

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF

MEMOIRE

Présenté à l'Institut d'Optique et de Mécanique de Précision

Pour l'Obtention du Diplôme de

MAGISTER

Option : Optique appliquée

Par

LAZHAR GRAINI

THEME

***Contrôle de la pollution de l'eau
par méthode acousto-optique***

Soutenu le: 31/10/2011

devant la commission d'examen:

<i>Dr : AYADI KHALED</i>	<i>M.C. à l'université de Sétif</i>	<i>Président</i>
<i>Dr : LAOUAR NOAMEN</i>	<i>M.C. à l'université de Sétif</i>	<i>Rapporteur</i>
<i>Dr : DEMAGH NACER ED</i>	<i>M.C. à l'université de Sétif</i>	<i>Examineur</i>
<i>Dr : MANALLAH AISSA</i>	<i>M.C. à l'université de Sétif</i>	<i>Examineur</i>
<i>Dr : MEDJAHED AICHA</i>	<i>M.C. à l'université de Sétif</i>	<i>Examineur</i>

Dédicaces

Je tiens à dédier ce modeste travail à :

- Mes chers parents : ZILOUKHA et YAZID.
- Mes chers frères et sœurs : SOUAD, NADJIHA, ABID, SOUHILA, FATEH, OUARDA, HAMZA et SALIM.
 - Toute la famille GRAINI.
 - Tous mes oncles.
 - Tous mes amis
- Les amis de la promo Magister 2007 et 2008 et Ingéniorat 2004.

LAZHAR GRAINI

Remerciements

*Je tiens à remercier en premier lieu : DIEU puissant
qui ma donné le courage et la volonté pour
accomplir ce modeste travail.*

*Mes vifs remerciements vont également à mon
encadreur : Dr. Naamane LAOUAR et M. Kouider
FERRIA pour leurs aides précieux.*

*Je remercie aussi Dr. Abdelkrim BENIAICHE pour
leur soutien.*

Merci Zidane HEBBOUL pour ton aide.

*Sans oublier de remercier infiniment les membres de
jury qui ont accepté de juger ce travail.*

LAZHAR GRAINI

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
CHAPITRE. I : CONTROLE DE QUALITE DE L'EAU POTABLE	
I.1. Introduction	2
I.2. Traitement des eaux de surface.....	2
I.2.1. L'eau et la pollution	2
I.2.1.1. L'eau...	2
• Caractéristiques Physiques De L'eau	2
• Propriétés Chimique	3
• Cycle de l'eau	3
I.2.1.2. La Pollution	4
• La pollution domestique et urbaine	4
• La pollution industrielle ...	4
• La pollution agricole	5
• La pollution d'origine naturelle et l'eau de pluie	5
I.2.2. Les indicateurs de qualité de l'eau	6
• Matières en suspension (MES)	6
• Demande biochimique en oxygène (DBO).	6
• Azote global (NGI)	7
• Phosphore total (PT)	7
I.2.3. La chaîne de traitement des eaux de surface	7
1.2.3.1. Prétraitement	8
1.2. 3.2. Pré-oxydation	8
1.2.3.3. Clarification.	9

1.2.3.4. Filtration	13
1.2.3.5. Désinfection	14
1.2.4. Normes de la qualité des eaux	16
I.3. Types de contrôle de qualité de l'eau	18
I.3.1. Méthodes classiques	18
I.3.1.1. Contrôle bactériologique	18
I.3.1.2. Contrôle de désinfection	19
I.3.1.3. Contrôle physico-chimique	20
I.3.2. Méthodes modernes	20
I.3.2.1. Les systèmes de surveillance	21
I.3.2.2. Les Capteurs	21
I.3.2.2.1. <i>Caractéristiques générales des capteurs</i>	21
I.3.2.2.2. <i>Capteurs électrochimiques</i>	22
I.3.2.3. Méthode optique	22
I.3.2.4. Méthode acoustique	23
I.3.2.5. Méthode acousto- optique	23
I.4. les principes de mesure des paramètres essentiels de potabilité	23
I.4.1. Mesure de la température	23
I.4.2. Mesure de la turbidité	23
I.4.3. Mesure de la conductivité	24
I.4.4. Mesure du pH	24
I.4.5. Mesure d'oxygène dissous	25

Chapitre. 2 : Les ultrasons

II.1. Introduction	26
---------------------------	----

II.2. Théorie de la piézoélectricité	27
II.2.1. L'effet piézoélectrique	27
II.2.2. Quelque matériau présentant des propriétés piézoélectrique	28
II.2.3. Equations de la piézoélectricité	29
II.3. Les transducteurs	30
II.3.1. Définition	30
II.3.2. les transducteurs ultrasonique	30
II.3.2.1. les transducteurs ultrasonique à piezoélectriques	31
II.3.2.1.1. La conversion électrostatique,	31
II.3.2.1.2. La conversion piézo-électrique	31
II.3.3. Description d un Champ acoustique rayonné par Transducteur plan	31
II.3.3.1. Zone initiale: zone de Fresnel	32
II.3.3.2. Zone distale: zone de Fraunhofer	33
II.3.3.3. Transducteurs focalisés	34
II.3.3.4. Transducteurs multiéléments	35
II.3.3.5. Balayage électronique par commutation	35
II.3.3.6. Balayage sectoriel et volumique	36
II.4. Théorie des ondes ultrasons	37
II.4.1. Définition des ultrasons	37
II.4.1.1. les ultrasons de puissance,	37
II.4.1.2. Les ultrasons de diagnostic,	38
II.4.2. Les différents types des ondes ultrasonores	39
II.4.2.1. Selon la géométrie de la source de vibration	39
II.4.2.2. Selon la nature du milieu de propagation	39

II.4.2.3. Selon les dispositifs qui produisent les ondes acoustiques.	40
II.5. Paramètres de caractérisation de l'onde ultrasonore	42
II.5.1. Impédance acoustique	42
II.5.2. La longueur d'onde	42
II.5.3. La pression et l'intensité	43
II.6. Propagation des ultrasons dans un milieu liquide	43
II.7. Quelques Grandeurs d'influence de la propagation des ondes ultrasons	46
II.8. Interaction des ondes ultrasonores avec le laser (interaction acousto optique)	50

Chapitre. III : Etude Expérimentale

III. Introduction	54
III.1. Montage Expérimentale	54
III.2. Ajustage du Montage	56
III.2.1. Ajustage de l'axe optique	56
III.2.2. Ajustage des éléments optiques	56
III.2.3. Ajustage de l'inclinaison du transducteur piézoélectrique :	56
III.3. Résultats Expérimentaux	56
III.3.1. Cas de l'éthanol	58
III.3.1.1. Influence de la concentration de l'éthanol sur la distance entre les ordres diffractés	58
III.3.1.2. Influence de la concentration de l'éthanol sur la vitesse acoustique	60
III.3.1.3. Influence de la concentration de l'éthanol dans l'eau distillée sur l'indice de réfraction de la solution.	64
III.3.1.4 Influence de la variation de la concentration de l'éthanol sur l'intensité des ordres diffractés	66
III.3.1.4.1. Manipulation	66

III.3.1.4.2. Résultat	66
III.3.2. Cas de l'acétone	68
III.3.2.1. Influence de la concentration de l'acétone dans l'eau sur la distance entre les ordres diffractés	68
III.3.2.2. Influence de la concentration de l'acétone dans l'eau sur l'indice de réfraction du mélange	71
III.3.2.3. Influence de la concentration de l'acétone sur l'intensité des ordres diffractés	73
III.3.3. Cas du sel	75
III.3.3.1. Influence de la concentration du sel dans l'eau sur la distance entre les ordres diffractés	75
III.3.3.2. Influence de la concentration du sel sur l'intensité de l'ordre diffraction	77
III.3.4. Cas de l'eau de Barrage	78
III.3.4.1. Influence de l'eau de barrage sur la distance entre les ordres diffractés	79
III.3.4.2 Effet des différents liquides sur l'intensité diffractée	80
Conclusion Générale	82

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est essentielle pour la vie, cependant elle peut être aussi une source de maladie. D'après un rapport de l'organisation mondiale de la santé cinq millions de nourrissons et d'enfants meurent chaque année de maladies, diarrhéiques dues à la contamination des aliments ou de l'eau de boisson. [Kassim 2005],

La consommation d'une eau potable, facteur déterminant dans la prévention des maladies liées à l'eau, doit bénéficier d'une attention particulière. En effet, l'eau destinée à la consommation humaine ne doit contenir ni substances chimiques dangereuses, ni germes nocifs pour la santé.

Le domaine du contrôle des pollutions a particulièrement explosé dans les dernières années grâce à l'automatisation des processus de traitement et des processus de contrôle. Dans cette optique, différentes méthodes existent : chimiques, physicochimiques, acoustiques, optiques ... etc.

L'objectif de notre travail est le contrôle de la pollution de l'eau par la méthode acousto optique : la propagation des ondes acoustiques dans l'eau provoque des variations spatiales temporelles de l'indice de réfraction .

La méthode que nous proposons utilise deux paramètres : la vitesse acoustique et l'intensité des ordres diffractés.

Afin d'aboutir à notre objectif, nous avons vu nécessaire de structurer mon mémoire en trois chapitres principaux :

Le premier est consacré à expliciter les différentes méthodes de contrôle de la pollution de l'eau potable en citant les différentes sources qui la causent ainsi que les différents paramètres de potabilité.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des ultrasons, leur production, leur propagation et leur interaction avec les ondes lumineuses.

Le troisième chapitre est réservé à l'application de la méthode acousto-optique pour le contrôle de l'eau polluée par des liquides miscibles et un solide soluble dans l'eau.

Finalement notre travail sera achevé par une conclusion générale .

Chapitre I

Contrôle de qualité de l'eau
potable.

I.1. Introduction

La forme de vie dite moderne de l'homme a beaucoup modifié l'équilibre écologique naturel autrefois existant sur la planète. Les problèmes d'environnement liés à la concentration des populations et aux activités humaines, que ce soit au niveau urbain, agricole ou industriel, deviennent de plus en plus importants.

La pollution générée par l'homme affecte de plus en plus le cycle de l'eau et des traitements artificiels doivent souvent être appliqués pour compléter les cycles naturels d'autoépuration. Ces traitements sont en place à l'heure actuelle sur les stations d'épuration et sur les stations des traitements.

Dans la mesure où les ressources souterraines traditionnelles ne suffisent plus à assurer la demande en eau potable, il s'est avéré nécessaire, sinon indispensables d'utiliser les eaux de surface.

I.2. Traitement des eaux de surface

I.2.1. L'eau et la pollution.

I.2.1.1. L'eau : L'eau liquide (H_2O) est souvent perçue comme une substance assez ordinaire car elle est transparente, inodore, insipide et se présente sur terre en grande quantité. Cependant, c'est un composé chimique remarquable. Bien que nous la buvions et que nous l'utilisons pour laver, pêcher ou cuisiner, nous oublions presque toujours la relation spéciale qu'elle a avec nos vies. [RODRIGUEZ, A. 2004].

L'eau comme ressource naturelle est indispensable à la vie, qu'elle soit d'origine souterraine ou superficielle, les eaux utilisées pour l'alimentation humaine sont rarement consommables telles quelles. Il est nécessaire de leur appliquer un traitement, ne serait-ce qu'une désinfection dans le cas des eaux souterraines. L'eau que nous utilisons couramment est celle des lacs et des rivières, elle constitue seulement 1% de l'eau disponible sur terre. [VALENTIN 2000], [RODIER 1995]. L'eau naturelle filtrée est en général une solution ou on peut trouver :

- Des sels minéraux
- Des gaz en solution (O_2 / N_2 , CO_2 ...)
- Des substances organiques

- **Caractéristiques physiques de l'eau**

L'eau semble, à première vue, être une molécule très simple, se composant de justes deux atomes d'hydrogène liés à un atome d'oxygène. En effet, il y a très peu des molécules qui

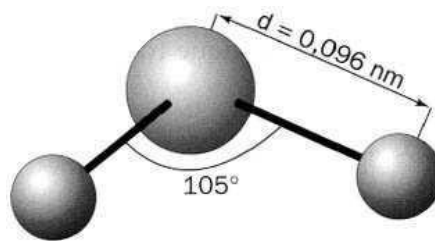
sont plus petites ou plus légères qu'elle. La taille de la molécule d'eau, cependant, montre la complexité de ses actions ainsi que ses capacités uniques et ses propriétés anormales semblent s'adapter idéalement pour créer les conditions de la vie. La glace est de l'eau à l'état solide, cristallisée, gelée. C'est l'un des trois états naturels de l'eau. L'eau pure gèle à 0°C. Les deux autres états sont l'état liquide et l'état gazeux (au-delà de 100°C). Ces deux valeurs sont valables uniquement à pression atmosphérique (environ $1,013 \times 10^5$ Pa). [RODRIGUEZ, 2004]

- $M=18.01528$ g/mol.
- Température de fusion : 0 °C (273,015K).
- Masse volumique de l'eau liquide $\rho=1.000$ kg/l (4°C)
- Température d'ébullition : $T_{eb}=100^\circ\text{C}$ (375.15°K)

Masse volumique de l'eau solide : $\rho = 00.9166$ kg/l (0°C, 1 atm) [Jacques 2003]

• Propriétés chimiques

L'eau correspond à la formule de LEWIS :



La molécule est triangulaire, sa géométrie est indiquée ci-contre. La distance entre l'atome d'oxygène et les atomes d'hydrogènes est $d = 0,096$ nm, l'angle entre les atomes d'hydrogènes est $\beta=105^\circ$ [Jacques 2003]

• Cycle de l'eau

Les eaux de surface résultent des précipitations. Une partie de cette eau s'évapore et retourne dans l'air sous forme de vapeur d'eau. La deuxième durcit à cause du froid, ou s'écoule à la surface du sol et pénètre jusqu'à la nappe phréatique. Le cycle de l'eau se fait donc, par évaporation permanente des eaux de mer ou de rivière, formant des nuages et des brouillards, puis retombent sous forme de précipitations (pluie où neige). On constate que la vie humaine se situe dans une zone relativement courte du cycle de l'eau qui est illustré sur la figure 1.1. [VALENTIN 2000]

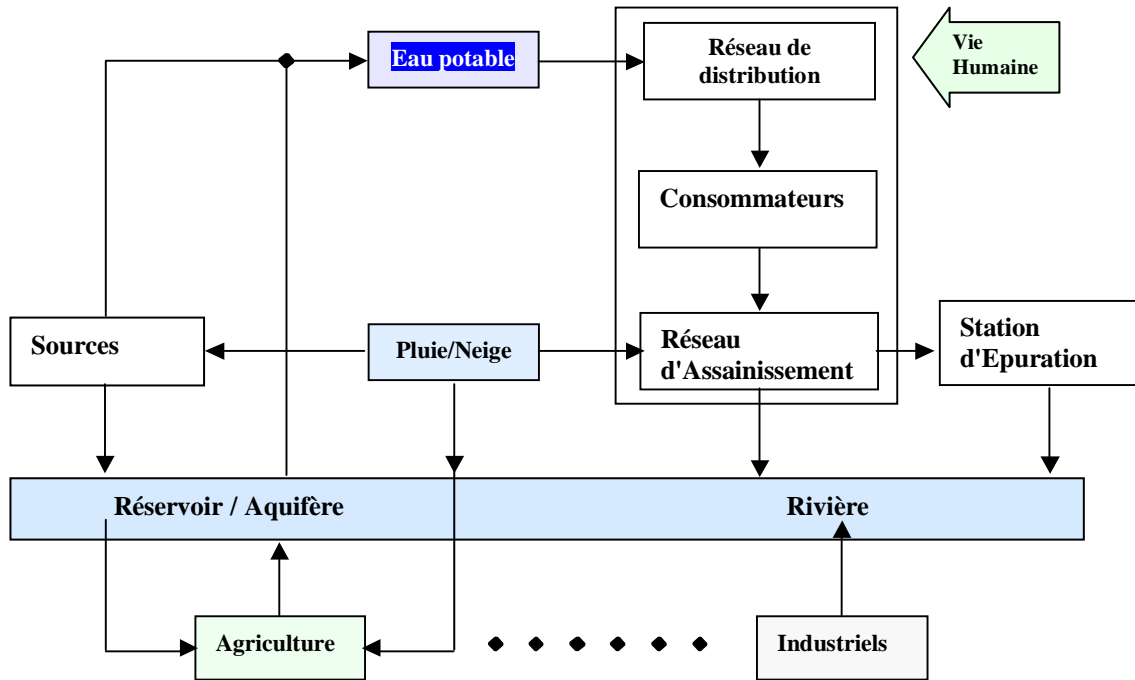


Figure.1.1: Cycle de l'eau.

I.2.1.2. La Pollution

La pollution est définie comme l'introduction dans un milieu naturel de substances provoquant sa dégradation. La pollution des ressources en eau au niveau des stations d'épuration provient de diverses sources, notamment les formes relatives aux activités humaines [HADJ-SADOK1999] [STEYER 1998] [QUEINNEC 2000] :

- **La pollution domestique et urbaine**

Les eaux usées urbaines sont rejetées par les installations collectives (hôpitaux, écoles, commerces,...) et comportent les eaux ménagères (détergents, graisses, ...) et les eaux vannes (eaux sanitaires : matière organique et azotée, germes et matières fécales, ...). Les eaux résiduaires urbaines (ERU) peuvent être considérées comme la plus importante industrie en termes de masse de matériaux bruts à traiter. A titre d'exemple, tant en France qu'en Colombie la consommation moyenne en eau est généralement estimée à 150 litres par jour et par habitant. Dans la communauté européenne il est produit quotidiennement un volume proche à 40 millions de m³ d'eaux usées.

- **La pollution industrielle**

Le degré et la nature de la pollution générée par des rejets industriels varient suivant la spécificité de chaque activité industrielle. Certains rejets troublent la transparence et

l'oxygénation de l'eau; ils peuvent avoir un effet nocif sur les organismes vivants et nuire au pouvoir d'auto-épuration de l'eau. Ils peuvent causer aussi l'accumulation de certains éléments dans la chaîne alimentaire (métaux, pesticides, radioactivité,...). Les eaux résiduaires industrielles (ERI) représentent une part importante des rejets arrivant aux stations d'épuration. A titre d'exemple, les deux tiers des industriels redevables des Agences de l'Eau en France (ceux qui génèrent le plus de pollution) sont raccordés aux stations d'épuration des collectivités territoriales. Ils produisent 10% de la charge polluante industrielle brute, ce qui est équivalent à un quart de la pollution domestique. Cet apport pose de sérieux problèmes aux exploitants de stations d'épuration urbaines, tant au niveau des capacités que des performances de traitement. En effet, les effluents industriels toxiques constituent un danger permanent pour les stations de dépollution biologique. De plus, il faut bien noter que, selon le ministère de l'Environnement Français, 30% des rejets industriels s'échappent encore dans la nature sans aucun traitement

- **La pollution agricole**

Ce type de pollution s'intensifie depuis que l'agriculture est entrée dans un stade d'industrialisation. Les pollutions d'origine agricole englobent à la fois celles qui ont trait aux cultures (pesticides et engrais) et à l'élevage (lisiers et purins). Néanmoins, le problème de la pollution agricole est un peu différent, dans la mesure où cette source de pollution n'arrive qu'indirectement à la station. C'est le cas en particulier des engrais et pesticides qui passent d'abord à travers les milieux naturels (nappes phréatiques, rivières...). C'est aussi le cas des déchets solides issus des industries agro-alimentaires et des concentrations des élevages qui entraînent un excédent de déjections animales (lisiers de porc, fientes des volailles...) par rapport à la capacité d'absorption des terres agricoles ; celles-ci, sous l'effet du ruissellement de l'eau et de l'infiltration dans le sous-sol, enrichissent les cours d'eau et les nappes souterraines en dérivés azotés et constituent aussi une source de pollution bactériologique.

- **La pollution d'origine naturelle et l'eau de pluie**

La teneur de l'eau en substances indésirables n'est pas toujours le fait de l'activité humaine. Certains phénomènes naturels peuvent y contribuer (contact de l'eau avec les gisements minéraux, ruissellement des eaux de pluie, irrptions volcaniques,...). En ce qui concerne l'eau de pluie, bien que longtemps considérée comme propre, l'eau d'origine pluviale est en fait relativement polluée. L'origine de cette pollution peut provenir des gaz ou solides en suspension rejetés dans l'atmosphère par les véhicules, les usines ou les centrales thermiques. Ces polluants (oxyde de carbone, dioxyde de soufre, poussière) sont envoyés vers le sol à la moindre averse. Lorsqu'elle ruisselle, l'eau de pluie a un second effet nocif: elle transporte les hydrocarbures,

les papiers, les plastiques et les débris végétaux accumulés sur la terre et les toitures. De plus, cette pollution est déversée sur de courtes périodes et peut atteindre des valeurs très élevées ce qui provoque un effet de choc sur le milieu biologique.

I.2.2. Les indicateurs de qualité de l'eau

Les eaux usées sont des liquides de composition hétérogène, chargés de matières minérales ou organiques pouvant être en suspension ou en solution, et dont certaines peuvent avoir un caractère toxique. L'élaboration et la définition de paramètres qualitatifs de la pollution ont conduit à établir des mesures quantitatives de la pollution [VICTOR-HUGO2007] [HADJ-S, 1999] [QUEINNEC 2000] :

- **Matières en suspension (MES)**

Quantité (en mg/L) de particules solides, de nature minérale ou organique, véhiculées par les eaux usées. La mesure des MES est effectuée par filtration ou bien par centrifugation d'un échantillon, après séchage à 110 °C.

- **Demande biochimique en oxygène (DBO)**

Représente la consommation d'oxygène (en O₂ mg/L) résultant de la métabolisation de la pollution organique biodégradable par les micro-organismes. L'échantillon prélevé est dilué par une solution contenant les substances nutritives appropriées et une semence d'un grand nombre de populations bactériennes. La procédure d'analyses biochimique dépendant des prévisions de la charge polluée, normalement plusieurs tests sont effectués avec différentes dilutions, afin de couvrir la gamme complète des concentrations possibles. Le mélange est laissé en incubation dans un flacon étanche, isolé de l'air, pour faciliter les mesures d'oxygène utilisé durant les réactions de métabolisme. Un test supplémentaire est réalisé sur la culture de micro-organismes avec une dilution d'eau, afin d'établir les corrections liées à la fraction d'oxygène consommée par la semence biologique. Les résultats de ce test dépendent de la température ainsi que de la période d'incubation. Si la température standard est fixée à 20 °C, la durée d'oxydation peut varier. La Demande Biochimique en Oxygène (DBO) est souvent mesurée après 5 jours, la notation utilisée dans ce cas est généralement DBO₅. Au cours de cette période, l'oxydation n'est pas totale (de 60 à 70% de la réaction complète), alors qu'elle est estimée entre 90% et 95% après une incubation de 20 jours. La DBO a été reconnue depuis très longtemps comme la principale mesure de la pollution organique.

- **Azote global (NGI)**

Quantité totale d'azote (en N mg/L) correspondant à l'azote organique (Norg) et ammoniacal (ion ammonium, NH^+4) et aux formes minérales oxydées de l'azote nitrates (NO^-3) et nitrites (NO^-2). L'analyse de l'ammoniac est réalisée sous un pH élevé par la technique de minéralisation (chauffage et condensation) et un test de colorimétrie. Le test Kjeldahl consiste à faire subir à un échantillon, un processus de digestion où l'azote organique est transformé en ammoniac. Par conséquent, l'azote Kjeldahl (NTK) représente l'azote organique et ammoniacal. Les formes oxydées (nitrates et nitrites) sont mesurées par colorimétrie.

- **Phosphore total (PT)**

Quantité (en P mg/L) correspondant à la somme du phosphore contenu dans les orthophosphates, les polyphosphates et le phosphate organique. Le phosphore qui pollue les eaux est en majeure partie sous forme de phosphates (PO^-3). Typiquement ce composé est déterminé directement par addition d'une substance chimique qui forme un complexe coloré avec le phosphate. On pourrait y rajouter des mesures plus spécifiques concernant la présence de toxiques d'origine minérale (mercure, cadmium, plomb, arsenic...) ou organiques (composés aromatiques tels que le phénol, PCP...). On trouvera aussi les mesures du Carbone Organique Total (COT), autre mesure de la quantité de matière organique, des Matières Volatiles en Suspension (MVS) qui représentent la partie organique (donc biodégradable) des MES, ou encore des Matières Oxydables (MO).

Cette mesure est particulièrement utilisée par les Agences de l'Eau pour établir les quantités de matières organiques présentes dans un effluent.

I.2.3. La chaîne de traitement des eaux de surface

Pour traiter ces eaux superficielles, nous avons deux types de procédés de traitements :

1-Traitement biologique

2- Traitement physico-chimique. [KETTAB.A,1992]

Nous présentons dans la figure 1.2 ci-dessous la filière la plus complète et la plus courante d'une chaîne de traitement des eaux de surface. Sans entrer dans les détails particulièrement fins des procédés, on peut admettre que la chaîne habituelle complète comporte cinq grandes étapes illustrées comme suit [VALENTIN, 2000] :

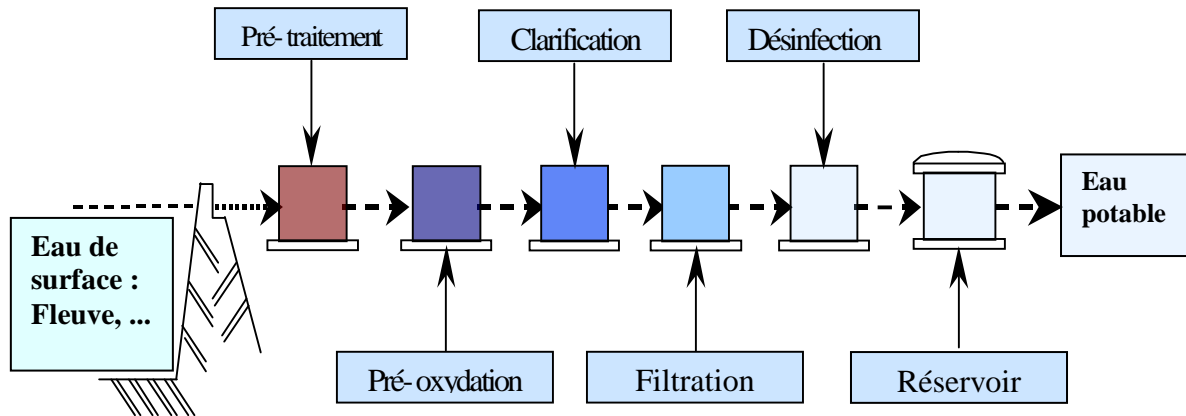


Figure.1.2 : Chaîne de traitement

1.2.3.1. Prétraitement

Une eau, avant d'être traitée, doit être débarrassée de la plus grande quantité possible d'éléments dont la nature et la dimension constitueraient une gêne pour les traitements ultérieurs. Pour cela, on effectue des pré-traitements de l'eau de surface. Ils sont principalement de deux types : le dégrillage et le tamisage.

Le dégrillage protège les ouvrages aval de l'arrivée de gros objets susceptibles de provoquer des bouchages dans les différentes unités de traitement, et permet également d'évacuer les matières volumineuses charriées par l'eau brute, qui pourraient nuire à l'efficacité des traitements suivants, ou en compliquer l'exécution.

Le tamisage permet d'éliminer des objets plus fins que ceux éliminés par le dégrillage. Il s'agit de feuilles ou de morceaux de plastique par exemple [VALENTIN 2000].

