure I.10).



Figure I.10: Ecrans [25]

Les cartes de circuits imprimés, ces plaquettes multicolores et en relief où se trouvent les circuits de l'ordinateur, contiennent divers métaux lourds, dont le mercure, le cadmium et une légère quantité de plomb. Les concentrations de plomb sont cependant beaucoup moins élevées que dans les tubes à rayons cathodiques. Les cartes électroniques assurent l'intelligence de l'équipement. Elles sont constituées de plaques formées d'un assemblage de cuivre, de résine époxy (un plastique thermodurcissable) et de fibre de verre, sur lesquels les composants électroniques sont soudés. La soudure est composée d'un mélange d'étain et de plomb. Dans les appareils les plus modernes, de la soudure sans plomb est utilisée pour des considérations environnementales [26].

La coque plastique protège l'équipement. Les plastiques utilisés sont de diverse nature. On retrouve en particulier de l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) et du polychlorure de vinyle (PVC). Des produits chimiques sont incorporés aux plastiques pour améliorer leur performance, en particulier des retardateurs de flammes (ignifuges bromés).

Les batteries rechargeables plusieurs technologies se sont succédé au cours des dernières années : les batteries nickel-cadmium, nickel-hydrure métallique, Lithium-ion et Lithium polymère. Comme leur nom l'indique, elles contiennent plusieurs éléments chimiques précieux comme le nickel, le cadmium ou le lithium [26].

I.7. Traitement des déchets solides

A l'étranger, les sociétés profitent et consomment de plus en plus de déchets d'équipements électriques et électroniques. Au bureau, les ordinateurs, imprimantes, téléphones, câbles et écrans se multiplient. Leurs déchets sont polluants et toxiques, sauf s'ils sont recyclés. Le recyclage des DEEE est donc nécessaire et surtout aujourd'hui obligatoire [27].

Le traitement des DEEEI consiste en un ensemble d'opérations englobant [22] :

- ✓ La dépollution,
- ✓ Le démontage,
- ✓ Le broyage,
- ✓ La valorisation ou préparation à l'élimination ou autre opération effectuée en vue de la valorisation ou de l'élimination.

La récupération, recyclage et valorisation des DEEE passe par plusieurs étapes :

- Le recyclage peut être défini comme le retraitement, dans un processus de production, des déchets aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins, à l'exclusion de la récupération d'énergie [27]. Il se met progressivement en place, par la réutilisation des outils ou du matériel par des structures de plus en plus organisées. La manière de collecter ces déchets varie d'une personne à une autre et d'une société à une autre, elle se fait par collecte des emballages en mélange ou non, en porte-à-porte ou sur des points d'apport volontaire. Suivant ce mode de collecte et suivant les matériaux, ceux-ci seront soit orientés directement vers la filière de recyclage (exemple : les cartouches d'encre sont généralement collectées seules par des collecteurs spécifiques et ensuite directement livrées à la filière de recyclage à l'intérieur du pays ou par des intermédiaires qui les acheminent vers les pays voisins. Ceux qui reçoivent des conteneurs d'équipements électroniques et informatiques en provenance des pays développés les reconditionnent avant de les mettre sur le marché local. Les déchets déposés dans la poubelle font l'objet d'un tri par des récupérateurs avant d'être menés à l'incinération ou en dépôt de transit, sauf quelques très rares cas. Quant aux équipements électroniques et informatiques, le recyclage se fait par les recycleurs qui font la réutilisation des pièces (carte mère, disque dur, lecteur CD, port USB, carte mémoire, écran, processeur,...) pour réparer un appareil en panne ou pour améliorer la performance.
- La collecte des DEEE doit être compatible avec le mode de traitement et de valorisation. Sans collecte sélective, la valorisation matière est impossible. Par

ailleurs, la collecte sélective en vrac ne permet pas le réemploi des appareils entiers ou de certains de leurs composants. Il est donc indispensable d'organiser la collecte en fonction du type de traitement qui sera opéré sur les produits, qui pourrait rassembler tous les DEEE dans une plateforme de collecte ou une décharge finale construite dans le respect de toutes les normes de sécurité et d'environnement. La première étape de la collecte consiste à rassembler le matériel obsolète au niveau de chaque producteur. Ce dernier devra faire l'inventaire du stock dont il dispose et le garder séparément des autres déchets. Cette phase peut être appelée pré-collecte et doit être entreprise à l'échelle individuelle. Les utilisateurs professionnels qui produisent en masse des DEEE peuvent abriter des points de collecte, tandis que les ménages peuvent, après la pré-collecte, transmettre leurs DEEE aux distributeurs, aux réparateurs/recycleurs ou même les mettre dans des poubelles installées à cet effet.

- La valorisation est une opération visant à éviter l'élimination définitive des déchets, y compris la réutilisation, opération pour laquelle des DEEI ou leurs composants, sont utilisés pour le même usage que celui pour lequel ils ont été conçus [27]. Il s'agit d'une activité dont l'intérêt économique et environnemental n'est pas négligeable. Devant la raréfaction des ressources naturelles de matières premières, la réutilisation des matériaux servant de « matières premières secondaires » est moins chère pour les fabricants. De plus, elle s'avère moins polluante en réduisant le recours à l'extraction minière des matières premières. C'est le cas des terres rares qui sont utilisées par le Japon à travers la récupération dans les DEEE pour éviter la pression économique (embargo et quotas) de la Chine qui détient les 95% des exportations mondiales quand on sait qu'elle possède les 37% de la réserve mondiale [28]. Par ailleurs, la récupération des matériaux précieux par les entreprises s'avère plus efficace. Cependant, la rentabilité de cette filière de valorisation des DEEE reste dépendante des cours boursiers des matières premières. Les procédés de traitement doivent être optimisés de telle sorte que la matière recyclée soit moins coûteuse que la matière première. Les autres difficultés concernent la problématique de l'approvisionnement en DEEE, de la gestion de leur flux et de leur répartition. De plus, elles doivent s'adapter en fonction de l'évolution technologique constante des appareils. Les procédés de traitement d'un écran plat n'est pas le même que celui des écrans cathodiques [29].

I.8. Cadre juridique sur la valorisation et le recyclage des déchets solides en Algérie

La gestion se définit comme étant l'action ou la manière de gérer, d'administrer, de diriger, d'organiser quelque chose. C'est une définition plus générale et par conséquent peu précise lorsqu'on parle de la gestion des déchets. La réglementation algérienne « **loi 01-19 du 12 décembre 2001** » définit la gestion des déchets comme « Toute opération relative à la collecte, au tri, au transport, au stockage, à la valorisation et à l'élimination des déchets, y compris le contrôle de ces opérations », Avec la croissance démographique et celle de la consommation, l'Algérie connaît une augmentation remarquable des déchets, dont la quantité estimée des déchets solides générés annuellement est près de 13 millions de tonnes, et plus de la moitié de cette quantité est constitués de déchets ménagers et assimilés. La loi n°01-19, a apporté une nouvelle dynamique qui repose sur le principe de hiérarchisation ; c'est-à-dire la prévention par la réduction des déchets à la source, le développement de la réutilisation et du recyclage, la responsabilité des producteurs, la réduction de l'incinération et de l'enfouissement. L'objectif, aujourd'hui, est d'améliorer les performances des consignes de tri, de développer des filières de recyclage et de valorisation. La prévention est donc la première priorité de la politique nationale des déchets. En effet, durant cette année une attention particulière est accordée à la collecte sélective à travers la mise en place de déchetteries et de centres de tri déjà opérationnels qui permettront à cette industrie de récupération et de valorisation des déchets de se mettre en place progressivement à l'échelle nationale.

La loi oblige de se défaire ou de l'éliminer tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou, plus généralement, tout objet, bien meuble dont le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont. La présente loi classe ces déchets par catégorie [31] :

- Déchets ménagers et assimilés : tous déchets issus des ménages ainsi que les déchets similaires provenant des activités industrielles, commerciales, artisanales, et autres qui, par leur nature et leur composition sont assimilables aux déchets ménagers.
- Déchets encombrants : tous déchets issus des ménages qui en raison de leur caractère volumineux ne peuvent être collectés dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés.
- Déchets spéciaux : tous déchets issus des activités industrielles, agricoles, de soins, de services et toutes autres activités qui en raison de leur nature et de la composition des

matières qu'ils contiennent ne peuvent être collectés, transportés et traités dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés et les déchets inertes.

- Déchets spéciaux dangereux : tous déchets spéciaux qui par leurs constituants ou par les caractéristiques des matières nocives qu'ils contiennent sont susceptibles de nuire à la santé publique et/ou à l'environnement.
- Déchets d'activité de soins : tous déchets issus des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif ou curatif, dans les domaines de la médecine humaine et vétérinaire.
- Déchets inertes : tous déchets provenant notamment de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation, qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge, et qui ne sont pas contaminés par des substances dangereuses ou autres éléments générateurs de nuisances, susceptibles de nuire à la santé et /ou à l'environnement.

Pour la gestion des déchets cette loi exige que toute opération relative à la collecte, au tri, au transport, au stockage, à la valorisation et à l'élimination des déchets, y compris le contrôle de ces opérations doit être effectuée par [31] :

- Collecte des déchets : le ramassage et/ou le regroupement des déchets en vue de leur transfert vers un lieu de traitement.
- Tri des déchets : toutes les opérations de séparation des déchets selon leur nature en vue de leur traitement.
- Traitement écologiquement rationnel des déchets : toute mesure pratique permettant d'assurer que les déchets sont valorisés, stockés et éliminés d'une manière garantissant la protection de la santé publique et /ou de l'environnement contre les effets nuisibles que peuvent avoir ces déchets.
- Valorisation des déchets : toutes les opérations de réutilisation, de recyclage ou de compostage des déchets.
- Elimination des déchets : toutes les opérations de traitement thermique, physico-chimique et biologique, de mise en décharge, d'enfouissement, d'immersion et de stockage des déchets, ainsi que toutes autres opérations ne débouchant pas sur une possibilité de valorisation ou autre utilisation du déchet.
- Immersion des déchets : tout rejet de déchets dans le milieu aquatique.
- Enfouissement des déchets : tout stockage des déchets en sous-sol.

- Installation de traitement des déchets : toute installation de valorisation, de stockage, de transport et d'élimination des déchets.
- Mouvement des déchets : toute opération de transport, de transit, d'importation et d'exportation des déchets

I.9. Propriétés des éléments (indium et étain) :

1.9.a. Chimie de l'indium

L'indium est un métal de couleur gris-blanc argenté qui est souvent associé à des matériaux contenant du zinc, tels que des solutions solides dans la sphalérite (sulfure de zinc) et la marmatite [32]. Il s'agit donc d'un sous-produit important des opérations d'extraction du zinc métallique [33]. La chimie de ce métal est similaire à celle de l'aluminium et du gallium. L'indium est doté d'une température de fusion basse (156,6°C) et une température d'ébullition assez élevée (2 080°C). Sa forme la plus utilisée est l'ITO (Indium Tin Oxide) (90% indium et 10% étain). En termes de santé, l'indium ne représente pas un danger pour l'homme [34]. L'indium est un métal appartenant à la famille des métaux pauvres [35]. L'utilisation majeure de ce métal (80%) est dans la fabrication d'appareils électroniques, plus précisément dans les écrans LCD. En effet, ce métal permet d'allier facilement transparence et conductivité, propriétés nécessaires dans la couche conductrice des écrans (couche transparente conductrice se trouvant dans le verre LCD [36].

Le diagramme présenté sur la Figure I.11 renseigne sur la stabilité des différents composés de l'indium. On remarque que l'In(II) n'est pas représenté. En effet, l'ion In^{2+} est très instable même sous forme complexée. L'oxyde InO est également très réactif en présence d'eau. L'ion In^{3+} est l'espèce dissoute la plus stable en solution aqueuse. L'ion In^+ est en effet beaucoup moins stable que l'ion In^{3+} , et se dismute pour former In^{3+} et In^0 . On peut toutefois l'obtenir en faible concentration par oxydation d'une anode d'indium métallique en milieu acide perchlorique, mais sa stabilité est faible car il est rapidement oxydé par l'oxygène et les ions H^+ et peut également se dismuter. En milieu aqueux l'indium est un métal non noble, son domaine de stabilité étant entièrement situé au-dessous de celui de l'eau.

