

# TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS .....	i
RESUME.....	ii
TABLE DES MATIERES .....	iii
LISTE DES ABREVIATIONS .....	vii
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
INTRODUCTION.....	1
Chapitre 1 : GENERALITES SUR LES SOLIDES ET LES FISSURES	
1. Introduction .....	2
2. Structures des solides .....	3
2.1 Composition des matériaux	
a) Définition	
b) Cohésion dans la matière .....	4
c) Réseau cristallin	
<i>i.</i> Cristaux ioniques .....	5
<i>ii.</i> Cristaux covalents	
<i>iii.</i> Métaux	
<i>iv.</i> Cristaux moléculaires	
2.2 Propriétés des matériaux	
a) Propriétés mécaniques	
b) Propriétés thermiques .....	6
c) Propriétés électriques	
3. Notion de fissure.....	7
3.1 Les défauts	
a) Défauts ponctuels.....	8
<i>i.</i> Lacunes	
<i>ii.</i> Solutions solides	
b) Défauts d'antiphases .....	9

c) Association des défauts .....	9
d) Défauts linéaires .....	10
e) Défauts surfaciques	
f) Défauts volumiques <sup>13</sup>	
<i>i.</i> Pores	
<i>ii.</i> Précipités	
<i>iii.</i> Effet des défauts volumiques.....	11
3.2 Les fissures	
a) Déformation plastique par déplacement d'une dislocation coin	
<i>i.</i> Dislocation vis .....	12
<i>ii.</i> Dislocation mixte	

## Chapitre 2 : GENERALITES SUR LES ONDES

1. Equation d'onde .....	14
a) Vitesse de déplacement	
b) Fréquence	
c) Longueur d'onde	
d) Mode de propagation.....	15
e) Coefficient de transmission et de réflexion	
f) Principe d'incertitude de Heisenberg .....	16
2. Propriétés optiques des ondes	
a) Réflexion.....	17
b) Réfraction	
c) Absorption	
d) Interférence	
e) Diffraction.....	18
3. Relation entre grandeurs optiques et grandeurs quantiques .....	19
4. Différentes types d'ondes électromagnétiques.....	20
a) Rayons pénétrants .....	21

<i>i.</i> Les microondes .....	21
<i>ii.</i> Les térahertz .....	
b) Rayons ionisants .....	22
5. Les ondes mécaniques .....	23
a) Définition de l'ultrason .....	
b) Caractéristiques .....	
<i>i.</i> Fréquence d'oscillation .....	
<i>ii.</i> Impédance acoustique .....	
<i>iii.</i> Coefficient d'atténuation .....	
6. Utilisation des rayons X pour la détection de fissures .....	24
a) Introduction .....	
b) Propriétés des rayons X .....	
c) Utilisations .....	
d) Conclusion .....	
<i>i.</i> Méthode de détection par réflexion .....	25
<i>ii.</i> Méthode de détection par transparence .....	
<i>iii.</i> Interprétation des résultats .....	

### Chapitre 3 : DETECTION DE FISSURE DANS LES BETONS

1. Constitution matériel du béton .....	26
a) Granulats .....	
b) Ciments .....	
c) Entrefers .....	
d) Eau .....	
2. Cause des fissurations dans les bétons .....	27
3. Choix de la méthode de détection .....	
4. Principes de détection.....	28
5. Chaîne d'acquisition .....	
6. Hypothèse de calcul .....	29
7. Précision de l'appareil.....	30

8. Instrumentation .....	30
a) Alimentation .....	31
b) Générateur de fréquence	
c) CAN/CNA et unité de traitement	
<i>i.</i> CAN	
<i>ii.</i> CNA.....	32
<i>iii.</i> Unité de traitement	
d) Emetteur/récepteur .....	33
e) Unité de stockage .....	34
f) Visualisation .....	35
9. Automatisation de la détection	
a) Les rails .....	36
b) Les roulettes	
c) Le support de l'appareil .....	37
d) Les moteurs	
<i>i.</i> Réglage du déplacement	
<i>ii.</i> Chaîne de commande des trois moteurs .....	38
<i>iii.</i> Système de coordination.....	40
10. Disposition de chaque bloc .....	41
a) Bloc générateur	
b) Bloc de traitement	
c) Système de câblage .....	42
CONCLUSION.....	44
Annexe 1 : Analyse spectrale .....	45
Annexe 2 : Convertisseur de tension .....	47
Annexe 3 : Générateur de fréquence .....	48
Annexe 4 : CAN/CNA et Unité de traitement .....	49
Annexe 5 : Unité de stockage .....	52
Bibliographie .....	53

## LISTE DES ABREVIATIONS

CAN : Convertisseur analogique-numérique

CNA : Convertisseur numérique- analogique

COMP : Comparateur

C.P.U : Control processor unit

DSP : Densité spectrale de puissance

EEPROM: Electrically erasable read only memory

ESPA: Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

LED: Light Emetting Diode

RAM: Read access memory

ROM: Read only memory

Rayon T: Rayon terahertz

RAZ: Remise à zero

RX : Rayons X

THT : Très haute tension

OEM: Onde électromagnétique

OSC : Oscillateur

PIC: Programmable integrated control

UV: Rayonnement ultraviolet

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : (a) fissure de terre, (b) fissure de verre, (c) fissure de bois, (d) fissure de route goudronnée, (e) fissure de béton

Figure 1.2 : Structure de la matière

Figure 1.3: Courbe de l'énergie de liaison

Figure 1.4 : Propriétés électriques des matériaux

Figure 1.5 : Enthalpie en fonction du nombre de défaut

Figure 1.6 : Lacune : site vide du réseau

Figure 1.7 : Solution solide de substitution

Fissure 1.8 : Solution solide de substitution d'insertion

Figure 1.9 : Atomes interstitiels octaédrique et tétraédrique dans un réseau cubique centré

Figure 1.10 : Réseau cubique à faces centrés

Figure 1.11 : Défaut d'antiphase

Figure 1.12 : Défaut de SCHOTTKY

Figure 1.13 : Défaut de FRENKEL

Figure 1.14 : Pores sur une couche d'oxyde

Figure 1.15 : Déformation plastique par déplacement d'une dislocation coin

Figure 1.16 : Distorsion élastique et cœur de dislocation

Figure 1.17 : Distorsion élastique et cœur

Figure 1.18 : Vue en perspective isométrique d'une dislocation mixte

Figure 2.1 : Propagation d'onde

Figure 2.2 : Réflexion et réfraction

Figure 2.3 : Principe d'interférence

Figure 2.4 : Diffraction

Figure 2.5 : Effet Compton

Figure 2.6 : Méthode de détection de fissure par réflexion

Figure 3.1 : Principe de détection de fissure de béton

Figure 3.2 : Chaîne de détection

Figure 3.3 : Algorithme de détection

Figure 3.4 : Emetteur et récepteur de rayon X

Figure 3.5 : Schéma global du système d'asservissement du balayage

Figure 3.6 : Mécanique de l'actionneur du mouvement

Figure 3.7 : Chaîne d'acquisition de commande du déplacement

Figure 3.8 : Algorithme de déplacement

Figure 3.9 : Disposition des sous-blocs du bloc générateur

Figure 3.10 : Disposition des sous-blocs du bloc traitement

Figure A.1 : Convertisseur 220V/12V

Figure A.2 : Oscillateur quartz

Figure A.3 : Schéma de base du CAN

Figure A.4: Schéma de base du CNA

Figure A.5 : Circuit intégré de CAN et de CNA

Figure A.6 : Schéma bloc du microcontrôleur 16C84

Figure A.7 : Boitier du PIC 16C84

Figure A.8 : Brochage du 16C84

Figure A.9 : Circuit intégré de RAM



## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : Classement des rayons électromagnétiques .....	20
Tableau 2 : Dosage des bétons armés .....	26

## INTRODUCTION

La plupart des infrastructures à Madagascar ne sont pas normalisées, bien que l'Etat essaye de les régulariser afin d'éviter tout danger éventuel et pour que toutes les constructions suivent les normes exigées. Donc les dangers les plus fréquents chez nous sont l'effondrement car dès qu'une forte pluie se présente, beaucoup de maison cède et sont détruits par la même occasion. Ce n'est pas la pluie seulement mais il y en a d'autre comme les séismes, les cyclones, et autres. L'ampleur de ce problème est d'ordre national, les facteurs de risque à l'origine de ces effondrements de construction sont les présences de taux de fissuration élevé dans les bétons qui sont la base des infrastructures du génie civil : bâtiment, ponts, ...

L'électronique peut nous conduire à éclaircir beaucoup de phénomène dans le domaine de la médecine et de l'infrastructure. C'est pourquoi nous avons choisi de travailler sur le thème intitulé « Conception de Fissuromètre à Rayons X ».

Ce manuscrit est divisé en trois grands chapitres. Les généralités sur les solides et les fissures sont présentées au premier chapitre. Ensuite, le deuxième chapitre traite les généralités sur les ondes et utilisation pour la détection de fissures. Puis les applications des méthodes de détection utilisant les rayons X pour la détection de fissures dans les bétons sont présentées au troisième chapitre. Enfin la conclusion parle des résultats concernant l'étude dans le manuscrit.

## **Chapitre 1: GENERALITES SUR LES SOLIDES**

### **1. Introduction**

La *fissure* est un défaut dans un matériau solide caractérisé par une discontinuité brutale, où la matière est séparée sur une certaine surface. Elle entraîne une grande concentration de contrainte à son fond. Elle se propage sous l'effet de contraintes suffisantes (critère de Griffith) [1].

Elle est essentiellement, en pratique, le facteur limitant la résistance mécanique des matériaux fragiles tels que les verres et les céramiques. Quelques images illustrant les fissures montrées à la Fig.1.1.



**(a)**



**(b)**



**(c)**



**(d)**

*Figure 1.1 : (a) fissure de terre, (b) fissure de bois,  
(c) fissure de route goudronnée, (d) fissure de béton*

La lave jaillit sur la tête du volcan qui est appelée fissure volcanique.

En médecine, la fissure anale est une ulcération superficielle en forme de raquette (bord externe élargi) qui suit les plis radiaires de la muqueuse. Elle touche plus souvent la jeune femme. C'est une affection douloureuse de la marge anale.

Dans le sens figuré, en parlant de solution de continuité la fissure peut être représentée comme lacune dans les idées.

La fissure est donc comme [1] :

- Une petite fente.
- Une coupure qui sépare des assises de même nature.
- Une fente correspondant à une fracture sans rejet vertical.
- Une petite fêlure de l'ordre du centimètre
- Une fente rocheuse qui ne permet pas le passage d'un corps mais sert de prise ou de points d'assurage.
- Une interruption de structure dans l'espace ou dans le temps

Avant d'entamer l'étude des fissures, étudions d'abord la structure des solides.