1.2. 3.2. Pré-oxydation

A l'issue du pré-traitement, on a une eau relativement propre mais qui contient encore des particules colloïdales en suspension, et des matières organiques en solution. Celles-ci n'ont en elles-mêmes rien de dangereux, car il nous arrive souvent de consommer de l'eau en contenant tels que : le thé, le café ou le lait. Ces produits sont des eaux chargées en matières organiques, mais on sait qu'elles s'oxydent spontanément en contact avec l'air. On va donc les détruire par une pré-oxydation qui peut être faite par trois méthodes différentes : l'ajout de chlore (pré-chloration), l'ajout de dioxyde de chlore ou ajout d'ozone (pré-ozonation).

a) Pré-chloration

La pré-chloration s'est surtout développée dans les années 60., elle tend à disparaître actuellement. Le chlore est le réactif le plus économique, mais son inconvénient est de former avec certains micro-polluants des composés organochlorés de type chloroforme ou des composés complexes avec les phénols de type chlorophénol dont le goût et l'odeur sont désagréables [VALENTIN 2000].

b) Dioxyde de chlore

On préfère parfois utiliser le dioxyde de chlore qui coûte plus cher mais n'a pas les inconvénients du chlore cités ci-dessus. L'utilisation du dioxyde de chlore présente, lui aussi, des inconvénients non négligeables : Il est sans effet sur l'ammonium et se décompose à la lumière, ce qui entraîne une augmentation importante de taux de traitement à appliquer en période d'ensoleillement. Le dioxyde de chlore est un oxydant puissant mais pas une solution économique. Il reste très peu utilisé en pré-oxydation mais représente une alternative à l'utilisation du chlore lorsque celui-ci entraîne des problèmes de qualité d'eau [VALENTIN 2000].

c) Pré-ozonation

Enfin, depuis quinze à vingt ans, on utilise comme pré-oxydant l'ozone, qui non seulement a l'avantage de détruire les matières organiques en cassant les chaînes moléculaires existantes, mais également a une propriété virulicide très intéressante. Généralement utilisée en désinfection finale, cette technique peut être mise en œuvre en pré-oxydation pour : la diminution du taux de traitement, l'amélioration de la clarification, et l'oxydation des matières organiques. La pré-ozonation est une solution de substitution à la pré-chloration. Néanmoins, elle ne résout pas tous les problèmes car certaines algues résistent à l'ozone et son coût reste plus élevé que celui du chlore [VALENTIN 2000].

1.2.3.3. Clarification

La clarification est l'ensemble des opérations permettant d'éliminer les Matières En Suspension (MES) d'une eau brute ainsi que la majeure partie des matières organiques. La clarification comprend les opérations suivantes: la coagulation, la floculation, la décantation et la filtration. L'objectif consiste à agréger sous forme de floccs, les matières en suspension organiques et minérales et les substances colloïdales. Elles se décantent au fond du bassin de décantation ou elles sont régulièrement extraites. Par contre, l'eau surnageant est filtrée soit sur sable (éliminer les fins particules en suspension qui restent) soit sur charbon

actif (afin d'éliminer en plus les couleurs et odeurs dues à la matière organique). Nous noterons qu'il existe d'autres procédés de décantation tels que la flottation, le lit de boue...'. [KETTAB.A 1992]. [VALENTIN 2000].

a) La coagulation

La coagulation est l'une des opérations les plus importantes dans le traitement des eaux de surface. Cette étape a une grande influence sur les opérations de décantation et de filtration ultérieures. Le contrôle de la coagulation est donc essentiel pour trois raisons [VALENTIN 2000] :

- La maîtrise de la qualité de l'eau traitée en sortie (abattement de la turbidité).
- Le contrôle du coagulant résiduel en sortie.
- La diminution des coûts de fonctionnement (réactifs et des interventions humaines).

Les colloïdes en solution sont naturellement chargés négativement. Ainsi, elles se repoussent mutuellement et restent en suspension. On dit qu'il y a stabilisation des particules dans la solution. La coagulation consiste en la déstabilisation de ces particules par la neutralisation de leurs charges négatives en utilisant des réactifs chimiques nommés coagulants avec une agitation importante.

Le choix du coagulant et la dose ont une influence sur la qualité de l'eau, le coût d'exploitation, et les opérations ultérieures. Il existe deux principaux types de coagulants [LIND C., 1995.] :

- Les sels de fer (chlorure ferrique).
- Les sels d'aluminium (sulfate d'aluminium).

Beaucoup de paramètres influent sur la coagulation tel que : la dose du réactif, la nature des particules, le pH, la température de l'eau, la turbidité, l'alcalinité etc.... Tout contrôle de l'opération de coagulation doit commencer par une régulation de ces paramètres. Le sulfate d'aluminium, par exemple, est un coagulant utilisé pour une température d'eau supérieure à 10-12°C, et a une efficacité optimale pour un pH compris entre 6,2 et 7,4. Une température basse augmente la viscosité de l'eau, ralentit la coagulation et la décantation du floc, et diminue la plage optimale du pH. L'opération de coagulation doit s'effectuer dans un temps très bref car le processus de déstabilisation est réversible. Le réactif doit être réparti de façon la plus rapide et la plus homogène possible dans toute la masse de l'eau. Ce mélange énergétique doit durer entre 1 et 3 minutes [LIND C, OCT,1994.].[LIND C., NOV, 1994.]

b) La floculation

La floculation est le phénomène de formation de flocons de taille plus importante, en utilisant des flocculants ou adjuvants de floculation. Contrairement à la coagulation, la floculation nécessite une agitation lente afin d'assurer le contact entre les flocons engendrés par la coagulation, si non ils risquent de se briser. La majorité des flocculants ou adjuvants sont des polymères de poids moléculaire très élevé. La durée du mélange se situe entre 10 et 60 min. Les temps d'injection du coagulant et du flocculant sont en général espacés de 1 à 3 minutes, en fonction de la température de l'eau. Les flocons ainsi formés seront décantés comme dans la figure 1.3 [VALENTIN 2000] [VALIRON1989]. Les boues formées pendant la coagulation-floculation aboutissent après décantation dans des concentrateurs. Les boues purgées de décanteurs sont plus concentrées dans ce cas, ce qui conduit à une perte d'eau réduite.

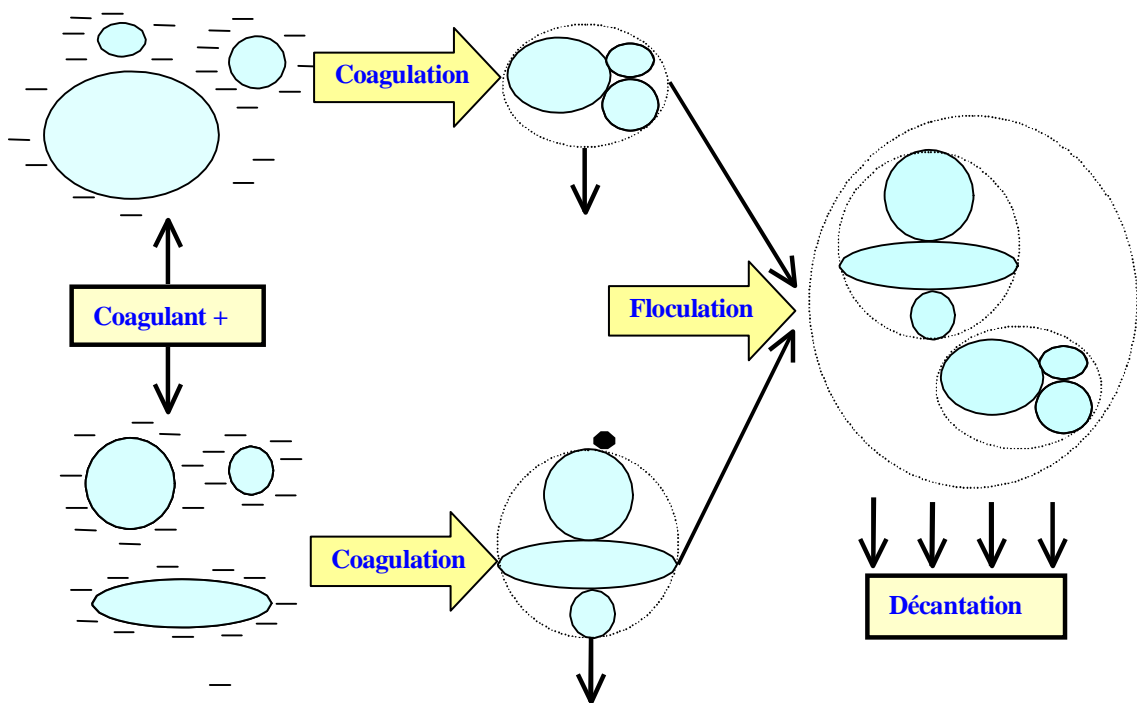


Figure.1.3 : Coagulation-Floculation [VALENTIN 2000] :

c) La décantation

Les colloïdes sont des suspensions stables qui existent sous forme d'ions négatifs dans l'eau, impossibles à décanter naturellement. Ils peuvent être d'origine organique (acides humiques, bactéries) ou minérale (argiles, glaise). Ces substances sont, en partie, responsables de la turbidité et de la couleur de l'eau. La chute d'une particule dans l'eau est régie par la loi de

Stokes [HECTOR, R. 2006]

$$V = \frac{g}{18.\eta} (\rho_s - \rho_l).d^2 \quad (1.1)$$

Avec :

V : vitesse de décantation de la particule.

g : accélération de la pesanteur.

η : viscosité dynamique.

d : diamètre de la particule.

ρ_s : masse volumique de la particule.

ρ_l : masse volumique du liquide.

Le Tableau 1.1 ci-dessous indique le temps de décantation des différentes particules en fonction de leur dimension, leur densité et de la température de l'eau [VALENTIN 2000].

Type de particules	Diamètre (mm)	Temps de chute		
		Densité de 2.6	Densité de 2.0	Densité de 1.1
Gravier	10.0	0.013 sec	0.02 sec	0.20 sec
Sable grossier	1.0	1.27 sec	2.09 sec	20.90 sec
Sable fin	0.1	2.11 min	3.48 min	34.83 min
Glaise	0.01	3.52 H	5.80 H	2.42 J
Bactéries	0.001	14.65 J	24.19 J	241.9 J
Colloïdales	0.0001	4.12 A	6.66 A	66.59 A
Colloïdales	0.00001	412.2 A	665.9 A	6659 A
Colloïdales	0.000001	41222 A	66590 A	665990 A

Sec : secondes ; min : minutes ; H : heures ; J : jour ; A : années.

Tableau 1.1 : Temps de décantation des particules

La décantation est actuellement le procédé le plus utilisé pour la séparation solide- liquide. Cette opération peut être effectuée aussi par : la coagulation sur filtre, ou la flottation. Ces deux techniques sont plus adaptées aux eaux brutes et peu chargées en MES.

Il existe deux types de décanteurs: les décanteurs statiques et les décanteurs à contact de boues. Le terme «statique» désigne les décanteurs qui ne sont ni à circulation de boues, ni à lit de boues. Afin d'augmenter la probabilité de décantation des particules dans les décanteurs à

contact de boues, on met l'eau additionnée de réactifs (eau brute + coagulant) en contact avec des boues concentrées provenant de la décantation. Deux procédés peuvent être employés pour assurer le contact avec les boues: les appareils à re-circulation de boues et les appareils à lit de boues.

1.2.3.4. Filtration

La filtration est définie comme le passage d'un fluide à travers une masse poreuse pour en retirer les matières solides en suspension. Elle représente donc le moyen physique pour extraire de l'eau, les particules non éliminées préalablement lors de la décantation. De façon générale, un filtre aura une longévité entre deux lavages d'autant plus importante que les traitements préalables auront été efficaces (coagulation, floculation, et décantation).

a) **Choix du filtre :** Les principaux critères de choix d'un filtre sont [VALENTIN 2000] [DEGREMONT, M 1989]

- Le matériau : On peut utiliser du sable ou du charbon actif en grain. Ce dernier est plus utilisé en traitement d'affinage en deuxième étage de filtration afin d'éliminer les pesticides et les sous-produits d'oxydation (odeurs et goûts).
- La taille de grain du milieu filtrant.
- Le coefficient d'uniformité: Si l'homogénéité des tailles n'est pas respectée, le lavage classe les grains selon leur taille, les gros grains au fond du filtre et les plus fins en surface.
- La hauteur de la couche filtrante: Il faut vérifier périodiquement si le filtre perd du matériau et compléter au besoin.
- Le taux de filtration (en $m^3/m^2.h$) ou vitesse de filtration.

Ce choix est guidé par les caractéristiques et la qualité de l'eau voulut. Un filtre doit produire une eau de qualité satisfaisante et constante tout au long d'un cycle de filtration.

b) Evolution de la turbidité de l'eau filtrée

La figure 1.4 [HECTOR, R. 2006] représente, l'évolution de la turbidité de l'eau filtrée en fonction du temps. (a) La phase de maturation du filtre, (b) La période de fonctionnement normal. (c) Début de crevaison de la masse filtrante et (d) La limite de turbidité acceptable, à ne pas dépasser.

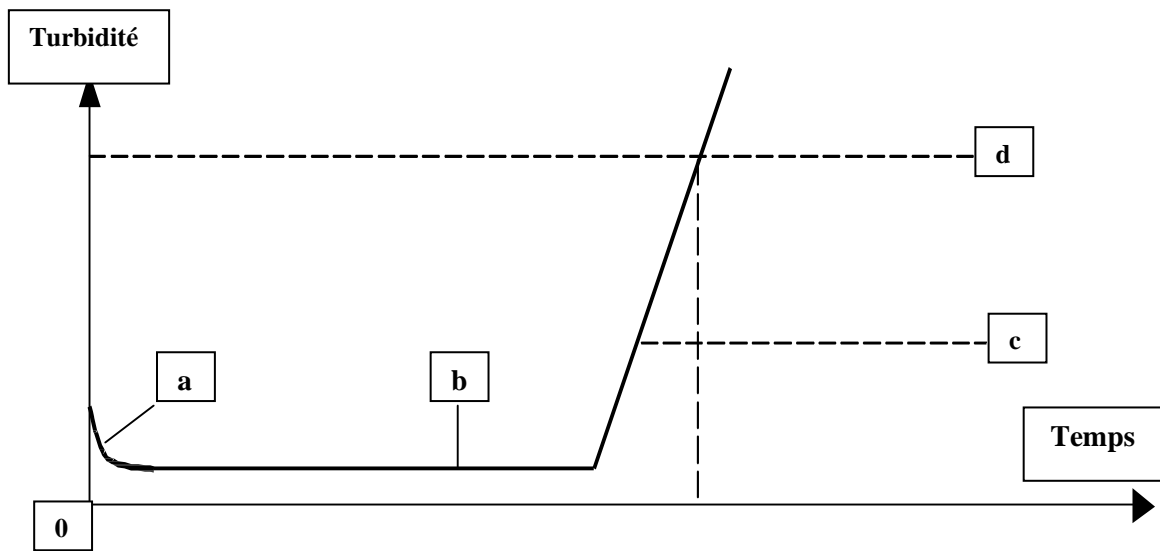


Figure.1.4 : Evolution de la turbidité de l'eau filtrée

1.2.3.5. Désinfection

Le but de la désinfection est d'éliminer tous micro-organismes pathogènes présents dans l'eau. Au niveau de l'exploitant, les dangers liés à la présence de micro-organismes pathogènes dans les eaux distribuées sont multiples :

- Risque à court terme amplifié par le délai d'analyse qui est au minimum de 24 h.
- Gravité des maladies, qui peuvent être mortelles.
- Ampleur de la contamination qui peut aller jusqu'à plusieurs milliers de personnes.

Le principe de la désinfection est de mettre un désinfectant à une certaine concentration pendant un certain temps dans une eau contaminée. Cette définition fait apparaître trois notions importantes : les désinfectants, le temps de contact, et la concentration des désinfectants.

a) Les désinfectants

Les trois principaux désinfectants utilisés en eau potable sont : Le chlore, l'ozone, et le rayonnement Ultra Violet (UV). Comme nous avons déjà vu le chlore et l'ozone, nous allons présentés dans cette section, le rayonnement UV. La découverte des effets bactéricides des radiations solaires date de 1878 [CARDOT,1999]

L'irradiation par une dose suffisante de rayons Ultra Violet permet la destruction des bactéries, des virus, des germes, des levures, des champignons, des algues, etc... Les rayonnements UV ont la propriété d'agir directement sur les chaînes d'ADN des cellules et d'interrompre le

processus de vie et de reproduction des micro-organismes. Comme pour l'ozone, elle n'est pas caractérisée par un effet rémanent. Chacun de ces produits possède un pouvoir désinfectant différent que l'on peut classer dans cet ordre :

UV > Ozone > Chlore. [HECTOR, 2006]

b) Le temps de contact

En générale, le temps de contact varie entre quelques minutes et plusieurs heures. En effet, l'eau ne se déplace pas de façon uniforme dans le réacteur. Il existe des passages préférentiels et des zones mortes. Par exemple, pour une bêche de chloration ayant un temps de séjour théorique d'une heure, certaines molécules d'eau sortiront au bout d'un quart d'heure et d'autres y resteront deux heures. Le cloisonnement des réacteurs permet d'améliorer l'écoulement du fluide et donc d'homogénéiser le temps de contact qui dépend de la taille et de l'hydraulique du réacteur de contact.

c) La concentration des désinfectants

L'efficacité de la désinfection dépend en partie, du suivi de la concentration en oxydant. L'évolution de la concentration en oxydant est liée à la demande en oxydant de l'eau. Cette demande dépend de : la qualité de l'eau, le pH, les températures (différentes entre été et hiver), les matières organiques, et la concentration en ammoniacque. Le paramètre de demande en chlore étant difficile à contrôler, on choisit en général de maintenir un niveau de résiduel (consigne) dans l'eau. Il est indispensable de mesurer régulièrement le résiduel de désinfectant afin de le maintenir au niveau souhaité et d'éviter des problèmes sur le réseau de distribution par la suite [VALENTIN 2000].

Pour chaque type de désinfection, il est nécessaire de contrôler certains paramètres pour évaluer l'efficacité de la désinfection tels que :

- La température : Lorsqu'elle augmente, la prolifération micro-biologique s'accélère et la consommation en désinfectant augmente.
- Le pH : Il est indispensable de mesurer le pH en même temps que le chlore libre afin d'évaluer au mieux l'efficacité du traitement.
- La turbidité : La présence de la turbidité est le signe d'un traitement incomplet. Les (MES) non éliminer peuvent véhiculer des micro-organismes qui seront plus difficiles à inactiver par les désinfectants.

En fin pour éliminer les maladies et assurer la satisfaction de l'utilisateur, il faut respecter les normes OMS.

1.2.4. Normes de la qualité des eaux [KASSIM, 2005]

Une eau de consommation ne doit pas contenir de germes des maladies à transport hydrique, de substances toxiques ni de quantité excessive de matières minérales et organiques. Elle doit par ailleurs, être limpide, incolore et ne posséder aucun goût ou odeur désagréable. En outre l'eau potable doit contenir sans excès un certain nombre d'éléments minéraux dont la présence lui confère une saveur agréable à l'exclusion de ceux qui seraient l'indice d'une contamination ainsi que toute substance toxique, les recommandations de l'organisation Mondiale de la Santé (O M S) relatives à la qualité de l'eau de boisson. Ainsi nous référons aux normes de l'OMS dans les tableaux qui suivent

Eléments	Valeurs indicatives en mg/l
Cuivre.....	1 mg/l
Cyanures.....	0,07 mg/l
Fluorures.....	1,5 mg/l
Manganèse.....	0,1 mg/l
Mercure.....	0,001 mg/l
Nitrates	50 mg/l
Nitrites	3 mg/l
Ammoniac.....	15 mg/l
Plomb.....	0,01 mg/l
Chlore.....	5 mg/l
Couleur.....	15 UCV (unité de couleur vraie)
Turbidité.....	5 UTN (unité de turbidité phérométrie)
Aluminium.....	0,2 mg/l
Chlorure.....	250 mg/l
Dureté.....	-
Fer.....	0,3 mg/l
pH.....	6,5 – 8,5
Sodium.....	200 mg/l
Sulfates.....	250 mg/l
Solides totaux en solution.....	1000 mg/l
Zinc.....	3mg/l

Tableau I.1 Qualité physico-chimique de l'eau de boisson

(Directive de l'OMS 2002)

Organismes	Les valeurs indicatives	Remarque
A-/ Toutes les eaux destinées à la consommation :	0	Non détectables dans un échantillon de 100 ml
E. Coli ou bactéries coliformes Thermotolérantes	0	
B-/ Eaux traitées à l'entrée du réseau de distribution :	0	Non détectables dans un échantillon de 100 ml
E.Coli ou bactéries coliformes Thermotolérantes	0	Non détectables dans un échantillon de 100 ml
Coliformes totaux	10	
C-/ Eaux traitées dans le réseau de distribution :	0	Non détectables dans un échantillon de 100 ml
E. Coli ou bactéries coliformes Thermotolérantes	0	Non détectables dans un échantillon de 100 ml Dans les installations importantes lorsqu'un nombre suffisant d'échantillons sont examinés, on ne doit pas trouver de coliformes dans
Coliformes totaux	10	95 % des échantillons prélevés sur une période de 12 mois

Tableau I.2 Qualité bactériologique de l'eau de boisson

(Directive de l'OMS 2002)

I.3. Types de contrôle de qualité de l'eau [VALENTIN, 2000]

Trois types de contrôle de qualité de l'eau sont indispensables pour qu'on puisse dire qu'une eau est potable : Contrôle bactériologique, contrôle de désinfection et contrôle physico-chimique. Ces contrôles peuvent être faits par deux méthodes : méthodes classiques et méthodes modernes.

I.3.1. Méthodes classiques

Les méthodes classiques sont basées sur les essais de traitabilité en laboratoire pour contrôler les doses des éléments constituant l'eau potable. On procède, donc à toutes les mesures utiles (turbidité, matières organiques, pH, etc...). La fréquence de ces tests est souvent irrégulière. L'opérateur fera un nouvel essai entre temps pour changer la dose de coagulant uniquement si la qualité de l'eau traitée se dégrade. Ce type d'approche a le désavantage d'avoir un temps de retard relativement long, et ne permet pas de suivre finement l'évolution de la qualité de l'eau.

I.3.1.1. Contrôle bactériologique

Le contrôle bactériologique consiste à contrôler les bactéries coliformes totales, notamment les bactéries coliformes fécales ou *Escherichia Coli*, et les bactéries hétéro-trophes aérobies et anaérobies facultatives (BHAA). Il est important de noter qu'au moins 50 % des échantillons doivent être prélevés aux extrémités du système de distribution afin de mesurer les BHAA. Le contrôle bactériologique doit être effectué selon la fréquence indiquée dans le tableau 1.3 suivant [QUEBEC.2004]:

Nbre de personnes	Nbre min. d'échantillons	Fréq. et lieu d'échantillonnage	Paramètres analysés
21 à 1000	2	Par mois dans des endroits représentatifs du réseau dont 50% aux extrémités du réseau	Bactéries coliformes totales, bactéries coliformes fécales ou Escherichia coli et BHAA*
1001 à 8000	8	Par mois dans des endroits représentatifs du réseau dont 50% aux extrémités du réseau	Bactéries coliformes totales, bactéries coliformes fécales ou Escherichia coli et BHAA*
8001 à 100 000	1 par 1 000 personnes	Par mois dans des endroits représentatifs du réseau dont 50% aux extrémités du réseau	Bactéries coliformes totales, bactéries coliformes fécales ou Escherichia coli et BHAA*
100001 et plus	1/1000 personnes, à partir de 100 001 on a 1 échant./tranche de 10000 per excédant 100 000	Par mois dans des endroits représentatifs du réseau dont 50% aux extrémités du réseau	Bactéries coliformes totales, bactéries coliformes fécales ou Escherichia coli et BHAA*
<ul style="list-style-type: none"> • Les BHAA sont analysées sur les échantillons prélevés aux extrémités du réseau. 			

Tableau 1.3 : La fréquence d'échantillonnage pour le contrôle bactériologique

I.3.1.2. Contrôle de désinfection

C'est le contrôle le plus important dans les traitements de l'eau potable. Il doit être effectué après le traitement de filtration et avant l'entrée dans le système de distribution. Pour chaque période de 4 heures on doit signaler, la teneur en désinfectant résiduel libre mesurée durant ce laps de temps, le débit de l'eau et la turbidité lorsqu'il s'agit d'eau de surface.

De plus, chaque jour, on doit mesurer le pH et la température de l'eau à la sortie de l'installation ou à la sortie du réservoir lorsque celle-ci contient un réservoir d'eau désinfectée [QUEBEC.2004].

Type de traitement de désinfection	Fréquence	Paramètres analysés	Caractéristiques
Désinfection en continu par le chlore	toutes les 4 h	<ul style="list-style-type: none"> • Inscription de la plus faible teneur en désinfectant résiduel • Le débit de l'eau • La turbidité 	<p>Teneur en chlore résiduel libre d'au moins 0,3 mg/l doit être mesurée en continu</p> <p>Vérification de l'efficacité de la désinfection par rapport au pourcentage d'enlèvement des parasites et des virus</p>
	1 fois par jour	<ul style="list-style-type: none"> • Le pH • La température de l'eau 	Vérification du respect de la norme de turbidité à la sortie des filtres

Tableau 1.4 : Le contrôle de la désinfection pour les traitements

I.3.1.3. Contrôle physico-chimique

Il consiste à mesurer les paramètres physiques (la température, et la turbidité) et les paramètres physico-chimiques (la conductivité, le pH, le potentiel redox, l'oxygène dissous etc..) pour avoir des informations sur les éléments qui constituent une eau.

La mesure de la conductivité électrique [$\mu\text{S}/\text{cm}$ à une T° de référence], par exemple, permet d'évaluer la minéralisation globale d'une eau du fait que les ions présents rendent celle-ci électriquement conductrice, [QUEBEC.2004] Le principe est basé sur quelques électrodes ioniques qui permettent de fournir des informations concernant la dégradation de substances organiques (réactions biochimiques), la provenance de l'eau et la mobilisation potentielle de certains métaux, etc...[MESSADI1999].

I.3.2. Méthodes modernes

L'importance de la mesure en continu des paramètres physiques et physico-chimique à l'aide des capteurs et des systèmes de surveillance montés sur place vient de fait que :

- Ces paramètres ne sont pas conservatifs et changent instantanément.
- Les mesures sont relativement simple, rapide et peu coûteuses.
- Ces mesures permettent de détecter immédiatement des anomalies de la composition de l'eau (élévation du pH par exemple) ce qui permet l'intervention immédiate.

I.3.2.1. Les systèmes de surveillance [VALENTIN 2000]

La surveillance permanente des processus de traitement implique la mesure en continu d'un certain nombre de paramètres à l'aide des capteurs. Ces paramètres peuvent être classés en deux grandes familles : les paramètres usuels (température, débit, pression etc...) et les paramètres spécifiques (turbidité, conductivité, pH, etc...). La mesure en continu de ces paramètres permet de libérer l'opérateur de routine et d'optimiser les traitements en réduisant les temps de réponse. Dans les stations de traitement des eaux, l'évolution de la qualité de l'eau brute est relativement lente. En revanche, les variations des quantités à traiter, qui dépendent de la demande en eau potable, sont très importantes et le débit est généralement un paramètre clé dans l'automatisation des installations. La commande et la surveillance des installations de production d'eau potable deviennent de plus en plus importantes et ce quel que soit l'endroit dans le monde [LAMRINI,2005]. Cependant, dans le cas des processus complexes, comme celui de production d'eau potable, il n'est pas toujours possible de dériver un modèle mathématique ou structurel approprié. Les techniques issues de l'intelligence artificielle peuvent être utilisées en raison de leur robustesse et de leur capacité à tenir compte de la nature dynamique et complexe du procédé. Ce type de technique est de plus en plus accepté dans l'industrie de production d'eau potable en tant qu'outil de modélisation et de contrôle des procédés. [HECTOR, 2006].

. Les avantages des systèmes de surveillance [VALENTIN, 2000]

Les avantages de ces méthodes modernes basées sur les systèmes de surveillance sont :

- ⇒ Amélioration des conditions d'exploitation et des performances d'une installation
- ⇒ Augmentation de la productivité
- ⇒ Fonctions temps réel et différé
- ⇒ Aide à la décision et à la maintenance

I.3.2.2. Les Capteurs

Dans le domaine de contrôle, toute quantité physique ou chimique à mesurer est d'abord convertie en un signal électrique qui doit être mis en forme favorable à la mesure ou à l'enregistrement.