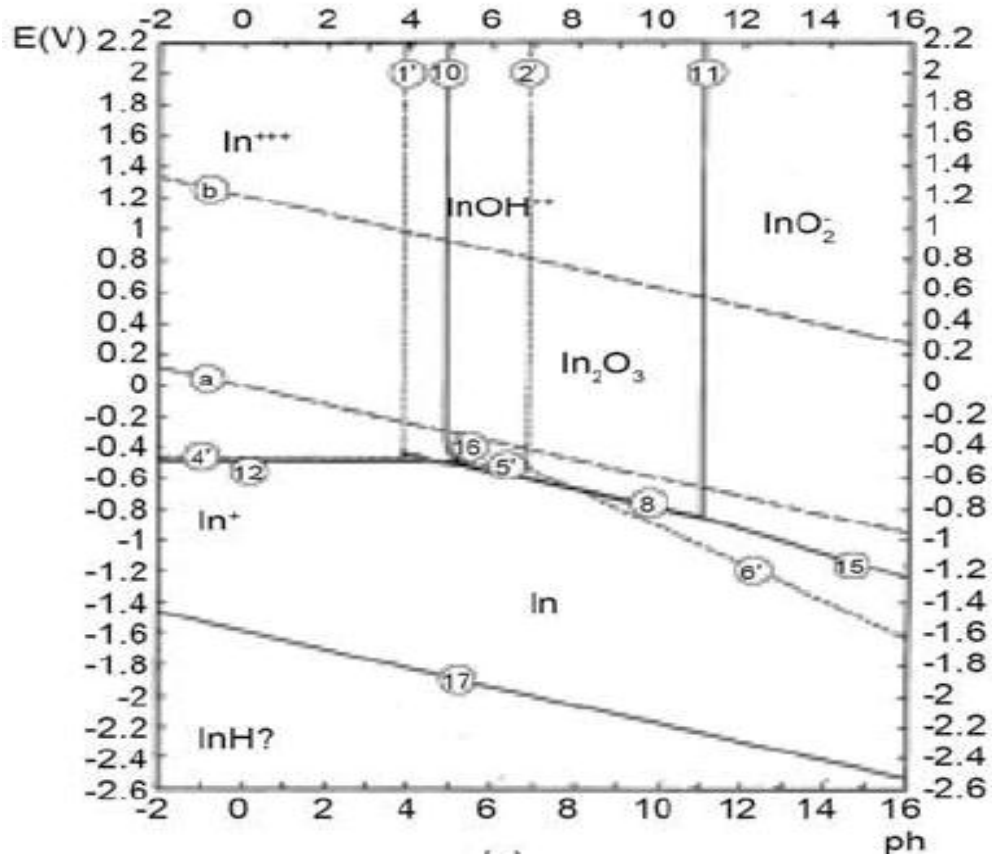


Figure I. 11 : Diagramme de Pourbaix de l'indium

En présence de solutions nettement acides ou nettement alcalines, l'indium se dissout avec dégagement d'hydrogène. Cette dissolution est accélérée par la présence d'agents oxydants. En solution non complexante, pour un pH compris entre environ 3 et 5 et 11 à 15, l'indium se couvre d'un film d'oxyde d'indium protecteur In_2O_3 (passivation). C'est ce qui explique l'utilisation de l'indium pour augmenter la résistance à la corrosion de certains matériaux. La forme anhydre de l'oxyde In_2O_3 étant plus stable que sa forme hydratée, il est le seul à apparaître sur le diagramme indium-eau. L'oxyde d'indium est amphotère et peut être dissous en présence d'un excès de soude. Toutefois, cet oxyde est peu stable en solution alcaline et on peut observer sa re-précipitation après un certain temps. L'oxyde In_2O n'est pas représenté car les données thermodynamiques correspondantes sont inexistantes. Selon ce diagramme, une forte action réductrice pourrait corroder l'indium avec formation d'un hydrure volatil InH , vraisemblablement instable. L'hydrure InH_3 , très instable, n'est pas considéré dans le diagramme de Pourbaix.

I.9.b. Chimie de l'étain (Sn)

L'étain, métal phare de l'âge du bronze, est l'élément chimique de symbole Sn (du latin Stannum). Métal tendre, ductile, malléable, qui « pousse un cri » au pliage, il se laisse aisément laminer en feuilles (papier d'étain). L'étamage de tôles fines par immersion ou voie électrolytique constitue une protection anti-corrosion des boîtes de conserve alimentaires. C'est le métal dont la fusion est la plus aisée : température de fusion égale à 232 °C. Ceci a permis de préparer des alliages cuivre - étain connus sous le nom de bronzes, dont certaines propriétés sont meilleures que celles du cuivre. Il est utilisé aussi dans la fabrication du verre plat.

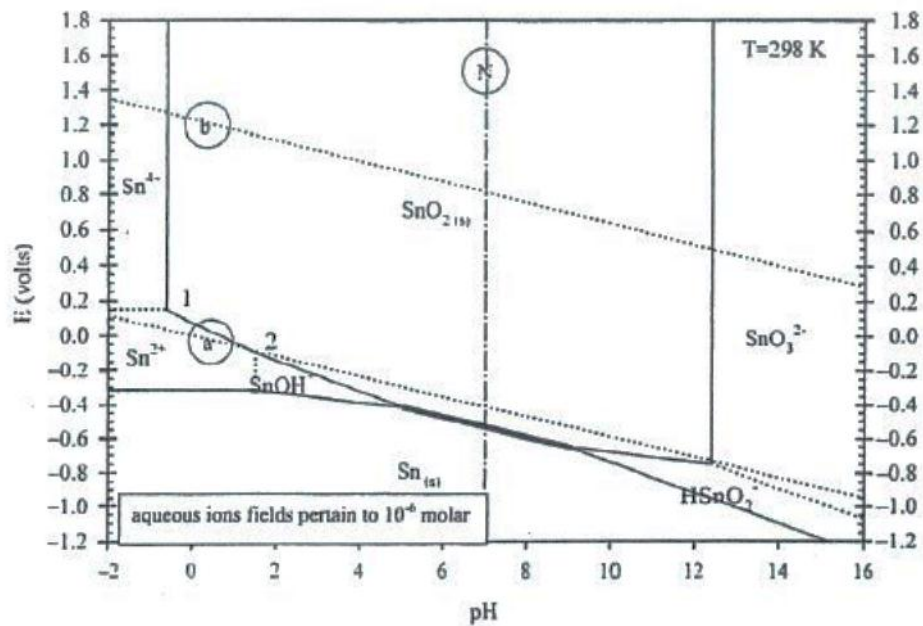


Figure I.12: Diagramme de Pourbaix de l'étain

Le diagramme potentiel-pH simplifié de l'étain est représenté sur la figure I.12. Les espèces prises en compte sont Sn, SnO₂, HSnO₂⁻, SnO₃²⁻, Sn²⁺ et Sn⁴⁺. On observe que l'oxyde d'étain SnO₂ se forme à un pH compris entre 0 jusqu'à 12.

II. Techniques d'analyse :

II.1. Voltampérométrie cyclique :

La voltampérométrie cyclique est une méthode rapide et facile à utiliser, qui permet d'obtenir rapidement des informations cinétiques concernant le système étudié. On peut ainsi distinguer des systèmes réversible ou irréversible, ou on peut différencier si le système est contrôlé par diffusion ou par adsorption. Dans le cas d'un contrôle par diffusion, une réaction de transfert de charge est caractérisée par l'apparition d'un pic de courant dont l'intensité maximale I_p varie selon la racine carrée de la vitesse de balayage. Une réaction rédox impliquant des espèces adsorbées à la surface donne également lieu à l'apparition d'un pic de courant, dont l'intensité maximale I_p varie linéairement avec la vitesse de balayage [37]. Le dispositif nécessite trois électrodes (Figure II.1):

- une électrode de référence à calomel saturée (ECS),
- une électrode auxiliaire (plaque de platine)
- une électrode de travail (carbone vitreux ou disque de platine)



Figure II.1 : Cellule électrochimique

Les tests électrochimiques ont été effectués en utilisant le dispositif indiqué dans la figure (II.2), et consiste en une cellule électrochimique à trois électrodes connectée à un potentiostat/galvanostat de type SP200 (BioLogic) assisté par ordinateur. Le choix de la méthode, le traitement des données et le tracé des courbes sont effectuées à l'aide d'un logiciel le EcLab.



Figure II.2. : Potentiostat /galvanostat

Le principe de la voltammétrie cyclique consiste à appliquer un balayage de potentiel de E_1 à E_2 suivi d'un balayage retour vers le potentiel initial E_1 à vitesse v constante afin de décrire un cycle de potentiel (E_2 est le potentiel d'inversion). C'est un balayage triangulaire du potentiel en fonction du temps qui est caractérisée par la vitesse de balayage $v = dE/dt$.

Cette technique consiste à mesurer le courant d'une électrode de travail en fonction d'une différence de potentiel variable imposée entre cette électrode et une électrode de référence. Ce potentiel varie de façon linéaire entre deux valeurs limites E_1 (potentiel initial) et E_2 (potentiel final), choisies par l'expérimentateur.

Avec une vitesse de balayage v , nous avons dans le cas de l'oxydation, $E(t) = E_1 + v t$ (balayage aller) et $E(t) = E_2 - v t$ (balayage retour) ; le potentiel étant balayé dans le sens inverse pour la réduction [3].

Le principe général de la voltampérométrie cyclique est l'obtention d'une réponse (le courant) à l'excitation (le potentiel) responsable de la réaction électrochimique désirée. Cette opération est réalisée en effectuant une exploration et variation progressive du potentiel d'électrode (balayage de potentiel). Les principales grandeurs caractéristiques d'un voltampérogramme sont données sur la figure II. 3.

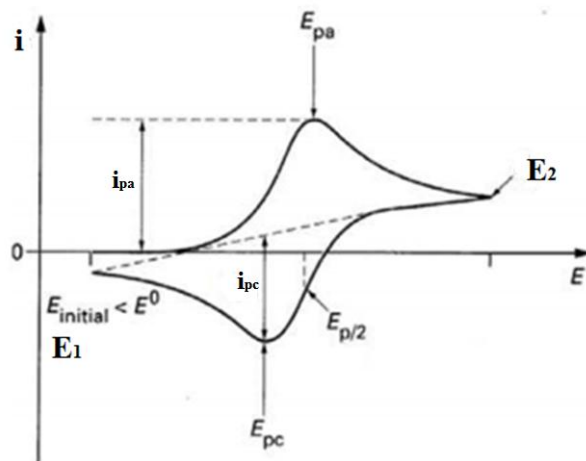


Figure II.3. : Voltampérogramme cyclique entre E_1 et E_2 d'un système rapide.

i_{pa} : densité de courant du pic anodique ;

i_{pc} : densité de courant du pic cathodique ;

E_{pa} : potentiel d'oxydation du pic anodique ;

E_{pc} : potentiel de réduction du pic cathodique.

$E_{p/2}$: potentiel à mi-hauteur du pic cathodique

II.2. Voltampérométrie à ondes carrées :

La voltampérométrie à onde carrée (SWV : square wave voltammetry) est une variante de la technique de voltammétrie différentielle où la durée de l'impulsion est égale à la moitié de la durée du palier de potentiel. Cependant, il est plus aisé de la considérer comme étant la surimposition d'une onde carrée à la rampe de potentiel, d'où son nom. Dans ce cas, chaque palier est constitué d'une impulsion de potentiel dans le même sens que le sens de balayage suivi d'une impulsion de même amplitude mais dans le sens inverse au sens de balayage. La différence de courant reportée sur la courbe intensité-potentiel est alors $I (i_{dir} - i_{inv})$ avec i_{dir} le courant mesuré sur l'impulsion dans le même sens que le balayage (dir pour direct) et i_{inv} le courant mesuré sur l'impulsion dans le sens opposé (inv pour inverse). La Figure 5 présente la séquence de balayage de potentiel utilisée en SWV ainsi qu'un exemple type de voltampérogramme obtenu.

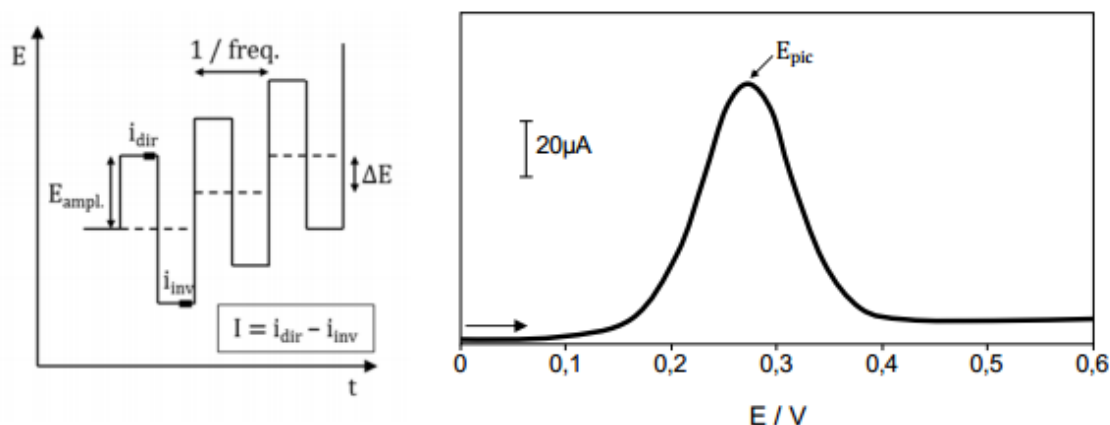


Figure II.4 : Séquence de balayage de potentiel utilisée en SWV (gauche) et exemple de courbe courant-potential obtenue (droite).