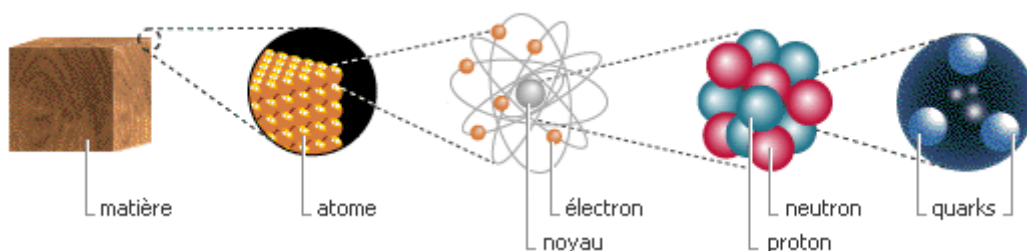
## 2. Structure des solides

### 2.1 Composition des matériaux

#### a) Définition

La matière est constituée d'une multitude de particules dites élémentaires (comme les électrons, les protons, les neutrons, les quarks, et autres). Ces particules interagissent entre elles et certaines s'associent pour former des atomes. Les atomes peuvent aussi s'assembler pour former des molécules, qui peuvent s'associer à leur tour en macromolécules et autres, le tout constituant la matière [2].

D'après Démocrite\*, « la matière est constituée d'une multitude de petits corps invisibles, indivisibles et éternels : les atomes » (Fig.1.2).



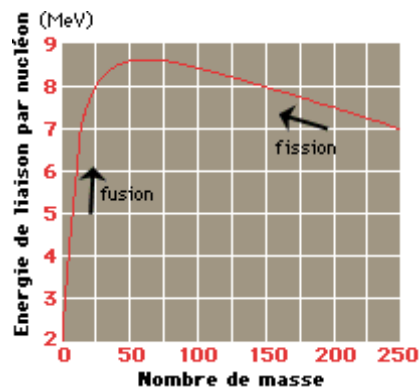
*Figure 1.2 : Structure de la matière [3]*

\*Démocrite est un savant grec né vers 460 av J.C., qui a développé la théorie atomiste de l'Univers.

D'une manière générale, l'atome est considéré comme l'unité de base pour étudier la matière.

### b) Cohésion dans la matière

Les éléments qui constituent (atomes, molécules) les états des matières sont liés entre eux par de puissantes forces appelées forces de cohésion. La cohésion dans la matière sont l'ensemble des forces d'interaction qui lient entre eux les atomes ou molécules d'un corps. La cohésion diffère de l'adhérence, qui est une interaction entre les surfaces de corps différents. La liaison des atomes est illustrée par la Fig.1.3 [2].



*Figure 1.3 : Courbe de l'énergie de liaison*

Les forces à l'origine de la cohésion des corps sont de quatre types. Dans le cas des matériaux atomiques, les atomes peuvent établir des liaisons covalentes, ioniques ou métalliques. Les matériaux moléculaires, quant à eux, assurent leur cohésion par des forces électrostatiques faibles, appelées forces de Van Der Waals. Les liaisons établies entre les atomes ou les molécules d'un corps sont caractérisées par une énergie de liaison égale à l'énergie qu'il faut fournir pour détruire cette liaison. Plus cette énergie est élevée, plus la liaison est forte et la cohésion importante [2].

Pour la matière, il existe deux types d'états solides :

- l'état amorphe : arrangement aléatoire des atomes
- l'état cristallin : arrangement symétrique et périodique des atomes

C'est l'état cristallin qui nous intéresse du fait de son arrangement facile à manipuler et très utilisé pour la fabrication des semiconducteurs.

### c) Réseau cristallin

La structure cristalline comprend quatre types [4] :

- Cristaux ioniques
- Cristaux covalents

- Métaux
- Cristaux moléculaires

**i. Cristaux ioniques**

C'est l'association d'un élément électronégatif (7 électrons périphérique comme le Cl, Br) et d'un élément électropositif (avec un électron périphérique : Li, Na et autres). L'élément électropositif cède facilement un électron et devenu un ion positif avec une configuration électronique stable. L'élément électronégatif accepte facilement un huitième électron et devenu un ion négatif ayant une configuration électronique stable.

**ii. Cristaux covalents**

Ils sont construits avec des éléments de la colonne IV du tableau périodique (Si, Ge). Ces éléments ont quatre électrons périphériques qu'ils mettent en commun avec quatre voisins pour établir des liaisons covalentes. Les électrons de valence sont liés mais leur énergie de liaison est beaucoup plus faible que dans les cristaux ioniques. Cette énergie de liaison est importante dans le carbone diamant, ce qui en fait un isolant, elle est nulle dans l'étain, ce qui en fait un conducteur. Dans le silicium et le germanium cette énergie a une valeur intermédiaire qui fait de ces matériaux des semiconducteurs.

**iii. Métaux**

Les métaux sont construits avec des éléments électropositifs, c'est-à-dire ayant un seul électron périphérique. Cet électron périphérique qui est très conducteur est libéré dans la réalisation du cristal. Les liaisons atomiques sont plus faibles que dans les cristaux ioniques ou covalents, ces matériaux sont moins durs et fondent à une tension relativement basse. On distingue les métaux alcalins Li, Na, K, Cs et les métaux nobles Cu, Ag, Au.

**iv. Cristaux moléculaires**

Les cristaux moléculaires, comme leur nom l'indique, sont bâtis sur une unité de base qui n'est plus l'atome mais la molécule. Les forces de liaison sont grandes à l'intérieur de la molécule mais du type Van Der Waals entre molécules et par conséquent faibles. Ces matériaux sont peu résistants et fondent à basse température.

**2.2 Propriétés des matériaux**

**a) Propriétés mécaniques**

Les propriétés mécaniques sont déduites d'une part des forces de cohésions qui lient les atomes ou les molécules du solide, et d'autre part des défauts qui peuvent apparaître dans leur structures cristallographiques : lacunes, substitutions, interstitiels, dislocations et joints de grains. Notons que ces propriétés mécaniques dépendent de la température des matériaux. Les

caractéristiques mécaniques des matériaux sont : sa masse, sa masse volumique, ses dimensions et sa résistance mécanique.

### b) Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques dépendent de la température de la matière. Si la température augmente, le solide subit une agitation et la matière se dilate. A très haute température, il se fonde.

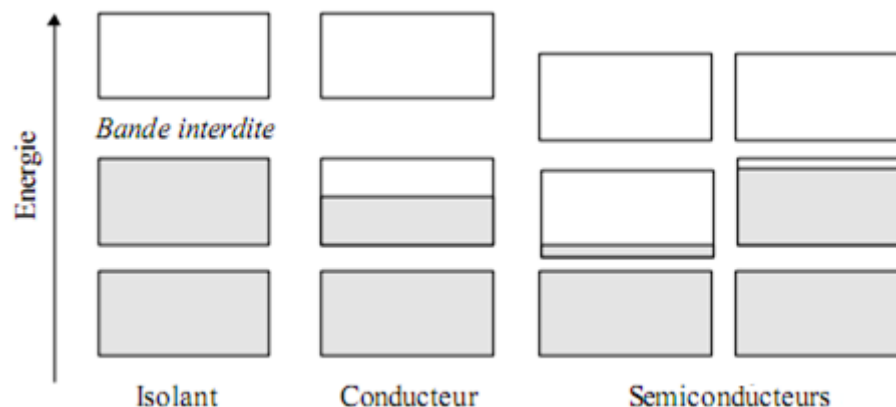
### c) Propriétés électriques

Les matériaux sont caractérisés électriquement par leurs conductivités électriques. Selon leur conductivité électrique (Fig.1.4), les corps se subdivisent en 3 groupes [4] :

- Les *isolants* : les bandes d'énergie les plus faibles sont entièrement pleines donc ne conduisent pas le courant électrique.

- Les *conducteurs* : conduisent bien le courant électrique, d'autant mieux que la température est plus basse. Cette bonne conductivité électrique est due à la présence des électrons presque libres du gaz électronique qui parcourent tout le réseau métallique.

- Les *semiconducteurs* : conduisent le courant nettement moins bien que les métaux, mais d'autant mieux que la température est plus élevée (exemples types : le silicium Si, le germanium Ge). Ils forment des réseaux atomiques (du type diamant) où les atomes sont reliés par covalence. La migration des électrons ne peut se faire que par « petits pas », les électrons sautant d'un atome à l'autre.



*Figure 1.4 : Propriétés électriques des matériaux [4]*

Comme on a vu précédemment, on va s'intéresser à ces structures des matériaux pour pouvoir bien illustrer la notion de fissure.

### 3. Notion de fissure

Une fissure est un ensemble de plusieurs défauts continus dans un matériau [5].

#### 3.1 Les défauts

Nous avons vu avec le potentiel de liaison que l'énergie est minimale si les atomes sont à une certaine distance les uns des autres ; de même, cette énergie est minimale pour une organisation donnée. Tout ceci dépend des atomes [6] : certains s'associent en molécules, d'autres rester tous seuls (les gaz rares).

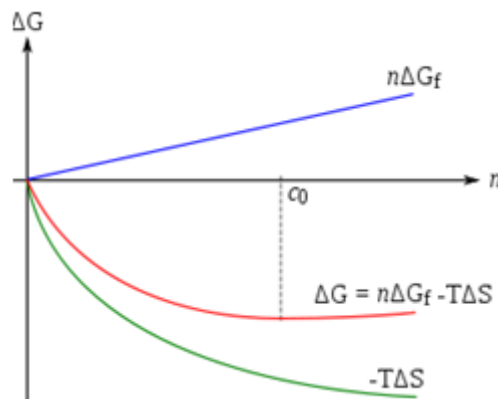
Pour une température  $T$  donnée et une concentration  $c_0$  de défauts ponctuels, l'enthalpie libre  $\Delta G$  qui représente un état d'énergie du cristal est minimale. Pour créer un défaut il faut dépenser une quantité d'énergie plus grande  $\Delta G_f$  appelée « enthalpie de formation ». On a typiquement :

$$\Delta G_f = 1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Pour créer  $n$  défauts distants, il faut dépenser une énergie  $n\Delta G_f$  (Fig.1.5). La variation d'énergie totale du cristal, ou plus précisément sa variation d'enthalpie libre  $\Delta G$ , vaut :

$$\Delta G = n\Delta G_f - T\Delta S$$

Où  $T$  est la température absolue et  $\Delta S$  la variation d'entropie.



*Figure 1.5 : Enthalpie en fonction du nombre de défaut [7]*

On a ainsi un terme qui augmente l'énergie,  $n\Delta G_f$  (Fig.1.4), et un terme qui la diminue,  $-T\Delta S(n)$  (Fig.1.2). Pour une température  $T$  donnée, il existe donc une valeur de  $n$  donnant l'énergie minimale, c'est-à-dire une concentration de défaut « spontanée », « stable ». Plus la température augmente, plus la concentration de défauts stables est grande : un cristal à haute température a plus de défauts qu'à basse température.

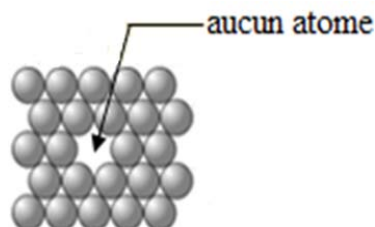


### a) Défauts ponctuels

Les défauts ponctuels sont des défauts limités à un nœud du réseau. Le rayon atomique est très petit devant les dimensions du cristal.