I.3.2.2.1. Caractéristiques générales des capteurs.

En instrumentation, un capteur désigne le composant utilisé pour faire cette conversion. Celui-ci est choisi en fonction de la mesure particulière qui doit assurer en tenant compte de ses caractéristiques électriques et physiques : sa bande passante, sa précision, son temps de réponse, sa résolution, etc ...

I.3.2.2.2. Capteurs électrochimiques il existe deux principales catégories :

- a) **Les capteurs thermodynamiques** : (exemple : capteur du pH).
- b) **Les capteurs cinétiques** : capteur (exemple : capteur d'oxygène). Cette catégorie est certes d'applications plus large, mais moins sélective et nécessite toujours un étalonnage.

I.3.2.3. Les méthodes optiques : [AMELIE MARCHAL, 2000]

Les méthodes optiques sont basées sur l'analyse d'un faisceau lumineux après traversée du milieu à analyser. La mesure de turbidité, associée à la notion de trouble, est un paramètre largement répandu pour appréhender les particules présentes au sein d'un milieu. Ces particules peuvent être détectées par la mesure de l'absorption ou de la diffusion du faisceau incident. Selon le système de mesure mis en œuvre, on distinguera, les néphélomètres, permettant une mesure de la diffusion suivant un angle variable mais le plus souvent à 90° et les turbidimètres, basés sur la mesure d'absorption. Quel que soit l'angle de mesure, la valeur du paramètre optique analysé va dépendre des caractéristiques de la suspension analysée. Par caractéristiques, on entendra répartition granulométrique (taille et proportion de particules de chaque taille), forme et propriété optique (traduite par l'indice de réfraction) des particules, La méthode normalisée prévoit l'utilisation de la formazine (dont l'unité correspondante est FNU). Ses contraintes de préparation, comme la sensibilité à la température influant sa granulométrie (0,1 à 10µm) [SADAR 1997], [FROST ET HUBER 1997] et son faible temps de conservation, ont incité le développement d'autres étalons [HACH 1984] et de nouvelles unités. De ce fait, une difficulté majeure de la mesure de turbidité tient à ce que les résultats obtenus au moyen de différents appareils ne peuvent pas être directement comparés entre eux, sauf si leurs caractéristiques optiques correspondent rigoureusement à la même norme de mesure de la turbidité (NF T 90-033 et ISO7027 notamment), et sont réglés avec la même suspension étalon. L'utilisation de la mesure de turbidité selon la méthode normalisée (étalon formazine et appareillage répondant aux diverses exigences : longueur d'onde de mesure de 860nm, bande spectrale de égale à 60nm, parallélisme de la radiation incidente, angle de mesure de $0^\circ \pm 2,5^\circ$ et angle d'ouverture de 10° à 20°) doit permettre d'aboutir à ce que, quel que soit l'appareil ou le modèle, on ait pour une même suspension, la même indication de turbidité dans la même unité. Ensuite, le terme turbidité est également utilisé en relation avec l'absorbance. Il s'agit alors d'une grandeur exprimée en L^{-1} et dont la définition est la suivante :

$$t = \frac{1}{L} \ln \frac{I_0}{I} \quad (\text{I.1})$$

$$A = \ln \frac{I_0}{I} \quad (\text{I.2})$$

avec : t turbidité (L-1) .

L longueur du chemin optique (L).

A absorbance.

I_0 intensité du rayon incident .

I intensité du rayon transmis .

L'intensité du rayon transmis peut s'exprimer en fonction de celle du rayon incident grâce aux lois de l'optique.

I.3.2.4. Les méthodes acoustiques [AMELIE MARCHAL, 2000]

Les systèmes de mesure acoustique évaluent le faisceau acoustique réfléchi par des particules individuelles dans le milieu à contrôler, c'est-à-dire qu'ils fonctionnent sur le principe du sonar. Les fournisseurs de ce type d'appareil soulignent les avantages qu'ils présentent par rapport aux turbidimètres basés sur un système optique, comme par exemple, une insensibilité aux conditions d'encrassement, à la couleur et à l'opacité du milieu de mesure, ou encore à la lumière extérieure.

Ces appareils nécessitent un étalonnage, réalisé sur les effluents à analyser. La relation d'étalonnage prend la forme d'un polynôme. La qualité des corrélations obtenues est assez semblable à celle obtenue par les méthodes optiques.

I.3.2.5. Méthodes acousto-optiques : est une technique qui regroupe les méthodes optiques et acoustiques. Cette technique sera clarifier dans les chapitres 2 et 3.

I.4. Principes de mesure des principaux paramètres de potabilités

I.4.1 Mesure de la température

La température de l'eau est généralement mesurée à l'aide d'un thermomètre à résistance afin de pouvoir être transmise à distance. La croissance de la résistivité des métaux avec la température sera utilisée. Le courant électrique traversant une telle résistance alimentée sous tension sera donc inversement proportionnel à la température du milieu environnant [THIERRIN, 2001].

I.4.2. Mesure de la turbidité

La turbidité est mesurée lorsque un faisceau lumineux vient toucher la surface de l'eau,

en présence d'une cellule photorésistante (capteur de lumière) placée sensiblement perpendiculairement au faisceau incident. La lumière diffusée par les particules en suspension modifier l'éclairement de la cellule lorsque leur nombre est élevé. Généralement, les gammes de mesure s'étendent de 0 à 5000(NTU) unités néphélométriques de la turbidité [*THIERRIN, 2001*].

I.4.3. Mesure de la conductivité

La mesure de la conductivité et de son inverse ; la résistivité, est simple puisqu'elle consiste à mesurer l'intensité du courant électrique recueilli aux bornes de deux électrodes de géométries connues, plongées dans l'eau et soumises à une différence de potentiel alternatif, dont la fréquence doit être d'autant plus élevée que la concentration en acides, sels ou bases dissous est grande, pour éviter les phénomènes de polarisation [*THIERRIN, 2001*].

I.4.4. Mesure du pH [*THIERRIN, 2001*]

Sachant que le pH caractérise le cologarithme de la concentration d'ions H^+ dans une solution, et qu'on va le déterminer à partir de la mesure de la différence de potentiel (d.d.p) entre deux électrodes particulières placées dans la solution à contrôler. Le couple d'électrodes (électrode de mesure et électrode de référence) le plus fréquemment rencontré est de verre et du calomel respectivement, qui présente des caractéristiques métrologiques très satisfaisantes. A chaque interface correspond un potentiel supposé invariant pendant la mesure, cependant au niveau de l'électrode de verre dont la membrane est très fine (0.2mm) on constate la possibilité d'une diffusion d'ions H^+ dans un sens ou l'autre selon l'acidité de la solution à mesurer, comme illustrer dans la figure 1.9 qui suit :

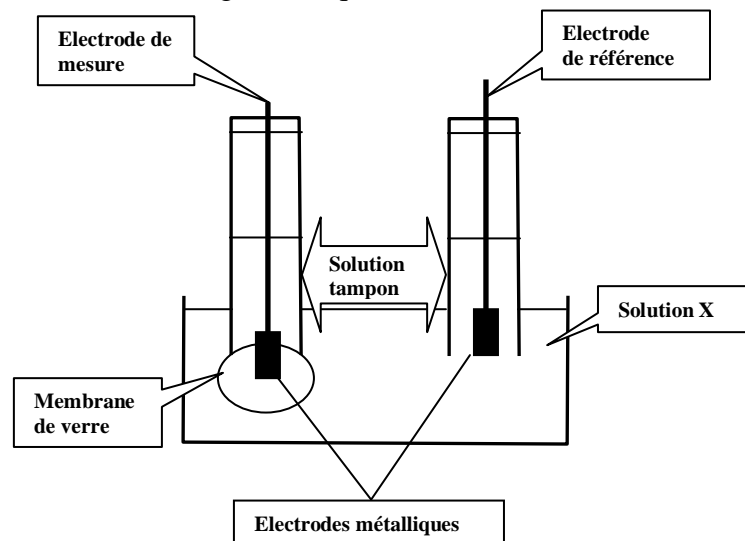


Figure.1.5 : Mesure de pH

En milieu alcalin les ions H^+ diffusent du verre vers l'extérieur créant une couche de charges négatives en surface de l'électrode et c'est l'inverse en milieu acide. Il en résulte une d.d.p entre les deux électrodes qui est significative, dès lors qu'il ne circule aucun courant, de la concentration en ions H^+ dans la solution selon la loi établie par Nernst :

$$U = U_0 + 2.3 \frac{RT}{F} \log a_{H^+} \quad (I.3)$$

Dans laquelle :

U : la d.d.p entre les deux électrodes

T : la température absolue

U_0 : une constante

F : le nombre de Faraday

R : la constante des gaz parfaits

a_{H^+} : l'activité des ions H^+ .

I.4.5. Mesure d'oxygène dissous

Le capteur d'oxygène, utilisé pour la mesure d'oxygène dissous, présente une géométrie différente. C'est essentiellement un couple d'électrodes polarisables concentriques et séparées du milieu à tester par une membrane de polymère perméable au gaz. Une solution électrolytique appropriée (calomel) réalise un film de très faible épaisseur entre la membrane et la cathode. L'oxygène diffusant à travers cette membrane est réduit au contact de la cathode sous l'effet d'une polarisation convenable ce qui se traduit par la création d'un courant directement proportionnel à la quantité d'oxygène [THIERRIN, 2001].

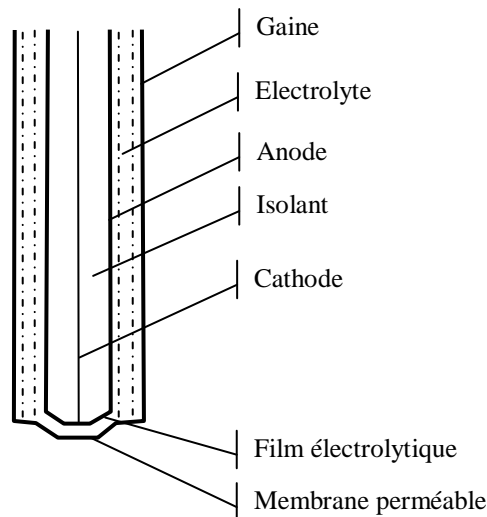


Figure.1.6 Sonde d'oxygène dissous

Chapitre II

Les ultrasons

II-1/ Introduction

Les ultrasons sont des ondes acoustiques de très hautes fréquences, inaudibles pour l'oreille humaine [GALTON, 1883]. A leur fréquence correspond une longueur d'onde spatiale, imposée par l'élasticité du milieu, c'est-à-dire des changements de géométries des défauts de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. Plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est petite, et plus l'onde est sensible à des variations mécaniques de petites dimensions [FIRESTONE, 1946], les moyens les plus répandus pour générer les ultrasons utilisent des transducteurs piézo-électriques. Cependant, ceux-ci sont limités en fréquence.

En 1817 Abbé René Just Haüy observé qualitativement le phénomène de piézoélectricité, En 1880, Pierre et Jacques Curie découvrirent qu'un échantillon de quartz convenablement choisi, soumis à une pression mécanique, était le siège d'une polarisation électrique [CURIE, 1880], C'est l'effet piézo-électrique direct. Un an plus tard, Lippmann établit l'existence du phénomène inverse: soumis à un champ électrique, un cristal de quartz se comprime ou se dilate.

L'observation macroscopique de la génération d'ondes sonores par l'absorption d'énergie lumineuse fut d'abord faite par A. G. Bell en 1881 [BELL, 1881]., Quelque trente six ans plus tard, les travaux de Chilowsky et Langevin [ARKIN 1994] montrèrent comment utiliser l'effet piézo-électrique pour générer des ultrasons, cette dernière méthode est la plus utilisée, puisque elle possède une large gamme de fréquence, elle peut atteindre quelques gigahertz.

Dans les années 20, la recherche dans ce domaine s'orienta essentiellement vers la détection sous-marine pour des applications militaires et déboucha sur les premiers systèmes sonar. Puis, d'un point de vue microscopique, le couplage entre une onde lumineuse et la vibration naturelle d'un matériau fut découvert en 1922 par L. Brillouin [BRILLOUIN, 1992], il prédit qu'un liquide traversé par une onde ultrasonore se comporterait comme un réseau de diffraction de la lumière, En 1960, l'avènement du laser [MAIMAN, 1960] fit naître de nouvelles méthodes de génération sans contact. Lorsqu'une impulsion électromagnétique d'une durée de quelques nanosecondes (10^{-9} s) atteint la surface d'un matériau, elle crée un brusque échauffement local. Ce rapide changement de volume génère une onde acoustique de quelques mégahertz [WHITE, 1963]. Cette dernière, au cours de sa propagation, se réfléchit sur les différentes interfaces élastiques qu'elle peut percevoir, Parallèlement à ce phénomène élastique, une lente relaxation thermique s'opère. Différents modèles théoriques, du plus simple considérant une source thermique localisée sur la surface [LEE, 1968], jusqu'au plus évolué

prenant en compte la pénétration de la radiation électromagnétique [*LYAMSHEV, 1983*], proposent alors de décrire ces processus de génération photo-élastique et photo-thermique. Des mesures expérimentales du déplacement de la surface permettent ensuite de caractériser ces évolutions transitoires. Par conséquent, le LASER offre la possibilité d'étudier à la fois la propagation d'ondes acoustiques ultrasonores et la diffusion d'un champ thermique. Au milieu des années 70, l'apparition des premières impulsions de durées inférieures à la picoseconde [*SHANK, 1974*] (10^{-12} s) fait franchir un nouveau pas aux ultrasons générés par laser. En effet, dès lors, la fréquence acoustique n'a de limite que celle imposée par les propriétés optiques du matériau. Ainsi, en 1984, H. J. Maris génère un train d'onde de plusieurs dizaines de gigahertz, et donne naissance à l'acoustique picoseconde [*THOMSEN, 1984*], Des matériaux nanométriques peuvent alors être étudiés. En outre, pour des durées d'impulsions aussi courtes, les évolutions thermiques rapides, de même que les mécanismes microscopiques, peuvent être analysés. Un nouveau champ d'applications est alors ouvert pour contrôler ces phénomènes transitoires avec une résolution temporelle suffisante.

II-2 . Théorie de la piézoélectricité.

II-2-1 L'effet piézoélectrique

Le terme piézo vient du terme grec piézen (presser, contraindre). On appelle piézoélectricité, la propriété que possède certains matériaux de pouvoir transformer une énergie électrique en une énergie mécanique, c'est à dire une onde électrique en une onde mécanique ou inversement [*BROWN ET GOODMAN, 1971*], [*DOGNON, 1953*], [*SYROTA, 1994*] ET [*BANKS, 1966*]. La piézoélectricité peut être définie comme l'interdépendance entre les phénomènes mécaniques (déformation, contrainte) et électriques (champ électrique, charge électrique) que possèdent certains matériaux (milieux cristallins : Quartz, Titanate de Barium, Oxyde de Zinc, Céramiques: PZT, Polymères: PVDF). L'effet piézoélectrique fut découvert en 1880 par les frères Curie qui remarquèrent qu'une plaque découpée dans un cristal suivant une direction perpendiculaire possédait la propriété de produire un potentiel électrique entre ses faces lorsqu'on lui appliquait une pression mécanique. Cet effet est appelé effet piézoélectrique direct, un phénomène de polarisation électrique induit par l'application d'une contrainte à certains matériaux. Cette polarisation est proportionnelle à la contrainte et change de signe avec elle. Cette dernière est importante pour certains cristaux naturels, comme le quartz. Lippmann, en 1881, prédit l'effet inverse et montra que de tels cristaux pourraient servir à produire des signaux électriques proportionnels aux vibrations

mécaniques alternées qu'on leur appliquerait. Une polarisation électrique résultant de l'application d'un champ électrique entraînerait une déformation du même matériau. On parle alors d'effet piézoélectrique inverse.

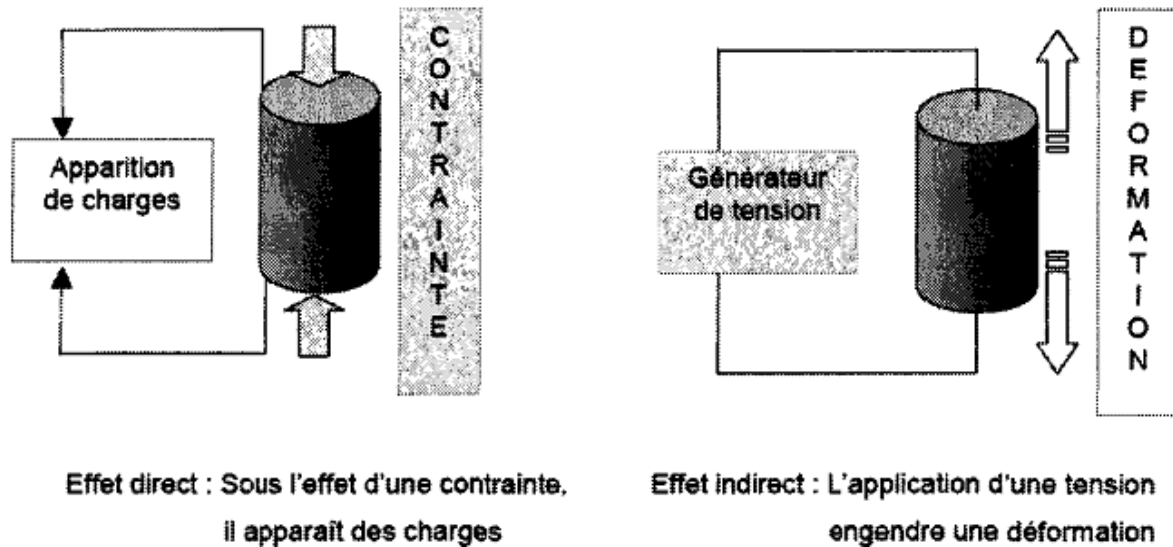


Figure III.1 Illustration du principe piézoélectrique.

II-2-2 . Quelques matériaux présentant des propriétés piézoélectriques

Actuellement, on dispose de nombreux matériaux présentant des propriétés piézoélectriques. Chacun d'eux possède des caractéristiques qui le destine à une application particulière.

Les cristaux : le quartz et la tourmaline, le niobate de lithium (LiNbO_3) : présentent une impédance acoustique relativement élevée et un coefficient de couplage très faible.

Les céramiques polycristallines : sont des matériaux ferro-électriques, qui sont rendus piézo-électriques suivant une direction de polarisation donnée, en les soumettant à un champ électrique intense, à une température peu inférieure à celle du point de Curie [MICHÉRON, 1981]. Ils présentent un coefficient de couplage et une impédance acoustique très élevés.

Les polymères : Les sondes commercialisées par les firmes Massa (Japon), Vernitron (Grande Bretagne), Siemens (Allemagne) et RTC Compelec (France-Hollande) sont à base de solutions solides de zirconate-titanate de plomb, d'où leur appellation abrégée PZT. D'autres types de transducteurs à base de polymères piézo-électriques de synthèse, tel le PVF2, font l'objet actuellement de réalisation dans certains laboratoires. Ses bonnes propriétés électriques (linéarité, hystérésis, adaptation d'impédance) et sa souplesse mécanique permettent son

utilisation sur différentes formes de surface. Des sondes constituées de plusieurs couches de matériaux différents sont aussi à l'étude, surtout dans le domaine des hautes fréquences où les problèmes de propagation deviennent plus critiques. Ces transducteurs piézo-électriques fonctionnent en mode résonnant et ont en conséquence une bande passante relativement étroite (quelques Khz maximum pour une fréquence centrale comprise entre 20 et 400 kHz).

II-2-3 . Equations de la piézoélectricité

Le phénomène piézoélectrique se manifeste par la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement. Les huit équations d'état présentées ci dessous relient les variables électriques (induction électrique D (Cm^{-2}) ou champ électrique E (V.m^{-1})) aux variables mécaniques (déformation S ou contrainte T (N.m^{-1})). Elles illustrent le phénomène de couplage entre l'énergie élastique et l'énergie électrique d'un matériau piézoélectrique.

Trois types de coefficient interviennent :

Des coefficients purement électriques,

Des coefficients purement mécaniques,

Des coefficients mixtes qui traduisent le couplage entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques. Il est courant de présenter ces équations sous la forme suivante :

$$D_m = d_{mi} T_i + \epsilon_{mk}^T E_k. \quad (\text{II.1})$$

$$S_i = S_{ij}^E T_j + d_{mi}^t E_m \quad (\text{II.2})$$

$$E_m = -g_{mi} T_i + \beta_{mk}^T D_k \quad (\text{II.3})$$

$$S_i = S_{ij}^D T_j + g_{mi}^t D_m \quad (\text{II.4})$$

$$D_m = e_m S_i + \epsilon_{mk}^S E_k \quad (\text{II.5})$$

$$T_i = C_{ij}^E S_j - e_{mi}^t E_m \quad (\text{II.6})$$

$$E_m = -h_{mi} S_i + \beta_{mk}^S D_k \quad (\text{II.7})$$

$$T_i = C_{ij}^D S_j - h_{mi}^t D_m \quad (\text{II.8})$$

- t : indique la transposée de la matrice considérée.
- x : indique que la grandeur considérée est définie à x constant ou nul,

avec $x = E, D, S$ ou T .

- $i, j = 1, \dots, 6$
- $m, k = 1, \dots, 3$

La définition et la dimension de chacun des termes sont présentées dans le tableau suivant :

Type	Signification	Unités
Électrique	D Déplacement électrique ou induction	$C.m^{-2}$
	E Champ électrique Électrique	$V.m^{-1}$
	S permittivité électrique	$F.m^{-1}$
	B imperméabilité diélectrique	$m.F^{-1}$
Mécanique	S déformation relative	
	T contrainte	$N.m^{-2}$
	s souplesse	$m^2 N^{-1}$
	C raideur	$N.m^{-2}$
Piézoélectrique	d constante reliant la contrainte T et l'induction D à E constant	$C.N^{-1}$
	e constante reliant la déformation S et l'induction D à E constant ou	$m.V^{-1}$
	g constante reliant la contrainte T champ E h D constant	$C.m^{-2}$
	h constante reliant la déformation S le champ E à D constant	$N.V^{-1}.m^{-1}$
		$V.m.N^{-1}$
		$m^2.C^{-1}$

Tableau II.I Définition des termes [RIZET, 1999]

II-3. Les transducteurs

II-3-1. Définition

Transducteur est le terme généralement employé pour désigner un système qui transforme une forme d'énergie en une autre forme d'énergie.

II-3-2. Les transducteurs ultrasoniques

Un appareil produisant des ultrasons s'appelle un transducteur ou convertisseur d'ultrasons. Ce dernier développe un déplacement maximal à certaines fréquences particulières qui dépendent de la géométrie du transducteur. On appelle ces fréquences les fréquences de

résonance. L'utilisation de ces transducteurs est généralement limitée à des fréquences particulières. Nombreux sont les systèmes qui sont susceptibles de produire des ultrasons. Ils sont généralement basés sur des générateurs : Mécaniques, Magnétostrictifs, Piézoélectriques [BROWN ET GOODMAN, 1971].

II-3-2-1 . Les transducteurs ultrasoniques piézoélectrique

Comme leur nom l'indique, ces éléments permettent de faire la conversion électro-acoustique ou acousto-électrique. Deux principes sont utilisés pour réaliser cette transformation d'énergie [LENAIN, 1989] :

II-3-2-1-1 . La conversion électrostatique

Elle est basée sur les interactions entre grandeurs électriques et mécaniques dans un condensateur, dont une armature est mobile. Quand celle-ci est polarisée, une force électrostatique s'applique sur l'armature. Une alimentation alternative de la sonde force la membrane mobile à bouger à la fréquence choisie et à émettre ainsi une onde ultrasonore. Généralement ce type de transducteur présente une bande passante assez large (25 à 100kHz suivant les modèles), ce qui le rend sensible aux bruits extérieurs, mais qui permet des modes de fonctionnement sur plusieurs fréquences distinctes [POLAROID, 1983].

II-3-2-1-2 . La conversion piézo-électrique

Elle est basée sur la déformation de certains matériaux lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique, et réciproquement le changement de leur polarisation sous l'action de contraintes mécaniques, nous utilisons les propriétés des matériaux piézoélectriques pour convertir l'énergie électrique en une énergie mécanique ultrasonore élevée. Pour générer cette onde ultrasonore, le principe consiste à alimenter le transducteur ultrasonique avec une tension électrique dont la fréquence est égale à sa fréquence de résonance mécanique. Le transducteur piézoélectrique utilisé est, en fait, le seul susceptible de permettre l'émission des fréquences élevées (de l'ordre de 10 mégahertz).

II-3-3 . Description du Champ acoustique rayonné par un transducteur plan

Le champ acoustique d'un transducteur plan d'ouverture circulaire de rayon r , alimenté continûment par un signal sinusoïdal et supposé émettre dans un seul milieu, est un problème classique, étudié dans plusieurs ouvrages [ROCARD, 1971] [ROSSI, 1986]. Ce champ peut être décomposé en deux zones. La théorie de la diffraction montre qu'un faisceau ultrasonore émis

par une source plane, circulaire de rayon r répondant à la condition $r > \Lambda$, (r est le rayon de la source, Λ est la longueur d'onde) comprend deux parties, une zone initiale cylindrique et une zone distale conique où le faisceau diverge [BROWN ET GOODMEN, 1971],[DOGNON, 1953], [SYROTA, 1994] et [BANKS, 1966], que l'on nomme respectivement la zone de Fresnel et la zone de Fraunhofer.

II-3-3-1 . Zone initiale: zone de Fresnel

Une zone proche du transducteur (appelée champ proche) pour laquelle le champ acoustique est très perturbé, et qui présente de nombreux maximums et minimums de pression acoustique dépendants de la longueur d'onde, C'est le champ initial ou zone de Fresnel qui est définie comme une source circulaire. Toute l'énergie est concentrée dans une zone cylindrique dont le diamètre est égal à celui de la source sonore. On caractérise le faisceau sonore par la relation suivante [SYROTA, 1994] [BANKS, 1966] (voir figure II.2).

$$l = \frac{D_s^2}{4\Lambda} \quad (\text{II.9})$$

Valable lorsque : $D_s > \Lambda$

$$d = D_s$$

où:

- d : diamètre de la zone en m;
- l : longueur de la zone en m;
- D_s : diamètre de la source en m;
- Λ : longueur de l'onde ultrasonore en m.

L'intensité sur l'axe de propagation dans ce cas passe par une succession de maxima et de minima dont les abscisses sont données par [BANKS,, 1966], [RISTIC, 1983] ,[CHEN ET PAYNE, 1994]:

$$x_{(min)} = \frac{r^2}{2k\Lambda} \quad (\text{II.10})$$

- $k = 1,2 \dots$

$$x_{(max)} = \frac{r^2}{(2k + 1)\Lambda} \quad (\text{II.11})$$

- $k = 0,1,2 \dots$

Pour $k = 0$, on obtient la position du dernier maximum

$$x_M = \frac{r^2}{\Lambda} \quad (\text{II.12})$$

qui représente la limite entre le champ initial et la zone distale, tel qu'illustrée à la figure II.3.

II-3-3-2. Zone distale: zone de Fraunhofer Une zone située au delà du champ proche (appelée champ lointain nommée champ lointain, elle correspond à la partie du faisceau située à une distance de la zone supérieure de $\frac{r^2}{\Lambda}$ (où r est le rayon de la source et Λ est la longueur d'onde acoustique). Dans cette zone, le faisceau est plus homogène que dans la zone de Fresnel, mais il se met à diverger d'un angle θ (voir la figure II.2) par rapport à l'axe central. L'angle de divergence est proportionnel à la fréquence et au diamètre de la source et est exprimé par la relation suivante [Banks et al, 1966]:

$$\sin \theta = \frac{1.22 c}{df} \quad (\text{II.13})$$

Valable pour $r > \Lambda$

Où:

- θ est l'angle de divergence en degrés;
- d est le diamètre de la source en m;
- f est la fréquence en Hz.