II.3. Spectroscopie infrarouge :

Le principe de la spectroscopie IR à transformée de Fourier est une technique fréquemment utilisée pour l'analyse de la matière organique. Elle repose sur l'interaction entre des ondes lumineuses et les vibrations des atomes des molécules. Lorsqu'un spectre polychromatique interagit avec un solide ou avec des molécules, on observe une absorption à certaine fréquence propre au solide ou à la molécule. Cette absorption, traduite sous forme de pics, correspond à des fréquences de vibrations. Chaque mode de vibration est caractérisé par une énergie particulière.



Figure II.4 : Spectrophotomètre infrarouge à transformée Fourier

Cette technique permet d'analyser la matière à l'état gazeux, liquide ou solide. On observe principalement des bandes en rapport avec deux modes de vibrations :

- Vibration d'élongation, c'est l'oscillation de deux atomes liés dans l'axe de leur produisant une variation périodique de leur distance

- Vibration de déformation, c'est l'oscillation de deux atomes liés à un troisième, produisant une variation périodique de l'angle de deux liaisons.

Dans notre étude nous utiliserons un spectrophotomètre à transformée de Fourier (Shimadzu FTIR IR-Affinity-) (figure II. 4). Le spectre infrarouge d'inhibiteur sera enregistré dans le domaine de nombre d'onde de $500-4000\text{cm}^{-1}$.

II.4. Spectroscopie UV-visible :

La spectroscopie UV-vis fait intervenir dans sa gamme les transitions entre les états d'énergie électronique .les molécules d'un groupe peuvent occupées plusieurs niveaux vibrationnels, qui ne sont par de faible variations énergétiques, un tel groupe de molécules subit la même transition électronique il se produit des variations simultanées d'état vibrationnel et rotationnel entraînant des absorptions énergétiques des diverses produisant une raie spectrale, l'ensemble de es raies donne naissance à une bande d'absorption.

Un spectre UV-vis est obtenu en faisant traverser à un échantillon un rayonnement continu en fréquence. ce spectre provient de l'absorption des rayons UV par la méthode qui provoque le transfert d'électrons des orbitales de basse énergie à des orbitales plus élevés, elle peut subir une transition électronique au cours de laquelle un électron est excité monte de l'orbitale de plus haut énergie, grâce au quanta énergétique absorbé.il est essentiel naturellement que la fréquence ν de la radiation absorbée correspondante à la différence énergétique $\Delta E=h \nu$ entre les deux orbitales concernée ou h est la constante de plank ($h=6,62 \cdot 10^{-34}\text{j.s}$). L'énergie absorbée dépend de la longueur d'onde de l'échantillon et de l'épaisseur traversée par la lumière. La relation reliant l'intensité du rayonnement utilisé, le rayonnement transmise l'épaisseur de la couche du milieu homogène et a concentration de la substance absorbante s'exprime par la loi de BEER-LAMBERT (1):

$$I = I_0 \exp^{(-\epsilon.l.c)} \quad (1)$$

I : intensité de la lumière transmise (I toujours inférieure à I_0)

I_0 : intensité de la lumière incidente

C : concentration molaire de la solution en mol/dm^3

ϵ : coefficient molaire d'absorption

L : épaisseur de la cellule

À partir de cette loi, deux grandeurs caractéristiques l'intensité de l'absorption :

La transmittance (2):

$$T = I/I_0 \text{ (exprimée en pourcentage)} \quad (2)$$

L'absorbance (3):

$$A = \log(I_0/I) = \epsilon.L.C \quad (3)$$

Un spectrophotomètre utilisé dans cette étude est un UV 1700 (Shimadzu) qui est constitué de la réunion de trois parties distinctes : source, le système dispersif (**figure 6**)

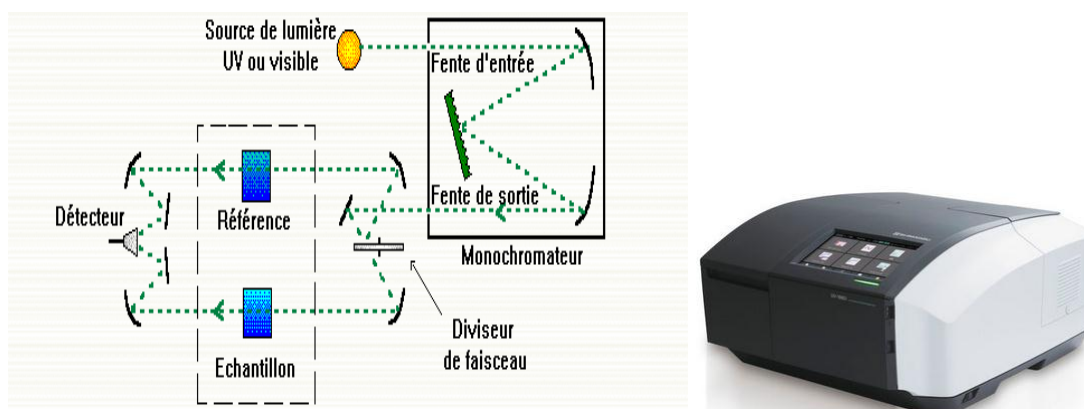


Figure 6 : Schéma d'un spectrophotomètre et spectrophotomètre UV-visible (UV 1700)

La source lumineuse est constituée par une lampe à décharge au deutérium utilisée dans le domaine de longueurs d'onde inférieures à 350nm et, pour la partie visible de spectre, par une lampe à filament de tungstène. Le monochromateur est l'élément de base est un prisme, un réseau ou un filtre coloré. Le rôle du monochromateur est d'isoler le rayonnement sur lequel on fait la mesure. Il est composé principalement d'un système dispersif, d'une fente d'entrée et d'une fente de sortie. La cuve contient soit l'échantillon soit la référence. La longueur de la cuve est définie (1, 2, 4 ou 5cm de trajet optique). Elle doit être transparente aux radiations d'étude. Par exemple en UV, les cuves sont en quartz, elles ne peuvent être ni en verre ni en plastique. Le détecteur est composé par une photodiode (semi-conducteur), une barrette de diodes ou un photomultiplicateur. Le domaine spectral de l'UV-visible est largement exploité en analyse quantitatives. Les mesures reposent sur la loi de BEER-LAMBERT qui relie, moyennant certaines conditions, l'absorption de la lumière par un composé à sa concentration [39].

III.1. Extraction de l'indium et de l'étain à partir d'un écran LED:

Dans le cadre de ce travail, un seul écran LED d'un ordinateur portable (Dell) est utilisé pour obtenir un échantillon, les caractéristiques de l'écran (20,6 cm x 36 cm) possède une résistivité dans l'ordre de $0,9 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, le poids total de l'écran est 500 g. Les écrans LED sont dotés d'un système de rétroéclairage composé de diodes électroluminescentes (LED) à l'arrière de la dalle.



Figure III.1. Plaques de l'écran LED

Après démantèlement (Figure III.1), les différentes composantes des écrans LED sont deux plaques écrans noir conducteurs électriques, deux films en plastique isolants, verre. Le sous-échantillon pour les expériences de lixiviation a été composé de la partie des petits morceaux des deux écrans noirs.

L'extraction de l'indium et de l'étain a été effectuée dans un bain ultrasons (Figure III.2), nous avons utilisé une solution de digestion d'acide sulfurique de concentration 6M pendant 2 heures.



Figure III.2. : Extraction de l'indium et de l'étain dans un bain ultrasons.

Après la digestion sous ultrasons, nous avons récupéré la solution et nous avons ajouté de l'ammoniaque (NH_4OH) et de la soude (NaOH) jusqu'au $\text{pH} = 9$, afin de faire réduire les cations In^{2+} et Sn^{2+} en hydroxyde. La matière en suspension a été récupérée par la méthode de centrifugation, ensuite, la poudre récupérée a été calcinée à 300°C pendant 1 h, enfin, nous avons obtenu un mélange d'une poudre d'oxyde d'indium et d'oxyde d'étain ($\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$) d'une masse de 0,33 g (Figure III.3). On doit savoir qu'au niveau du marché mondial, le prix de la poudre d'ITO est estimée jusqu'à 5 \$US/g, ce qui nous donne une valeur de 1,65 \$US prix de la masse obtenue, pour étudier la pureté et l'homogénéité, il reste à faire une caractérisation complète de cette poudre.

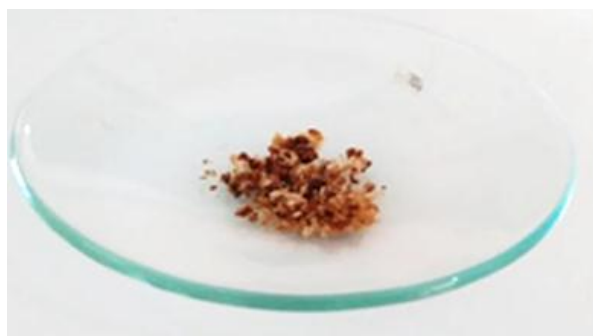


Figure III.3 : Quantité d'oxyde d'indium et d'oxyde d'étain ($\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$) récupérée (0,33 g).

III.2. Caractérisation par spectroscopie infrarouge :

Nous avons utilisé la spectroscopie infrarouge pour identifier les groupements fonctionnels majeurs ainsi que certaines bandes caractéristiques. Le spectre infrarouge du colorant synthétisé a été réalisé à l'aide d'un spectrophotomètre à transformée de Fourier sous la forme d'une pastille de KBr. Il a été enregistré en transmittance dans la zone de fréquence comprise entre 4000 à 400 cm^{-1} .

La figure III.4 montre le spectre FTIR de la poudre récupérée, d'après ce spectre nous pouvons relever l'existence de plusieurs groupements fonctionnels de matériau récupéré $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$, en se basant sur les absorptions des liaisons moléculaires en tant qu'énergie de vibration type élongation ou déformation, les attributions des différentes bandes de transmittance sont indiquées dans le tableau III.1 [38-40].

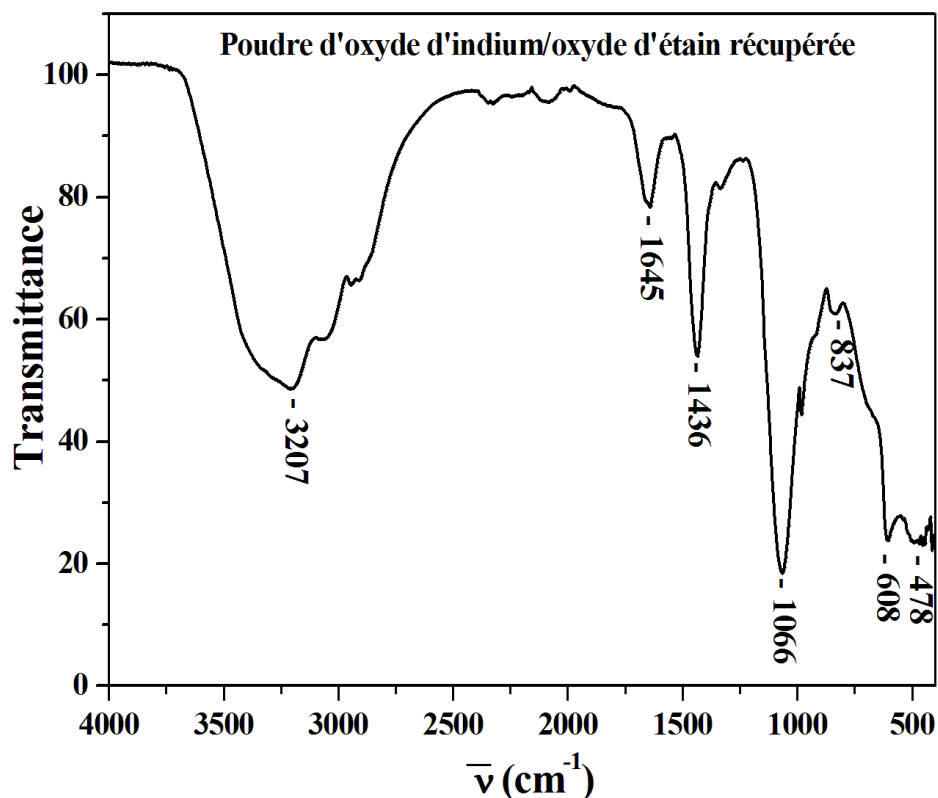


Figure III.4 : Spectre infrarouge de la poudre récupéré $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$

Tableau III.1 : Différentes bandes de transmittance.