#### i. Lacunes

Une lacune est un site du réseau ne contenant aucun motif, aucun atome (Fig.1.6).

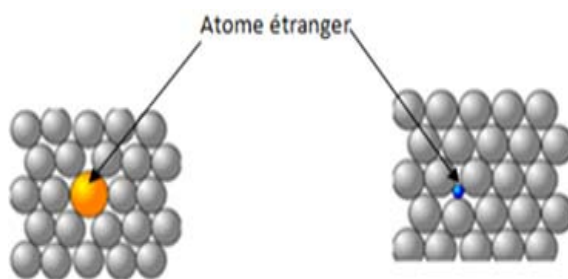


*Figure 1.6 : Lacune : site vide du réseau [3]*

#### ii. Solutions solides

Une solution solide est une situation dans laquelle un cristal contient des « atomes étrangers », c'est-à-dire des atomes d'éléments ne faisant pas partie du cristal parfait. Il peut s'agir d'impuretés ou d'éléments d'alliage. On a deux types de solution solide :

- en substitution : l'atome étranger remplace une des atomes du cristal (Fig.1.7) [7];
- en insertion : l'atome étranger se glisse dans les espaces vides (les positions interstitielles) des atomes du cristal (Fig.1.8) [7].



*Figure 1.7 : Solution solide de substitution*

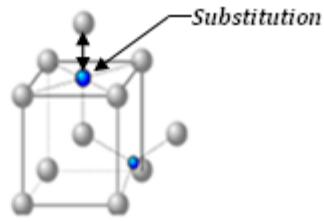
*Figure 1.8 : Solution solide d'insertion*

Le terme « solution » indique que la matière étrangère est dispersée dans le cristal. Notons qu'un atome propre du cristal peut se mettre en position interstitielle (on parle d'auto-interstitiel). Il ne s'agit alors pas de solution solide.

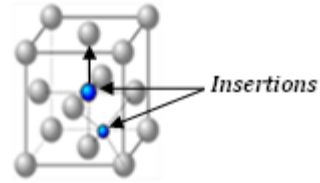
En général :

- si l'atome étranger a un rayon atomique proche des atomes du cristal, il se met en substitution (Fig.1.9) ;
- seuls les atomes plus petits de rayon  $r'$  que les atomes hôtes de rayon  $r$  se mettent en

insertion :  $r' \leq 0,1r$  à  $0,5r$  (Fig.1.10).



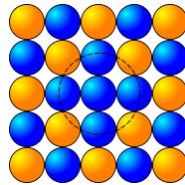
**Figure 1.9 :** Atomes interstitiels octaédrique et tétraédrique dans un réseau cubique centré



**Figure 1.10 :** Réseaux cubiques à faces centrés

### b) Défaut d'antiphase

Dans un cristal ordonné, un site est occupé par un élément donné. Un défaut d'antiphase apparaît lorsqu'un site est occupé par un atome d'un autre élément. Ce genre de défaut nécessite en général une grande énergie de formation, en particulier dans les cristaux ioniques où une charge se trouve entourée de charges de même signe (répulsion). Ce sont donc des défauts présents en très faible concentration (Fig.1.11).



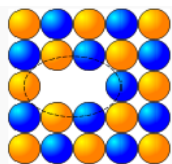
**Figure 1.11 :** Défaut d'antiphase [3]

### c) Association de défauts

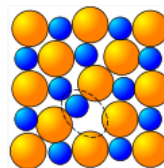
Les défauts ponctuels ne sont pas toujours isolés, ils peuvent parfois s'associer. Dans les cristaux ordonnés, on peut par exemple avoir :

- l'association de lacunes de deux ou plusieurs éléments différents, c'est un défaut de SCHOTTKY (Fig.1.12) ;
- l'association d'un atome auto-interstitiel et d'une lacune du même élément, c'est un défaut de FRENKEL (Fig.1.13).

Ces défauts permettent de respecter la stœchiométrie du cristal, et dans le cas d'un cristal ionique, la neutralité électrique.



**Figure 1.12 :** Défaut de SCHOTTKY [3]



**Figure 1.13 :** Défaut de FRENKEL [3]

#### **d) Défauts linéaires**

Les défauts linéaires sont appelés « dislocations ». Ce sont des défauts de dimension 1, c'est-à-dire que la largeur des défauts est très petite devant les dimensions du cristal. Ces défauts permettent la déformation élastique. Nous avons vu précédemment que la déformation plastique se fait par glissement des atomes les uns sur les autres, comme des cartes à jouer. Si c'est tout un plan atomique qui glissait d'un coup, on aurait une limite élastique bien supérieure à ce que l'on mesure. Le glissement se fait en fait au fur et à mesure, de deux manières : par dislocation coin ou par dislocation vis.

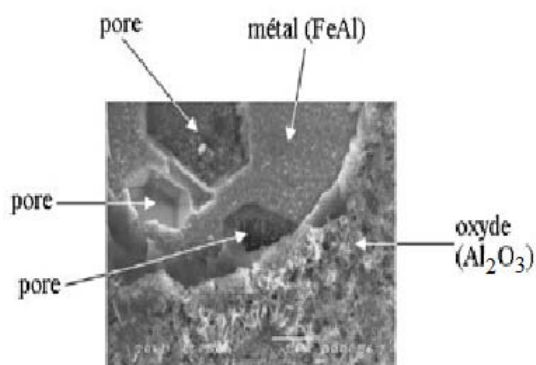
#### **e) Défauts surfaciques**

La matière est en général composée de plusieurs cristaux. Elle est dite « polycristalline ». On voit bien cela lorsque l'on regarde une pièce d'acier galvanisée : les cristaux de zinc déposés sur l'acier diffusent la lumière différemment ce qui donne des différences de teintes. Ces cristaux varient de quelques millimètres à quelques centimètres. Les cristaux de l'acier, quant à eux, sont de l'ordre de la dizaine de micron (10-100  $\mu\text{m}$ ). La frontière entre les cristaux est appelée « joint de grain ». C'est une surface, donc un défaut de dimension 2.

#### **f) Défauts volumiques**

##### **i. Pores :**

Un pore est une cavité vide ou remplie de gaz (Fig.1.14).



*Figure 1.14 : Pores sur une couche d'oxyde [3]*

##### **ii. Précipités**

Les précipités sont des cristaux de nature différente de l'environnement, à la manière des amandes dans le nougat. Ils résultent d'un regroupement (condensation) d'atomes étrangers.

Par exemple, dans l'acier, le carbone peut se concentrer et former avec le fer précipité

de carbures de fer. Certaines roches ne sont faites que de précipités, dans le sens où il n'y a pas de « cristal majoritaire ». C'est le cas par exemple du granite, où l'on voit trois types de grains en proportion relativement égaux : quartz, mica, feldspaths.

### **iii. Effet des défauts volumiques**

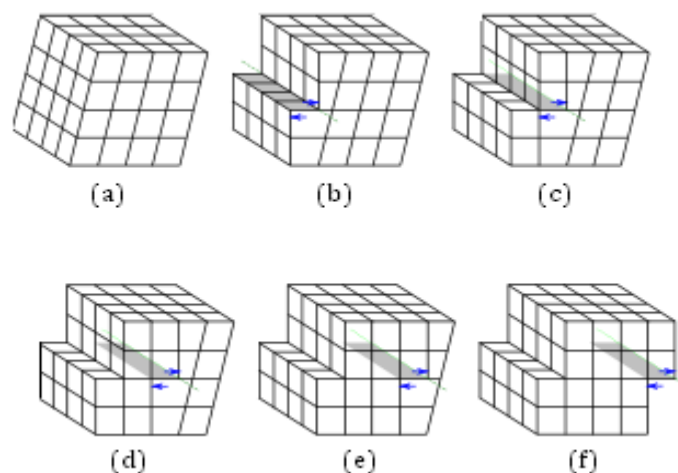
Les défauts volumiques n'ont pas les mêmes propriétés mécaniques (en particulier module de YOUNG) que le reste du matériau. Il s'ensuit des concentrations de contrainte et donc un amorçage de rupture possible. Ils n'ont pas non plus les mêmes propriétés chimiques. Il peut donc se produire des piles de corrosion localisées. Enfin, ce sont des obstacles aux dislocations. Dans les matériaux ductiles, la présence de précipités entraîne donc une élévation de la limite élastique  $R_e$ . Ce mécanisme est appelé « durcissement structural ».

## **3.2 Les fissures**

Un ensemble de défaut donne naissance à des dislocations qui forment les fissures.

### **a) Déformation plastique par déplacement d'une dislocation**

Considérons un cristal (a) soumis à du cisaillement. La déformation plastique commence sur une face libre (b), puis se propage jusqu'à l'autre face (f). Ce sont donc des rangées atomiques qui glissent l'une après l'autre (Fig.1.15 (c), (d), (e)), et non pas le plan cristallin en entier.



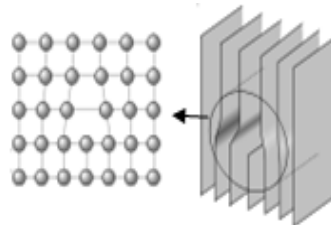
*Figure 1.15 : Déformation plastique par déplacement d'une dislocation coin [8]*

Sur la figure 1.15, la zone de glissement est représentée en gris. La largeur de cette zone est faible devant les dimensions du cristal, on l'assimile donc à une ligne représentée en pointillés verts, c'est la « ligne de dislocation ». Lorsque la direction du glissement est perpendiculaire à la ligne de dislocation, on parle de « dislocation coin ».

Pour se déplacer, la dislocation « saute » d'une rangée atomique à une autre. Le saut

minimum correspond donc à la distance entre deux rangées. On comprend facilement que le glissement est plus facile sur les plans atomiques denses car le saut est plus petit.

On voit que le déplacement de la dislocation permet de relâcher l'énergie élastique de déformation (Fig.1.16).

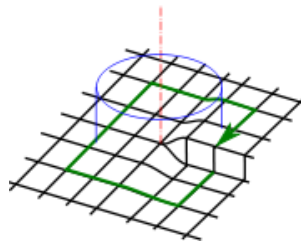


*Figure 1.16 : Distorsion élastique et cœur de dislocation [8]*

Le défaut créé peut être imaginé ainsi : on retire un demi-plan atomique (en fait, les demi-plans sont décalés d'un côté), et les plans se rapprochent pour combler le vide. La distorsion élastique engendrée est concentrée dans un cylindre appelé « cœur de dislocation », le cristal est inchangé loin du cœur. En dehors de cette zone, le cristal est parfait.

#### **i. Dislocation vis**

La ligne de dislocation peut aussi être parallèle à la direction de glissement. On parle alors de « dislocation vis ». De la même manière, le glissement est plus facile sur les plans atomiques denses.