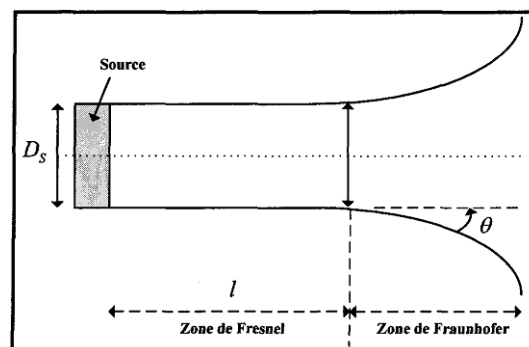


Figure II.2: Géométrie d'un faisceau d'ondes ultrasonores

Comme le montre la figure II.2, en s'éloignant de la source ultrasonore, l'intensité de l'onde devient faible car l'énergie se répartit

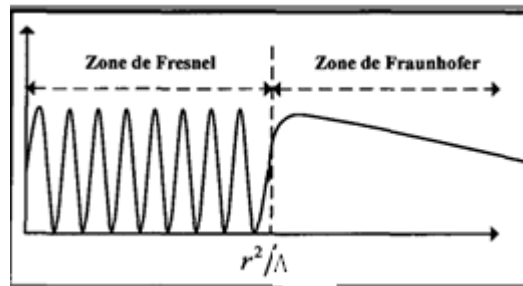


Figure II.3: Représentation du champ de Fresnel et du champ de Fraunhofer pour un élément piézoélectrique de diamètre D

L'adjonction d'une lentille focalisante devant la céramique entraîne un rapprochement du dernier maximum et augmente sa valeur, ce qui diminue la zone du champ proche [LAMBERT, 1979]. La seconde façon de caractériser le faisceau est de définir une largeur de faisceau acoustique [HICKLING, 1986]. Au delà du champ perturbé, dans chaque plan de section du faisceau, la pression acoustique est maximale sur l'axe du faisceau.

II-3-3.3. Traducteurs focalisés

La focalisation d'un faisceau ultrasonore permet de concentrer l'énergie générée en une zone précise. Ainsi, on peut obtenir des faisceaux plus étroits de façon à améliorer la précision spatiale et le rapport signal sur bruit. Comme en optique, on peut ajouter à l'avant d'un transducteur plan une lentille. Pour obtenir un faisceau convergent, on utilise une lentille de surface sphérique, où la distance focale est déterminée par plan focale.

$$f = R \frac{n}{n - 1} \quad (\text{II.14})$$

Où :

R : le rayon de courbure de la lentille

n, : l'indice de réfraction entre la lentille et le milieu de propagation.

Une forte atténuation crée aussi une apodisation indésirable sur la surface du transducteur, aux endroits où la lentille est plus épaisse. Une alternative à la focalisation des transducteurs ultrasonores peut être envisagée par la mise en forme d'un transducteur. Cette mise en forme peut être réalisée avec la technologie piézocomposite ce type d'émetteur utilise une relativement grande surface par rapport à la longueur d'onde. La mise en forme permet donc aux ondes émises par chaque partie infinitésimale de la surface émettrice d'être en phase à son

arrivée au point de focalisation. Les motifs de mise en forme peuvent donc varier suivant l'application visée. Pour focaliser dans un milieu homogène ou à travers une interface plane [BRILLOUIN1922] [POGUET, 2002].

II-3-3-4. Transducteurs multiéléments

La technique multiéléments repose sur le principe de segmentation d'une surface active en un réseau d'émetteurs. Sur le même principe qu'un réseau sonar, la variation de la phase à l'émission ou à la réception, d'un élément à l'autre, permet de modifier la directivité du faisceau émis ou reçu. Les premières applications ont été réalisées dans le secteur médical vers la fin des années 1950. L'utilisation d'un tel dispositif implique un traitement des données ainsi qu'une acquisition multivoies, ce qui était très difficile à réaliser avec des techniques analogiques. Grâce aux progrès en traitement numérique des données, on est en mesure de réaliser des systèmes capables de gérer plusieurs voies simultanément et en temps réel. Par ailleurs, la réalisation des capteurs en céramique piézoélectrique a longtemps posé des problèmes de couplage acoustique entre les éléments du réseau, dus à la propagation des modes latéraux (diaphonie acoustique). Ceux-ci peuvent en partie être résolus grâce à des techniques de fabrication particulière des céramiques piézoélectriques comme le piézocomposite

II-3-3-5. Balayage électronique par commutation

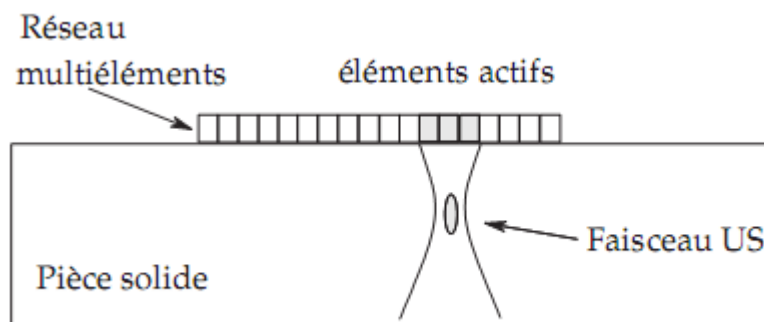


Figure.II.4 – Schéma du fonctionnement d'un transducteur multiéléments par commutation.

On peut créer un balayage électronique en activant chaque élément tour à tour. Ainsi le découpage de la partie active d'un transducteur peut être utilisée de façon à détecter des défauts situés sous chaque élément. Cette technique permet de réaliser des acquisitions à grande vitesse pour la détection des défauts. Ce type de mise en forme utilise deux rayons de courbure différents suivant le plan d'incidence et suivant le plan perpendiculaire.

II-3-3-6. Balayage sectoriel et volumique

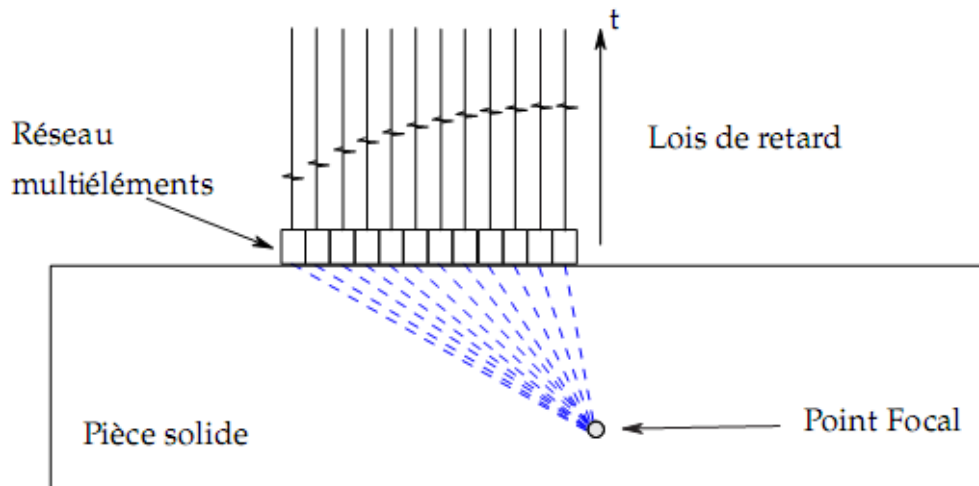


Figure.II.5. Principe de fonctionnement d'un transducteurs multiéléments

Comme on utilise plutôt des tradnsucteurs à large bande fréquentielle, on préfère parler de lois retard que de lois de phase. Le principe d'une loi de retards est illustré figure II.5. Un transducteur multiéléments est composé de plusieurs éléments émetteurs (et récepteurs) pouvant fonctionner indépendamment les uns des autres. De cette façon, il est possible de construire un faisceau avec une incidence choisie par déviation angulaire. En faisant varier ces paramètres en temps réel au cours du contrôle, on peut réaliser un balayage angulaire : le transducteur reste fixé en une position et plusieurs tirs sont effectués à des incidences différentes afin de couvrir la zone d'intérêt. On peut utiliser cette technique afin que chaque élément émette un signal arrivant en phase à un point focal choisi par l'utilisateur. De cette façon, il est aussi possible de contrôler le faisceau pour une focalisation en plusieurs profondeurs. Cette technique permet, en plus de la détection, le positionnement voire le dimensionnement d'un défaut. [CURIE 1880] [FINK. 1992].

II-4. Théorie des ultrasons

II-4-1. Définition des ultrasons

Les ultrasons sont des ondes acoustiques ou élastiques dont la fréquence est supérieure à celle des sons audibles par l'oreille humaine et inférieure aux vibrations thermiques des atomes. Les sons audibles sont compris entre 10 et 20000 Hz et la gamme de vibrations thermiques s'étend de 10^9 à 10^{13} Hz (1 GHz - 10 THz). On appelle ultrasons les ondes élastiques dont la fréquence est comprise entre 16 kHz et quelques centaines de mégahertz [BROWN ET GOODMAN, 1971], [DOGNON, 1953], [SYROTA, 1994] ET [BANKS, 1966].

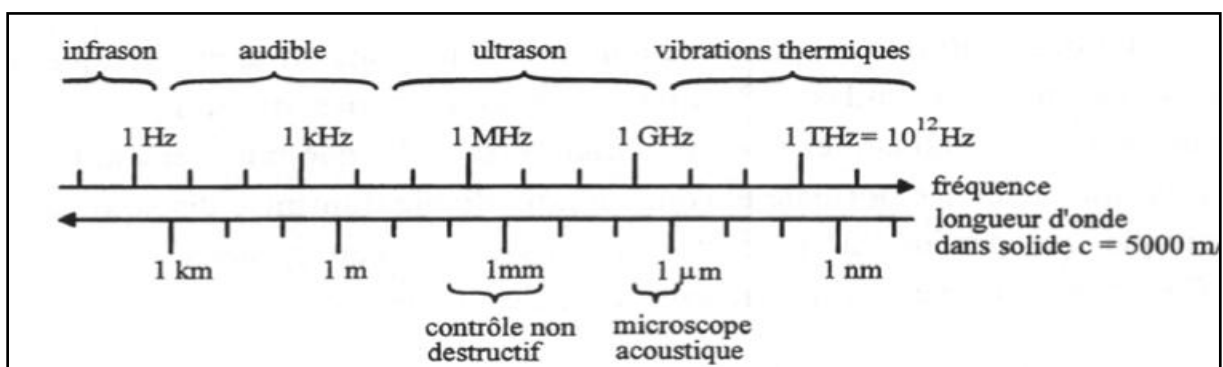


Figure II.6- Echelle des ondes élastiques.

Les longueurs d'ondes sont données pour un solide ayant une vitesse du son de 5000 m/s.

Il est à noter que les infrasons et les ultrasons sont communément utilisés par les animaux pour communiquer ou pour se diriger. Les deux exemples les plus connus sont les éléphants qui utilisent les infrasons pour communiquer sur de longues distances (parfois > 1 km) et les chauves souris qui se servent des ultrasons comme sonar pour se diriger. [FREDERIC, 2007]

Les ultrasons possèdent les propriétés générales des ondes élastiques. L'une des toutes premières applications des ultrasons fut, en 1912, la détection des icebergs puis, lors de la première guerre mondiale, le développement rapide de la détection des sous marins et du sondage maritime. Le chercheur russe Sokolov semble avoir été le premier à suggérer l'emploi des vibrations ultrasoniques pour la détection des défauts dans les matériaux [BANKS, 1966]. Étant donné le large spectre de fréquence (Figure.II.6) occupé par les ultrasons on différencie classiquement deux zones :

II-4-1.1. les ultrasons de puissance,

les ultrasons de puissance, ayant forte intensité et faible fréquence, de 16 à 1000 kHz, dans cette gamme de fréquences, l'effet recherché est une modification du milieu par les

ultrasons principalement grâce à la cavitation : l'onde modifie le milieu irradié. Cette modification peut être physique (décapage, dégazage, émulsification) ou chimique (modification du mécanisme réactionnel, production de radicaux libres...).

C'est le domaine d'utilisation des ultrasons en génie des procédés ; l'exemple le plus connu et le plus utilisé est le nettoyage par ultrasons fonctionnant à des fréquences inférieures à 50 kHz. Cependant il n'est pas rare de pratiquer la Sonochimie à des fréquences pouvant aller jusqu'au mégahertz. Ces hautes fréquences semblent plus favorables à la production de radicaux libres, et seront préférées par exemple pour des procédés de dégradation de polluants chimiques [PETRIER, 1994].

II-4-1.2. Les ultrasons de diagnostic,

Les ultrasons de diagnostic, possédant faible intensité et haute fréquence, de 1 à 10 MHz. contrairement au cas précédent, dans ce domaine d'application des ultrasons, on ne veut pas que l'onde modifie le milieu traversé. Le but est d'observer l'impact du milieu sur l'onde ultrasonore. Lorsqu'un son traverse un milieu (peu importe sa fréquence), il en ressort modifié : l'amplitude et la phase de l'onde sinusoïdale sont modifiées. Amplitude et phase dépendent de l'atténuation de l'onde (absorption par le milieu), des propriétés acoustiques du milieu (réflexion, transmission), ainsi que de l'angle d'incidence de l'onde et de la topographie de l'interface. L'analyse de ces modifications de l'onde (transmise ou réfléchi) donne des informations sur les caractéristiques du milieu traversé, c'est pour cela qu'ils sont utilisés en détection pour faire des diagnostics. Cette catégorie d'ultrasons est utilisée entre autres en métallurgie pour la détection de défauts dans les soudures ou la présence d'inclusions, cependant l'application la plus courante est l'échographie en imagerie médicale, dans ce cas la sonde de l'échographe sert alternativement à émettre des impulsions d'onde et à recevoir l'écho de ces impulsions.

En résumé, on utilise les ultrasons de puissance pour que l'onde modifie le milieu irradié et ainsi obtenir des effets physico-chimiques sur le milieu, et les ultrasons de diagnostic pour observer la modification de l'onde par le milieu et en déduire ainsi des caractéristiques du milieu traversé.

Les avantages principaux dans l'utilisation des ondes ultrasoniques sont les suivants :

- Une mesure directe sans passer par des algorithmes de calcul,
- Une réponse rapide usuellement en fraction de seconde,
- Une très bonne résolution.

II-4-2. Les différents types d'onde ultrasonores

Les ondes ultrasonores peuvent se propager dans les gaz, les liquides ou les solides, c'est à dire dans toute substance possédant des propriétés élastiques, elle est prendes défferentes types.

II-4-2-1. Selon la géométrie de la source de vibration. Lorsque les onde ultrasonores se propagent dans un milieu infini, elles peuvent le faire soit avec une symétrie sphérique dans toutes les directions (source isotropique), soit sous forme de faisceaux parallèles d'ondes planes.

-Les ondes sphérique si le rayon de la source est petit vis à vis de la longueur d'onde émise, celle ci est alors sphérique.

-Les ondes plans si le rayon de la source est plus grand que la longueur d'onde émise, cette dernière est alors une onde plane (voir figure II.7).

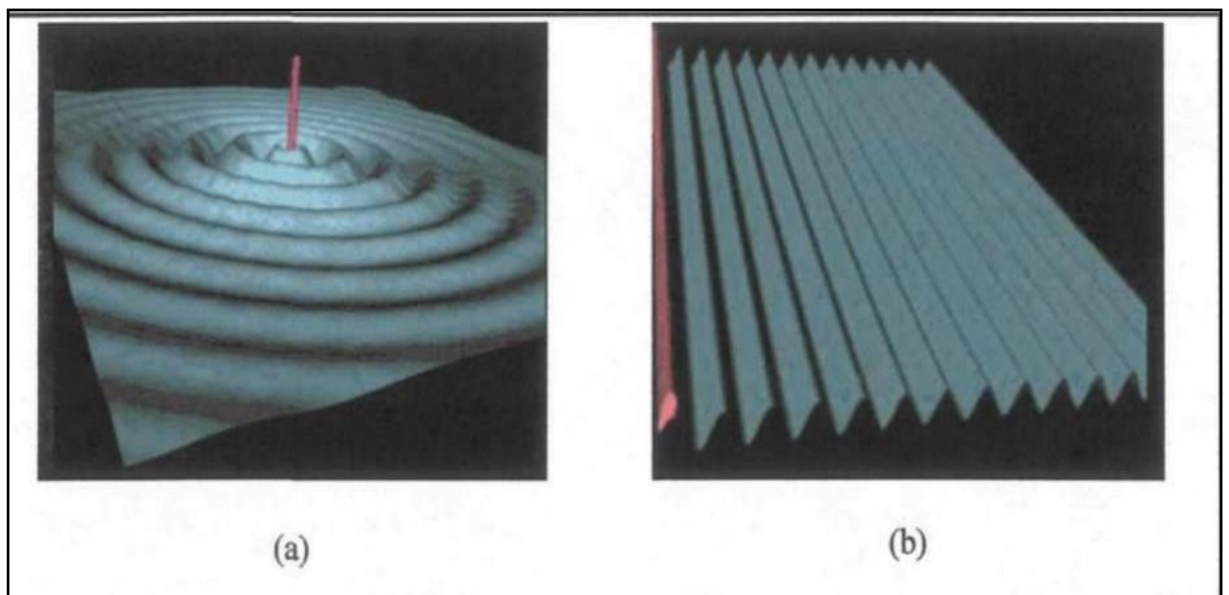


Figure II.7 : Propagation d'onde ultrasonore, (a) Onde sphérique, (b) Onde plane

II-4-2-2. Selon la nature du milieu : On peut observer deux modes de propagation suivant le déplacement des atomes par rapport à la direction de propagation de l'onde:

-Les ondes longitudinales : dont la déformation se produit dans le même sens que le sens de propagation de l'onde,

-Les ondes transversales : pour lesquelles la déformation mécanique a lieu dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde (figure II.8).

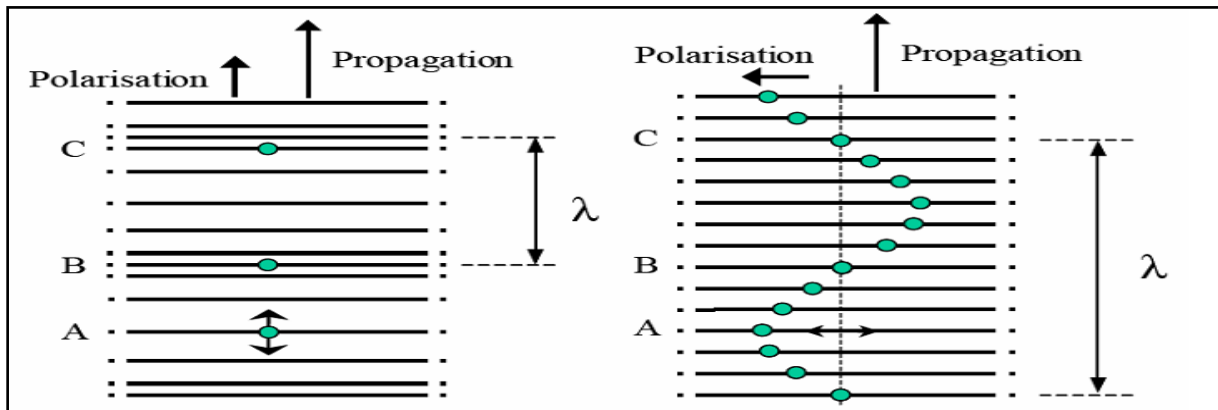


Figure II.8 : Onde longitudinale (a) et onde transversale (b).

II-4-2-3. Selon les dispositifs qui produisent les ondes acoustiques.

Les ondes acoustiques générées par effet piézoélectrique, sont utilisées depuis environ un siècle dans des dispositifs électroniques. Le principal avantage de l'emploi des ondes acoustiques en électronique provient de leur faible vitesse de propagation : se déplaçant à une vitesse environ 100000 fois inférieure à celle de la lumière, leur utilisation permet une forte réduction en taille des dispositifs (dispositif lignes à retard, résonateurs, filtres). Elles sont basées sur deux types de dispositifs qui utilisent les deux types d'ondes

-Ondes de surface

Les ondes acoustiques de surface sont des ondes de type 2D qui se propagent à la surface des matériaux et dont l'énergie reste confinée sur une profondeur comprise entre une et deux fois la longueur d'onde de l'onde acoustique (figure II.9, Figure II.10).

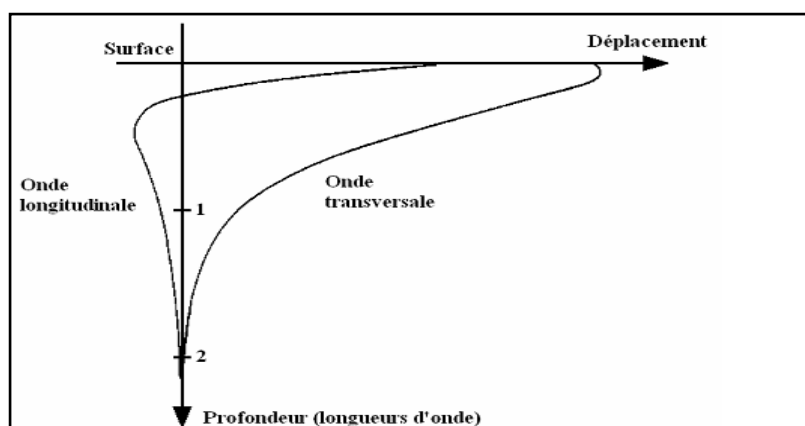


Figure II.9: Pénétration des ondes acoustiques de surface dans un solide isotrope semi-infini

La génération des ondes acoustiques de surface est très souvent basée sur l'utilisation de l'effet piézoélectrique inverse. Une électrode métallique interdigitée (IDT : Inter-Digital Transducer),

déposée généralement à la surface du matériau piézoélectrique, crée une onde acoustique par effet piézoélectrique inverse lorsqu'une différence de potentiel lui est appliquée. L'onde acoustique se propage à la surface du matériau piézoélectrique. Si une deuxième électrode interdigitée est placée en vis-à-vis de la première, elle pourra recueillir l'onde acoustique qui générera, par effet piézoélectrique direct, une différence de potentiel aux bornes de cette électrode. Cet ensemble (substrat piézoélectrique et électrodes) constitue un dispositif à ondes acoustiques de surface

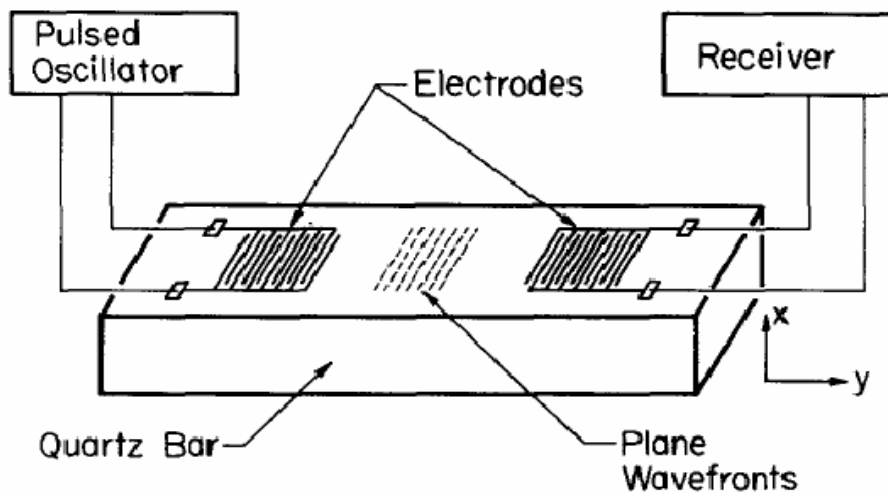


Figure II.10 : Schéma de principe d'un résonateur à ondes acoustiques de surface 1

(d'après [WHITE, 1963])

La longueur d'onde de l'onde acoustique est définie par l'électrode d'entrée elle-même. En effet, celle-ci est interdigitée, c'est-à-dire qu'elle est constituée de deux peignes qui s'interpénètrent. La largeur d'un doigt (ou la distance entre deux doigts consécutifs) est égale au quart de la longueur d'onde. Il s'ensuit que la fréquence centrale f_0 du dispositif SAW dépend à la fois de la longueur d'onde λ de l'onde acoustique, mais aussi du matériau piézoélectrique employé par sa vitesse d'onde acoustique de surface V , par la relation :

$$f_0 = \frac{V}{\lambda} = \frac{V}{4d} \quad (\text{II.15})$$

Où : d correspond à la distance entre deux doigts consécutifs d'un peigne.

Aujourd'hui encore, pour des dispositifs fonctionnant à des fréquences de quelques centaines de MHz, le matériau piézoélectrique est employé sous forme de substrat massif. Dans la mesure où les industriels visent à miniaturiser au maximum leurs produits et à les faire fonctionner à des fréquences de plus en plus élevées, l'utilisation de couches minces piézoélectriques

(quelques microns d'épaisseur) à la place de substrats massifs va fortement influencer les fréquences de fonctionnement, l'onde acoustique se propageant à la fois dans le matériau piézoélectrique, mais aussi dans le substrat non piézoélectrique (silicium ou arséniure de gallium). Le choix du couple substrat - matériau piézoélectrique déterminera les caractéristiques du dispositif fabriqué.

-Ondes de volume

Les matériaux piézoélectriques entrent également dans la fabrication d'un nouveau type de résonateurs compatibles avec la technologie CMOS, en remplacement des résonateurs à ondes acoustiques de surface et des filtres céramiques. Contrairement aux dispositifs à ondes acoustiques de surface (SAW), l'onde se propage sous la forme d'une d'onde stationnaire dans le matériau piézoélectrique lui-même : ce sont les résonateurs à ondes acoustiques de volume, ou BAW pour Bulk Acoustic wave Resonator.

II-5 . Paramètres de caractérisation de l'onde ultrasonore

Cette section présente les différents paramètres nécessaires à la caractérisation de l'onde ultrasonore.

II-5-1 Impédance acoustique

le comportement du milieu vis-à-vis des ultrasons est exprimé par un constant appelé impédance acoustique Z [Syrota, 1994]

II-5-2 La longueur d'onde

la longueur d'onde ultrasonore dans un milieu est reliée à une fréquence donnée elle est donnée par la relation suivante

$$V = f * \Lambda \tag{II.16}$$

- V : la vitesse de son dans le milieu
- f : la fréquence des émissions en Hz
- Λ : la longueur d'onde acoustique.

II-5-3 La pression et l'intensité

La pression acoustique varie selon la fréquence acoustique de l'onde ultrasonore, l'énergie délivrées dans le milieu elle est dépende de ces variations de pression qui soumettent les particule du milieu à du mouvement vibratoire

On appelé intensité ultrasonore l'énergie qui traverse pèrpendiculairement une unité de surface pendant une unité de temps. Elle est relies a la pression acoustique par la formule suivante

$$I = \frac{p^2}{2\rho V} \quad (\text{II.17})$$

- I : Intensité ultrasonore en wat
- p: Pression acoustique en $\text{kgm}^{-1}.\text{s}^{-2}$
- ρ : La densité du milieu kg.m^{-3} .

II-6 . Propagation des ultrasons dans un milieu liquide

La propagation des ultrasons dans les liquides se limite à celle d'ondes longitudinales puisque ces milieux ne peuvent résister aux contraintes tangentielles on considérons une onde ultrasonore plane progressive sinusoidale se propageant dant la direction(x). les particules du milieu vibrent autour d'une position d'équilibre avec la même fréquence de l'onde ultrasonore , l'équation différentielle qui décrit la propagation des ces ondes est donnée comme suit [Arkin H, 1994][Brillouin, 1922]] [Brown, 1971]:

$$\frac{\partial^2 X}{\partial t^2} = V^2 \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (\text{II.18})$$

- V : la vitèsse de propagation de l'onde ultra sonore.

La solution de cette équation différentielle est donnée par la formule suivante :

$$X(x, t) = X_0 \sin(\omega_a t - k_a x) \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$$k_a = \frac{2\pi}{\lambda_a} \quad (\text{II.20})$$

- K_a : vecteur d'onde ultra sonore.
- X_0 : l'amplitude de vibration.
- X : direction de propagation.
- ω_a, λ_a : pulsation et longueur d'onde ultra sonore.