Position de la bande de transmittance (cm^{-1})	Attributions
3207	Vibration d'élongation de la liaison ν -OH
2367-2261	KBr hydraté (molécules de H_2O)
1645 et 1436	Vibrations de déformation dans le plan de la liaison O-H combinées dans les structures des oxydes $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$.
1066	Vibration de déformation de la liaison OH hors du plan combinée à l'atome d'oxygène lié au métal In ou Sn dans la structure des oxydes $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$
975 et 837	Vibrations d'élongation de la liaison Sn-OH
679	Vibrations d'élongation de la liaison Sn-O
608 et 478	Vibrations d'élongation de la liaison In-O

III.3. Analyse morphologique par MEB couplée avec EDX :

L'imagerie électronique permet la mise en évidence de nombreuses caractéristiques telles que la morphologie, l'état de surface, les différences de compositions chimiques et de nombreux autres détails microscopiques. La figure III.5 montre les images MEB de la poudre récupérée $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$ avec différents agrandissements (x 500 et x 1000). Il est à noter que la topographie de la poudre est composée par des grains de différentes tailles qui varient de 10 μm jusqu'à 100 nm et qui sont distribués uniformément.

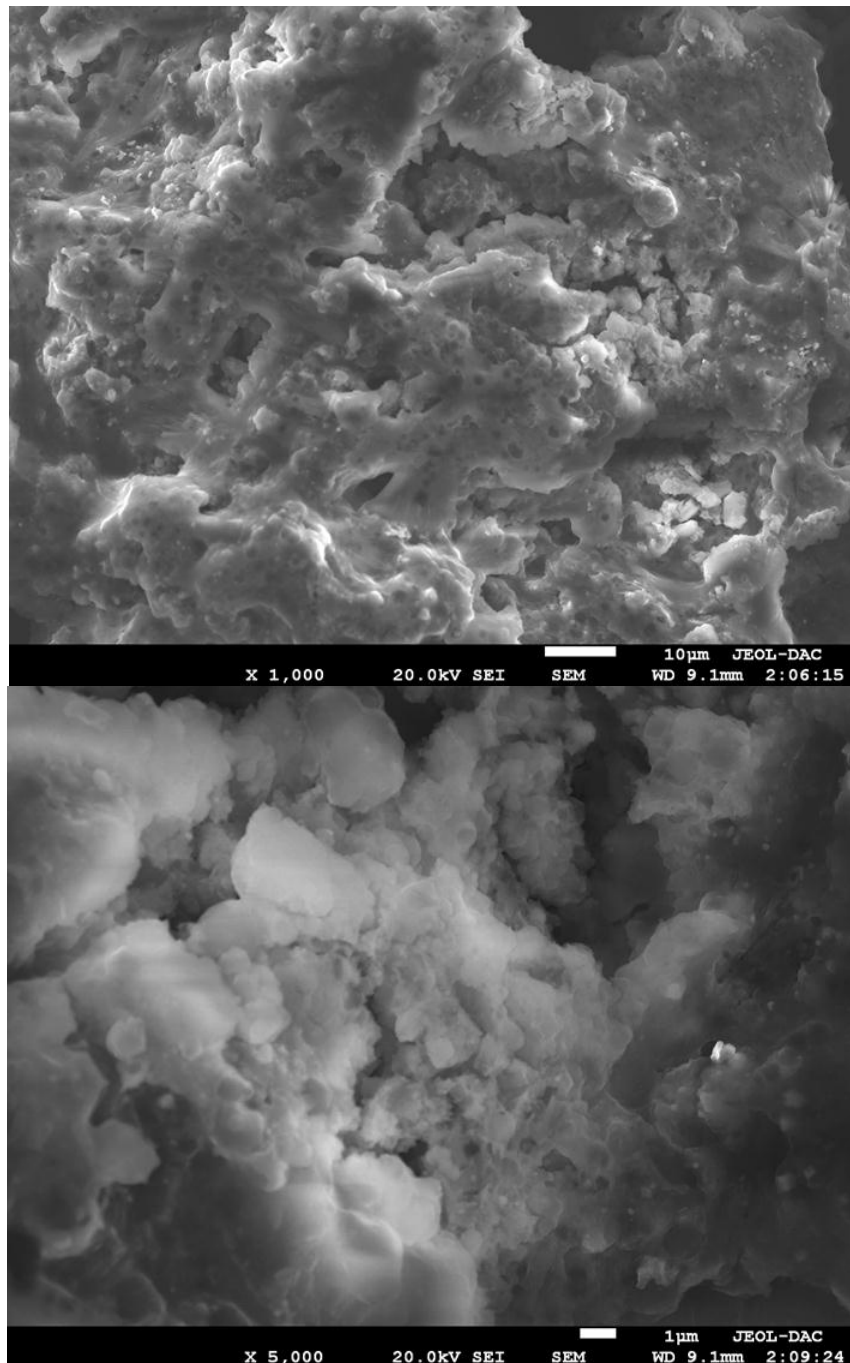


Figure III.5 : Images MEB de la poudre récupérée $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$

En parallèle des images MEB, nous avons réalisé des analyses semi-quantitatives par EDX pour la détermination de la composition chimique de la poudre récupéré ($\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$).

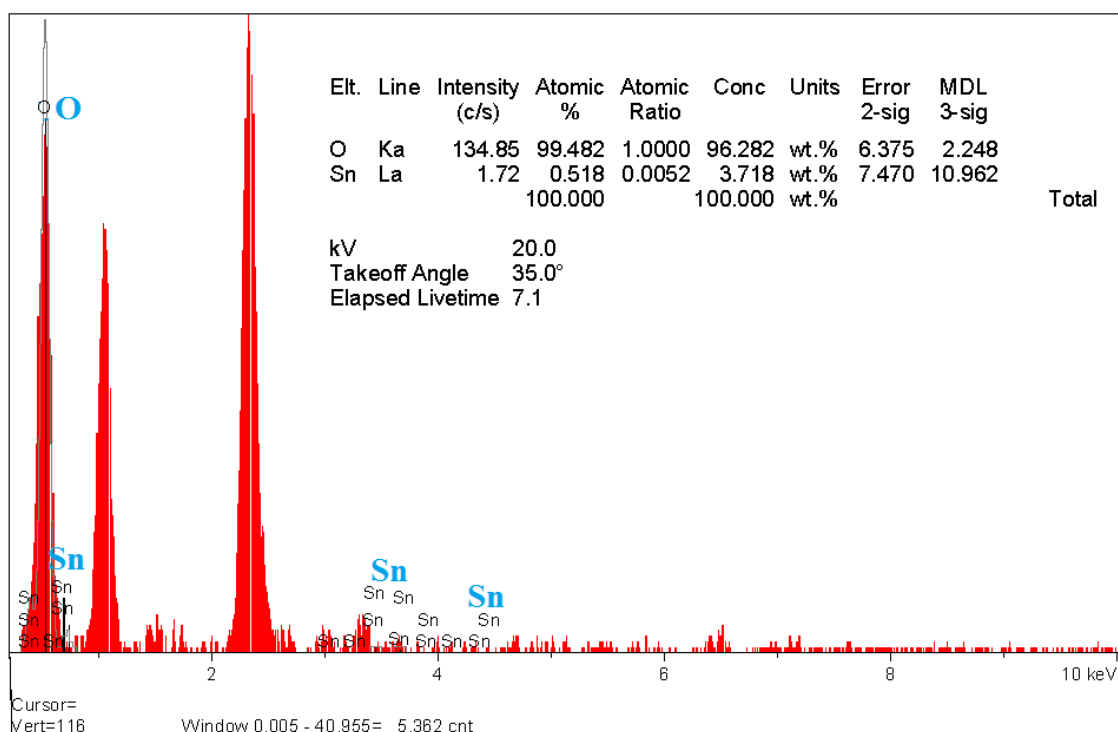
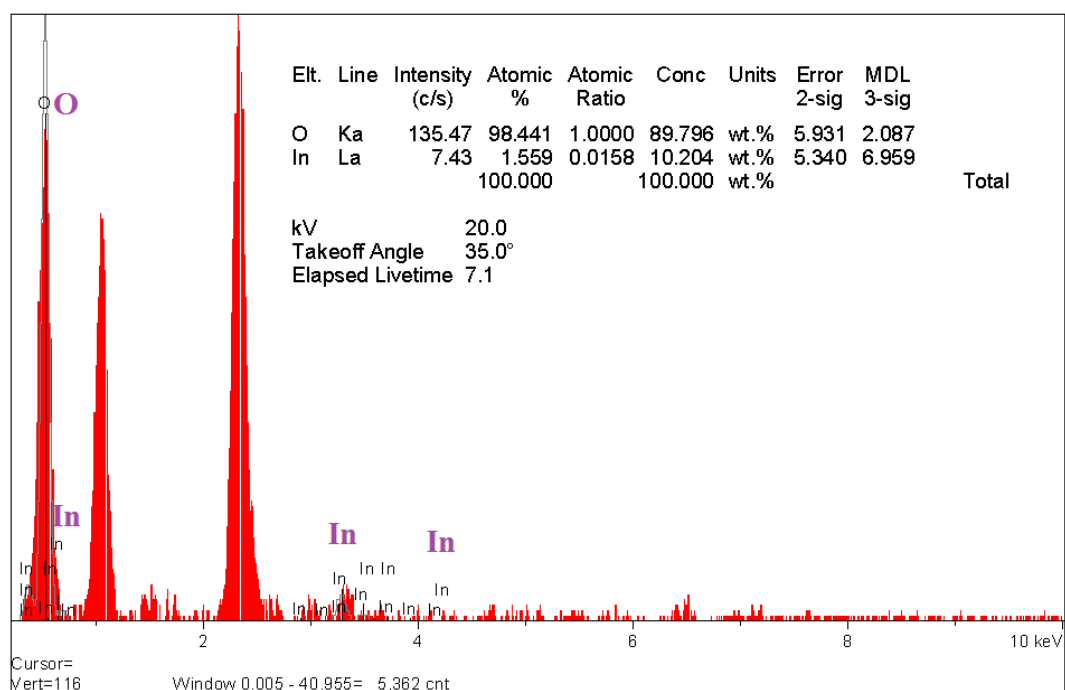


Figure III.6 : Spectres EDX de la poudre récupéré $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$

La figure III.6 des spectres de dispersion en énergie (EDX) montre clairement la présence des éléments chimiques In, Sn, O avec une concentration massique atomique de 10,2 % en indium et 3,71 % en étain. Les pics observés au niveau des énergies 1,04 et 2,3 keV sont attribués aux atomes Na et S (voir l'annexe).

III.2. Analyse de la poudre la poudre d'oxyde d'indium/oxyde d'étain récupérée par les méthodes électrochimiques :

III.2.a. Caractérisation par voltampérométrie cyclique :

La figure III.7 montre l'enregistrement des voltampéromgrammes cycliques relatifs à une solution d'électrolyte support de pH = 10 contenant H₃BO₃ (1M) + NaOH (1M) en présence et en absence de 200 mg/l de la poudre récupérée (In₂O₃/SnO₂), les voltampéromgrammes cycliques sont enregistrées sur une gamme de potentiel comprise entre -0,4 et 0,3 V/ ECS à v = 50 mV/s.

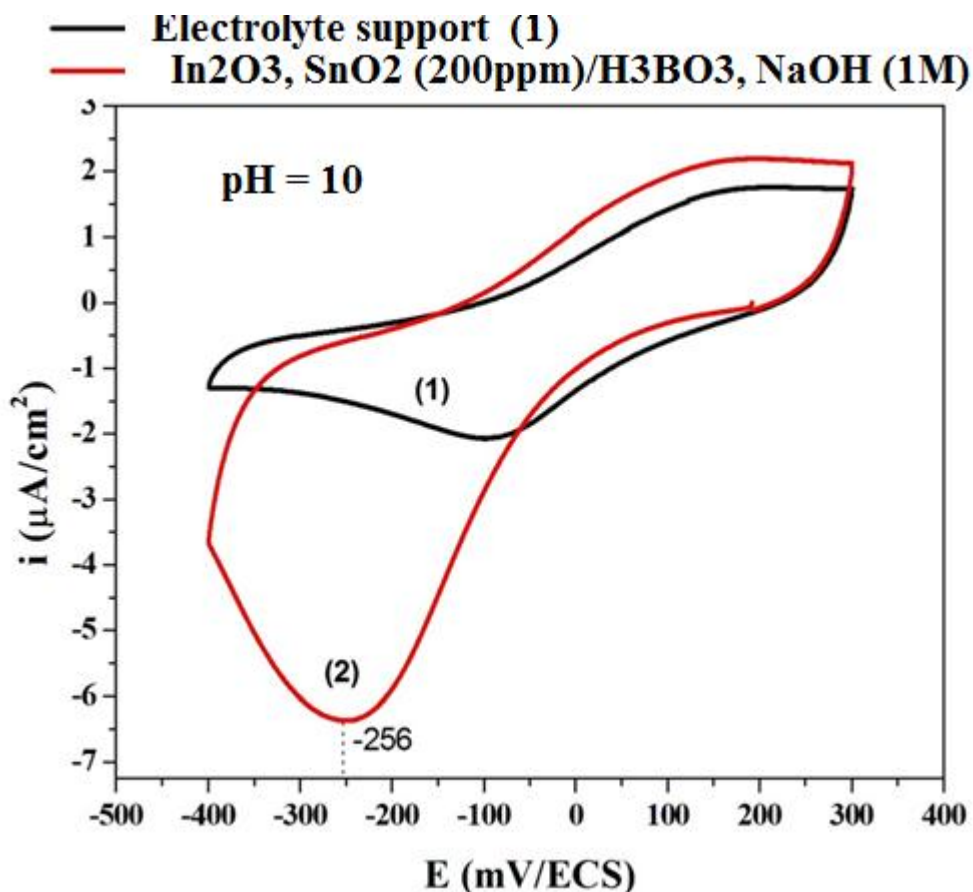


Figure III.7 : Voltampéromgrammes cycliques relatifs à une solution de H₃BO₃/NaOH en absence (1) et en présence (2) de 200 mg/l de la poudre récupérée (In₂O₃/SnO₂).