*Figure 1.17 : Distorsion élastique et cœur [8]*

Si l'on fait le tour de la dislocation en suivant les atomes de proche en proche, on monte d'un plan atomique à chaque tour, d'où le nom de « vis ». Comme précédemment, la distorsion élastique est concentrée dans un cylindre, appelé « cœur de la dislocation », dont le rayon est petit devant les dimensions du cristal (Fig.1.17). En dehors du cœur, le cristal est parfait.

#### **ii. Dislocation mixte**

La ligne de dislocation n'est pas forcément droite. Une dislocation courbe a des parties vis, des parties coins, et des parties intermédiaires. Une telle dislocation est appelée « dislocation mixte » (Fig.1.18).

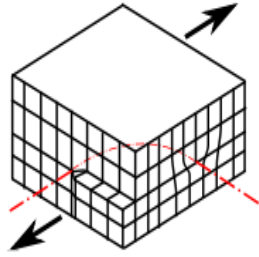


Figure 1.18 : *Vue en perspective isométrique d'une dislocation mixte [8]*

On voit que les fissures sont des ensembles de défauts qui forment des dislocations dans des matériaux solides. Pour pouvoir faire la détection de ces fissures, il faut avoir des notions sur les outils de détection de fissure. Voyons, donc, les généralités sur les ondes.

## **Chapitre 2 : GENERALITES SUR LES ONDES ET UTILISATION POUR LA DETECTION DE FISURES**

Les ondes sont divisées en deux grands types tels que les OEM et les ondes mécaniques. Mais elles sont toutes régies par la même équation.

### **1. Equation d'onde**

La propagation d'une onde peut être décrite par l'équation de Schrödinger [9] :

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\Psi(x, y, z) + V(x, y, z)\Psi(x, y, z) = -\frac{\hbar}{i}\frac{\partial}{\partial t}\Psi$$

ou encore 
$$\mathcal{H}\Psi = -\frac{\hbar}{i}\frac{\partial}{\partial t}\Psi$$

où  $\mathcal{H}$  est l'opérateur hamiltonien ou l'énergie totale de la particule ;  $\Psi$  la fonction d'onde ;  $\hbar = h/2\pi$  , avec  $h$  est la constante de Planck.

La fonction d'onde est la solution de cette équation et vaut :

$$\psi = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{V \cdot T}x\right)$$

où  $T$  est la période d'oscillation de l'onde ;  $A$  l'amplitude ;  $t$  la variable temporelle ;  $x$  la variable d'espace et  $V$  la vitesse de propagation.

#### **a) Vitesse de déplacement**

L'onde électromagnétique se propage en ligne droite dans un milieu homogène; sa vitesse est  $c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$  dans l'espace ou  $v = c/n$  dans un milieu autre que l'espace et dont l'indice de réfraction est  $n$ .

#### **b) Fréquence**

La fréquence  $\nu$  (exprimée en Hz) d'une onde électromagnétique est la fréquence des champs électriques et magnétiques qui la composent.

$$\nu = \frac{1}{T}$$

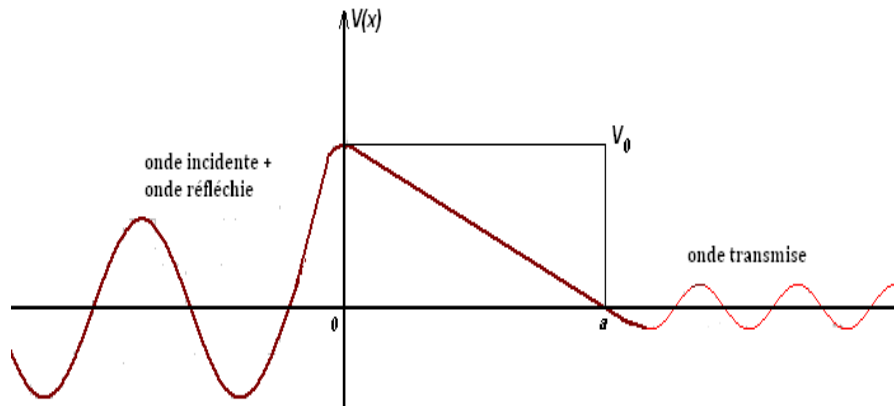
#### **c) Longueur d'onde**

La distance sur laquelle il se répète identique à lui-même, est appelée longueur d'onde notée  $\lambda$  (exprimée en m) et définie comme le trajet parcouru par une onde après une période d'oscillation  $T$ .

$$\lambda = V \cdot T = \frac{V}{\nu}$$

#### d) Mode de propagation

On distingue l'onde directe, l'onde réfléchie et l'onde transmise Fig.2.1.



*Figure 2.1 : Propagation d'onde [9]*

- L'onde directe est une onde partant de l'émetteur et arrivant sur un récepteur sans rencontrer d'obstacles naturels (montagnes, couches atmosphériques) ou artificiel (immeubles, lignes à THT).
- L'onde réfléchie est l'onde qui rencontrant un obstacle est renvoyée dans sa totalité, ou en partie, dans une direction différente. Par exemple, les couches ionisées de l'atmosphère peuvent constituer des surfaces de réflexion.
- L'onde transmise est l'onde qui se propage dans presque la même direction que l'onde incidente, après avoir traversé un obstacle (milieu dispersif). Cette onde est en général une onde amortie ou une onde évanescence.

#### e) Coefficient de transmission et de réflexion

Les coefficients de transmission  $T$  et de réflexion  $R$  sont obtenus par la relation de continuité des trois premières solutions de l'équation d'onde [9].

$$\begin{aligned}\Psi_1 &= A_1 e^{kx} + B_1 e^{-kx} \\ \Psi_2 &= A_2 \cos(\alpha x) + B_2 \sin(\alpha x) \\ \Psi_3 &= A_3 e^{kx} + B_3 e^{-kx}\end{aligned}$$

On obtient :

$$T = \frac{1}{\cosh^2(\alpha x) + \frac{1}{4} \left( \frac{\alpha}{k} - \frac{k}{\alpha} \right)^2 \sinh^2(\alpha x)} \quad \text{et} \quad R = \frac{\frac{1}{4} \left( \frac{\alpha}{k} + \frac{k}{\alpha} \right)^2 \sinh^2(\alpha x)}{\cosh^2(\alpha x) + \frac{1}{4} \left( \frac{\alpha}{k} - \frac{k}{\alpha} \right)^2 \sinh^2(\alpha x)}$$



## f) Principe d'incertitude de Heisenberg

Le principe d'incertitude de Heisenberg est basé sur la relation d'incertitude portant sur l'énergie d'une particule et la variable temps. Selon lui la durée  $\Delta t$  nécessaire à la détection d'une particule d'énergie  $E$  à  $\Delta E$  près vérifie la relation :

$$\Delta E * \Delta t \approx \hbar$$

ou encore

$$\Delta x * \Delta p \approx \hbar$$

avec  $\Delta p$  l'incertitude sur la quantité de mouvement de la particule et  $\Delta x$  l'incertitude sur la position de la particule.

Après manipulation de ces équations, on obtient

$$\Delta x \approx \frac{c}{2\pi\Delta\nu}$$

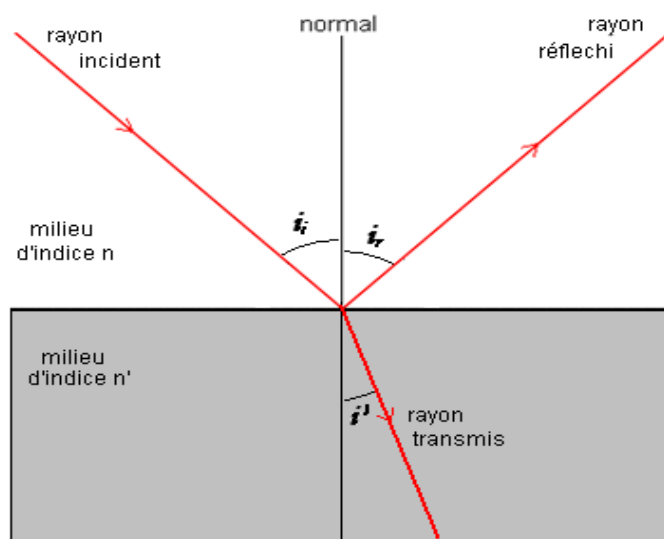
Cela veut dire que pour une erreur de fréquence de  $\Delta\nu$  on a une erreur du diamètre  $\Delta x$ .  $\Delta x$  correspond à la largeur de la fente. Autrement dit, avec une réglage de fréquence de rayonnement de  $\Delta\nu$  on obtient une largeur de fente de  $\pm \Delta x$ .

## 2. Propriétés optiques des ondes

On considère deux milieux d'indices respectives  $n$  et  $n'$ . Le faisceau incident subit à la fois une réflexion et une réfraction à l'interface  $n/n'$ . Ces deux ondes suivent toutes les deux lois de Snell-Descartes (Fig.3.4) [10] :

$$n.\sin i = n'.\sin i'$$

où  $i$  est l'angle d'incidence et  $i'$  l'angle de réflexion et/ou de réfraction



*Figure 2.2 : Réflexion et réfraction*

### a) Réflexion

Lors d'un changement de milieu de propagation, une partie de l'onde repart vers le milieu d'origine, c'est la réflexion. Le cas le plus connu de la réflexion est le miroir, mais celle-ci concerne également les rayons X (miroir à rayons X) et les ondes radio : réflexion sur la ionosphère des ondes mégahertz, antenne parabolique, réflexion sur la Lune et autres. La loi de la réflexion est que l'angle d'incidence ( $i$ ) est égal à l'angle de réflexion ( $i'$ ). On en déduit de la relation précédente que pour une valeur critique de l'angle incident  $i$  tendant vers  $\pi/2$  la réflexion est totale.

### b) Réfraction

Lors d'un changement de milieu de propagation, si le second milieu est transparent pour l'onde, celle-ci se propage dans le second milieu mais avec une direction différente. Cela concerne la lumière (lentille optique, mirage), mais aussi les ondes radio (réfraction des ondes décimétriques dans l'ionosphère).

### c) Absorption

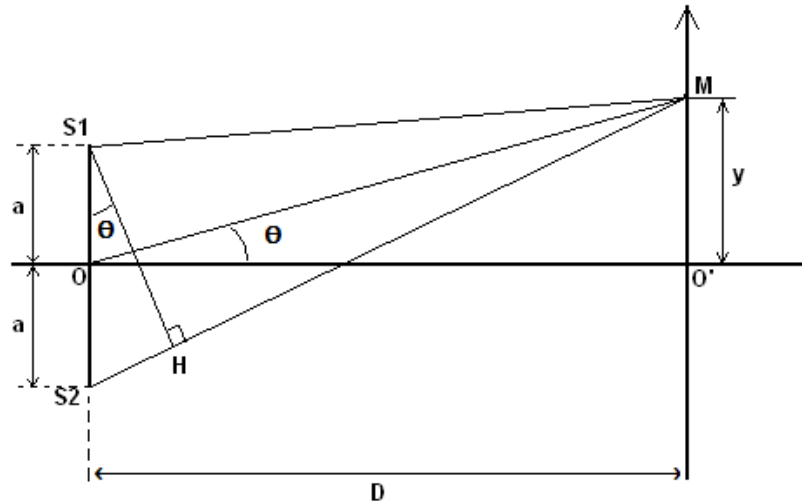
L'absorption est un processus physique par lequel l'énergie est transformée en une autre forme d'énergie. Elle constitue le phénomène par lequel tout matériau atténue toute onde le traversant. L'énergie absorbée est alors convertie en chaleur (Effet Joule). Le taux d'absorption varie avec la longueur d'onde de la lumière incidente, menant par exemple à l'apparence de couleur dans les pigments qui absorbent certaines longueurs d'onde mais pas d'autres.