On constate que tous les points situés à la même abscisse x sont dans le même état vibratoire : ils sont dits en phase et constituent une surface d'onde qui est dans ce cas plane [PERDIJON, 1981].,

La vitesse de propagation de la particule est donnée alors par :

$$X'(x, t) = \frac{dX}{dt} = X_0 \omega_a \cos(\omega_a t - K_a x) \quad (\text{II.21})$$

La pression acoustique alternative en un point donné est reliée à la vitesse de la particule dans le milieu par l'équation : [BROWN, 1971]

$$P(x, t) = \rho V X'(x, t). \quad (\text{II.22})$$

Avec :

ρ : la densité du milieu kg.m^{-3} .

Le rapport de la pression à la vitesse de la particule en un point donné est alors égal au produit de la densité du milieu par la vitesse de l'onde, ce rapport est constant :

$$\frac{P(x, t)}{X'(x, t)} = \rho V \quad (\text{II.23})$$

On appelle souvent cette équation loi d'hom en acoustique, et le rapport précédent ce qui appelé l'impédance acoustique du milieu Z

D onc l'équation devient

$$P(x, t) = ZX_0 \omega_a \cos(\omega_a t - K_a x) \quad (\text{II.24})$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \frac{K_c}{\rho} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \quad (\text{II.25})$$

avec :

- p : est la pression acoustique en $\text{kgm}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
- K_c : module d'élasticité (N/m^2). Il est défini, par la loi de *Hooke* :

$$Kc = -v_0 \frac{dp}{dv} = \gamma \Gamma \quad (\text{II.26})$$

- dp : variation de la contrainte produisant une déformation dv .
- v_0 : volume original.
- Γ : module de compressibilité.

□ La vitesse avec laquelle les ultrasons se propagent dans le milieu dépend de l'élasticité et de la densité du milieu. Elle est donnée par l'équation suivante [BROWN, 1971] ET [DOGNON, 1953]:

$$V = \sqrt{\frac{K_c}{\rho}} \quad (\text{II. 27})$$

- k est le constant élastique approprié en N.m^{-2} ;
- ρ la densité du milieu en kg.m^{-3} .

D'autre part la vitesse V_L est donnée par :

$$V = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (\text{II. 28})$$

Le tableau ci dessous donne la vitesse du son, la densité et l'impédance acoustique spécifique des liquides [BROWN, 1971]- [JESSEL, 1973]

Liquide (L)	Température. ° C	Vitesse (m/s)	Densité(g/cm^3)	Impédance 10^6 ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
Chloroforme($\text{CH}_3 \text{CL}$)	20	1000	1.49	1.49
Alcool métallique($\text{CH}_3 \text{OH}$)	20	1120	0.79	0.89
Sulfure de carbone (CS_2)	20	1160	1.26	1.46
Alcool éthelique ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)	20	1180	0.79	0.935
Pétrole(C_7H_8)	15	1330	0.88	1.17
Eau	17	1430	1	1.43
Eau de mer	17	1510	1.03	1.56
Mercure	20	1450	13.6	19.7
Glycérine	20	1920	1.26	0.242
Benzène	20	1320	0.879	1.16
Ethanol	20	1170	0.789	0.934

Tableau I.2 : la vitesse du son, la densité et l'impédance acoustique spécifique des liquides.

II-7 . Grandeurs d'influence de la propagation des ultrasons

Lorsque les ondes sonores se propagent dans un liquide, on observe une perte d'énergie due au mouvement relatif des particules qui constituent le milieu, La vitesse du son dans l'air, qui est de 331,3 m/s à zéro degré Celsius, dépend surtout de la température. Son expression est donnée par la formule suivante

$$V = V_0 \sqrt{\left(1 + \frac{T}{273}\right)} \quad (\text{II.29})$$

avec T température en degré Celsius et V_0 vitesse à $T=0^{\circ}\text{C}$. Autrement dit, à pression atmosphérique constante, une variation de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ de la température engendre une variation relative de la vitesse du son dans l'air de $\pm 0,18\%$, soit une variation de 3,44 mm sur une distance de 1m. Les fluctuations de la pression atmosphérique n'ont pratiquement aucun effet sur l'exactitude de la mesure. Ainsi à température constante, une variation de 1 hPa (0,75 mm de mercure) de la pression atmosphérique engendre une variation relative de la célérité des ultrasons dans l'air de 0,05%, ce qui permet l'utilisation de ce type d'onde sous forte pression [FIEDLER, 1990]. L'influence de la variation de l'humidité de l'air est négligeable.

Ainsi une modification de l'humidité relative de 20% se traduit par une variation relative de la mesure de 0,07%. De plus, ce type de variation brutale de l'humidité de l'air est rarement rencontré dans les régions tempérées. Les courants d'air, les turbulences et les couches de densité différente dues à des gradients de température de l'air, provoquent la réfraction de l'onde ultrasonore. Les poussières, la fumée atténuent la puissance de l'onde ultrasonore. Lorsqu'une sonde doit fonctionner en atmosphère poussiéreuse (par exemple dans des silos à grains), la portée effective est réduite de 20 à 40%. Presque les mêmes grandeurs influence sur la propagation des ondes ultrasonore dans les liquide les eaux pur ou pollue exemple1 variation des vitesses des ondes ultrasonore dans les eaux de mère influence par la température le profondeur et la salinité qui peut être présentée par les relations[Leroy, 1969][Medwin, Herman. 1975][Mackenzie, 1981] comme suit :

$$V = 1492.9 + 3(T - 10) - 6 \times 10^{-3}(T - 10)^{-2} - 4 \times 10^{-2}(T - 18)^2 + 1.2(S - 35) - 10^{-2}(T - 18)(S - 35) + \frac{D}{61} \quad (\text{II.30})$$

- $-2^{\circ} \leq T \leq 24.5^{\circ}$
- $30 \leq S \leq 42$
- $0 \leq D \leq 1000$

$$V = 1449.2 + 4.6T - 5.5 \times 10^{-2}T^2 + 2.9 \times 10^{-4}T^3(1.34 - 10^{-2}T)(S - 35) + 1.6 \times 10^{-2}D \quad (\text{II.31})$$

- $0 \leq T \leq 35^\circ$
- $0 \leq S \leq 45$
- $0 \leq D \leq 1000$

$$V = 1448.96 + 4.591T - 5.304 \times 10^{-2}T^2 + 2.374 \times 10^{-4}T^3 + 1.340(S - 35) + 1.630 \times 10^{-2}D + 1.675 \times 10^{-7}D^2 - 1.025 \times 10^{-2}T(S - 35) - 7.139 \times 10^{-13}TD^3 \quad (\text{II.32})$$

- $0 \leq T \leq 30$
- $30 \leq S \leq 40$
- $0 \leq D \leq 8000$

Une autre relation existe elle présente la vitesse acoustique dans l'eau par en fonction de la température et la pression, elle donnée comme suit :

$$V = V = 1402.7 + 488T - 482T^2 + 135T^3 + (15.9 + 2.8T + 2.4T^2) \frac{P_a}{100} \quad (\text{II.33})$$

Avec :

V : vitesse acoustique (m/s).

$$T = \frac{T}{100} \quad (\text{II.34})$$

- T : Température de la cellule où se propagent les ultrasons (°C).
- Pa : Pression atmosphérique égale à 1bar.

Le changement de ces paramètres précédent influe sur l'indice de réfraction optique des liquides et des solides [BALLAND,2007], L'augmentation de la température. augmente le volume du liquide ou du gaz à pression constante Il y a donc moins de molécules par unité de volume, ce qui diminue la valeur de l'indice de réfraction optique. Pour l'eau la relation de l'indice de réfraction en fonction de la température est donnée par [NEMOTO, 1992]:

$$n = 1.332156 - [8.889(T - 20) + 0.1610 \times (T - 20)^2] \times 10^{-5} \quad (\text{II.35})$$

Par exemple, l'indice de réfraction est de 1.3328 pour de l'eau à 20°C et de 1.3227 pour de l'eau à 100°C. [HESPEL,2007], voir la figure ci dessous .Il est décroissant si la température

croissante [HANDBISSECK,1995],

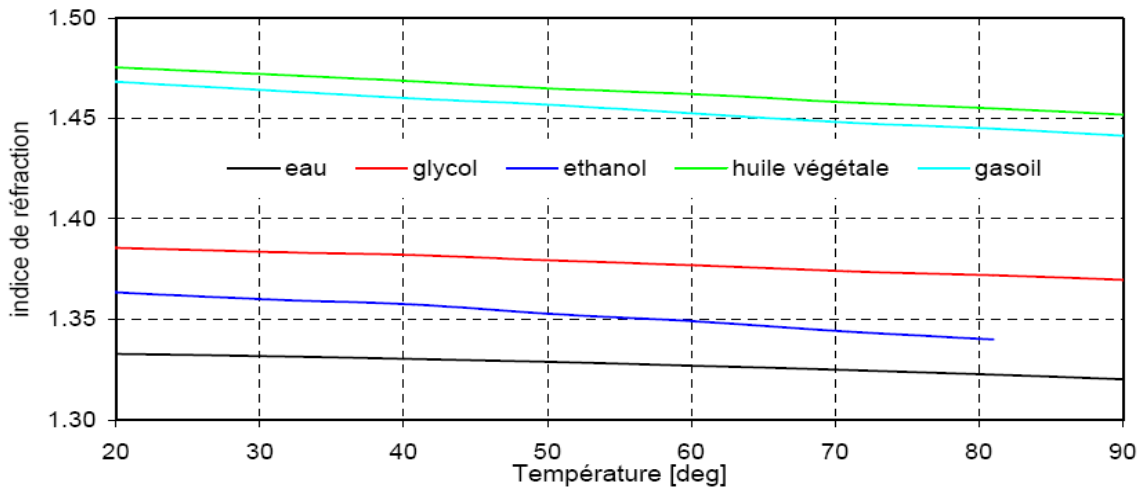


Figure.II.11 Relation entre la température et l'indice de réfraction pour différents produits pour une longueur d'onde de 589.32nm. [HESPEL,2007].

Variation de l'indice de réfraction avec la densité pour un milieu donné et pour une longueur d'onde donnée, L'indice de réfraction est une fonction de la densité $n = n(\rho)$, la relation de Lorenz-Lorentz pour un milieu homogène transparent s'écrit [AGARD1988],

$$\frac{n^2 - 1}{\rho n^2 + 2} = n \quad (\text{II.36})$$

Le milieu ayant un indice de réfraction élevé dit à une grande densité, et celui ayant un indice de réfraction bas dit à une basse densité, L'indice de réfraction du vide est égal à 1, les indices de l'air, l'eau et le diamant sont 1.0003, 1.333 et 2.417 respectivement. [BENENSON,2000], Donc l'indice de réfraction est proportionnel à la densité du milieu dans lequel la lumière pénètre. [DESPRETZ,1837] Pour les liquides mélangés il est important de parler de l'influence de la concentration sur la viscosité et sur l'indice de réfraction les mouvements relatifs des particules qui constituent le milieu elle est due aux forces de viscosité qui tendent à dégrader l'énergie acoustique en chaleur [BROWN ET GOODMAN, 1971]. La viscosité dans ce cas, est équivalente à la rigidité pour un matériau. Ainsi, plus la concentration augmente plus la viscosité est élevée plus la température du milieu augmente.

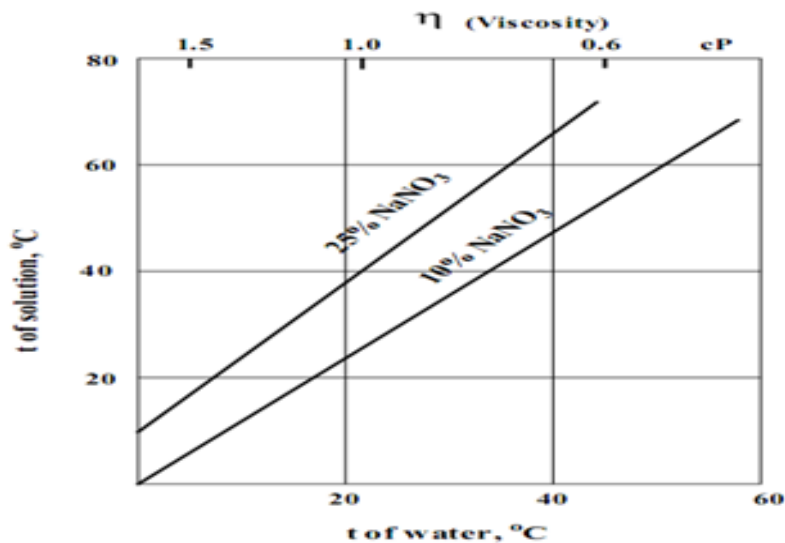


Figure II.12: Présentant l’effet de la concentration de NaNO₃ sur la viscosité de la solution en fonction de la température de la solution

La variation de la densité, de l'indice de réfraction et de la vitesse d'onde ultrasonique des liquides mélanges peut être calculée par les relations additives décrites par Richardson [Richardson EG 1952], qui sont comme suit :

$$\rho_{12} = \rho_1 C_1 + \rho_2 C_2 \tag{II.37}$$

- ρ_1 : densité du liquide référence.
- ρ_2 : densité de la deuxième liquide.
- ρ_{12} : densité du mélange binaire.

$$n_{12} = n_1 C_1 + n_2 C_2 \tag{II.38}$$

$$V_{12} = V_1 C_1 + V_2 C_2 \tag{II.39}$$

- V_{12} : vitesse acoustique du mélange binaire.
- V_1 et C_1 : sont respectivement la vitesse acoustique dans l’eau distillée et la proportion de l’eau relativement au liquide.
- V_2 et C_2 : Sont respectivement la vitesse acoustique dans le liquide polluant et sa proportion par rapport à l’eau.

II-8 Interaction des ondes ultrasonores avec le laser (interaction acousto optique)

La propagation d'une onde acoustique (ultrasonore) dans un milieu transparent, crée des zones de dilatation et des zones de compression commandées par le signal électrique appliqué. L'onde acoustique est équivalente à un réseau de phase à pas variable ; la diffraction de l'onde lumineuse avec ce réseau donne naissance à des ordres de diffraction.

La diffraction du premier ordre, avec un angle d'incidence non nul, comme la prédit Brillouin, a été observée par Royw en 1935. En 1936, Raman et Nath développent le modèle d'interaction acousto-optique pour plusieurs ordres [RAMAN ET NATH, 1936]. Il faudra attendre 1956 pour que Phariseau Réalise cette expérience [PHRISEAU, 1956] qui sont réparties verticalement sur l'écran d'observation. Chaque tache de diffraction s'accompagne d'un changement de fréquence avec un décalage par rapport à la fréquence initiale de la vibration lumineuse à laquelle oscille l'onde acoustique. La plupart des dispositifs acousto-optique exploitent le phénomène de la diffraction de la lumière par une onde acoustique dans un milieu transparent, les ondes acoustiques provoquent dans le milieu une variation d'indice périodique. Celle ci se comporte comme un réseau optique de pas

$$\Lambda = 2 \frac{\pi V}{\omega_A} \quad (\text{II. 40})$$

- V la vitesse de l'onde acoustique.
- ω_A la fréquence angulaire de l'onde acoustique dans le milieu.
- Λ la longure d'onde acoustique.

La vitesse acoustique est très inférieure a la vitesse des lumières, le réseau peut être concéderai comme un réseau stationnaire, l'effet du déplacement se traduisant uniquement par un changement de fréquence optique du à l'effet Doppler sous certains conditions, se réseau a la propriété de diffracte la lumière.

La figure représente une expérience typique de diffraction de la lumière ou l'onde lumineuse est soit une onde plane soit un faisceau gaussien de diamètre D supérieur à plusieurs longueurs d'onde $D > 5 \Lambda$

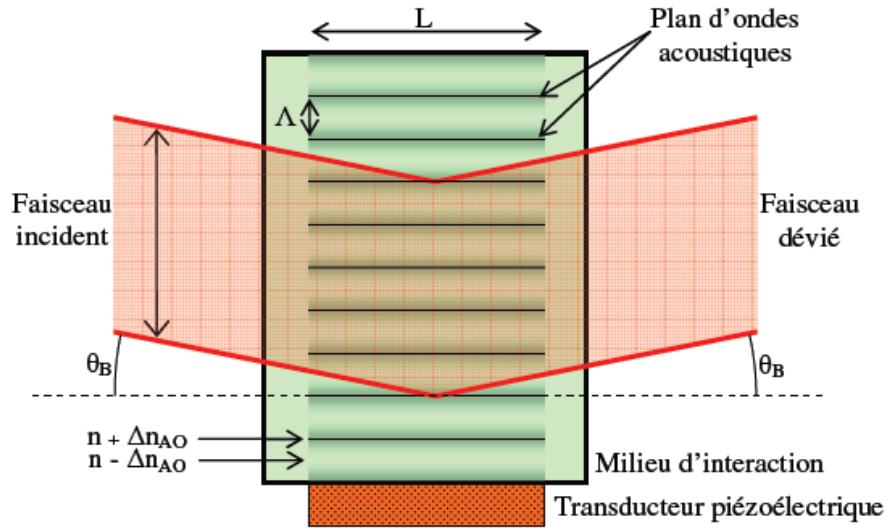


Figure. II.13 Expérience type de diffraction de la lumière par ultrason

Il y a deux types de diffraction de la lumière et pour les caractériser nous servons du paramètre Q sans dimension [*SAPRIEL, 1976*]

$$Q = \frac{\lambda L}{\Lambda^2} \tag{II.41}$$

Où : λ est la longueur d'onde lumineuse dans le milieu et L la longueur d'interaction, voir par exemple la figure 1.13.

Quand $Q > 1$, il n'y a qu'un seul Faisceau diffracté, c'est la diffraction de Bragg. l'angle de déviation du faisceau lumineux est alors égal à

$$\theta_{\text{diffracté}} = \arcsin\left(\frac{\lambda}{\Lambda}\right) \tag{II.42}$$

Et l'angle de Bragg (θ_b) est égale $\theta_{\text{diffracté}} / 2$,

La proportion η De La Lumière diffracté maximale est égale à :

$$\eta = \sin^2\left(\frac{\xi}{2}\right) \tag{II.43}$$

Avec :

$$\xi = \frac{2\pi L}{\lambda_0} \Delta n_{AO} \tag{II.44}$$

Où la longueur d'onde optique dans le vide et Δn_{AO} est l'amplitude des variations de l'indice de réfraction due à l'effet acousto-optique.

Quand $Q \ll 1$, la lumière est diffractée en plusieurs faisceaux correspondant aux différents ordres de diffraction dessinés par $0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \pm j$. Nous parlons cette fois-ci de la diffraction de Raman et Nath les angles de diffraction de chaque ordre j sont donnés par

$$\theta_j = \frac{j\lambda}{\Lambda} \quad (\text{II.45})$$

Le faisceau incident est ou quasi normale par rapport à la direction de propagation de l'onde acoustique, l'intensité des faisceaux diffractés d'ordre j est donné par :

$$\frac{I_j}{I_i} = J_j^2(\xi), \quad (\text{II.46})$$

Où J_j sont les fonctions de Bessel de premier espèce d'ordre j , La figure. II.14 montre les intensités lumineuses pour la diffraction dans le régime de Raman et Nath en fonction de ξ pour les indices de modulation faibles, seul les ordres $+1$ -1 apparaissent symétriques par rapport au faisceau central. Les pulsations optiques de chaque ordre de diffraction ω_j sont modifiées comme suite

$$\omega_j = \omega \pm j\omega_A \quad (\text{II.47})$$

Où ω_A est la fréquence angulaire de l'onde acoustique et w est la fréquence d'onde

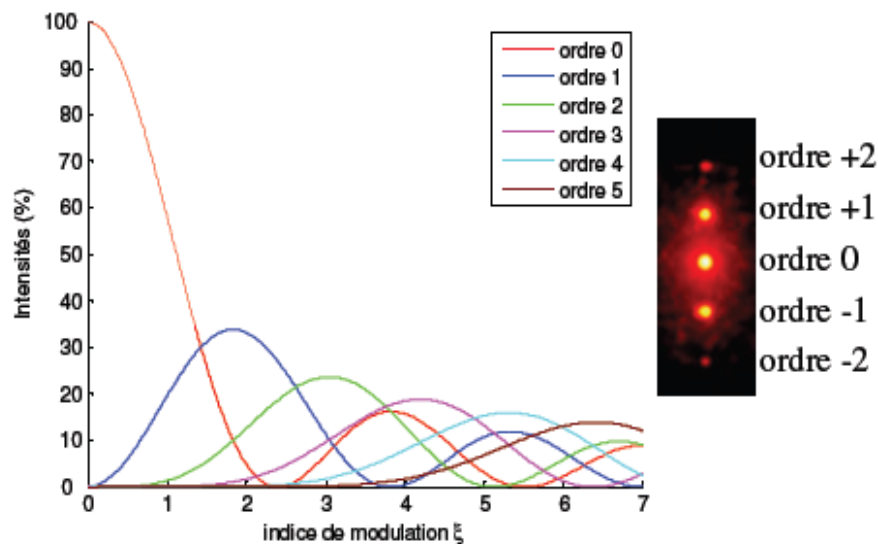


Figure.11.14 Intensité des différents ordres des raies de diffraction en fonction de l'indice de modulation ξ dans le régime de Raman et Nath

L'efficacité de l'interaction acousto-optique des composants dépend de la caractéristique photo élastique du milieu, Normalement cette efficacité est caractérisée par le facteur de mérite acousto-optique M_2 [CIPLYS, 2000]. La variation de l'indice de réfraction due à l'effet acousto-optique dépend du facteur de mérite M_2 et de l'intensité de l'onde acoustique, I_A

$$\Delta n_{AO} = \sqrt{\frac{M_2 I_A}{2}} \quad (\text{II-48})$$

$$M_2 = n_0^6 P^2 / \rho V^3 \quad (\text{II-49})$$

Avec : n_0 : Indice de réfraction du liquide, P : Constante photo élastique, V : Vitesse acoustique et ρ : Masse volumique.

Chapitre III

Etude expérimentale

III. Introduction :

Le contrôle de la pollution des eaux par différentes méthodes (physique, chimique, optique, biologique et ultrasonique...) est connu comme étant une opération nécessaire avant toute exploitation humaine de cette eau. Par le travail que nous exposons, on va vérifier la faisabilité d'une nouvelle méthode de contrôle qui complète les autres méthodes existantes. Cette méthode est basée sur l'exploitation du phénomène de diffraction d'un faisceau lumineux due à l'interaction d'une onde lumineuse et d'une onde acoustique dans l'eau polluée, qui servira comme un milieu d'interaction.

L'idée générale de cette méthode consiste à utiliser la fréquence spatiale des ordres de diffraction, comme un moyen sensible à tout changement de la vitesse acoustique dû à une variation du liquide par un agent polluant. En deuxième lieu à exploiter le rendement de diffraction qui dépend d'un facteur de qualité $M2$ qui dépend à son tour de la masse volumique, de l'indice de réfraction, de la vitesse acoustique et de la constante photoélastique du milieu d'interaction.

Dans cet objectif, on a utilisé une eau distillée polluée par deux types de liquides (acétone, éthanol) de différentes concentrations comme des liquides échantillons.

L'étude sera achevée par une comparaison de notre à d'autres méthodes déjà utilisées.

III.1. Montage expérimental:

Le montage expérimental de notre expérience est présenté par la figure. III-1:

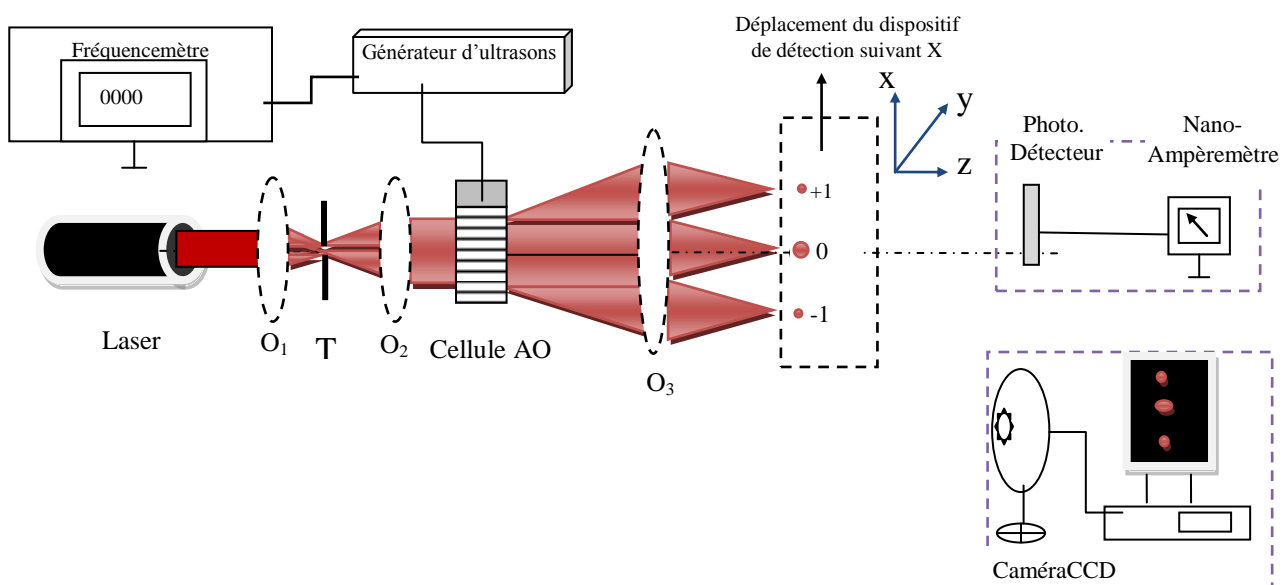


Figure III.1: Montage global de l'expérience

Les éléments constituant ce montage sont présentés comme suit :

- Banc optique.
- Fente spatiale $D = 20\mu\text{m}$.
- Une source laser de puissance $P = 15 \text{ mW}$ et une longueur d'onde $= 632,8 \text{ nm}$
- 1 Objectif de microscope O_1 20/0.5.
- 2 Objectifs Photographiques O_2 4,5/210
- Deux polariseurs.
- Goniomètre de pas égale 1 minute.
- table de translation.
- Un photodétecteur
- Nano-ampèremètre marque AOIP
- Un fréquencemètre : modèle (PHILIPS, PM6612, 80 MHz/100 ns).
- Une camera CCD.
- Un Micro-ordinateur

Le laser He-Ne émet un faisceau de lumière monochromatique directif avec une faible divergence. Juste après, on trouve : un objectif de microscope O_1 , un filtre spatial T et un autre objectif photographique O_2 ; leurs associations nous permettent d'obtenir un faisceau de lumière élargi et parallèle. Le but toujours, est de rendre l'intensité de la lumière uniforme sur toute la section du faisceau laser.

Le faisceau de lumière uniforme traverse ensuite la cellule acousto-optique (A.O), où il interagit avec un champ ultrasonore périodique émis par un émetteur ultrasonore. Juste après la cellule A.O, on place un objectif photographique O_3 assurant la transformée de Fourier spatiale de l'information portée par la lumière sortante de la cellule A.O.

Dans le plan de Fourier, se trouve un photo-détecteur relié à un nano-ampèremètre et muni d'un déplacement selon l'axe OY, il permet la mesure de l'intensité lumineuse de chaque ordre de diffraction.

La visualisation du spectre est assurée par une caméra CCD reliée à un micro-ordinateur, placée dans le plan spectral de l'objectif O_3 .

III.2. Ajustage du Montage

Avant de commencer l'opération de mesure, un ajustage préalable de notre montage expérimental présenté par la figure III.2, est nécessaire, les éléments que l'on doit ajuster sont présentés comme suit :

III.2.1. Ajustage de l'axe optique :

Le laser est installé sur un banc optique, en face et à une distance suffisante, on pose un écran sur lequel se trouve une croix, et on déplace l'écran dans la direction de propagation du faisceau. L'ajustage du laser se fait de telle manière qu'on obtient la tache du faisceau sur la croix.