On observe lors de balayage de potentiel négatif, un large pic cathodique qui apparaît à entre 0 et -0,4 V/ECS, ce pic est attribué aux réactions de réduction des espèces In^{2+} et Sn^{2+} en In et Sn. Les travaux de Vasanth Raj Vasanth et col. [40] sur la caractérisation de l'oxyde d'étain par voltampérométrie cyclique montre un pic similaire à celui obtenu dans notre travail.

III.2.b. Caractérisation par voltampérométrie à ondes carrées :

La figure III.8 montre l'enregistrement des courbes de voltampérométrie à ondes carrées du coté cathodique relatives à une solution d'électrolyte support de pH = 10 contenant H_3BO_3 (1M) + NaOH (1M) en présence de 200 mg/l de la poudre récupérée ($\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$), les courbes sont enregistrées sur une gamme de potentiel comprise entre 0,6 et -0,4 V/ ECS.

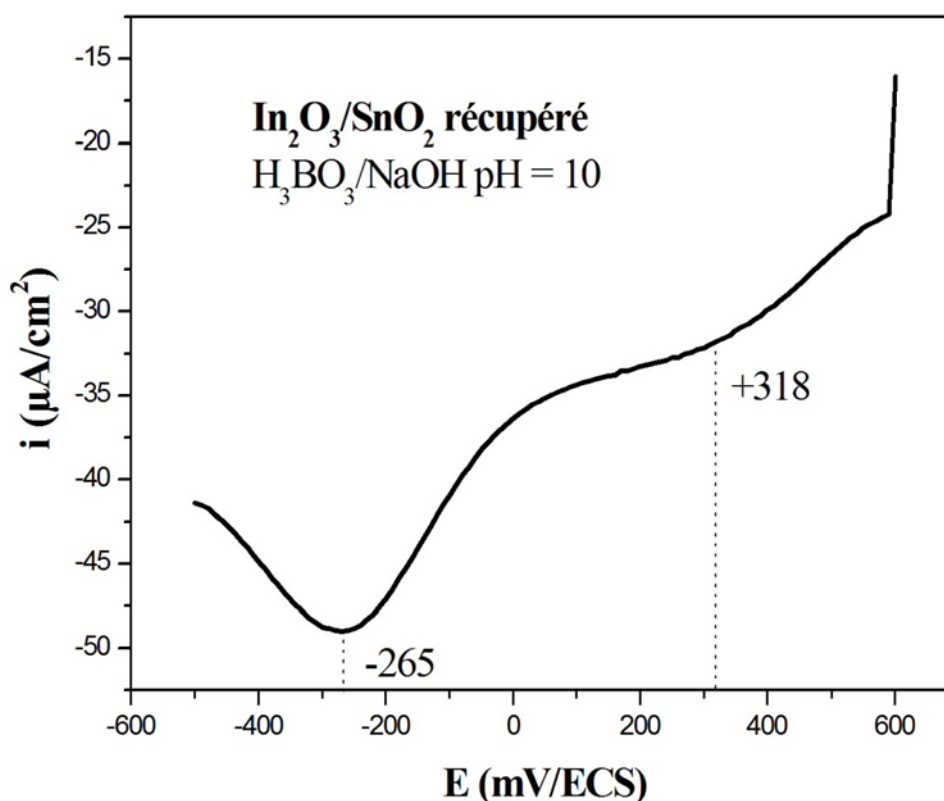


Figure III.8 : Courbes de voltampérométrie à ondes carrées relatifs à une solution de $\text{H}_3\text{BO}_3/\text{NaOH}$ (1M) pH =10, en présence de 200 mg/l de la poudre récupérée ($\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$).

On remarque lors de balayage cathodique, l'apparition de deux pics cathodiques, un épaulement au voisinage 0,318 V/ECS qui est dû à la réduction des cations In^{2+} , un deuxième large pic cathodique qui apparaît à -0,265 V/ECS, ce pic est attribué aux réactions de réduction des espèces Sn^{2+} .

La figure III.9 montre l'enregistrement des courbes de voltampérométrie à ondes carrées du côté anodique relatives à une solution d'électrolyte support de pH = 10 contenant H_3BO_3 (1M) + NaOH (1M) en absence (1) et en présence (2) de 200 mg/l de la poudre récupérée ($\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$), les courbes sont enregistrées sur une gamme de potentiel comprise entre -1,7 et +1,7 V/ ECS.

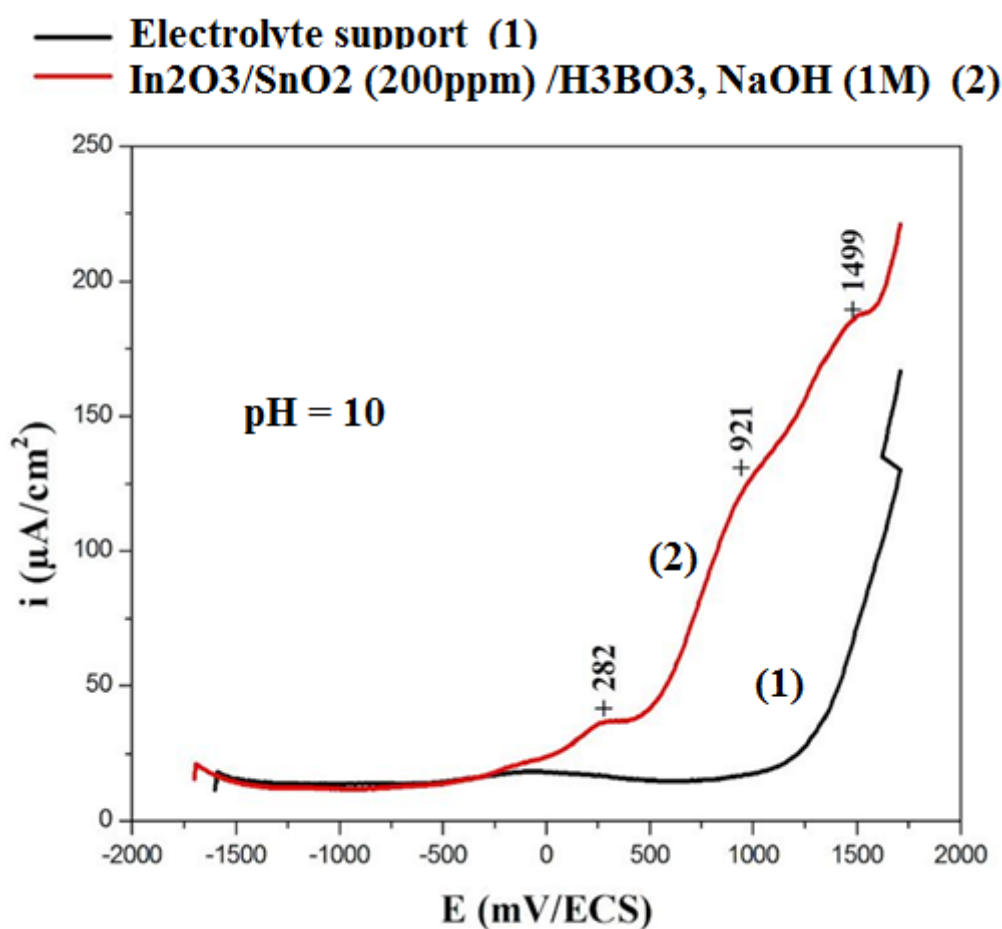


Figure III.9 : Courbes de voltampérométrie à ondes carrées relatives à une solution de $\text{H}_3\text{BO}_3/\text{NaOH}$ (1M) pH =10, en absence (1) et en présence (2) de 200 mg/l de la poudre récupérée ($\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$).

On remarque lors de balayage anodique, l'apparition de trois pics anodiques, un épaulement au voisinage + 0,282 V/ECS qui est dû à l'oxydation des espèces réduites de l'étain, un deuxième épaulement anodique qui apparaît à -0,921 V/ECS, ce pic est attribué à

la réaction d'oxydation des espèces réduites d'indium, le troisième épaulement à 1,499 V/ECS est dû à l'oxydation de l'indium en oxyde d'indium.

La figure III.10 montre l'enregistrement des courbes de voltampérométrie à ondes carrées du coté anodique relatives à une solution d'électrolyte support de pH = 7 contenant H₃BO₃ (1M) + NaOH (1M) en absence (1) et en présence (2) de 200 mg/l de la poudre récupérée (In₂O₃/SnO₂), aussi nous avons analysé une solution référence de SnCl₂ (10 g/l). Toutes les courbes sont enregistrées sur une gamme de potentiel comprise entre -1,7 et +1,7 V/ECS.

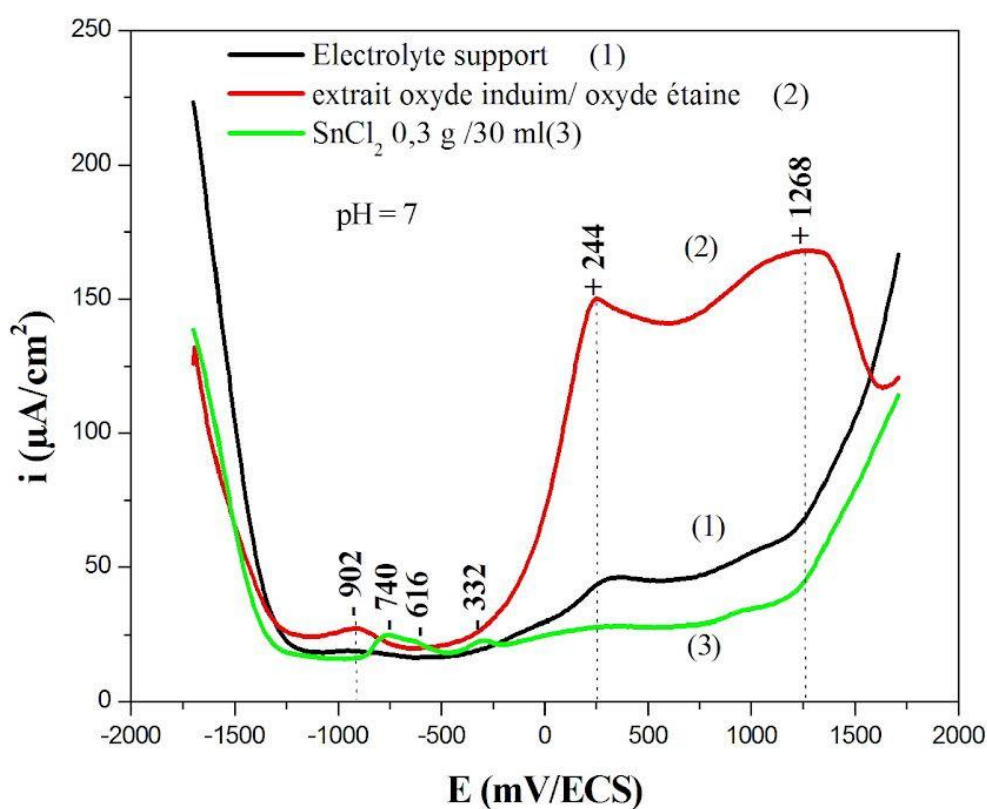


Figure III.10 : Courbes de voltampérométrie à ondes carrées relatifs à une solution de H₃BO₃/NaOH (1M) pH = 7, en absence (1) et en présence (2) de 200 mg/l de la poudre récupérée (In₂O₃/SnO₂), solution de 10g/l de SnCl₂ (3).

On observe lors de balayage anodique, l'apparition de trois pics anodiques, un épaulement au voisinage - 0,902 V/ECS qui est dû à l'oxydation des espèces réduites de l'étain, un deuxième pic anodique qui apparaît à +0,244 V/ECS, ce pic est attribué à la

réaction d'oxydation des espèces réduites d'indium. La solution référence de SnCl_2 montre des pics d'oxydation à -0,74 ; -0,616 et - 0,332 V/ECS.