D'après l'hypothèse d'Einstein l'absorption ou l'émission de rayonnement de fréquence  $\nu$  se fait toujours par quanta d'énergie (photons ou grains d'énergie) :

$$e = h\nu = \frac{h.c}{\lambda}$$

### d) Interférence

Considérons deux vibrations représentées par deux sources S1 et S2 de milieu O, et un objet M, représenté par Fig.2.3.



*Figure 2.3 : Principe d'interférence [10]*

Les ondes issues de S1 et S2 interfèrent au point M, avec :

-Une différence de marche :

$$\delta = \frac{2.a.n.y}{D} + \delta_0 \quad (\text{où } n \text{ indique l'indice du milieu),$$

-Une différence de phase :

$$\varphi = \frac{2.\pi.\delta}{\lambda}$$

-Une ordre d'interférence :

$$P = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{2.a.y}{\lambda}$$

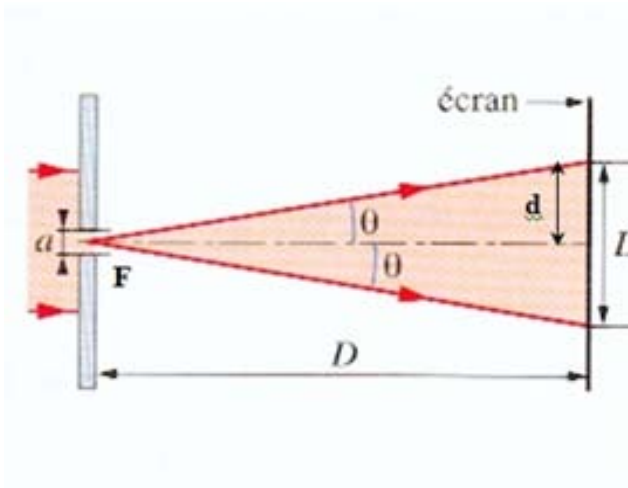
### e) Diffraction

La diffraction est le comportement des ondes lorsqu'elles rencontrent un obstacle qui ne leur est pas complètement transparent ; le phénomène peut être interprété par la diffusion d'une onde par les points de l'objet. Elle se manifeste par le fait qu'après la rencontre d'un objet, la densité de l'onde n'est pas conservée selon les lois de l'optique géométrique. Elle est aussi le résultat de l'interférence des ondes diffusées par chaque point. Pour être mise en évidence clairement, l'obstacle que rencontre l'onde doit avoir une taille caractéristique relativement petite par rapport à la distance à laquelle l'observateur se place. Si l'observateur est proche de l'objet, il observera l'image géométrique de l'objet : celle qui nous apparaît habituellement. La diffraction des particules de matière, c'est-à-dire l'observation des particules de matière projetées contre un objet, permet de prouver que les particules se comportent aussi comme des ondes.

D'après HUYGHENS (Fig.2.4), l'onde se propage de proche en proche. Chaque élément de surface atteint une source secondaire qui émet des ondelettes sphériques dont l'amplitude est proportionnelle à cet élément.

D'après FRESNEL (Fig.2.4), l'amplitude complexe de la vibration de l'onde en un point est la somme des amplitudes complexes des vibrations produites par toutes les sources secondaires.

Il faut noter que les ondes incidente et diffractée ont la même longueur d'ondes.



$d$  : Distance critique de MAYLER

$$d = \frac{a^2}{\lambda}$$

$D < R \Rightarrow$  Diffraction de FRESNEL

$D > R \Rightarrow$  Diffraction de FRAUNHOHER

Figure 2.4 : Diffraction [10]

Pour une fente : 
$$s(M) = S_p \left( \frac{\sin\left(\frac{\pi x'}{I}\right)}{\frac{\pi x'}{I}} \right) = s(x)$$

avec  $I = \lambda.k$  où  $s$  est la source d'onde et  $x'$  la longueur de la fente.

### 3. Relation entre grandeurs optiques et grandeurs quantiques

Les relations entre grandeurs optiques et grandeurs quantiques ont été mise en évidence par l'effet Compton (Fig.2.5) et l'expérience de DAVISON-GERMER [9].

#### • Effet Compton

La particule incidente d'énergie  $h\nu$ , après choc avec la cible est diffractée d'un angle  $\theta$  et son énergie devient  $h\nu'$ ; tandis que l'autre particule mise en mouvement par le choc est diffractée d'un angle  $\varphi$  et est animé d'une vitesse  $v$ . Utilisant les lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement, on a :

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda' = A \sin^2(\theta/2)$$

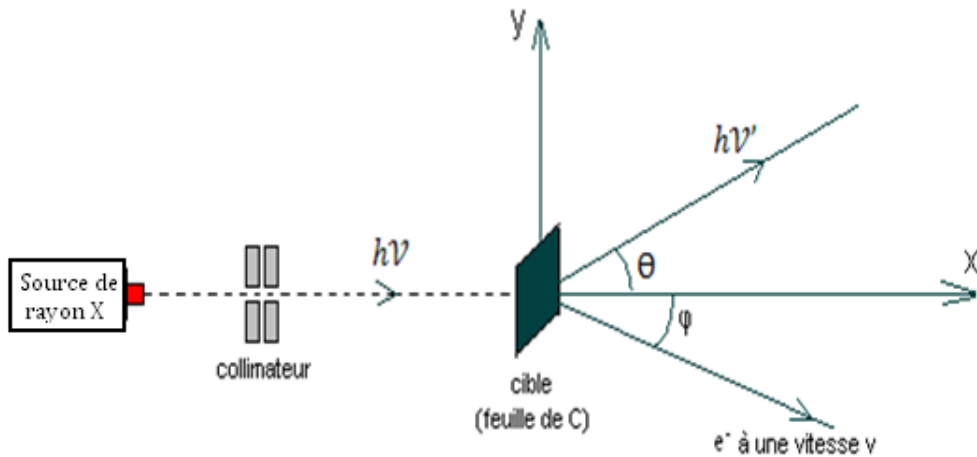


Figure 2.5 : Effet Compton

- **Expérience de DAVISON-GERMER**

Les particules diffractées obéissent à la loi :  $n.\lambda = 2.d.\sin\theta \approx 2.d.\theta$

où  $n$  est l'ordre de diffraction;  $\theta$  l'angle de diffraction et  $d$  la largeur de la fente correspondant à la distance de séparation des plans d'atomes de la cible.

#### 4. Différents types d'ondes électromagnétiques

Il y a plusieurs types d'ondes électromagnétiques, différenciés par leurs fréquences ou leurs longueurs d'ondes (Tableau 1).

Tableau 1 : Classement des rayonnements électromagnétiques [11]

Fréquence en [Hz]	$10^9$	$3 \times 10^{12}$	$4.8 \times 10^{14}$	$5.3 \times 10^{14}$	$6.12 \times 10^{14}$	$7.5 \times 10^{14}$	$3 \times 10^{19}$ →							
	$9 \times 10^3$	$3 \times 10^{11}$	$4.05 \times 10^{14}$	$5.08 \times 10^{14}$	$5.77 \times 10^{14}$	$6.9 \times 10^{14}$	$3 \times 10^{16}$ →							
Longueur d'onde en [m]	$3 \times 10^{-1}$	$10^{-4}$	$6.25 \times 10^{-7}$	$5.65 \times 10^{-7}$	$4.9 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-12}$ →							
	$3.3 \times 10^4$	$10^{-3}$	$7.45 \times 10^{-7}$	$5.9 \times 10^{-7}$	$5.2 \times 10^{-7}$	$4.35 \times 10^{-7}$	$10^{-8}$							
Bande	ondes radio	micro-ondes	téra-hertz	infrarouge	rouge	orange	jaune	vert	cyan	bleu	violet	ultra-violet	rayon X	rayon gamma
		rayonnements pénétrants		lumière visible							rayonnements ionisants			

Ce qui nous intéresse pour la détection de fissure sont les rayons ionisants, les rayons pénétrants et l'infrarouge.

### a) Rayons pénétrants

Ils permettent potentiellement de voir à travers de nombreux matériaux non conducteurs (tels que la peau, les vêtements, le papier, le bois, le carton, les plastiques...). Ils sont peu énergétiques et non-ionisants ce qui les rend à priori peu nocifs. On peut les classifier en deux bandes fréquences : le micro-onde, le térahertz [11].

#### i. Les Micro-ondes

Les micro-ondes de fréquence  $10^9$  Hz à  $3 \times 10^{11}$  Hz c'est-à-dire de longueur d'onde  $3 \times 10^{-1}$  m à  $10^{-3}$  m. Elles sont produites dans des tubes à électrons spécifiques, comme le klystron et le magnétron, ou grâce à des oscillateurs spéciaux ou à des semiconducteurs. Les applications des micro-ondes sont nombreuses dans la radio et la télévision, les radars, la météorologie, les satellites de communication, la mesure des distances, la recherche scientifique sur la matière et la cuisine [3].

#### ii. Le Térahertz

##### – Définition

Le térahertz est un rayon pénétrant de fréquence comprise entre  $10^{10}$  Hz à  $3 \times 10^{13}$  Hz environ, c'est-à-dire de longueur d'onde entre  $3 \times 10^{-3}$  m à  $10^{-6}$  m. Il est historiquement connu sous le nom d'infrarouge lointain mais on l'appelle aussi aujourd'hui Rayon T. Il se situe dans le spectre électromagnétique entre l'infrarouge et les micro-ondes.

##### – Propriétés

Le térahertz a un fort pouvoir pénétrant mais peu énergétique. Il excite les liaisons de faibles énergies et absorbe de l'eau aux fréquences THz.

##### – Utilisations

Les applications potentielles des rayons T sont nombreuses. En effet, l'aspect peu énergétique et non-ionisant ouvre de nombreuses possibilités basées sur les propriétés spectroscopiques particulières de ce rayonnement, utilisables en particulier dans les domaines de la médecine et de la sécurité. D'autres applications potentielles sont dans le domaine des télécommunications à hauts-débits, des réseaux sans fils, des radars, de la surveillance de l'environnement, des tests biomédicaux, de la caractérisation des matériaux et des dispositifs, de la détection de gaz ou de polluants, de la lutte contre le terrorisme, de l'observation astronomique, de la sécurité, et autres.