III.2.2. Ajustage des éléments optiques :

L'ajustage est assuré à l'aide de trois vis de fixation. On fixe une vis et on manœuvre les deux autres, pour garder la tache du faisceau laser toujours centrée autour de la croix sur l'écran. L'opération est effectuée pour chaque élément optique

III.2.3. Ajustage de l'inclinaison du transducteur piézoélectrique :

Avant toutes mesures, il faut s'assurer que le faisceau laser est bien perpendiculaire au faisceau ultrasonore. Pour cette raison, le transducteur piézoélectrique est monté sur une tige comportant deux goniomètres assurant le réglage de la rotation suivant les axes OY et OX. La perpendicularité est assurée quand le rendement de diffraction est maximal et les deux ordres de diffraction obtenus présentent les mêmes intensités.

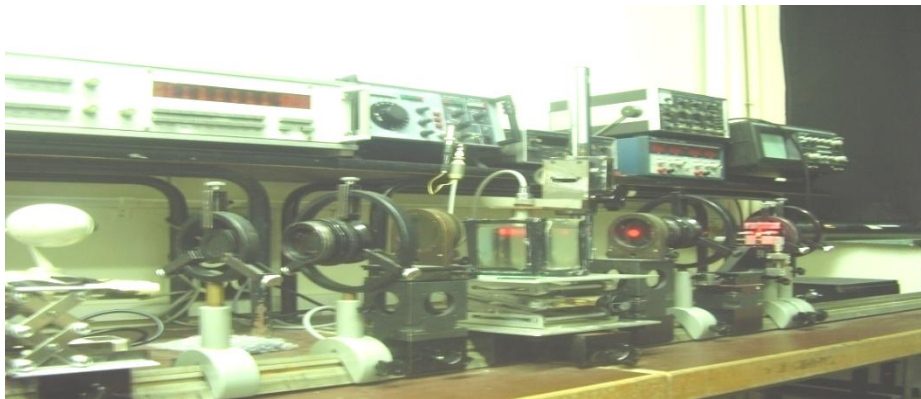


Figure. III.2: Image réelle du montage expérimental

III.3. Résultats expérimentaux :

La première opération effectuée consiste à utiliser une eau distillée polluée par deux liquides ; l'éthanol et l'acétone, pour chaque concentration, on mesure la distance d entre le premier ordre de diffraction et la tache centrale.

Le schéma suivant nous donne une idée sur la distance d :

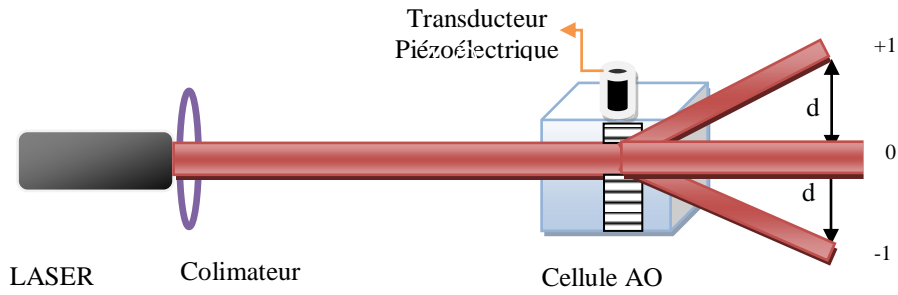


Figure III.3. Présentation de la fréquence spatiale

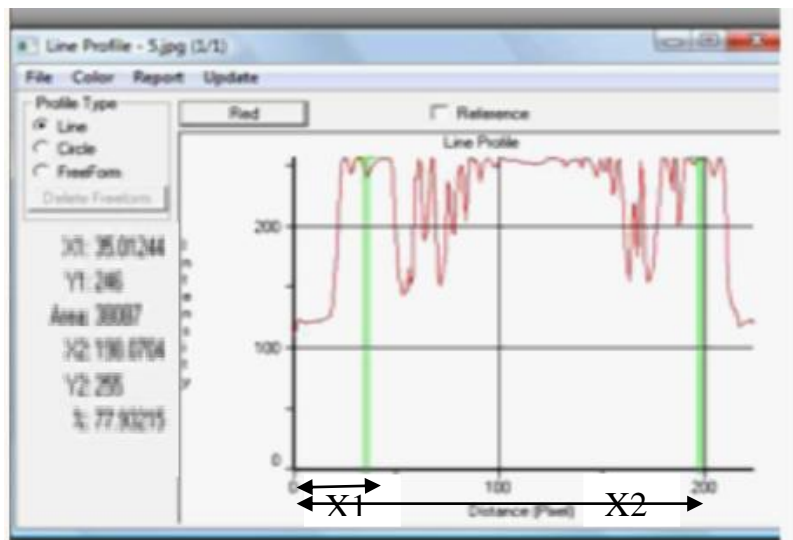


Figure III.4. Illustration de la distance entre les ordres par IPP.

La mesure de la distance d est obtenue par la relation : $d=(X_{+1}-X_{-1})$ qui est tirée de la figure ci-dessus avec $X_2(X_{+1})$ et $X_1(X_{-1})$ sont respectivement les coordonnées axiales des ordres de diffraction ∓ 1 . Cette distance d est mesurée en fonction de la variation de la concentration C de l'éthanol ou de l'acétone dans l'eau ; mesurée en adoptant la relation suivante:

$$C_{éth,acé} = \left(\frac{V_{éth,acé}}{V_{eau}} \right) \%$$

Où V représente le volume en (ml),

L'opération de mesure est effectuée après avoir pris l'image de la figure de diffraction au moyen d'une caméra CCD. Un logiciel de traitement d'image (Image-Pro Plus) assure la mesure des distances en pixel.

La méthode adoptée consiste à tracer le profil d'intensité sur la surface des ordres diffractés (figure III.4) et ensuite évaluer la distance entre les taches de diffraction comme il est montré sur la figure ci-dessous :

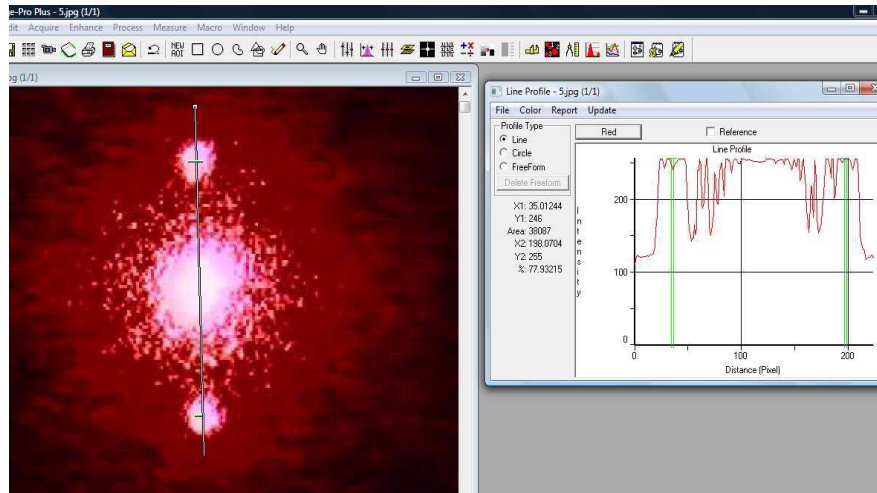


Figure. III.5 : Principe de mesure des distances des ordres X_{+1} et X_{-1} .

On fait varier la concentration de 0 à 100%, et pour chaque variation, on refait le même travail

III.3.1. Cas de l'éthanol

III.3.1.1. Influence de la concentration de l'éthanol sur la distance entre les ordres diffractés :

Pour voir l'influence de la concentration de l'éthanol sur la distance d , on réalise le montage de la figure III.1. En fait varier la concentration de l'éthanol dans l'eau distillée entre 0% et 100%, et on mesure à chaque fois la distance d dans le plan focal de la lentille O_3 . La température est un facteur important qui doit être pris en considération (voir chapitre II).

Comme exemples on a pris, les figures suivantes (figure III.6.a et figure III.6.b) pour illustrer l'effet de la concentration.

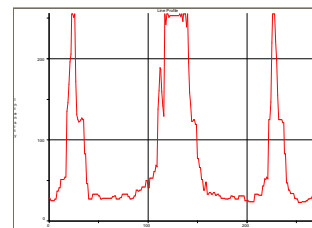


Figure. III.6.a : Profil d'intensité effectué sur l'image des ordres diffractés pour $C = 10\%$ et une température $T=18^\circ\text{C}$ ($d=102$ pixel)

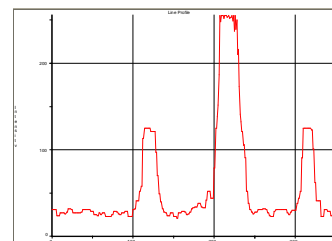


Figure. III.6.b : Profil d'intensité effectué sur l'image des ordres diffractés pour $C=20\%$, et une température $T=18^\circ\text{C}$ ($d=197$ pixels)

Les valeurs enregistrées sont présentées dans le tableau suivant :

Concentration de l'éthanol en [%]	0	1.66	2.5	5	10	15	20	25	30	40	50	75	100
Distance d [pixels]	102.5	102	102	103	104	1 05	1 06	107	1 09	110	111	113	132

Tableau III.1 : Valeurs enregistrées de la variation de la distance d en fonction de la concentration C de l'éthanol pour une température $T=18^{\circ}\text{C}$.

Pour une vision plus claire, cette variation est illustrée sur la courbe suivante:

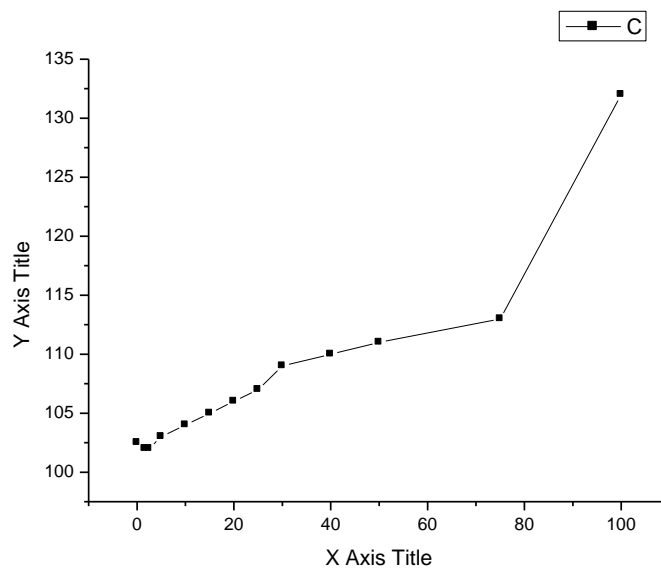


Figure. III.7 Variation de la distance d en fonction de la concentration de l'éthanol dans l'eau distillée.

III.3.1.2 Influence de la concentration de l'éthanol sur la vitesse acoustique :

L'effet de la concentration d'un liquide polluant dans l'eau distillée sur la vitesse de propagation des ondes ultrasonores a été largement étudié par d'autres chercheurs [JACOB 2006]. [LAURENT ALLIES, 1999]. En vu d'une comparaison de nos résultats avec ces travaux, on va dans ce qui suit établir une relation entre la concentration de l'éthanol dans l'eau distillée, en fonction de la vitesse acoustique. Pour réaliser cette tâche on procède comme suit :

La variation de l'angle de diffraction θ_i en fonction de la distance d est donnée par la relation suivante [FERRIA, 2011] :

$$\sin \theta_i = \frac{d}{f_3} \quad (\text{III-1})$$

Avec :

Λ : Longueur d'onde acoustique.

λ : Longueur d'onde du laser.

θ_i : Angle de diffraction.

d : Distance entre les ordres.

f_3 : Distance focal de l'objectif O_3 .

De cette relation, on tire :

$$\Lambda = \frac{\lambda}{d} f_3 \quad (\text{III-2})$$

Comme la vitesse V est reliée à la fréquence F et la longueur d'onde Λ par la relation suivante :

$$V = F \Lambda \quad (\text{III-3})$$

En tenant compte des relations III-1, III-2 et III-3 on aboutit à une relation liant la vitesse acoustique à la distance d présentée comme suit :

$$V = \frac{\lambda}{d} f_3 F \quad (\text{III-4})$$

L'utilisation de cette relation nous permet de relier la variation de la vitesse acoustique à la concentration.

Cette variation est présentée dans le tableau III.2 et illustrée dans la figure III.8

C%	0	2	4	5	10	15	20	25	30	40	50	75	100
d[pixels]	102.5	102	102	103	104	1 05	1 06	107	1 09	110	111	113	132
V[m/s] pratique	1500	1492	1490	1485	1480	1470	1440	1425	1400	1380	1315	1250	1198

Tableau III.2: Présentation de la variation de la vitesse acoustique en fonction de la distance d .

La courbe obtenue est présentée sur la figure ci-dessous

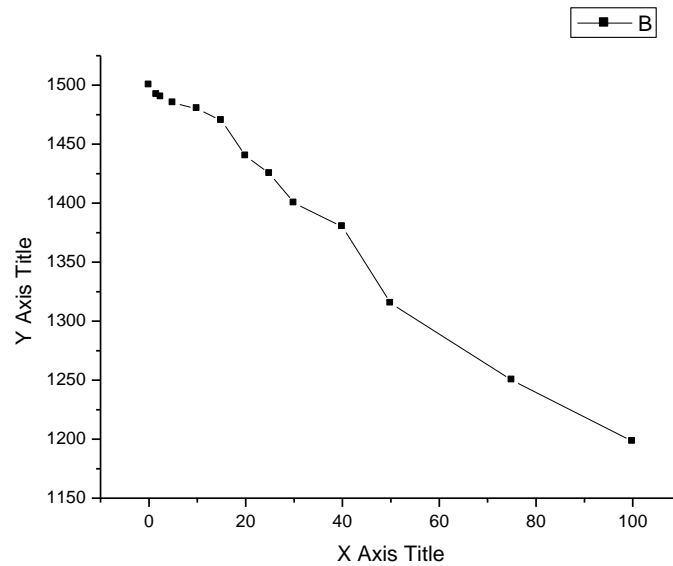


Figure III.8 : Présentation de la vitesse acoustique en fonction de la concentration de l'éthanol.

Il est clair que la vitesse acoustique commence par une valeur de 1500m/s qui est la vitesse de l'eau distillée ($C=0\%$) et se termine par une vitesse qui est proche de 1200m/s qui celle de l'éthanol pur ($C=100\%$). Entre ces deux valeurs, la vitesse croit jusqu'à atteindre une valeur de le même comportement à été enregistré par la référence] qui a utilisé une technique de l'interaction d'ondes élastiques pour la mesure des propriétés non-linéaires des matériaux, les résultats obtenus sont présentés sur figure III.9

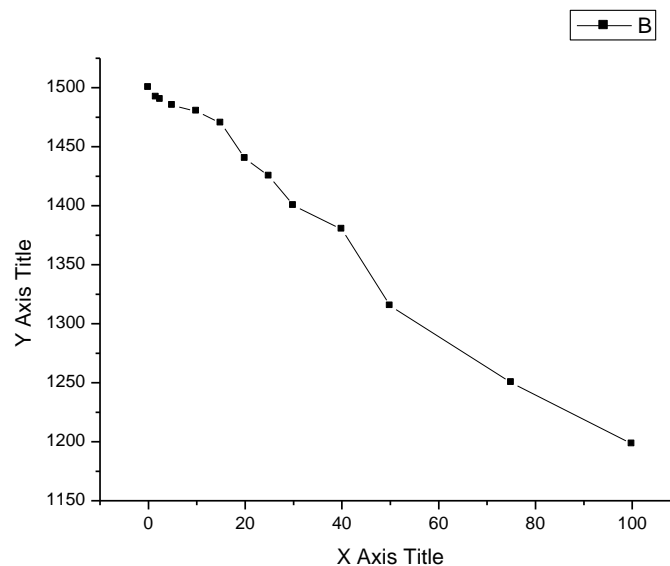


Figure : III.9 : Présentation de la vitesse acoustique en fonction de la concentration de l'éthanol obtenue par la méthode de l'interaction d'ondes élastiques

Comme deuxième exemple, un autre travail de recherche présenté par [LAURENT ALLIES, 1999] dans lequel il a utilisé une technique ultrasonore pour la mesure du paramètre de non linéarité au moyen de la méthode d'amplitude finie. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure III-10.

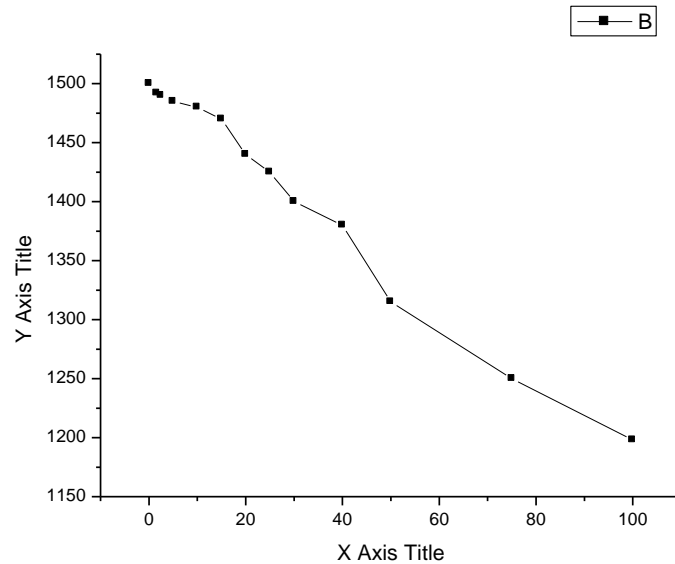
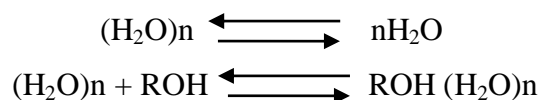


Figure III.10 : Présentation de la vitesse acoustique en fonction de la concentration de l'éthanol trouvées par une technique ultrasonores

L'accroissement de la vitesse acoustique entre les concentrations 25 à 30% est dû au fait que le mélange donne naissance à une solution homogène de caractéristiques différentes de celles de l'eau et de l'éthanol.

Pour mieux comprendre ce qui s'est passé, on donne en premier lieu une interprétation physique à partir des deux équations d'équilibre impliquées au cours de cette salvation



L'introduction du radical R-OH commence par diminuer la compressibilité (vitesse acoustique augmente) en favorisant des liaisons plus fortes [BRIDGMAN.1935]. Pour les faibles concentrations, l'association de l'éthanol avec l'eau stabilise l'association des molécules d'eau entre-elles. Cette dernière possède une raideur plus importante qui implique une augmentation de la célérité. Lorsque la concentration en éthanol augmente, l'équilibre se déplace en faveur des

liaisons ROH (H₂O)_n qui sont moins raides, ce qui s'accompagne d'une diminution de célérité, ceci s'explique aussi par le changement de proportion de formes libre et liée de l'eau

Un troisième travail présenté par la référence [KIRTI, 2008] dans lequel les auteurs expriment une relation linéaire entre la concentration du liquide polluant dans l'eau qui est donnée par la relation suivante :

$$V_{12} = c_1 v_1 + c_2 v_2 = c_1 v_1 + (100 - c_1) v_2 \quad (\text{II.39})$$

V_{12} : vitesse acoustique du mélange binaire.

v_1 et c_1 : sont respectivement la vitesse acoustique dans l'eau distillée et la proportion de l'eau relativement au liquide.

v_2 et c_2 : sont respectivement la vitesse acoustique dans le liquide polluant et sa proportion par rapport à l'eau.

Les résultats de notre travail expérimental et ceux obtenus par la relation (II.39) ainsi que les valeurs trouvées par la référence [KIRTI, 2008] sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Concentration [%]	Distance [pixels]	Vitesse [m/s] pratique	Vitesse [m/s] calculée obtenu par la relation (II.39)	Vitesse [m/s] expérimentale obtenue par la Ref [Kirti 2007]
0	100	1500	1485	1473
1,66	102	1495	1480	
2,5	102	1490	1478	
5	103	1485	1470	
10	104	1480	1456	
15	105	1470	1441	
20	106	1440	1427	
25	107	1425	1412	1428
30	109	1400	1398	
40	110	1380	1368	
50	111	1345	1339	1386
75	113	1250	1266	1329
100	132	1198	1198	1122

Tableau III.3: Présentation de la variation de la vitesse acoustique en fonction de la concentration par plusieurs méthodes.

Pour une meilleure illustration, on présente les valeurs du tableau sous forme de courbes présentées sur la figure III.11

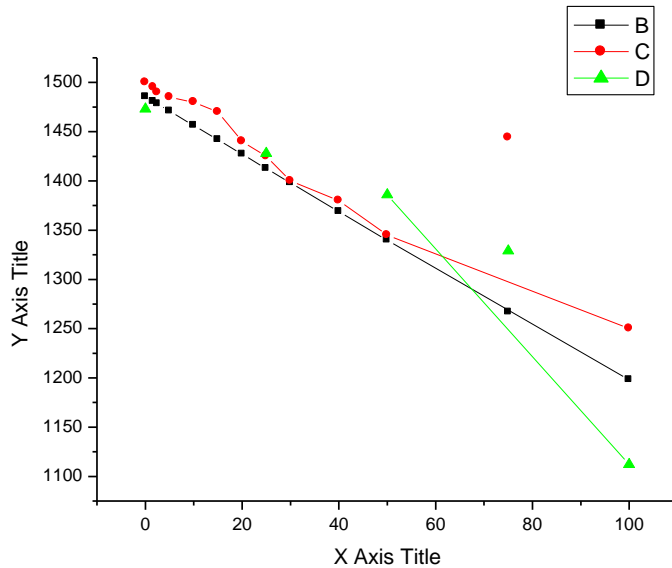


Figure III.11: Présentation de la vitesse acoustique en fonction de la concentration de l'éthanol.

Le comportement de la vitesse acoustique en fonction de la concentration, obtenu par les trois méthodes (la notre, celle de la] et celle de la confirme réellement qu'il est non linéaire (contrairement à celui obtenu par la relation présentée par la référence [KIRTI, 2008] où ce comportement est linéaire.

A la lumière des résultats trouvés par les auteurs, on voit clairement que leurs résultats sont en accord avec les nôtres. Ceci nous a donné une sorte de validation de nos résultats obtenus par la technique acousto-optique et nous a encouragés à poursuivre dans cet axe pour étudier d'autres agents polluants tel que l'acétone et le sel, dans les prochaines étapes de ce travail.

III.3.1.3. Influence de la concentration de l'éthanol dans l'eau distillée sur l'indice de réfraction de la solution.

Comme l'indice de réfraction de toute substance est très sensible à tout changement de concentration, de pression ou de température (chapitre II). On va dans ce qui suit utiliser cette particularité pour voir l'effet de la concentration de l'éthanol dans l'eau distillée sur l'indice de réfraction du mélange. Comme moyen de mesure, on a utilisé le réfractomètre d'Abbé pour déterminer l'indice de réfraction n pour chaque concentration de l'éthanol. Le but de cette étude est de confirmer la prédiction présentée par la référence [KIRTI, 2008]. Cette variation est vérifiée théoriquement par calcul en utilisant les relations de Richardson

$$n_{12} = c_1 n_1 + c_2 n_2 \quad (\text{II.38})$$

Avec : $c_2 = 100 - c_1$

n éthanol = 1.3615, T=22°C

Le tableau III.4 englobe tous ces résultats (mesurées et calculées)

C₁ éthanol [%]	0		1.66	2.5	5	10	15
n₁₂ selon Abbé	1.3328		1.3330	1.3334	1.3345	1.3370	1.340
n₁₂ selon la Ref. [kirti2008]	1.3328		1.33327	1.333517	1.334235	1.33567	1.33715
C₁ éthanol [%]	20	25	30	40	50	75	100
n₁₂ selon Abbé	1.3415	1.345	1.3455	1.3490	1.3540	1.3585	1.3615
n₁₂ selon la Ref. [kirti 2007]	1.33854	1.33399	1.3414	1.34428	1.34715	1.354325	1.3615

Tableau III.4: Présentant la variation de l'indice de réfraction en fonction de la concentration de l'éthanol.

Pour une meilleure vision, ces résultats sont illustrés par la figure suivante :

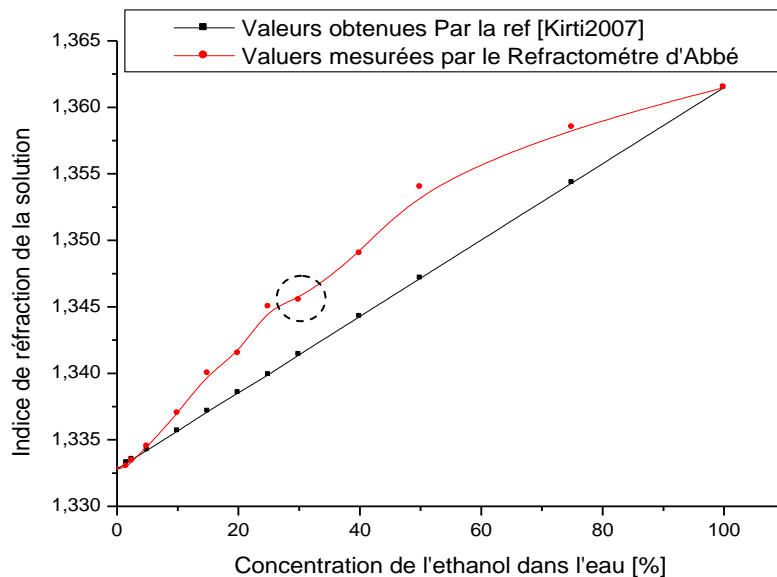


Figure III.12: Variation de l'indice de réfraction de la solution en fonction de la concentration de l'éthanol

La première constatation enregistrée dans cette courbe est que l'indice de réfraction croit avec l'augmentation de la concentration, contrairement à celle de la vitesse ou à une certaine concentration la courbe décroît figure III.8, ceci peut nous informé qu'il n'ya pas une relation linéaire entre la variation de la vitesse et celle de l'indice en fonction de la concentration.

En deuxième lieu, la différence d'indice enregistrée entre les deux courbes de la figure III-12 est maximale entre les concentrations 40 à 75% est vaut : $\Delta n = 0.0067$.

D'après ces dernières courbes, on remarque qu'il ya une déférence significative entre les valeurs mesurées et celles calculées de l'indice de réfraction par le référence [KIRTI,2008].

La linéarité de la courbe obtenue Par Kirti et al. ne tient pas compte des réactions chimiques qui se passent à l'intérieur du mélange et de ce faite, elle peut être considérée comme approximative puisque la différence maximale d'indice ne dépasse guère $\Delta n = 0.0067$.

III.3.1.4 Influence de la variation de la concentration de l'éthanol sur l'intensité des ordres diffractés :

Une autre méthode que nous proposons comme outil de control, sensible à toute variation du milieu d'interaction par un agent polluant, est l'intensité de la lumière diffractée, cette dernière d'après la relation (II-48) dépend d'un facteur connu sous le nom du facteur de mérite M_2 et qui à son tour dépend de l'indice de réfraction, de la vitesse acoustique, de la constante photo élastique et de la densité de la solution liquide, comme présenté par la relation (II-49).

III.3.1.4.1. Manipulation :

Le montage associé à cette expérience est le même que celui de l'expérience précédente (figure III.1), sauf que la camera est remplacée par un photo détecteur relié à un nano-Ampermètre pour la lecture de l'intensité du premier ordre diffracté (+1).

On fixe tout d'abord les paramètres suivants:

- La fréquence de travail utilisée appliquée sur le piézoélectrique est de 10MHz dont on mesure par un fréquencemètre.
- La perpendicularité du faisceau lumineux relativement au faisceau acoustique:
Une colonne porte émetteur muni de deux goniomètres et un mouvement de translation assure à 12 min d'angle près la perpendicularité des deux faisceaux.
Cette dernière est atteinte quand le rendement de diffraction est maximal.
- La tension d'alimentation du transducteur est fixée à 10 Volt.