III.2.2. Spectroscopie UV-visible :

Pour confirmer la présence des cations métalliques, nous avons utilisé un ligand complexant, dithizone (Figure III.11), d'après la bibliographie [41] le dithiozone dissout dans le méthanol montre trois bandes d'absorption 320, 432 et 592 nm.

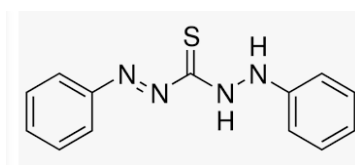


Figure III.11 : Dithizone.

La figue III.12 montre l'évolution des spectres UV-visibles des solutions (pH =7):

- Dithizone (20 ppm) éthanol / H_3BO_3 / NaOH (1M) pH = 7
- Dithizone (20 ppm) éthanol / H_3BO_3 / NaOH (1M) pH = 7 en présence de 200 mg/l de la poudre récupérée ($\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$).

On observe clairement trois bandes d'absorbance située à 965, 468 et 272 nm caractérisant la molécule de dithizone.

Après l'ajout de la poudre récupérée ($\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$), on observe clairement le déplacement de la bande vers les faibles longueurs d'ondes (effet hypsochrome) de 272 nm vers 268 nm, ceci est dû à la complexation du ligand avec les éléments In^{2+} et Sn^{2+} .

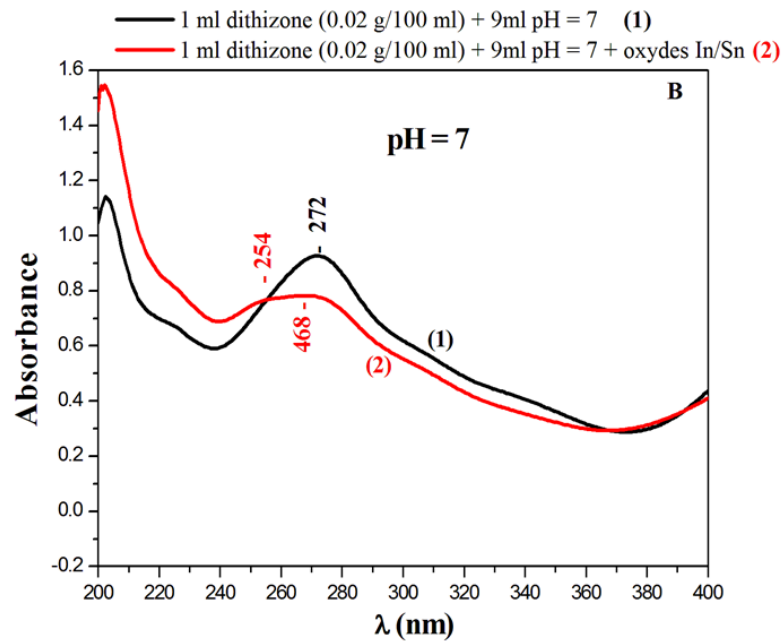
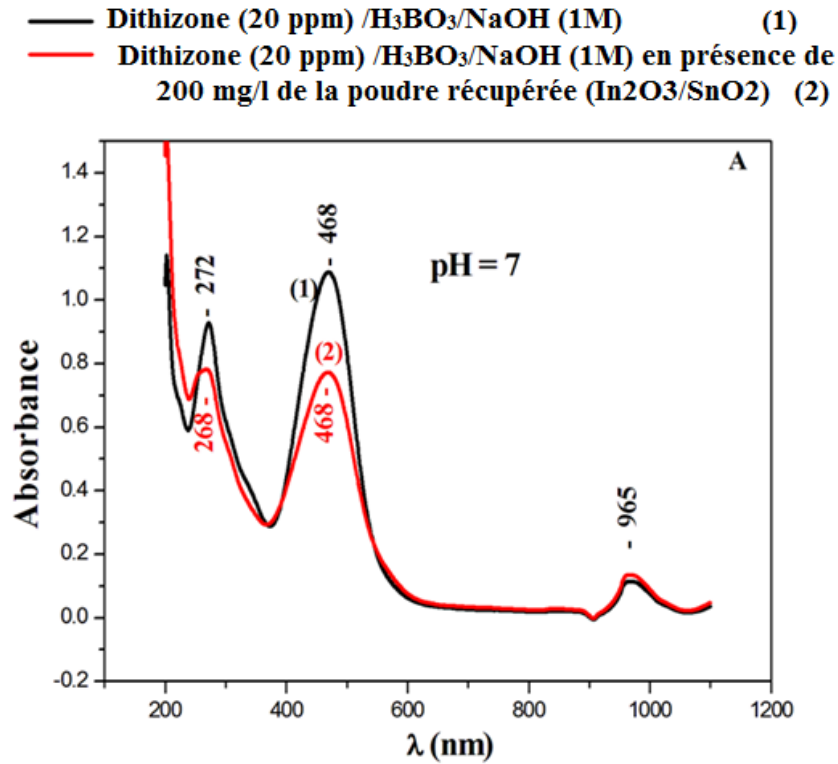


Figure III.12: Spectre UV-visible de la solution dithizon /H₃BO₃, NaOH (pH = 7) en absence (A) et en présence (B) de la poudre oxyde d'indium/oxyde d'étain récupérée.

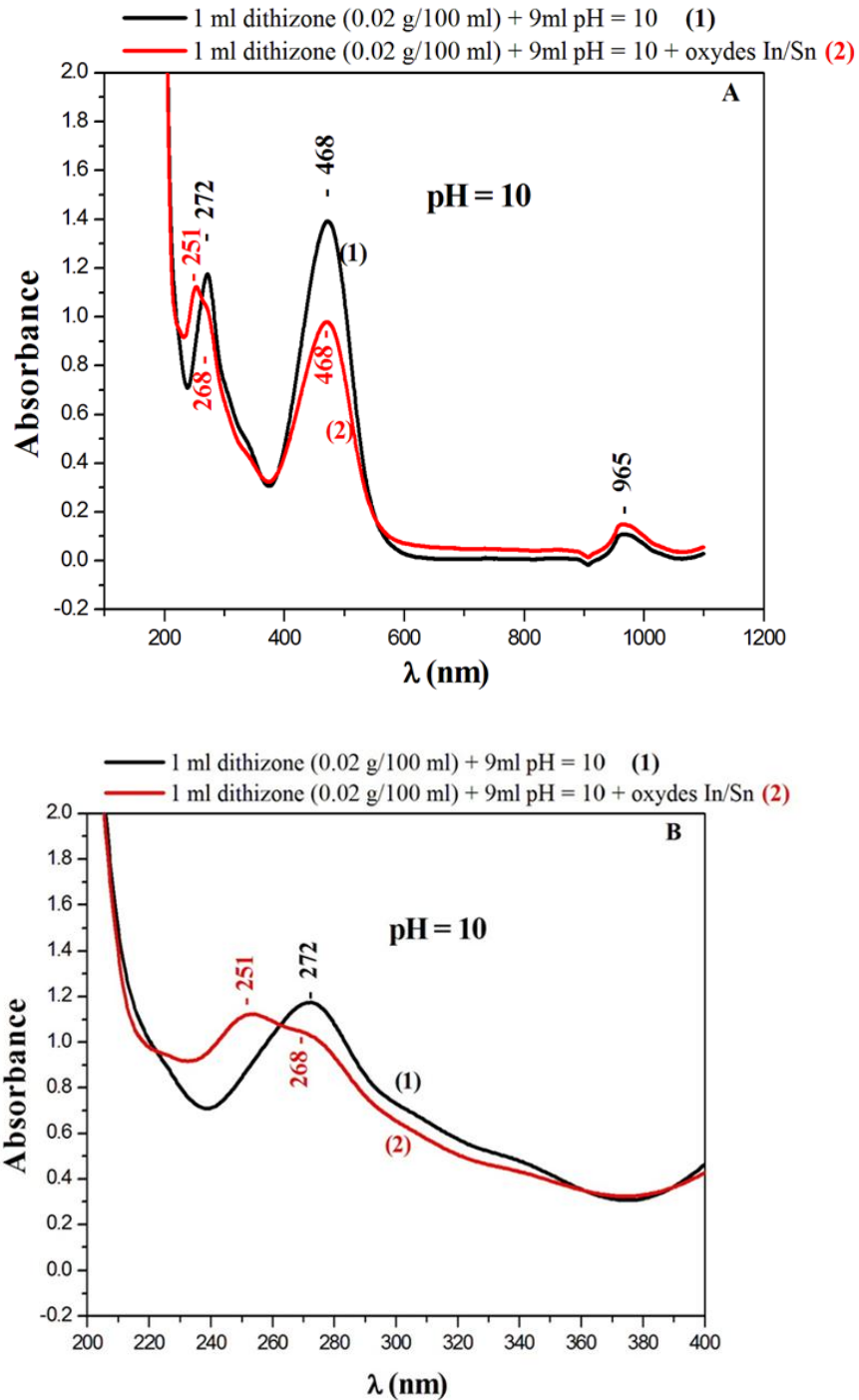


Figure III.13: Spectre UV-visible de la solution dithizon / H_3BO_3 , NaOH (pH = 10) en absence (A) et en présence (B) de la poudre oxyde d'indium/oxyde d'étain récupérée.

La figure III.13 montre l'évolution des spectres UV-visibles des solutions (pH = 10):

- Dithizone (20 ppm) éthanol / H_3BO_3 /NaOH (1M) pH = 10
- Dithizone (20 ppm) éthanol / H_3BO_3 /NaOH (1M) pH = 10 en présence de 200 mg/l de la poudre récupérée (In_2O_3/SnO_2).

On observe clairement trois bandes d'absorbance situées à 965, 468 et 272 nm caractérisant la molécule de dithizone.

Après l'ajout de la poudre récupérée ($\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$), on observe clairement le déplacement de la bande vers les faibles longueurs d'ondes (effet hypsochrome) de 272 nm vers 268 nm et 251 nm, ceci est dû à la complexation du ligand avec les éléments In^{2+} et Sn^{2+} .

On dissout 70 mg de la poudre récupérée/100 ml, ensuite on trace la courbe UV-visible de l'échantillon.

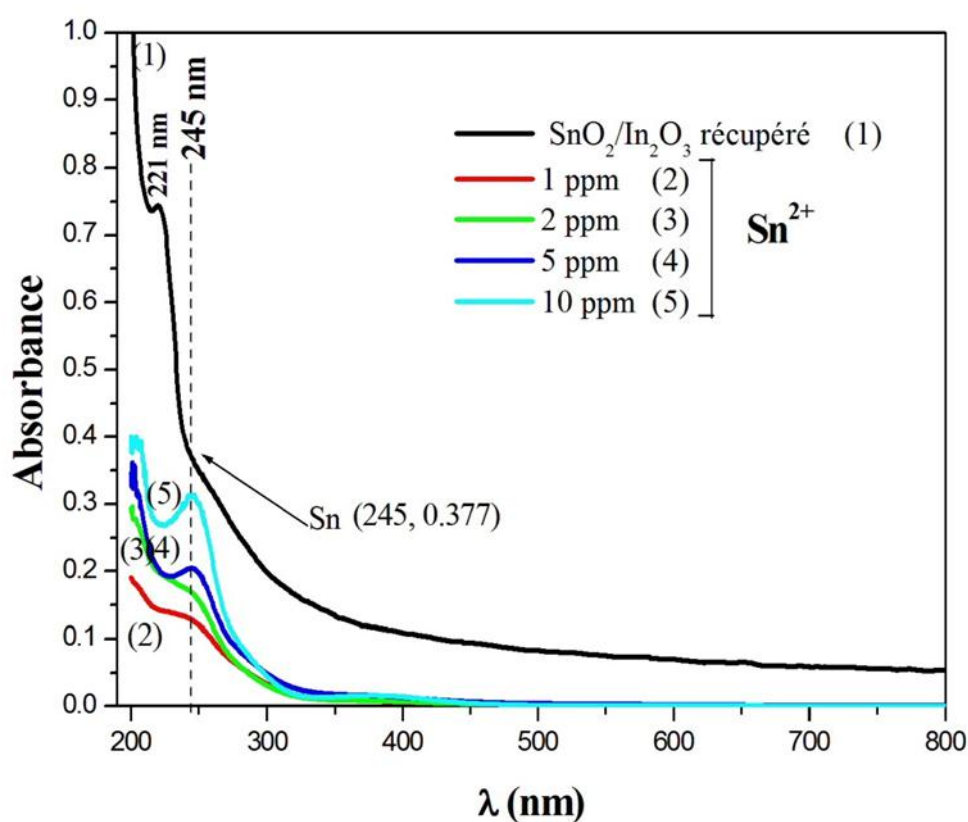


Figure III.14: Spectre UV-visible de la solution contenant $\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2$ récupérée /dithizone (20 ppm) éthanol (1) solutions standards à différentes concentrations de SnCl_2 en présence de 1 ml de dithizone (20 ppm) éthanol.