## **b) Rayons ionisants**

Un rayonnement ionisant est un rayonnement qui produit des ionisations dans la matière qu'il traverse. Les rayons ionisants sont de natures et de sources variées, et leurs propriétés dépendent en particulier de la nature des particules constitutives du rayonnement ainsi que de leur énergie. Il comprend cinq spectres différents tel que les rayons alpha, les rayons bêtas, les rayons gammas, les rayons ultraviolets et les rayons X.

Les rayonnements alpha, bêta et gamma produisent de forte irradiation aux cellules vivantes. Ils sont destinés pour les productions d'énergie nucléaire et non pour la détection.

Les rayons ultraviolets et les rayons X nous intéressent pour la détection des fissures.

### **Rayons ultraviolets**

#### **– Définition**

Ce sont des rayonnements électromagnétiques notés UV dont la longueur d'onde est inférieure à celle de la radiation violette visible. Il se divise en trois spectres différents :

- **UV-A :**

Les UV-A est un rayon dont la longueur d'onde appartient à la gamme  $3,15 \times 10^{-7}$  m à  $4 \times 10^{-7}$  m et représentent près de 95 % du rayonnement UV. Ils peuvent pénétrer dans les couches profondes de la peau.

- **UV-B :**

Les rayons UV-B ont une longueur d'onde de  $2,8 \times 10^{-7}$  m à  $3,15 \times 10^{-7}$  m. Les UV-B, représentent 5% des UV solaires, mais sont 1000 fois plus efficaces pour entraîner un coup de soleil et sont la cause de multiples cancers cutanés.

- **UV-C :**

Les UV-C de longueur d'onde  $10^{-7}$  m à  $2,8 \times 10^{-7}$  m, sont les UV les plus nocifs, mais ils sont complètement filtrés à 99% par la couche d'ozone de l'atmosphère.

#### **– Utilisations**

Les rayons ultraviolets s'utilisent notamment dans la production de lumière (lampe halogène), l'analyse minérale ou pour l'identification de toute sorte de choses, par exemple des billets de banque. En effet, des objets peuvent paraître semblables sous la lumière visible et différente sous la lumière UV. Ils servent aussi pour la stérilisation des outils ou des matériels et dans la photolithographie à très haute résolution pour la fabrication des semi-conducteurs. Les ultraviolets tiennent aussi une place dans le séchage des encres et le durcissement de certaines colles.

## **5. Les ondes mécaniques (ultrasons)**

### **a) Définition de l'ultrason**

L'ultrason est un son (c'est-à-dire une onde mécanique et élastique) diffusée par les gaz, les liquides, les tissus mous (chair, organes) ou les solides, de fréquence supérieure à 20 000 Hz [12]. Le nom vient du fait que leur fréquence est trop élevée pour être audible pour l'oreille humaine (le son est trop aigu). De la même façon que les infrasons désignent les sons dont la fréquence est trop basse pour être perceptible par l'oreille humaine.

L'onde sonore se divise en trois bandes différentes [13] :

- L'infrason de fréquence inférieur à 20 Hz
- Les sons audibles de fréquence comprise entre 20 Hz et 20 kHz
- L'ultrason de fréquence supérieur à 20 kHz

### **b) Caractéristiques**

#### **i. Fréquence d'oscillation**

La fréquence d'oscillation  $f$  (exprimée en Hz) est le nombre d'onde par unité de temps :

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

#### **ii. Impédance acoustique**

L'impédance acoustique  $Z$  exprimée en Rayl est donnée par la formule :

$$Z = \rho * c \quad \text{où } 1 \text{ Rayl} = 1 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

L'impédance acoustique d'un milieu augmente en fonction sa masse volumique.

#### **iii. Coefficient d'atténuation**

L'amplitude d'oscillation des ondes sonores décroît avec la distance. Il en résulte une atténuation évidente des ondes à mesure qu'elles traversent les substances. L'intensité  $I$  d'une onde varie selon une loi exponentielle [14]:

$$I = I_0 \exp(-\mu x)$$

Où  $x$  est la distance traversée par un ultrason dans une substance en m,  $I_0$  l'intensité initiale en  $\text{Wm}^{-2}$  et  $\mu$  le coefficient d'atténuation de la substance traversée en  $\text{m}^{-1}$ .

Ce sont les rayons X et les ondes ultrasonores qui sont les plus performants de point de vu pénétration dans la matière et les plus contrôlables pour l'analyse non destructive des matériaux. On peut les utiliser alors pour la détection de fissure. Les ultrasons sont spécialisés pour les contrôles non destructifs mais ils sont faibles en énergie donc ils sont classés pour la détection dans les matériaux peu denses comme la détection de fissures dans l'os humain (les



chairs et les muscles ne sont pas denses). Les rayons X sont qualifiés par son énergie très intense donc on les utilise pour la détection dans les matériaux denses.

## **6. Utilisation des rayons X pour la détection de fissures**

### **a) Introduction**

Les rayons X sont des rayonnements de type électromagnétique dont la longueur d'onde est comprise entre 10 nm et 0,001 nm. Plus la longueur d'onde des rayons X est courte, plus son énergie est élevée. Les rayons de longueur d'onde proches de la plage des ultraviolets dans le spectre électromagnétique sont appelés rayons X mous. Les rayons de longueur d'onde plus courte, proches de la plage des rayons gamma, sont appelés rayons X durs (Radioactivité). Les rayons X composés d'un mélange de nombreuses longueurs d'onde sont des rayons X « blancs ». Les rayons X qui présentent une seule longueur d'onde sont appelés rayons X « monochromatiques ».

### **b) Propriétés des rayons X**

Les rayons X par leurs facilité de pénétration aux matériaux solides qui est fortement lié à la densité et au poids du matériau récepteur (plus le poids atomique du matériau est faible, plus ce matériau est transparent aux rayons X) absorbent facilement les matériaux durs ainsi que les matériaux solides peu denses constitués d'éléments légers (Carbone, Azote, Oxygène et autres) [11].

### **c) Utilisations**

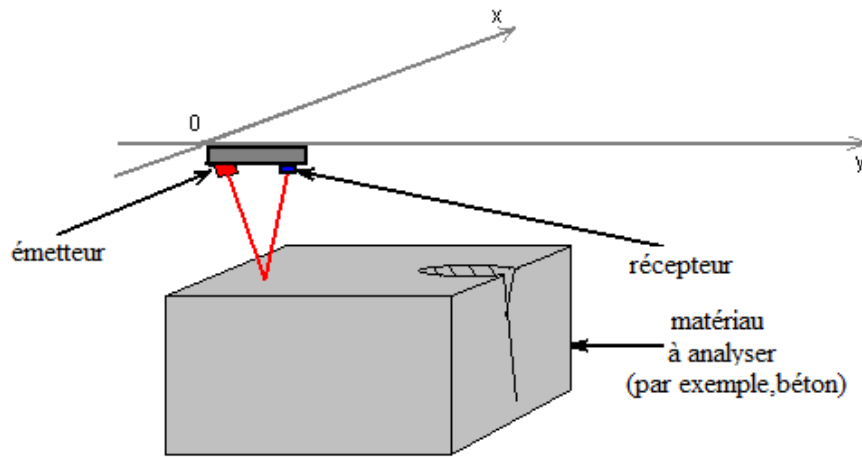
Les propriétés données ci-dessus sont utilisées en imagerie médicale (scanner, radiographie), car de ce fait les rayons X traversent la chair et sont arrêtés par les os. Dans cette imagerie médicale, le patient doit être proche de la source de rayon X. On peut faire l'analyse chimique c'est à dire l'analyse de phase par diffraction de rayon X ou radiocristallographie. Ceci donne naissance au phénomène de fluorescence X, qui permet une analyse chimique, mais cela modifie aussi les cellules vivantes [11] [12].

### **d) Conclusion**

D'après les caractéristiques de ces ondes électromagnétiques, il y a des ondes qui traversent des matériaux et il y en a ceux qui sont réfléchis au contact des matériaux. Donc on a 2 méthodes pour détecter les fissures dans les matériaux : la méthode de détection par réflexion et la méthode de détection par transparence.

### **i. Méthode de détection par réflexion**

On compare les spectres de l'onde incidente et de l'onde réfléchi, ces deux spectres se ressemblent s'il n'y a pas de fissure c'est-à-dire qu'il y a réflexion totale de l'onde émise, sinon l'onde est déphasée (Fig.3.1).



*Figure 2.6 : Méthode de détection de fissure par réflexion*

Ox et Oy sont les axes de balayage de l'émetteur/récepteur dans un plan horizontal.

### **ii. Méthode de détection par transparence**

On compare les spectres de l'onde incidente et de l'onde transmise, il y a une certaine limite du spectre reçus qui dépend de la nature, de la dimension (épaisseur) du matériau à analyser.

### **iii. Interprétation des résultats**

Dans chacune de ces deux méthodes, on compare en générale les amplitudes des ondes émises aux ceux des ondes incidents.

Il y a fissure si les amplitudes de l'onde incidente et de l'onde réfléchi vérifient la relation suivante :

$$A_r \geq k * A_i$$

où  $A_i$  est l'amplitude de l'onde incidente ;  $A_r$  l'amplitude de l'onde réfléchi et  $k$  est un constant, coefficient de réflexion (dans le cas de la première méthode) ou coefficient de transmission (dans le cas de la deuxième méthode).

## **Chapitre 3 : DETECTION DE FISSURE DANS LES BETONS**

### **1. Constitution matériel du béton**

Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories. En général le béton peut être classé en trois groupes (norme NF EN 206-1 articles 3.1.7 à 3.1.9), selon sa masse volumique  $\rho$  [11] :

- béton normal :  $\rho$  entre 2 000 et 2 600 kg/m<sup>3</sup>
- béton lourd :  $\rho > 2600$  kg/m<sup>3</sup>
- béton léger :  $\rho$  entre 800 et 2 000 kg/m<sup>3</sup>

Les bétons sont composés des matériaux fondamentaux que sont le ciment, les granulats, les entrefers et l'eau.

#### **a) Granulats**

Les granulats sont les matériaux de base essentielle du béton. Leur taille variable détermine l'utilisation du béton.

#### **b) Ciment**

Le ciment est l'élément qui sert de lien aux granulats.

#### **c) Entrefers**

Ce sont en général des fers tores bien arrangés qui servent à bien soutenir le béton. C'est aussi une sorte de mise en forme du béton.

#### **d) Eau**

L'eau a un double rôle d'hydratation de la poudre de ciment et de facilitation de la mise en œuvre c'est à dire l'élément utilisé pour le gâchage du béton.

Dans le cadre de cette étude sur la détection de fissure, on s'intéresser au béton armé de densité 2500 kgm<sup>-3</sup> à cause de sa grande utilité de base dans infrastructures comme les ponts, les bâtiments. Le dosage des bétons armés de 1 m<sup>3</sup> le plus courant avec du gravillon 5/12.5, à une compression 28 jours est présenté au Tableau 2.