III.3.1.4.2. Résultat

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau suivant :

Concentration [%]	0	1.66	2.5	5	10	15	
Intensité I_{+1} [μA]	0.099	0.0750	0.0585	0.0450	0.0322	0.019	
Concentration [%]	20	25	30	40	50	75	100
Intensité I_{+1} [μA]	0.0143	0.0099	0.0023	0.006	0.0985	0.1502	0.300

Tableau III-5: Présentant la variation de l'intensité de l'ordre +1 en fonction de la concentration de l'éthanol.

La courbe suivante illustre ces résultats

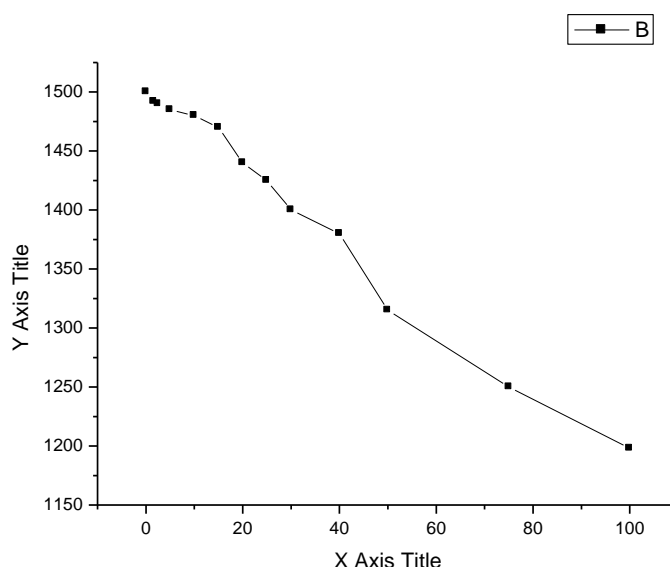


Figure III.13 : Variation de l'intensité de l'ordre diffracté en fonction de la concentration de l'éthanol.

La courbe obtenue commence par une concentration nulle, représentant l'eau distillée pure et se termine par l'éthanol pur, entre ces deux extrémités, on remarque que l'intensité décroît jusqu'à une valeur minimale de $0.0023 \mu\text{A}$ dans la plage de concentration variant de 25 à 35%

Il est à noter que le comportement de cette courbe est identique à celui enregistré sur la courbe de la figure III.8 mais en sens inverse.

Une comparaison qualitative montre que les deux courbes sont symétriques par rapport à une droite horizontale. Lorsque la concentration en éthanol augmente (plus de 40%), l'intensité augmente, ce qui s'accompagne d'une diminution de célérité, ceci s'explique aussi par le changement de proportion de formes libre et liée de l'eau.

III.3.2. Cas de l'acétone

III.3.2.1. Influence de la concentration de l'acétone dans l'eau sur la distance entre les ordres diffractés :

Comme autre produit miscible dans l'eau, on utilise cette fois-ci l'acétone comme agent polluant dont on varie la concentration. Commenant tout d'abord par la mesure de la distance entre les ordres de diffraction en fonction de cette concentration. Pour cela on réalise le même montage de la figure (III.1) mais on utilise la camera comme moyen de détection.

On fait varier la concentration entre 0% à 100%, et en mesure à chaque fois les distances entre les ordres dans le plan focal de la lentille O₃.

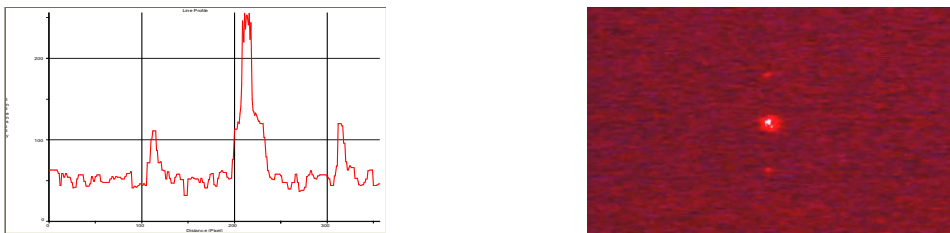


Figure. III.14.a : Profil d'intensité effectué sur l'image des ordres diffractés pour C =20%, à T=21°C.



Figure. III.14.b : Profil d'intensité effectué sur l'image des ordres diffractés pour C_{acét} 100% à T=21°C.

Les valeurs mesurées sont enregistrées dans le tableau suivant :

Concentration %	0	2.5	4	5	10	15
d (pixels)	106.5	106	105	104	102.5	102
Concentration %	20	30	40	50	70	100
d (pixels)	101.5	101		101	100	111

Tableau III.6: Présentant la variation de la distance *d* en fonction de la concentration de l'acétone

Les résultats obtenus sont présentés comme suit :

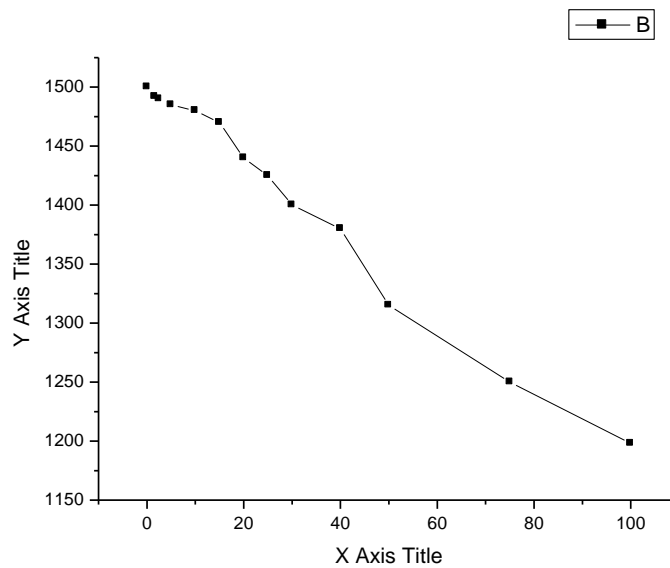


Figure III.15 : Présentation de la distance d en fonction de la concentration de l'acétone

La courbe obtenue commence par une concentration nulle, représentant l'eau distillée pure et se termine par une valeur maximale $d=145$ pixels qui représente l'acétone pur, entre ses deux valeurs, on remarque que la distance d décroît à une valeur minimale $d=101$ pixels pour une concentration variant de 30 à 50%, ceci s'explique de la même manière que précédemment, ou il ya l'apparition d'une solution homogène dont les caractéristiques sont différentes de celle de l'eau et de l'acétone. Pour qu'on puisse comparer le cas de l'acétone avec celui de l'éthanol, on préfère élaborer une courbe donnant la vitesse acoustique en fonction de la concentration de l'acétone dans l'eau. Les résultats présentés dans le tableau III.7 sont obtenus en exploitant la relation suivante :

$$V = \frac{\lambda}{d} f_3 \tag{III.4}$$

A titre de comparaison de nos résultats avec ceux de la Ref. [KIRTI 2008] dont la relation est donnée par :

$$v_{12} = c_1 v_1 + c_2 v_2 \tag{II.39}$$

Le tableau suivant englobe les valeurs obtenues :

C [%]	0	2	4	5	10	15	20	30	40	50	75	100
V [m/s] pratique	1500	1485	1485	1480	1470	1550	1448	1430		1374	1300	1171
V₁₂ [m/s]	1485	1480	1477	1469	1454	1438	1422	1391	1360	1328	1265	1171

Tableau III.7 : Présentant la variation de la vitesse acoustique on fonction de la concentration de l'acétone dans l'eau.

Les Courbes présentant ces valeurs sont données par la figure III.16

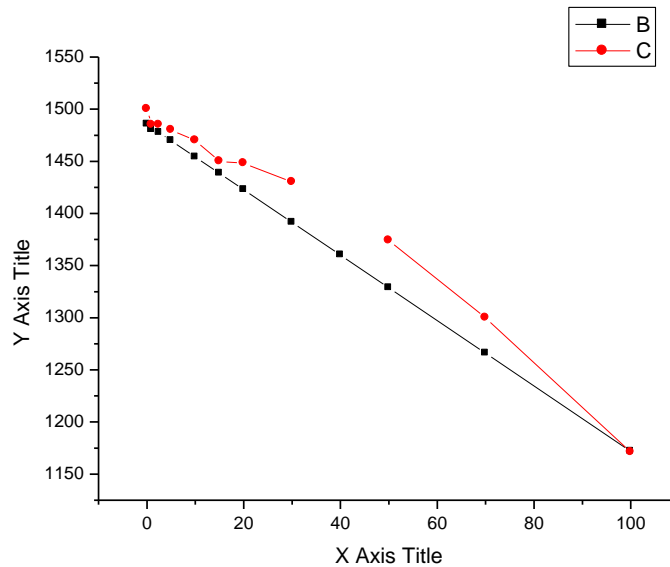


Figure III.16: Présentation de la variation de la vitesse acoustique en fonction de la concentration

- L'introduction de l'acétone (C_3H_6O) commence par diminuer la compressibilité en favorisant des liaisons plus fortes. Pour les faibles concentrations, l'association de l'acétone avec l'eau stabilise l'association des molécules d'eau entre-elles. Cette dernière possède une raideur plus importante qui implique une augmentation de célérité.

Les pressions nécessaires à l'apparition d'effets non-linéaires sont donc plus élevées et le coefficient de non-linéarité diminue. Lorsque la concentration en acétone augmente, l'équilibre se déplace en faveur des liaisons qui sont moins raides, ce qui s'accompagne d'une diminution de célérité qu'on peut expliquer par le changement de proportion de formes libre et liée de l'eau.

-Le comportement de la vitesse acoustique en fonction de la concentration, obtenu par les trois méthodes, confirme réellement qui est non linéaire, contrairement à celui obtenu par la relation présentée par la référence [KIRTI, 2008] qui prédit que cette variation est linéaire.

-Pour le cas du contrôle de la pollution de l'eau au moyen de la vitesse acoustique, on peut constater ce qui suit : Comme la courbe présentée sur la figure III.16 présente un extremum maximum, donc on remarque qu'il ya un intervalle de concentration variant de [0% 100%] pour le quel deux concentrations différentes correspondent à une même vitesse, à titre d'exemple pour la même vitesse acoustique $V = 1485\text{m/s}$ correspondent deux concentrations différentes 0% et 100%

qui correspond respectivement à l'eau pure et l'eau polluée à 100% d'acétone. Pour cette raison il est nécessaire d'ajouter un autre contrôle complémentaire pour mieux apprécier la pollution de l'eau. Le meilleur moyen optique qu'on propose et le contrôle de l'indice de réfraction de la solution échantillon.

III.3.2.2. Influence de la concentration de l'acétone dans l'eau sur l'indice de réfraction du mélange

Comme l'indice de réfraction de toute substance est très sensible à tout changement de concentration, de pression ou de température. On va dans ce qui suit utiliser cette particularité pour voir l'effet de la concentration de l'acétone dans l'eau distillée sur l'indice de réfraction du mélange. Des mesures au moyen du réfractomètre d'Abbé ont été élaborées pour chaque concentration de l'acétone

Les mesures obtenues et ceux données par la référence [KIRTI 2008] sont présentés dans le tableau III.8

$$n_{12} = c_1 n_1 + c_2 n_2 \quad (II.39)$$

Avec :

$$c_2 = 100 - c_1$$

$$n_{\text{actéon}} = 1.3576 \quad T=22^\circ\text{C}$$

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau comme suit :

C₁ acétone [%]	0	1.66	2.5	5	10	15
n₁₂ selon la Ref. [kirti2007]	1.3328	1.3331	1.3339	1.3339	1.3351	1.3363
C₁ acétone [%]	20	30	40	50	70	100
n₁₂ selon Abbé						
n₁₂ selon la Ref. [kirti 2007]	1.3376	1.3399	1.3423	1.3447	1.3499	1.3575

Tableau III.8: Présentant la variation de l'indice de réfraction en fonction de la variation de la concentration d'acétone

La courbe présentant ces valeurs est donnée comme suit :

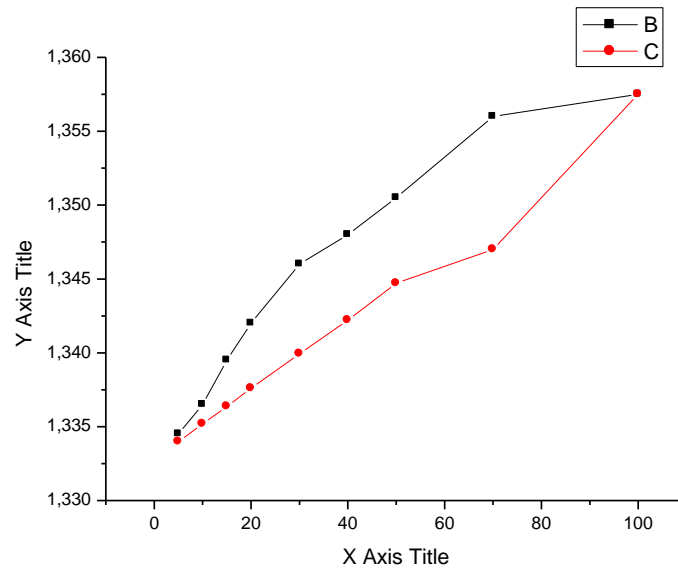


Figure III-17 : Variation de l'indice de réfraction d'une eau polluée par l'acétone en fonction de la concentration de l'acétone.

La première constatation est que: la courbe obtenue pour le mélange de l'eau avec l'acétone est qualitativement identique à celle obtenue pour le cas de l'éthanol avec l'eau, en d'autres termes l'indice augmente avec l'augmentation de la concentration de l'acétone jusqu'à un extremum maximum, où la courbe tend à devenir constante; c'est l'acétone pure. Contrairement à celle de la vitesse où à une certaine concentration la courbe décroît (Figure III.16), ceci peut nous renseigner sur la relation non linéaire qui existe entre la variation de la vitesse et celle de l'indice en fonction de la concentration.

La courbe obtenue est en accord avec un résultat obtenu par la référence [VAN AUBEL 1895] dont on peut présenter par la figure III.17 où l'auteur présente dans la même figure les courbes de densité et d'indice de réfraction.

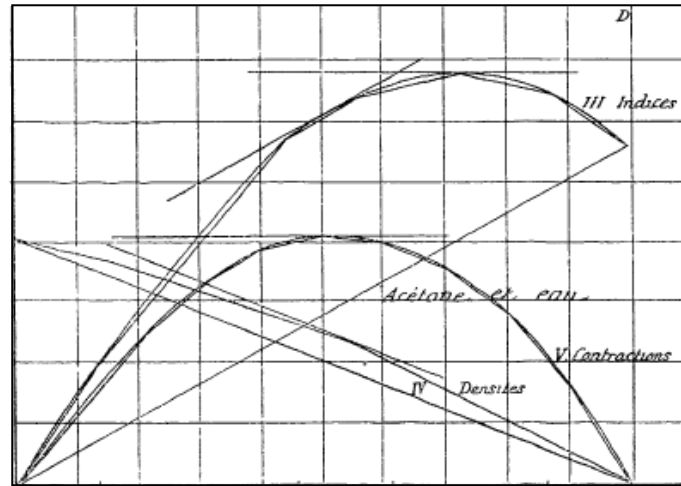


Figure III.18 : Courbe tirée de la référence [VAN AUBEL 1895], présentant la variation de l'indice de réfraction d'une eau polluée par l'acétone en fonction de la concentration de l'acétone

Les droites en pointillées présentées sur la figure III.17 représentent la pente de variation de l'indice en fonction de la concentration, la variation est plus importante au début qu'à la fin ou la courbe tend à devenir constante

Un autre point important est celui présenté par un cercle en pointillé sur les deux courbes des figures III-12 et III-17, où la courbe de l'indice dans ces points subit une certaine déviation par rapport à l'allure globale. L'indice en ces deux points correspond à des concentrations pour lesquelles les vitesses acoustiques sont maximales.

De la même manière que pour l'éthanol, la courbe présentée en noir est celle de la Ref. [KIRTI, 2008], est linéaire, par analogie avec l'éthanol, cette linéarité ne tient pas en compte de l'effet des réactions chimiques qui donnent naissance à un autre composé de nature différentes de celle de l'eau et de l'acétone.

III.3.2.3. Influence de la concentration de l'acétone sur l'intensité des ordres diffractés :

Le montage associé à cette expérience est le même que celui de l'expérience précédente, sauf que la camera est remplacée par un photo-détecteur qui transforme l'intensité lumineuse des ordres diffractés en une variation d'intensité électrique, mesurée par un Nano-Ampèremètre.

Avant de commencer les mesures, on fixe tout d'abord la fréquence acoustique à 10MHz, en deuxième lieu, on s'assure de la perpendicularité du faisceau ultrasonore et celui lumineux. Cette perpendicularité est atteinte quand le rendement de diffraction est maximal.

Pour chaque concentration on prélève l'intensité diffractée de l'ordre +1.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau comme suit :

Concentration [%]	0	3	8	9	10	15
Intensité [μA]	0.11	0.09	0.0728	0.0628	0.0465	0.0018
Concentration [%]	20	30	40	50	92	100
Intensité [μA]	0.006	0.0025	0.00	0.0013	0.009	0.42

Tableau III-9: Présentant la variation de l'intensité des ordres en fonction de la concentration d'acétone.

Les résultats obtenus sont illustrés par la figure III.19:

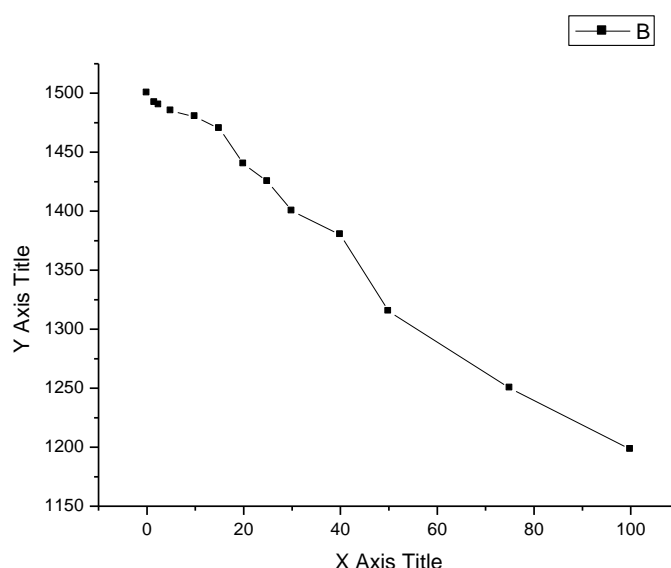


Figure III-19 : Variation de l'intensité de l'ordre diffracté en fonction de la concentration de l'acétone dans l'eau distillée.

De la même manière que pour l'éthanol, la courbe pour le cas de l'acétone commence par une concentration nulle, représentant l'eau distillée et se termine par l'acétone pure, l'ajout de l'acétone dans l'eau influence la transparence de la solution ce qui augmente la diffusion de la lumière et réduit par la suite le rendement de diffraction, la transparence se dégrade de plus en plus jusqu'à une valeur de 50% (voir figure III.20) où l'intensité diffractée atteint sa valeur minimale de $0.00 \mu\text{A}$, au-delà de cette valeur, la transparence s'améliore jusqu'à la valeur de 100% ou la solution devient de l'acétone pure. Ceci s'explique aussi par le changement de proportion de formes libre et liée de l'eau



Transparence dégradée



Transparence améliorée

Figure III.20. Présentant la dégradation de la transparence en fonction de la concentration

Ce comportement de l'intensité diffractée ne s'explique pas uniquement par le phénomène de diffusion causé par la dégradation de la transparence, mais aussi, par le changement du facteur de mérite M_2 qui est dû au changement de la vitesse acoustique (figure III.16.), de l'indice de réfraction de la solution (figure III.17), de la densité du milieu et de la constante photo-élastique (cette dernière est étroitement liée à l'indice de réfraction et la contrainte de pression appliquée par le transducteur [SAPRIEL 1972]).

Une autre remarque qu'on peut tirer de cette courbe est sa symétrie par rapport à celle obtenue pour la vitesse acoustique de la figure III.16. Une comparaison qualitative montre que les deux courbes sont symétriques par rapport à une droite horizontale.

Concernant l'utilisation de l'intensité diffractée comme moyen de contrôle de la pollution, il est clair que la sensibilité de la méthode à un changement de concentration est faible dans la plage [0 55%], mais elle meilleure dans la plage [0 100%].

III.3.3. Cas du sel

Après avoir testé deux liquides qui sont miscibles dans l'eau, on va dans ce qui suit testé un solide soluble dans l'eau ; le sel à titre d'exemple et pour lequel on varie la concentration pour voir son effet sur la vitesse acoustique et l'intensité de la lumière diffractée.

III.3.3.1. Influence de la concentration du sel dans l'eau sur la distance entre les ordres diffractés :

Le montage utilisé est identique à celui utilisé pour les autres expériences, sauf que cette fois-ci on utilise une caméra CCD, pour observer et mesurer la distance entre l'ordre central et l'ordre +1. La même méthode de mesure basée sur l'utilisation d'un logiciel de traitement d'image (Image Pro Plus) a été adoptée

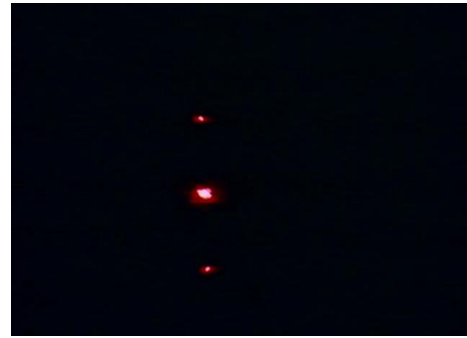
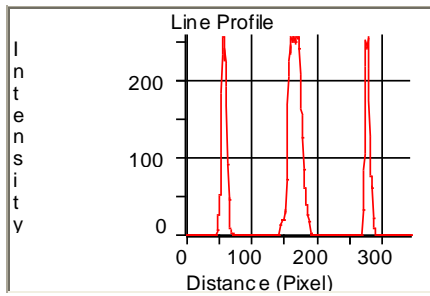


Figure III.21.a : Profil d'intensité effectué sur l'image des ordres diffractés pour une concentration nulle (eau distillée pure) à une température T21°C, distance mesurée d=109.5 Pixel

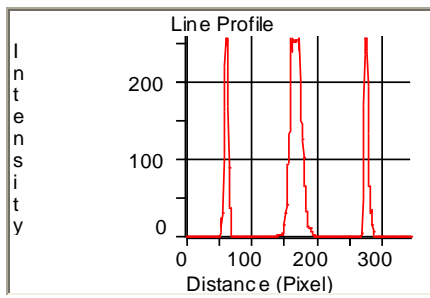


Figure III.21.b : Profil d'intensité effectué sur l'image des ordres diffractés pour une concentration C= 33% (eau distillée pure) à une température T21°C, distance mesurée d=106.5 Pixel

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau comme suit :

Concentration (%)	0	3	8	16	25	33
Vitesse acoustique (m/s)	1517	1500	1531	1538	1512	1529

Tableau III-10: Présentant la variation de la distance et la vitesse acoustique en fonction de la concentration du sel.

Et elle sont illustrés par les figures suivantes :

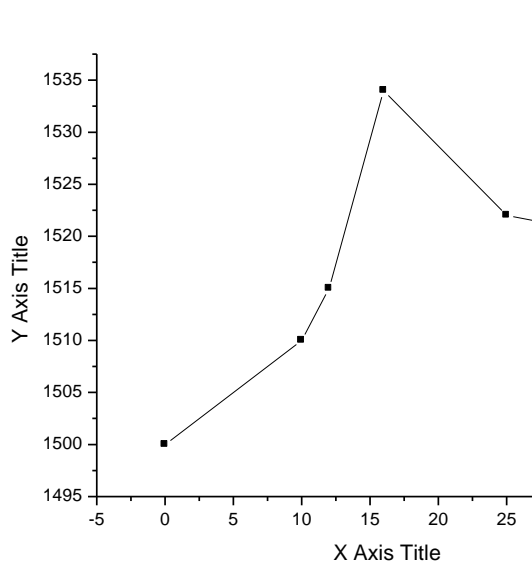


Figure III.22 : Effet de la variation de la concentration du sel dans l'eau sur la fréquence spatiale.

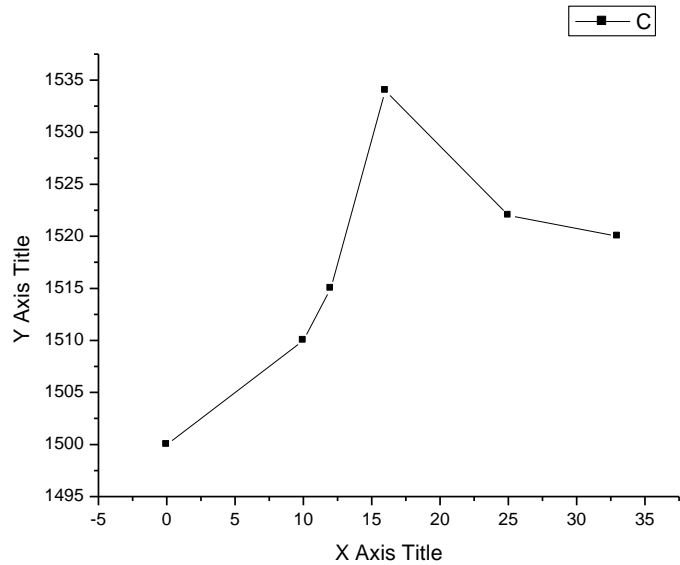


Figure III.23 : Effet de la concentration du sel dans l'eau sur la vitesse des ondes ultrasonores dans cette solution

D'après la littérature [POMPIDOU, 2002] la présence du sel dans l'eau modifie certaines propriétés (densité, compressibilité, point de congélation, température du maximum de densité, conductivité, pression osmotique), d'autres paramètres tels que (viscosité, absorption de la lumière) ne sont pas influencés de manière significative. L'eau salée est plus dense que l'eau claire, les molécules de sel vont alors intégrer l'espace des molécules d'eau.

Pour les courbes obtenues, on montre que la vitesse acoustique est aussi influencée par la variation de la concentration du sel, ce qui lui confère d'être utilisé comme un capteur de variation de la concentration.

La courbe est pratiquement linéaire croissante, elle présente une pente approximative de 1.3, donc pour une variation d'une concentration Δc lui correspond une variation de la vitesse acoustique : $\Delta V_a = 1.3 \times \Delta c$, le facteur de sensibilité est donc modéré.

III.3.3.2. Influence de la concentration du sel sur l'intensité de l'ordre diffraction

Dans ce qui suit, on va voir l'effet de la concentration du sel dans l'eau, sur le rendement de diffraction de la lumière incidente.

Le contrôle de l'influence de la concentration du sel dans l'eau est effectué en utilisant un nano Ampère-mètre comme il a été déjà mentionné dans les expériences précédentes.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau III.11 et illustrés sur la figure III.24:

Concentration (g/l)	0	3.33	8.33	16.66	25	33.33
Intensité (μA)	0.39	0.42	0.45	0.5	0.56	0.58

Tableau III.11 : Intensité en fonction de la concentration

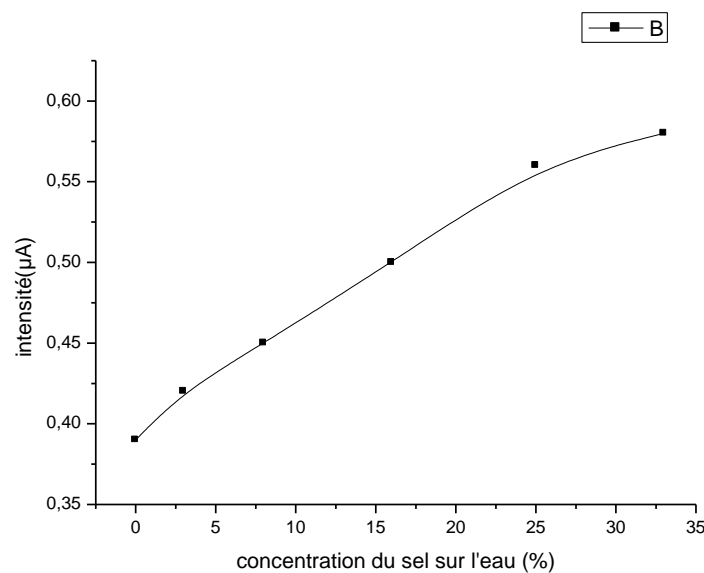


Figure III.24: Variation de l'intensité diffractée en fonction de la concentration du sel.