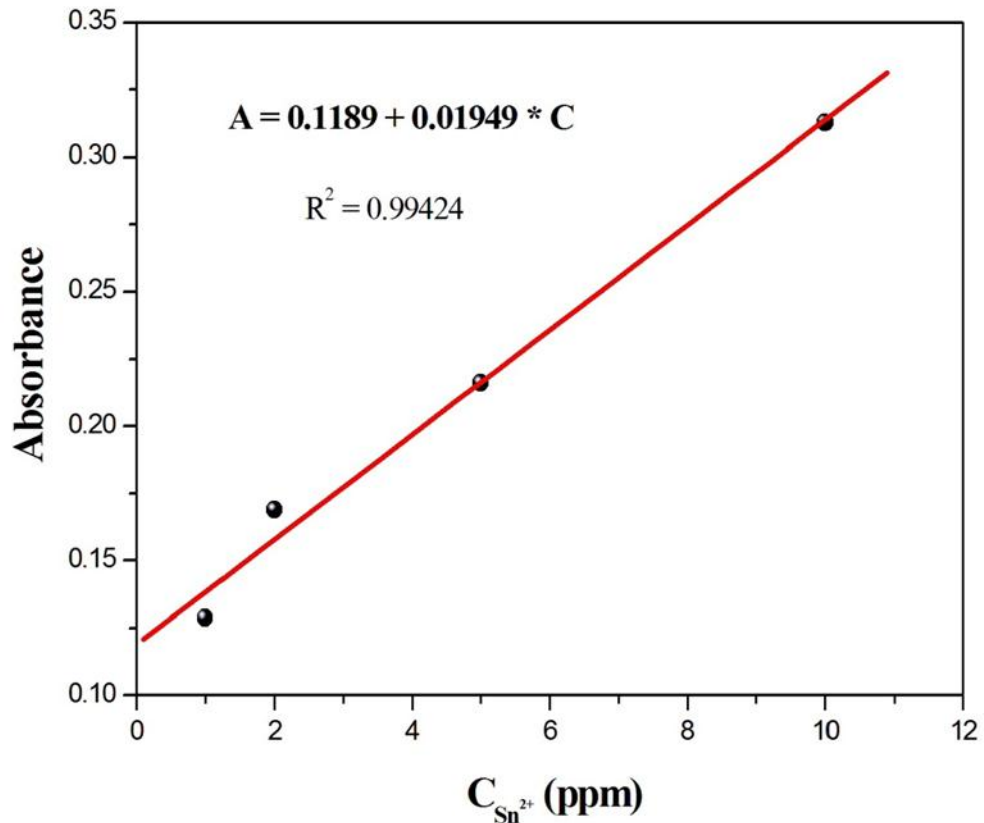


Figure III.14: Courbe d'étalonnage des ions Sn²⁺ à différentes concentrations

Nous pouvons calculer la concentration des ions d'étain dans la solution de la poudre récupérée en utilisant l'équation de la droite d'étalonnage :

$$\text{Abs} = 0,1189 + 0.01949 C_{\text{Sn}^{2+}}$$

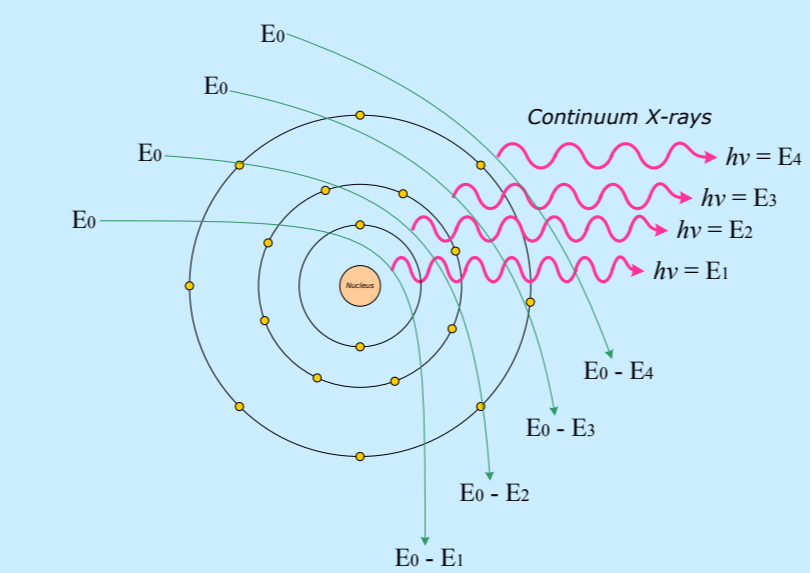
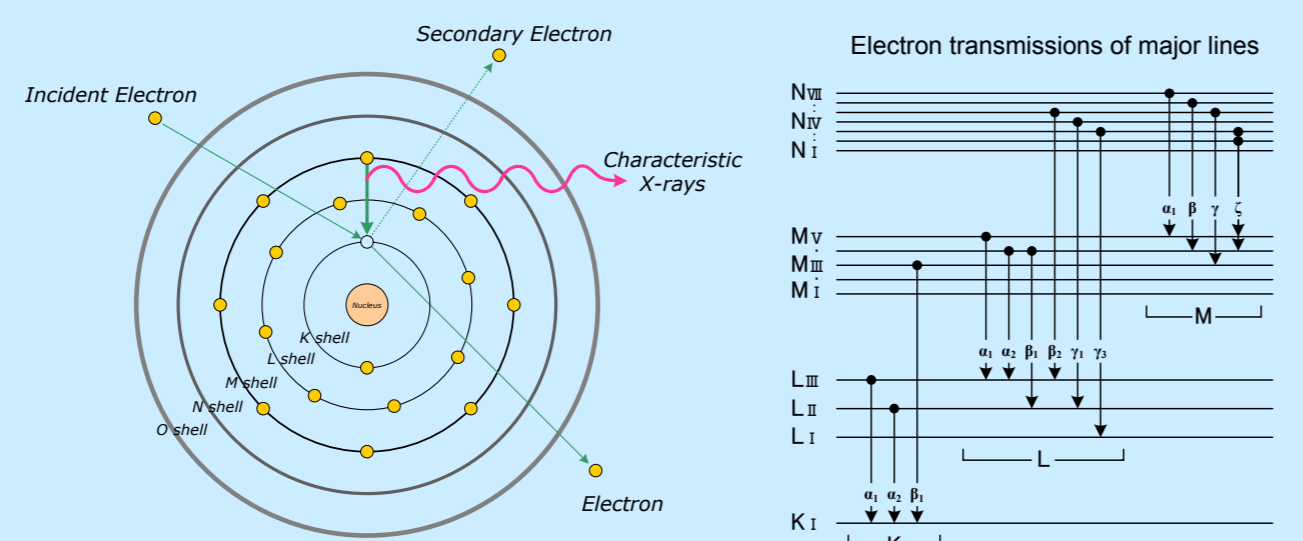
On a Abs = 0,377, alors :

$$0,377 = 0,1189 + 0.01949 C_{\text{Sn}^{2+}}$$

$$C_{\text{Sn}^{2+}} = 13,24 \text{ ppm}$$

La teneur de l'étain 13,24 mg dans 70 mg de la poudre, ce qui représente 19 % de la masse totale de la poudre. Cette masse représente aussi 16,81 mg d'oxyde d'étain ce qui représente 24% de la masse totale de la poudre.

Characteristic X-rays										Continuum X-rays													
Hydrogen 1 H 1.01 0.08																			Helium 2 He 4.00 0.19				
Lithium 3 Li 6.94 0.53	Beryllium 4 Be 9.01 1.85 K α 0.110																	Boron 5 B 10.81 2.54 K α 0.183	Carbon 6 C 12.01 2.25 * K α 0.277	Nitrogen 7 N 14.01 1.14 K α 0.392	Oxygen 8 O 16.00 1.57 K α 0.525	Fluorine 9 F 19.00 1.5 K α 0.677	Neon 10 Ne 20.18 1.20 K α 0.848
Sodium 11 Na 22.99 0.97 K α 1.041	Magnesium 12 Mg 24.31 1.74 K α 1.253																	Aluminium 13 Al 26.98 2.70 K α 1.486	Silicon 14 Si 28.09 2.42 * K α 1.739	Phosphorus 15 P 30.97 2.97 * K α 2.013	Sulphur 16 S 32.06 2.07 * K α 2.307	Chlorine 17 Cl 35.45 2.2 K α 2.621	Argon 18 Ar 39.95 1.65 K α 2.957
Potassium 19 K 39.10 0.87 K α 3.312	Calcium 20 Ca 40.08 1.55 K α 3.690	Scandium 21 Sc 44.96 2.99 K α 4.088 L α 0.395	Titanium 22 Ti 47.90 4.5 K α 4.508 L α 0.452	Vanadium 23 V 50.94 5.87 K α 4.949 L α 0.511	Chromium 24 Cr 52.00 7.14 K α 5.411 L α 0.573	Manganese 25 Mn 54.94 7.3 K α 5.894 L α 0.637	Iron 26 Fe 55.85 7.86 K α 6.398 L α 0.705	Cobalt 27 Co 58.93 8.71 K α 6.924 L α 0.776	Nickel 28 Ni 58.70 8.8 K α 7.471 L α 0.851	Copper 29 Cu 63.55 8.93 K α 8.040 L α 0.930	Zinc 30 Zn 65.38 6.92 K α 8.630 L α 1.012	Gallium 31 Ga 69.72 5.93 K α 9.241 L α 1.098	Germanium 32 Ge 72.59 5.46 K α 9.874 L α 1.188	Arsenic 33 As 74.92 5.73 K α 10.530 L α 1.282	Selenium 34 Se 78.96 4.82 K α 11.207 L α 1.379	Bromine 35 Br 79.90 4.2 K α 11.907 L α 1.480	Krypton 36 Kr 83.80 3.4 K α 12.631 L α 1.586						
Rubidium 37 Rb 85.47 1.53 K α 13.373 L α 1.694	Strontium 38 Sr 87.62 2.60 K α 14.140 L α 1.806	Yttrium 39 Y 88.91 4.48 K α 14.931 L α 1.922	Zirconium 40 Zr 91.22 6.44 K α 15.744 L α 2.042	Niobium 41 Nb 92.91 8.4 K α 16.581 L α 2.166	Molybdenum 42 Mo 95.94 9.01 K α 17.441 L α 2.293	Technetium 43 Tc (97) 101.07 12.1 K α 18.325 L α 2.424	Ruthenium 44 Ru 101.07 12.1 K α 19.233 L α 2.558	Rhodium 45 Rh 102.91 12.44 K α 2.696	Palladium 46 Pd 106.4 12.16 K α 2.838	Silver 47 Ag 107.87 10.49 K α 2.984	Cadmium 48 Cd 112.40 8.65 K α 3.133	Indium 49 In 114.82 7.28 K α 3.286 M 0.368	Tin 50 Sn 118.69 7.30 * K α 3.443 M 0.691	Antimony 51 Sb 121.75 6.62 K α 3.604 M 0.733	Tellurium 52 Te 127.60 6.25 K α 3.769 M 0.778	Iodine 53 I 126.90 4.94 K α 3.937	Xenon 54 Xe 131.30 3.4 K α 4.109						
Cesium 55 Cs 132.91 1.87 K α 4.286	Barium 56 Ba 137.34 3.5 K α 4.465 M 0.972	Lanthanoid 57-71	Hafnium 72 Hf 178.49 13.3 K α 7.898 M 1.644	Tantalum 73 Ta 180.95 16.6 K α 8.145 M 1.709	Tungsten 74 W 183.85 19.3 K α 8.396 M 1.774	Rhenium 75 Re 186.21 20.53 K α 8.651 M 1.842	Osmium 76 Os 190.2 22.5 K α 8.910 M 1.914	Iridium 77 Ir 192.22 22.42 K α 9.174 M 1.977	Platinum 78 Pt 195.09 21.37 K α 9.441 M 2.048	Gold 79 Au 196.97 18.88 K α 9.712 M 2.120	Mercury 80 Hg 200.59 14.19 K α 9.987 M 2.195	Thallium 81 Tl 204.37 11.86 K α 10.267 M 2.267	Lead 82 Pb 207.2 11.34 K α 10.550 M 2.342	Bismuth 83 Bi 208.98 9.78 K α 10.837 M 2.419	Polonium 84 Po (209)	Astatine 85 At (210)	Radon 86 Rn (222)						
Francium 87 Fr (223) K α 12.029	Radium 88 Ra 226.03 5 K α 12.340	Actinoid 89-103	Lanthanum 57 La 138.91 6.17 K α 4.650 M 0.833	Cerium 58 Ce 140.12 6.66 K α 4.839 M 0.883	Praseodymium 59 Pr 140.91 6.77 K α 5.033 M 0.929	Neodymium 60 Nd 144.24 7.02 K α 5.229 M 0.978	Promethium 61 Pm (145)	Samarium 62 Sm 150.4 7.54 K α 5.635 M 1.081	Europium 63 Eu 151.96 5.25 K α 5.845 M 1.131	Gadolinium 64 Gd 157.25 7.90 K α 6.056 M 1.185	Terbium 65 Tb 158.93 8.25 K α 6.272 M 1.240	Dysprosium 66 Dy 162.50 8.56 K α 6.494 M 1.293	Holmium 67 Ho 164.93 8.80 K α 6.719 M 1.347	Erbium 68 Er 167.26 9.06 K α 6.947 M 1.405	Thulium 69 Tm 168.93 9.32 K α 7.179 M 1.462	Ytterbium 70 Yb 173.04 6.96 K α 7.414 M 1.521	Lutetium 71 Lu 174.97 9.84 K α 7.654 M 1.581						
			Actinium 89 Ac (227) K α 12.650	Thorium 90 Th 232.04 11.00 K α 12.967 M 2.991	Protactinium 91 Pa 231.04 K α 13.288 M 3.077	Uranium 92 U 238.03 18.7 K α 13.612 M 3.164	Neptunium 93 Np 237.05 K α 13.942 M 3.260	Plutonium 94 Pu (244) K α 14.276 M 3.348	Americium 95 Am (243) K α 14.615 M 3.437	Curium 96 Cm (247) K α 14.953 M 3.539	Berkelium 97 Bk (247) K α 15.304 M 3.634	Californium 98 Cf (251) K α 15.652 M 3.731	Einsteinium 99 Es (254)	Fermium 100 Fm (257)	Mendelevium 101 Md (258)	Nobelium 102 No (255)	Lawrencium 103 Lr (262)						