Tableau 2 : *Dosage des bétons armés* [13]

<b>Rc</b> (MPa)	<b>Ciment</b> (kg)	<b>Sables</b> (kg)	<b>Gravillons</b> (kg)	<b>Eau</b> (l)
25	350	950	1100	160

où  $R_c$  est la résistance réelle du ciment

Les densités respectives des constituants sont :

- Ciment :  $d = 2.2 \text{ kg.dm}^{-3}$
- Sables :  $d = 1.6 \text{ kg.dm}^{-3}$
- Gravillons :  $d = 1.7 \text{ kg.dm}^{-3}$

## **2. Cause des fissurations dans les bétons**

Les fissurations dans les bétons sont causées en général par l'hétérogénéité des matériaux constituants. Elles peuvent être dues à:

- Un dosage avec du ciment en excès
- Une exposition à une forte température
- Une insuffisance de vibration lors de l'écoulement ; d'où existence de bulles d'airs à l'intérieur du béton
- Une intrusion d'éléments étrangers lors de la composition du béton
- Une déformation d'un élément de structure sous charge maintenue constante au cours du temps
- Une collision brusque avec des matériaux plus denses
- Des fortes vibrations constantes durant une certaine période de temps

De ces formes de fissuration il existe alors deux sortes de fissure :

- Fissure interne causé par l'intrusion
- Fissure externe c'est à dire surfacique

L'augmentation des déformations d'un élément de structure sous charge c'est à dire le fluage au cours du temps provoque les microfissures. La croissance de ces contraintes implique l'élargissement de la microfissure et lorsqu'il atteint la limite des microfissures, il devient fissure. L'agrandissement des fissures par l'élévation des charges conduit à la rupture du béton.

## **3. Choix de méthode de détection**

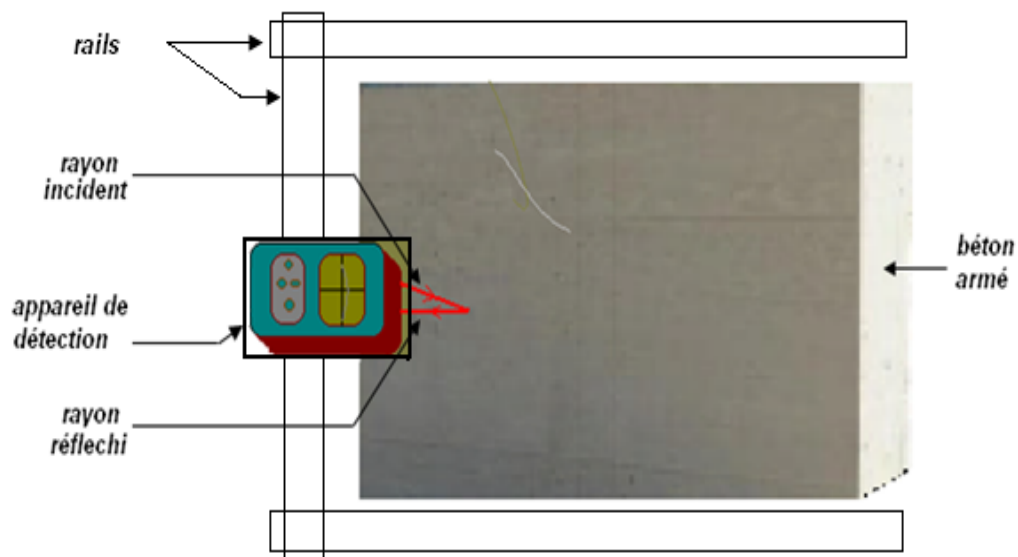
Deux sortes de méthodes de détection peuvent être utilisées. Une première méthode, utilise le principe de transmission des signaux à travers le mur en béton. Ce qui rend la méthode difficile à appliquer ; car l'émetteur d'un côté du mur et le récepteur de l'autre côté doivent être positionnés exactement l'un en face de l'autre à chaque instant, pendant les déplacements. Ceci implique un appareillage compliqué.

Une deuxième méthode est axée sur la réflexion des ondes électromagnétiques. De cette manière, l'émetteur et le récepteur se trouvent dans un même appareil, facile à manipuler. C'est cette méthode qu'on va adopter pour la détection des fissures dans les matériaux, et dans le béton en particulier.

Comme les bétons sont composés de matières solides denses, on va donc utiliser les rayons X à cause de sa pénétration aux matériaux peu denses et son importance énergie de photon.

#### **4. Principes de détection**

Le principe de détection consiste à balayer automatiquement l'appareil suivant deux mouvements perpendiculaire. Un premier mouvement verticale du bas vers le haut ou inversement, puis un petit déplacement horizontal, et ainsi de suite jusqu'à ce que la course horizontale du déplacement soit terminée. La figure 3.1 illustre ce principe.



*Figure 3.1 : Principe de détection de fissure de béton*

#### **5. Chaîne d'acquisition**

La chaîne d'acquisition des données est montrée à la Fig.3.2.

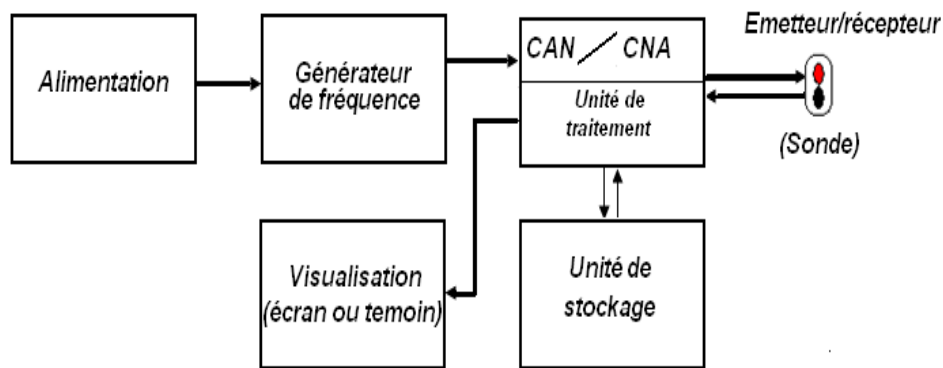


Figure 3.2 : Chaîne de détection

## 6. Hypothèse de calcul

On va utiliser les rayons X le plus proche de l'ultraviolet pour minimiser son pouvoir d'ionisation. Mais on ne peut pas être trop près de l'ultraviolet. Soit donc les rayons X de longueur d'onde de 6 nm à 3 nm. C'est à dire  $10^7$  GHz à  $5 \times 10^7$  GHz.

Le coefficient de réflexion  $R$  [4] [9] d'une onde est :

$$R = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$$

où  $Z = \rho \cdot c$  pour un rayonnement électromagnétique et  $\rho$  la masse volumique de la matière,  $Z_1$  l'impédance de l'air,  $Z_2$  l'impédance du béton.

Donc pour  $\rho_1 = 1.235 \text{ kgm}^{-3}$  la masse volumique de l'air et  $\rho_2 = 2500 \text{ kgm}^{-3}$  la masse volumique du béton :

$$R = \frac{(\rho_1 - \rho_2)^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} = 0.998$$

Pour les signaux incident et réfléchi respectives  $x(t)$  et  $y(t)$ , les spectres discrets d'amplitudes  $|X_i(f)|$  et  $|Y_i(f)|$  sont liés par la relation :

$$|Y_i(f)| \geq 0.998 |X_i(f)|$$

Dans notre étude de cette détection ici,  $|X_i(f)|$  (Cf. Annexe1) représente le spectre discret d'amplitude de l'onde incident et  $|Y_i(f)|$  celle de l'onde réfléchi. Si cette relation est vérifiée il n'y a pas de fissure dans la cible ; sinon alors il y a bien de fissure. La longueur de la profondeur  $lp$  de la fissure est proportionnelle à la valeur de ce spectre réfléchi. C'est-à-dire si il y a fissure alors si  $|Y_i(f)|$  est grande,  $lp$  est petit.

Si la fissure existe, sa profondeur est tel que

$$I_p = e * \frac{|Y_i|}{R * |X_i|}$$

où  $p$  est la profondeur,  $e$  l'épaisseur de la cible,  $R$  le coefficient de réflexion,  $|X_i(f)|$  et  $|Y_i(f)|$  les spectres discrets incident et réfléchi.

## 7. Précision de l'appareil

Pour avoir plus de précision sur le rayon réfléchi, on va utiliser le principe d'incertitude qui permet déterminer au maximum la largeur de la fente et la marge d'erreur de la fréquence.

Après manipulation des équations d'incertitude de Heisenberg, on obtient :

$$\Delta x \approx \frac{c}{2\pi\Delta\nu}$$

$$\text{Pour } \Delta\nu = 5 \times 10^{16} \text{ Hz} \quad \text{et} \quad \Delta x \approx 10^{-9} \text{ m} = 1 \text{ nm}$$

Pour une erreur de fréquence de  $5 \times 10^{16}$  Hz de notre plage de fréquence de  $10^{16}$  à  $5 \times 10^{16}$  Hz on a une erreur de largeur de la fente de 1 nm. On obtient une variation de la largeur de la fente de 1 nm.

De la relation entre la longueur d'onde et la largeur de la fente on a pour une diffraction d'ordre 2 :

$$\lambda = \theta \cdot d \quad \text{où } \theta \text{ est très petit de l'ordre de } 10^{-3}$$

Pour la fréquence maximale  $5 \times 10^{17}$  Hz c'est-à-dire de longueur d'onde minimale 0,66 nm on obtient la largeur minimale de la fente cible :

$$d \approx 1 \mu\text{m}$$

Pour la fréquence minimale  $10^{17}$  Hz c'est-à-dire de longueur d'onde maximale 3 nm, le rayonnement est plus intense donc l'ordre de la diffraction augmente par exemple 5 fois c'est dire 10 alors la relation entre la longueur d'onde et la largeur de la fente devient :

$$\lambda = \theta \cdot d$$

On obtient la largeur maximale de la fente cible :

$$d = 5 \mu\text{m}$$

## 8. Instrumentation de l'appareil

L'appareil qu'on va concevoir est un appareil aussi léger que possible pour faciliter son déplacement sur les rails. Il doit être pratique et démontable. Le plan de l'instrumentation de cet appareil va suivre le plan suivant l'ordre au schéma de l'acquisition de données.

Dans le cas pratique, le bloc d'alimentation (convertisseur, transformateur THT) et la visualisation avec le traitement des données se fait à part au sol pour ne pas encombrer le détecteur et pour éviter le surplus de poids. Pour le transfert des données au sol ou vice versa, on utilise la transmission filaire, les câbles utilisés sont blindés (par exemple câble paire torsadé).

#### **a) Alimentation**

C'est une source de courant électrique continu ou sinusoïdale. Elle peut être une batterie ou une pile, si c'est un secteur on doit concevoir un convertisseur. On utilise une pile 12 V/15 A à l'alimentation du détecteur. Mais il faut utiliser le secteur pour l'alimentation du système entier.

Il existe des circuits intégrés de convertisseurs avec des tensions de sortie usuelles. Donc on va recourir à ces circuits intégrés pour l'alimentation.