La même remarque peut être tirée de cette courbe, est que le rendement de diffraction est influencé par le changement de concentration du sel.

Ce changement est la conséquence de la variation de la vitesse acoustique, de la densité, de l'indice de réfraction et de la constante photoélastique qui sont tous regroupés dans le facteur M_2

On voit bien sur cette figure l'effet de la variation de la concentration du sel sur l'intensité. La courbe présente une forme linéaire, elle commence par l'eau distillée avec une valeur d'intensité minimale et se termine par une valeur maximale donc les molécules de sel intègrent les molécules d'eau.

III.3.4. Cas de l'eau de Barrage

Pour concrétiser notre étude faite sur des liquides miscibles et un solide soluble, on va dans ce qui suit poursuivre notre étude sur une eau qu'on a ramenée du barrage de Ain Zada.

Le principe consiste à appliquer le même raisonnement déjà effectué sur des échantillons d'eau prisent de la station de Ain Zada pour différentes étapes de traitement, en commençant par l'eau brute et en termine par l'eau traitée.

III.3.4.1 Influence de l'eau de barrage sur la distance entre les ordres diffractés

Dans cette expérience, on va procéder de la même manière que précédemment (la figure.III.1) pour voir l'effet de la nature de l'eau (Brute.....Traitée) sur la fréquence spatiale des ordres diffractés. Les résultats obtenus sont présentés sur le tableau suivant :

Eau (ml ³)	distillée	Brute	décanté	Filtrée	traitée
T=17,6,	107	106.5	106	105.5	105

Tableau III.12 : Présentant la variation de la distance entre l'ordre central et l'ordre +1 en fonction de la nature de l'eau prise du barrage

Les résultats sont illustrés comme suit

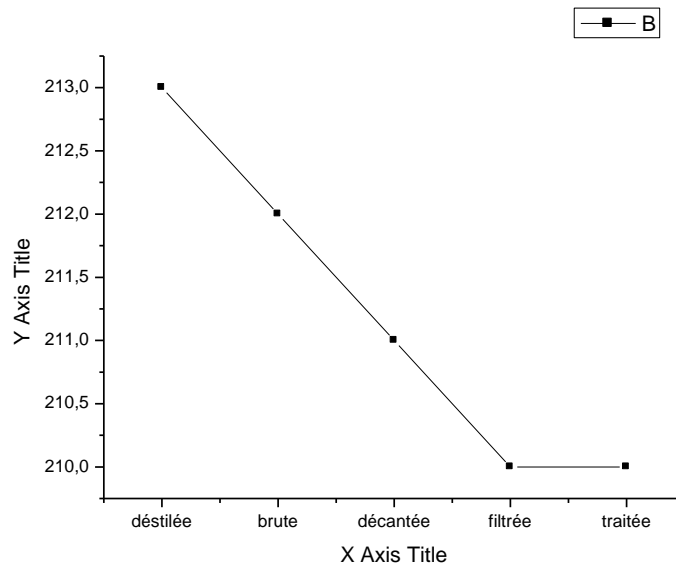


Figure III.25 : Présentant la variation de la distance d en fonction des différentes eaux de barrage

Il est clair de la courbe obtenue que la fréquence spatiale des ordres diffractés, est insensible au changement de la nature l'eau

Pour plus de confirmation, on a essayé avec le réfractomètre d'Abbé pour voir si l'indice de réfraction est sensible au changement du liquide ou non.

Les valeurs mesurées sont enregistrées dans le tableau comme suit :

Eau [ml ³]	Distillée	Brute	Décantée	Filtrée	Traitée
Indice de réfraction	1.3328	1.3329	1.3330	1.3331	1.3332

Tableau.III.13 Effet du changement de la nature de l'eau sur l'indice de réfraction

Les résultats obtenus sont présentés par la courbe ci-dessous :

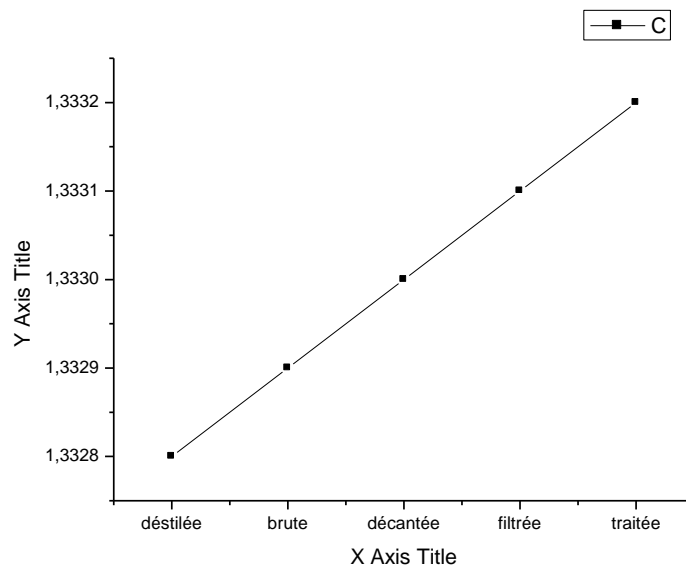


Figure III.26: Présentant la variation de l'indice de réfraction des différentes eaux de barrage

On voit bien que l'indice de réfraction des différentes solutions est le même. En conclusion les différents échantillons (distillée, brute, décantée...) présentent le même comportement chimique.

III.3.4.2 Effet des différents liquides sur l'intensité diffractée

Dans ce qui suit, on va voir l'effet du changement du liquide sur l'intensité diffractée, le même montage utilisé précédemment a été adopté (figure .III.1)

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau III.14 et illustrés par la figure III.27

Eau (ml ³)	Distillée	Brute	Décantée	Filtrée	Traitée
Intensité d'ordre +1 (µA)	0,41	0,385	0,392	0,400	0,398

Tableau III.14: Présentant la variation de l'intensité d'ordre +1 on fonction variation de eau de barrage.

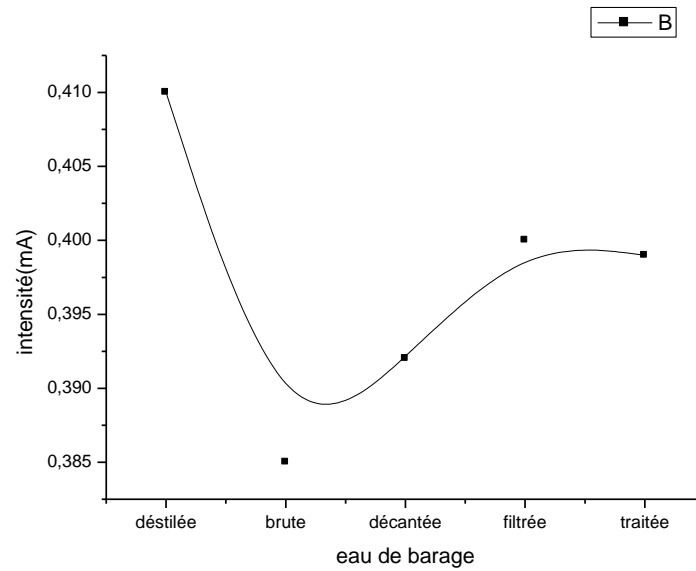


Figure III.27: Présentant la variation de l'intensité en fonction des différentes eaux de barrage

On voit bien de la courbe obtenue que l'intensité diffractée est meilleure pour l'eau distillée est médiocre pour l'eau brute et elle commence à s'améliorer à partir de l'eau décantée jusqu'à atteindre une valeur stable pour l'eau filtrée et l'eau traitée.

Tout ce comportement s'explique par la présence des micros particules qui causent un effet de diffusion et réduit par la suite la lumière diffractée, captée par le photodétecteur. L'élimination de ces particules par les opérations de décantation et de filtrage améliore l'intensité lumineuse diffractée. Le facteur de qualité M_2 est pratiquement le même puisque la vitesse acoustique et l'indice de réfraction sont insensibles.

Conclusion Général :

Ce travail, riche en contenu, nous a permis d'approfondir nos connaissances théoriques et expérimentales sur l'un des sujets qui constituent un défi mondial à ce jour : le contrôle de la pollution de l'eau.

Nous avons développée une technique basée sur l'interaction acousto-optique pour le contrôle des eaux polluées par trois agents polluants : l'Acétone, l'Ethanol qui sont miscibles dans l'eau et le sel, un solide soluble dans l'eau. Pour une concrétisation, nous avons appliqué cette technique également pour contrôler une eau venant du barrage de Ain zada, les résultats obtenues démontrent que :

Si il ya une réaction chimique (réaction qui dégage la température) entre l'eau et les polluants, ce sont l'indice de réfraction et la vitesse acoustique qui changent. Cette dernière change de manière non linéaire, chose qui a été confirmée par d'autres travaux utilisant d'autres techniques de mesures.

Pour une même concentration de l'acétone ou de l'éthanol dans l'eau, les changements de la vitesse acoustique et de l'indice de réfraction ne sont pas les mêmes.

Le contrôle de la pollution des liquides en utilisant la vitesse acoustique est intéressant pour des concentrations supérieure à % 60 : cas de l'éthanol à titre d'exemple. Au dessous de cette pourcentage on retrouve des solutions de concentrations différentes qui présentent la même vitesse acoustique, chose par laquelle on ne peut pas décidé de la qualité de l'eau.

Dans le contexte toujours de la méthode acousto-optique, nous avons la possibilité aussi d'utiliser une autre technique basée sur la mesure de l'intensité lumineuse de l'ordre de diffraction +1. Les résultats obtenues par cette méthode sont en accord avec ceux obtenues par la mesure de la vitesse acoustique, les deux courbes sont symétriques par rapport à une droite horizontale.

S'il ya interaction entre les polluants et l'eau sans dégagement de la température ; cas des sels NaCl à titre d'exemple, le contrôle par mesure de la vitesse acoustique et l'intensité de la lumière diffractée par voie acousto-optique est intéressant vu que le comportement de ces deux paramètres est linéaire en fonction de la concentration.

S'il y a une pollution physique sans réaction chimique, l'indice de réfraction et la vitesse acoustique ne changent pas. Uniquement l'intensité de la lumière diffractée est sensible à cette turbidité.

Vu l'importance primordiale que constitue le contrôle de l'eau potable, nous espérons que l'intégration de la science de l'optique (interaction acousto-optique) dans ce domaine, ouvre des grandes perspectives sur le plan qualité/pureté de l'eau potable.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances théoriques et expérimentales sur l'un des sujets qui constituent un défi mondial à ce jour : le contrôle de la pollution de l'eau.

Nous avons développée une technique basée sur l'interaction acousto-optique pour le contrôle des eaux polluées par trois agents polluants : l'Acétone, l'Ethanol qui sont miscibles dans l'eau et le sel, un solide soluble dans l'eau. Pour une concrétisation, nous avons appliqué cette technique également pour contrôler une eau venant du barrage de Ain zada, les résultats obtenues démontrent que :

Le cas d'une réaction chimique (réaction qui dégage la température) entre l'eau et les polluants, ce sont l'indice de réfraction et la vitesse acoustique qui changent. Cette dernière change de manière non linéaire, chose qui a été confirmée par d'autres travaux utilisant d'autres techniques de mesures [JACOB 2006]. [LAURENT ALLIES, 1999].

En fonction de la concentration de l'acétone ou de l'éthanol dans l'eau, les variations de la vitesse acoustique et de l'indice de réfraction se comportent différemment.

Le contrôle de la pollution des liquides en utilisant la vitesse acoustique est intéressant pour des concentrations supérieures à % 60 : cas de l'éthanol à titre d'exemple. Au-dessous de ce pourcentage on retrouve des solutions de concentrations différentes qui présentent la même vitesse acoustique, chose par laquelle on ne peut pas décider de la qualité de l'eau.

Dans le même contexte de la méthode acousto-optique, nous avons la possibilité d'exploiter la mesure de l'intensité lumineuse des ordres de diffraction ∓ 1 . Les résultats obtenus par cette méthode sont en accord avec ceux obtenus par la mesure de la vitesse acoustique, les deux courbes sont symétriques par rapport à une droite horizontale.

Si l'interaction entre les polluants et l'eau s'effectue sans dégagement de température ; cas des sels NaCl à titre d'exemple, le contrôle par mesure de la vitesse acoustique et l'intensité de la lumière diffractée est intéressant vu que le comportement de ces deux paramètres est linéaire en fonction de la concentration.

Dans le cas d'une pollution physique sans réaction chimique, l'indice de réfraction et la vitesse acoustique ne subissent aucune variation, par contre l'intensité lumineuse diffractée est sensible à la turbidité.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [**Agard, 1988**] AGARD, Techniques of Flow Visualization, AG-302, p 42, 1988.
- [**Amélie Marchal, 2000**], Amélie Marchal, doctorant, Relations entre caractéristiques de la pollution particulaire et paramètres optiques dans les eaux résiduaires urbaines. L'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2000.
- [**Arkin , 1994**] Arkin H., Xu X; Holmes K.R., Recent Developments in Modeling Heat Transfer in Blood Perfused Tissue, IEEE Trans. Bio. Eng., vol. 41, pp. 97-107, 1994.
- [**Balland, 2007**] Optique géométrique : Imagerie et instruments, Ed.ppurpresses plytechniques, pp 57-58,2007.
- [**Banks, 1966**] Banks B, Gordon E et Rawding H, :la détection ultrasonique des défauts dans les matériaux, Paris 1966.
- [**Bell, 1881**] A.G. Bell : Upon the production of sound by radiant energy. Philiso. Mag., 11(5):510– 528, 1881.
- [**Benenson, 2000**] W.BENENSON, J.W.HARRIS, H.STOCKER, H.LUTZ, Handbook of physics,4eme edition, Horst Stocker, p 345, 2000.
- [**Bridgman.1935**], P.W.Bridgman. theoretically interesting aspects of high pressure phenomena. Review of Modern physics ,7(1),pp.1-33,1935.
- [**Brillouin, 1922**] L. Brillouin : Diffusion de la lumière et des rayons X par un corps transparent homogène, influence de l'agitation thermique. Ann. Phys., 17:88–122, 1922.
- [**Brown et Goodman, 1971**] Brown B et Goodman, J.E :ultrasons de haute intensité. Applications Industrielles, Ed Dunod,Paris1971.
- [**Cardot, 1999**], CARDOT C, Les traitements de l'eau. Procédés physico-chimiques et biologiques, Ellipses Edition Marketing S.A., 1999.
- [**Cetim, 1989**] CETIM - Télémètres ultrasonores, 75 pages, 1989.
- [**Chen, 1994**]. Chen, Q.X. et Payne P.A., «Industrial applications of piezoelectric polymer transducers » December 1994.

[Curie, 1880] Curie J., Curie P., Sur l'électricité polaire dans les cristaux hémiédries à faces inclinées, C. R. Séances Acad. Sci., Paris, pp. 91-294, 1880.

[Despretz, 1837] César-Mansuète Despretz, Traité élémentaire de physique, Edition 4, Méquignon-Marvis, p 224, 1837.

[Dognon, 1953] Dognon A : les ultrasons et leurs applications, presses universitaires de France, Paris 1953.

[Ferria, 2011] Ferria K, Laouar N, Bouadja, N Acousto-optics methods for liquids refractometry . Optica applicata, Vol 41 N°1, 2011.

[Fiedler, 1990] Fiedler O., Kruse K., Sievert M., Luschnitz T. - Ultraschall Distanzsensoren unter hoher Störschallbelastung - Technisches Messen, pp. 207-210, Mai 1990.

[Fink, 1992] M. Fink. Time reversal of ultrasonic fields – Part 1 : Basic principles. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr., 39(5) pp. 555–566, septembre 1992.

[Firestone, 1946] F. A. Firestone: The supersonic reflect scope, an instrument for inspecting the interior of solid parts by means of sound waves. J. Acoust. Soc. Am., 17(3):287–299, 1946.

[Frost, 1997], FROST M., HUBER E., Mesure en continu de la turbidité, L'Eau, L'Industrie, Les Nuisances, No 206, pp. 42-45, 1997,

[Galton, 1883] F. Galton: Hydrogen whistles. Nature, 27:491–492, 1883.

[Hach, 1984] .C., Turbidity Standards, Hach Company, 1984,

[Hadj-Sadok, 1999], HADJ-SADOK, Z., K., Modélisation et estimation dans les bioréacteurs ; prise en compte des incertitudes : application au traitement de l'eau. Thèse de Doctorat de l'Université de Nice – Sophia Antipolis, Nice, France, 1999

[Handt Bisseck, 1995] I. Handt Bisseck, Fondements physiques de la météorologie dynamique, Karthala éditions, p 35, 1995.

[Héctor, 2006], Héctor Ricardo , Supervision et diagnostic des procédés de production d'eau potable, Thèse Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse 2006.

[Hespel, 2007] C.HESPEL, Extension de l'anémométrie phase doppler à la mesure d'indice de réfraction et développement de la vélocimétrie laser par corrélation, thèse de doctorat, Université de Rouen, pp59-61,2007.

[Hickling, 1986]. Hickling R., Marin S. - The use of ultrasonics for gauging and proximity sensing in air - Journal of Acoust. Soc. Amr., Vol 79, No 4, pp. 1151-1160. 1986.

[Jacques, 2003], jacques le coarer, Chimie le minimum à savoir autoformation, EDP Sciences. France,. ISBN 2-86883-636-4, 2003.

[Jakobi, 2006] Xavier JACOB , Applications de l'interaction d'ondes élastiques à la mesure des propriétés non-linéaires des matériaux et `a la caractérisation de champs de pression. Thèse doctorat. l'universite de paris 7 France. 2006.

[Jessel, 1973] M.jessel, acoustique théorique propagation et holophonie ,1973.

[Kassim, 2005], Kassim Coulibaly ; Etude de la qualité physico chimique et bactériologique de l'eau des puits de certains quartiers du district de bamako. Faculté de médecine de pharmacie thèse doctorat d'état 2005.

[Kettab, 1992],Docteur A.KETTAB, traitement des eaux, office des publications universitaires Alger,1992.

[Kirti, 2008],Kirti .S, Kasana. RS. Optics and lasers in Engineering 46(2008) 6-11

[Lambert, 1979] Lambert E. - Qualification et définition des transducteurs ultrasonores utilisés en contrôle non destructif - Mécanique, Matériaux, Electricité, pp. 191-200. Mai 1979.

[Laurent ALLIES, 1999] Laurent ALLIES, étude des phénomènes de non-linéarités ultrasonores : Analyse théorique et expérimentale de systèmes de mesure du paramètre B/A par la méthode d'amplitude finie. Thèse de doctorat octeur de l'Université Henri Poincaré - Nancy I,1999.

[Lavoisier, 1989], Lavoisier, Degré mont Mémento technique de l'eau : Tome 1, Lavoisier - Technique et documentation, Paris, 1989.

[Lee, 1968] R. E. Lee et R. M. White: Excitation of surface elastic waves by transient surface heating. Appl. Phys. Lett., 12(1):12-14, 1968.

[Lenain, 1989]. Lenain J.C. - Les critères de choix d'un capteur d'émission acoustique - Pratique de contrôle industriel, , No 133, pp. 63-67,1989.

[Leroy, 1969]. Leroy, C. Development of simple equations for accurate and more realistic calculation of the speed of sound in sea water. Journal of the Acoustical Society of America 46: 216. 1969.

[Lind, 1995], Lind C. A coagulant road map, Public Works, 36-38, March 1995.

[Lind, Nov.1994], Lind C., Coagulation Control and Optimization: Part two, Public Works, 32-33, November, 1994.

[Lind,Oct.1994], Lind C., Coagulation Control and Optimization: Part one, Public Works, 56-57, October, 1994..

[Lyamshev ,1983] L. M. Lyamshev et B. I. Chelnokov : Sound generation in a solid by penetrating radiation. Sov. Phys. Acoust., 29(3):220–225, 1983.

[MacKenzie, 1981] Mackenzie, K. V.. Nine-term equation for sound speed in the oceans. Journal of the Acoustical Society of America 70: 807, 1981.

[Maiman, 1960] T. H. Maiman :Stimulated optical radiation in ruby. Nature, 187:493–494, 1960.

[Medwin,. 1975] Medwin, Herman.. Speed of sound in water for realistic parameters. Journal of the Acoustical Society of America 58: 1318,1975

[Messadi, 1992], D.MESSADI, Etude et application de quelques electrodes ioniques au contrôle de et application de quelques électrodes ioniques spécifiques au contrôle de la pollution des eaux, université de Annaba office des publication universitaires Alger1992

[Micheron, 1981] Micheron F. - Vers une nouvelle génération de capteurs grâce aux polymères piézo-électriques - Mesures, pp. 73-85,. Novembre ,1981.

[Nemoto, 1992] S.NEMOTO, Measurement of the refractive index of liquid using laser beam displacement, Applied optics, Vol .31, No.31, pp 6690-6692, 1992.

[perdijon,1981] , .perdijon l'échographie, bordas, paris 1981.,

[Poguet , 2002] : J. Poguet, et O. Le Baron, et L. Gallet. Enhanced resolution transducers for thick pieces ultrasonic inspection: The Fermat transducer concept. In Proceedings of the 8 European Conference on NDT, 2002.

[Polaroid, 1983] *POLAROID* - Ultrasonic ranging system - Polaroid application note, 1983.

[Pompidou, 2002] Propriétés Physiques du Milieu Marin Institut des Sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var Avenue G. Pompidou - BP56 83162 LA VALETTE DU VAR CEDEX (<http://isitv.univ-tln.fr/~lecalve/oceano/>)

[Québec.2004], Rapport, Règlement sur la qualité de l'eau potable , Quebec.2004

[Queinnec,2000], QUEINNEC, I. Contribution à la Commande de Procédés Biotechnologiques : Application au Traitement Biologique de la Pollution. Habilitation à Diriger des Recherches, Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes, Rapport LAAS No. 00455, Toulouse, France, 2000.

[Richardson,1952]. Richardson EG, Ultrasonic physics, vol. 178. Amsterdam: Elsevier;1952,

[Riste 1983] Riste V. «Principle of Acoustic Devices». John Wiley & Sons, New York 1983.

[Rizet, 1999] Rizet N ; contrôle actif de vibration utilisant des matériaux piézo-électrique, Thèse de Doctorant de l'institut national des sciences appliquées de LYON.1999.

[Rocard, 1971] Rocard Y. - Dynamique générale des vibrations – Ed :Masson, , 460 pages. Paris 1971.

[Rodier, 1995], J. RODIER, C. BAZIN, L. RODI, l'analyse de l'eau Ed : DUNOD, 8ème édition 1995.

[Rodriguez, 2004], A. RODRIGUEZ GARCIA, étude de la congélation comme technique de traitement des eaux : Applications spécifiques Thèse Doctorat. 2004.

[Rossi, 1986] Rossi M. - Electro-acoustique - Dunod, , 561 pages, Paris 1986.

[Sadar, 1997], SADAR M.J., Nouveaux étalons de formazine prêts à l'emploi pour la mesure de turbidité, L'Eau, L'Industrie, Les Nuisances, N°204, pp. 77-82, 1997.

[Shank, 1974] C. V. Shank et E. P. Ippen : Subpicosecond kilowatt pulses from a mode-locked CW dye laser. Appl. Phys. Lett., 24(8):373–375, 1974.

[Steyer 1998], STEYER, J.P. Modélisation, Commande et Diagnostic des Procédés Biologiques de Dépollution. Habilitation à Diriger des Recherches, Laboratoire de Biotechnologie – INRA, Narbonne, France, 1998.

[**Syrota .1994**] SyrotaA : Bases physique de l'imagerie ultrasonore, N⁰ Parie onze édition H37,1994.

[**Thierrin,2001**], J. THIERRIN, P. STEFFEN , Guide pratique de l'échantillonnage des eaux souterraines , Porrentury.2001.

[**Thomsen1984**] C. Thomsen, J. Strait, Z. Vardeny, H. J. Maris, J. Tauc et J. J. Hauser : Coherent phonon generation and detection by picosecond light pulses. Phys. Rev. Lett., 53(10):989, 1984.

[**Valentin 2000**] , N.VALENTIN, Construction d'un capteur logiciel pour le contrôle automatique du procédé de coagulation en traitement d'eau potable Thèse Doctorat. 2000.

[**Valiron , 1989**], Valiron F., Gestion des Eaux : alimentation en eau assainissement, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 1989.

[**Van Aubel, 1895**] Van Aubel, les densités et les indice de réfraction des mélanges de l'aldéhyde ou de l'acetone avec l'eau, laboratoire de physique de l'université de Gand, avril 1895.

[**Victor-Hugo 2007**], **Victor-Hugo** GRISALES PALACIO , modélisation et commande floues de type takagisugeno appliquées a un bioprocédé de traitement des eaux usée, Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS, THÈSE Doctorat de l'Université Paul Sabatier - Toulouse III et l'Université de los Andes, Colombie. 22 février 2007.

[**White, 1963**] R. M. White : Generation of elastic waves by transient surface heating. J. Appl. Phys., 34(12):3559–3567, 1963.

ملخص :

تحصل معظم المجتمعات على المياه اللازمة للشرب، من المياه السطحية، كمياه الأنهار والبحيرات، وهي مياه عرضة دائماً للتلوث من مخلفات المنازل، والمزارع، والمصانع، والمستشفيات، وتزداد حدة مشاكل التلوث بازدياد عدد السكان. لهذا فان تنقية و مراقبة مياه الشرب، قبل الاستعمال تعتبر أيضاً من العمليات الضرورية لحماية المجتمع.

إن انتشار الأمواج فوق الصوتية في وسط مرن(سائل...) يحدث تغيراً في قرينة انكساره كما أن تداخلها مع الأمواج الكهرومغناطيسية يعطينا ظاهرة الانعراج.

في هذه المذكرة سنقوم بدراسة تطبيقية جديدة تعتمد على ظاهرة التداخل لمراقبة تلوث المياه.

الكلمات المفتاح : التلوث، الماء، المراقبة، فوق الصوت...

Résumé :

La plupart des sociétés s'approvisionnent en eau potable de l'eau de surface, des rivières et des lacs, d'où ses sources sont toujours vulnérables à la contamination à cause des déchets ménagers, agricoles, industriels, et hospitaliers. Les progrès technologiques de ses dernières années ont causé l'augmentation de la contamination des eaux qui est aussi le résultat direct de la démographie. Pour cette raison la purification et la surveillance de la pollution de l'eau potable est nécessaire pour protéger la communauté.

La propagation des ultrasons dans le milieu élastique (liquide ...) produit un changement dans son indice de réfraction, l'interaction avec les ondes électromagnétiques engendre le phénomène de diffraction.

Dans ce mémoire, nous avons essayé de mettre au point une nouvelle étude et des applications basées sur le phénomène de diffraction pour contrôler la pollution de l'eau.

Abstract:

Most societies of the world obtain drinking water, from surface, rivers and lakes; water is always sensitive to contamination released from houses, farms, factories and hospitals. The augmentation of contamination has a direct relation with the number of the population (demographics). For this two reasons, purification and monitoring of drinking water is necessary to protect the community before the use of water.

The propagation of ultrasound in the elastic medium (liquid ...) result in a change in its refractive index, the interaction with electromagnetic waves gives us the phenomenon of diffraction.

In this paper, we have a new research and applications based on the phenomenon of diffraction to control water pollution.

MOTS CLES : pollution, eau, contrôle, ultra son, acousto –optique,