The electrons generated by the electron gun are accelerated and irradiate the sample. The electron has a kinetic energy proportional to the accelerating voltage. The kinetic energy dissipated within the sample generates characteristic signals from the specimen. The characteristic X-rays are the information used for EDS analysis.

If the incident electrons have sufficient acceleration and then have enough energy to strike an electron from the inner shell of the atom, it'll make an electron hole. An electron from the outer shell will fill up the hole and then, some characteristic X-rays will be emitted. The characteristic X-rays have different energy for each element, and the intensity will be proportional to the element concentration.

The continuum X-rays are emitted when the primary electrons are decelerated by the strong electric field existing close to atomic nucleus. The continuum X-rays have the energy of the kinetic energy lost during the deceleration. It will be observed as EDS spectrum background.

Gold
79 Au
196.97
19.3
K α 9.712
M 2.120

Number: 79
Atomic mass: 196.97
Density (kg/m³): 19.3
Name: Gold
Symbol: Au
Characteristic X-ray (keV): K α 9.712, M 2.120

Note: Density
* 'C' as (graphite), 'P' as (white),
'S' as (alpha), 'Sn' as (white)

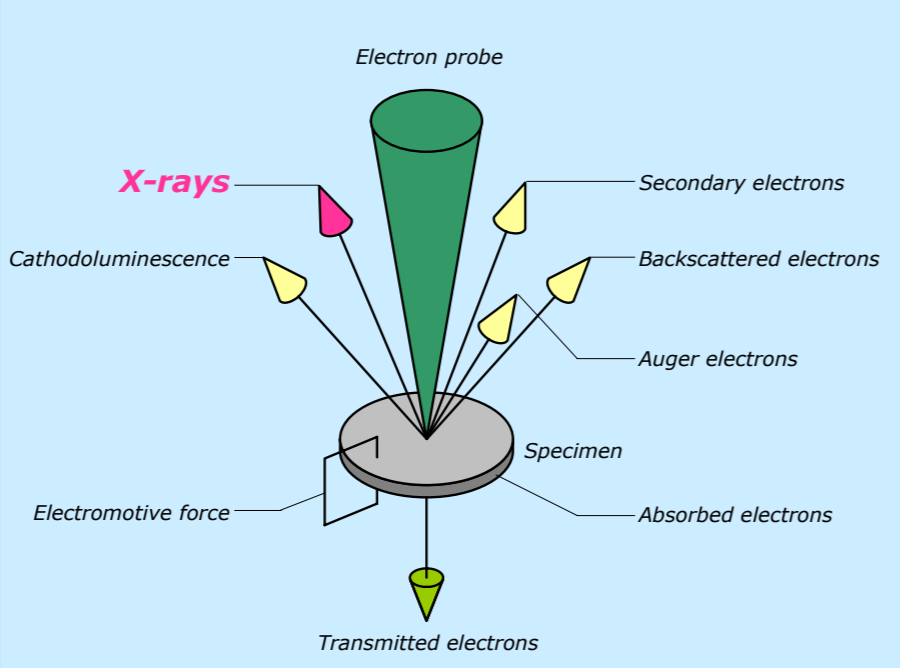
Minimum accelerating voltage

Unable to detect | **5kV or higher**

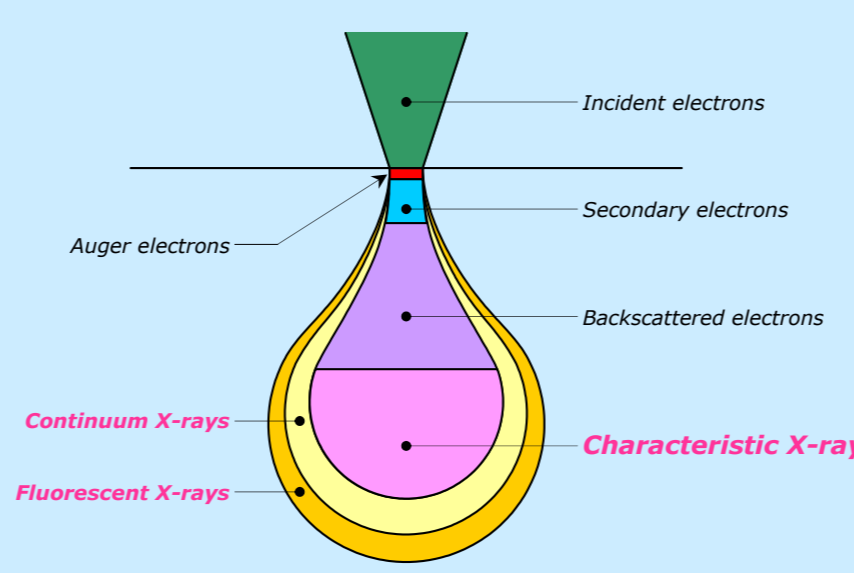
10kV or higher | **15kV or higher**

The colors mean to detect the characteristic X-ray of the lowest energy for each element.

Information from specimen



Generation depth and space resolution

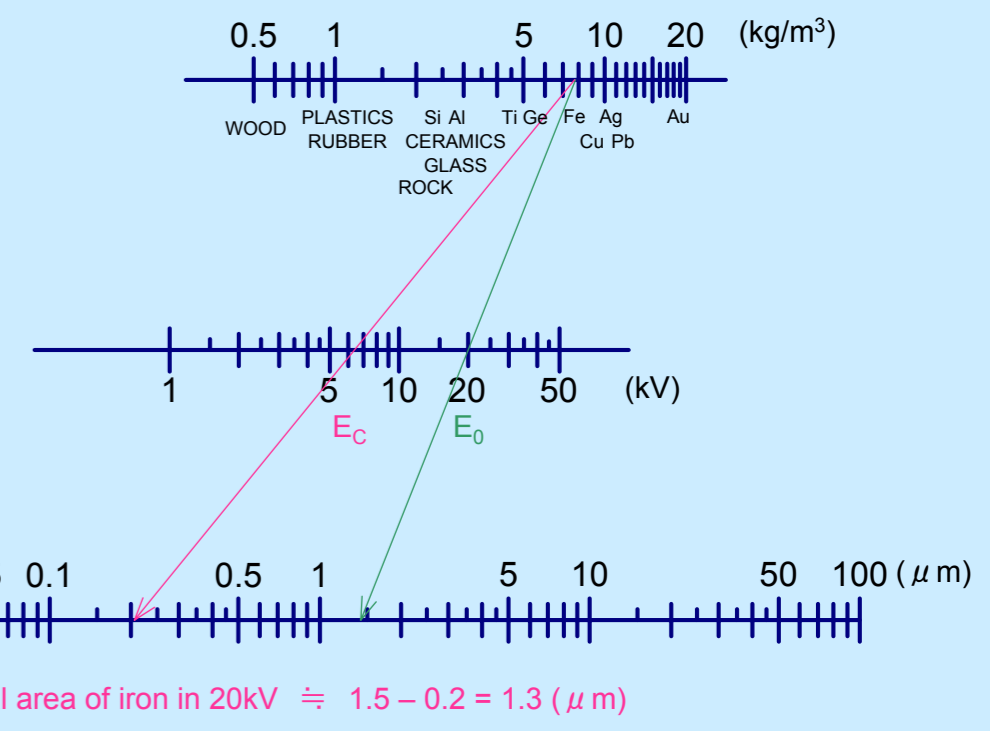
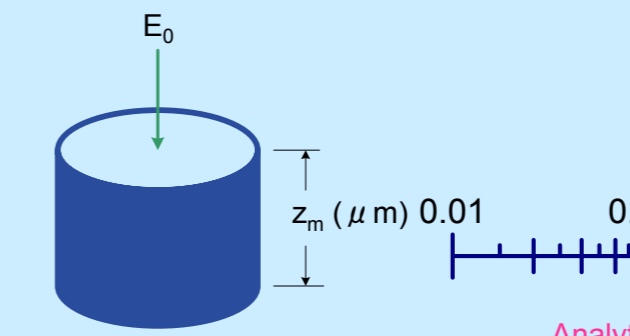


Analytical area

Castaing's formula

$$Z_m = 0.033 (E_0^{1.7} - E_C^{1.7}) \frac{A}{\rho Z}$$

- E₀: Accelerating voltage (kV)
- E_C: Minimum emission voltage (keV)
- A: Atomic mass
- ρ : Density (kg/m³)
- Z: Atomic number



Conclusion

Ce projet de recherche permet de la récupération et l'extraction d'oxyde ($\text{InO}_2 \text{ SnO}_2$) qui est connue comme l'un des métaux les plus utilisés dans l'industrie électrique et électronique, surtout dans les écrans LED d'ordinateur.

Les meilleures conditions d'extraction d'oxyde ($\text{InO}_2 \text{ SnO}_2$) dans cette phase ont été une concentration de (6M) d' (H_2SO_4) pendant 2h.

La matière récupérée par la méthode de centrifugation et à été calcinée à 300C° pendant 1h , nous avons obtenu un mélange d'une poudre d'oxyde ($\text{InO}_2 \text{ SnO}_2$) de (0.33g).

Les résultats de la spectroscopie infrarouge nous ont montré l'existence de plusieurs groupements fonctionnels de matériaux récupéré ($\text{InO}_2 \text{ SnO}_2$).

Les résultats de la voltampérométrie cyclique nous ont montré un large pic cathartique entre 0 et -0.4 V/ECS, qui est attribué de réaction des espèces $\text{In}^{+2} \text{ Sn}^{+2}$.

Résumé

Dans ce projet, nous étudions le recyclage et l'évaluation des déchets informatiques pour réduire leur dangerosité.

Nous avons extrait un échantillon de (In Sn) avec un poids de (0,03 g). Avec une solution à haute concentration de (H₂SO₄).

Puis nous lui avons appliqué plusieurs analyses, il s'agit de voltampérométrie cyclique, voltampérométrie à ondes carrées, spectroscopie infrarouge, spectroscopie UV-vis.

Pour connaître la quantité d'indium pur présent dans cet échantillon.

Abstract

In this project, we are studying the recycling and evaluation of IT waste to reduce its dangerousness.

We extracted a sample of (In Sn) with a weight of (0.03 g). With a high concentration solution of (H₂SO₄).

Then we applied several analyzes to it, these are cyclic voltammetry, square wave voltammetry, infrared spectroscopy, UV-vis spectroscopy.

To know the quantity of pure indium present in this sample.

ملخص

في هذا المشروع ، ندرس إعادة تدوير وتقييم نفايات تكنولوجيا المعلومات لتقليل خطورتها (H₂SO₄) وزنها (0.03 جم). بمحلول عالي التركيز من (In Sn) استخرجنا عينة من ثم قمنا بتطبيق العديد من التحليلات عليه ، وهي قياس الفولتميتر الدوري ، وقياس الجهد بالموجة المربعة ، والتحليل الطيفي بالأشعة تحت الحمراء ، والتحليل الطيفي للأشعة فوق البنفسجية لمعرفة كمية الإنديوم النقي الموجود في هذه العينة.