#### **b) Générateur de fréquence**

Elle génère la fréquence utilisée par le système c'est-à-dire pour synchroniser la fréquence du système. Elle contient un filtre à sa sortie qui filtre c'est-à-dire qui minimise l'erreur ou petite variation de fréquence de sortie. On peut le réaliser à l'aide d'une bascule astable. Pour les rayons X, la fréquence est en fonction de l'accélération des particules.

#### **c) CAN/CNA et unité de traitement**

Pour pouvoir bien traiter et stocker le signal analogique on le converti en signal numérique par un CAN. On le reconverti en signal analogique pour l'entrée de l'émetteur/récepteur. A la sortie de l'émetteur/récepteur on a un signal analogique donc on le converti en signal numérique pour pouvoir le stocker et de comparer son spectre à celle de l'entrée. Il y a un comparateur qui compare les spectres incident et réfléchi pour pouvoir tirer une conclusion quant à l'existence de fissure. Il y a fissure si le spectre réfléchi est inférieur au spectre incident multiplié par le coefficient de réflexion. Il y a aussi un éléments de prise des coordonnées des points détecter pour pouvoir tirer une conclusion quant aux points de fissuration. Et l'intégration ou la somme de ces points suspects donne, la longueur et l'image des fissures.

##### **i. CAN**

Pour le CAN, la caractéristique de transfert idéal est une courbe en escalier qui lie l'entrée analogique au code numérique qui lui est affectée. On peut l'établir à l'aide de la fonction  $E_{nom}$  [14]:



$$V_{num} = V_{REF} \left\{ d_0 + \frac{d_1}{2} + \dots + \frac{d_n}{2^n} \right\}$$

avec  $f_{an} \geq 2 * f_{clk}$  ;  $f_{an}$  la fréquence du signal analogique et  $f_{clk}$  la fréquence de l'horloge.

Ainsi, le code obtenu ( $d_1 d_2 \dots d_n$ ) vérifie :

$$V_{num} - \frac{1}{2} \frac{V_{REF}}{2^n} < V_{an} < V_{num} + \frac{1}{2} \frac{V_{REF}}{2^n}$$

### ii. CNA

Pour le CNA, nous obtenons une caractéristique discrète où chaque point est lié au code par la relation [14] :

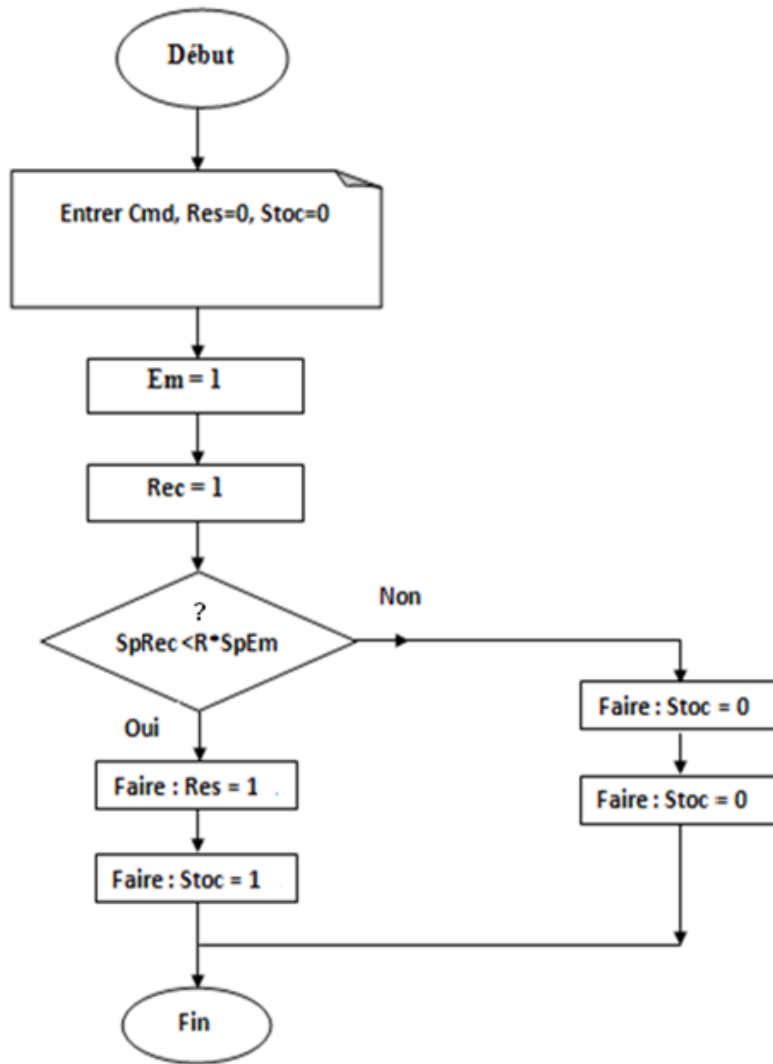
$$V_s = V_{cc} \left\{ d_0 + \frac{d_1}{2} + \dots + \frac{d_n}{2^n} \right\}$$

Les CAN et les CNA sont maintenant intégrés à circuits intégrés, on va donc utiliser ces circuits pour faciliter le travail, de ça diminue le cout, la masse.

### iii. Unité de traitement

L'unité de traitement est le cerveau du système. Elle gère le système entier. Elle est composé d'un microprocesseur qui va contrôler toutes les données de la détection : le signal émis convertit en numérique, le signal numérique venant de la réflexion dans la sonde et les données des coordonnées des zones fissurées de la cible. Il assure aussi la comparaison des deux spectres (celle de l'émission et celle de la réflexion) et l'automatisation de détection. A la place du microprocesseur on peut utiliser un microcontrôleur car il s'agit d'une tâche simple bien programmée donc on besoin d'un simple petit système pour le gérer le microcontrôleur encombre la plupart des composants périphériques qu'on va utiliser avec le microprocesseur. Le microcontrôleur se présente sous la forme d'un circuit intégré réunissant tous les éléments d'une structure à base de microprocesseur.

L'organigramme (Fig.3.3) suivant va représenter l'algorithme de la détection dans le microcontrôleur.



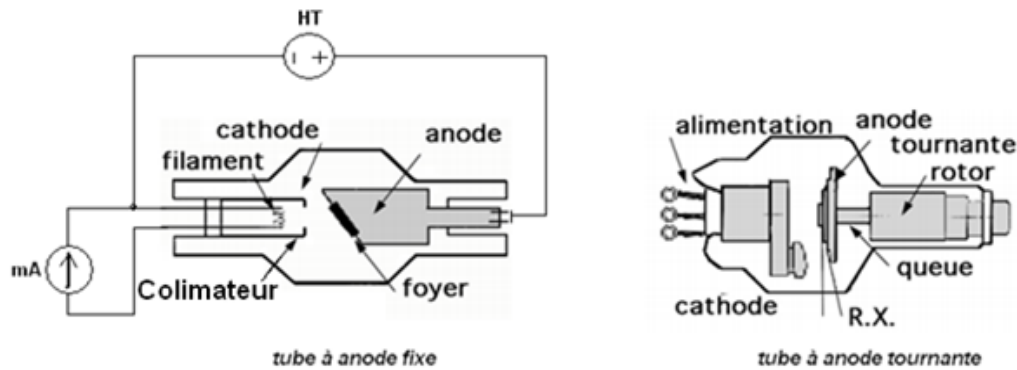
*Figure 3.3 : Algorithme pour la détection de fissure*

où Cmd est commande (1 si le système est à l'état ON), Res le résultat (1 il y a fissure), SpRec et SpEm les spectres respectifs des rayons incidents et de réfléchis, Stoc état d'enregistrement (1 s'il y a fissure).

#### **d) Emetteur/Récepteur**

Le signal électrique de son entrée doit être converti en rayons X à l'aide d'un générateur de rayons X. Un récepteur de rayons X reçoit le rayon réfléchi et le converti en signal électrique.

L'émetteur de rayons X est un tube à rayons X. Il y a deux types de tubes à rayons X donnés par la Fig.3.4 : rayons X tube à anode fixe et rayons X tube à anode tournante.



*Figure 3.4 : Emetteur et récepteur de rayons X [11]*

Dans un tube à rayons X, l'émission de ces rayonnements est obtenue en bombardant une cible appelée anode par un faisceau d'électrons accélérés dans le vide. Ces électrons sont obtenus en chauffant un filament appelé cathode et ils sont accélérés par une forte différence de potentiel. Deux courants électriques sont nécessaires au fonctionnement du tube : courant de chauffage et courant haute tension. C'est la haute tension qui impose la fréquence des rayons X.

Courant de chauffage : Compte tenu de la tension très élevée qui existe entre cathode et anode, tous les électrons émis par le filament à une température donnée sont captés par l'anode. En pratique, le nombre d'électrons du faisceau cathodique par unité de temps ou intensité du courant haute tension, est uniquement commandé par la température du filament et donc par l'intensité du courant de chauffage. L'élévation thermique de ce dernier est obtenue par un courant de grande intensité stabilisée (1,7 à 8,5 A) et de faible tension (1,9 à 15,5 V).

Courant haute tension : Son intensité est de l'ordre de 3 à 5 mA pour la radioscopie et 10 à 1000 mA pour la radiographie. La tension appliquée entre les deux électrodes est de plusieurs dizaines de milliers de volts, de même sens et la plus constante possible: 20 à 40 kV pour la mammographie, 50 à 150 kV pour la radiographie conventionnelle et la tomodynamométrie. Pour des raisons techniques, il existe pour chaque tube, une tension maximale à ne pas dépasser.

Les signaux de retour du récepteur sont amplifiés (amplificateur différentiel) avant d'être traité.

#### e) Unité de stockage

Les signaux à stocker dans cette unité de stockage sont des signaux numériques des ondes transmises et reçus de l'émetteur/récepteur et aussi les données numériques du balayage de l'appareil (coordonnées des points de fissure). Avant le début de la détection l'unité de

stockage est remise à zéro, c'est pendant la détection qu'il enregistre les données (spectres  $X_i$  et  $Y_i$ ). Pour la mémorisation donc un mot de 16 bits correspond à un résultat de détection avec sa coordonnée correspondante (existence de fissure avec sa profondeur) s'il y a fissure. C'est une mémoire vive.

#### **f) Visualisation**

C'est là qu'on consulte les résultats de la détection, on peut utiliser un écran si on veut une imagerie ou recevoir un bip sonore ou encore un témoin LED.

Pour une simple détection il suffit d'utiliser un réseau de 5 LED vertes et de 5 LED rouges. Les LED vertes clignotent s'il y a émission de rayonnement. Les LED rouges clignotent en l'existence de fissure, le numéro des LED clignotées dépend de l'intensité du spectre réfléchi. Il s'agit ici d'un appareil à balayage automatique alors on doit stocker les données ou on les observe ou les analyse directement. Donc on va utiliser un écran par exemple pour pouvoir voir le plan de la face de la cible afin de trouver les coordonnées des parties fissurées.

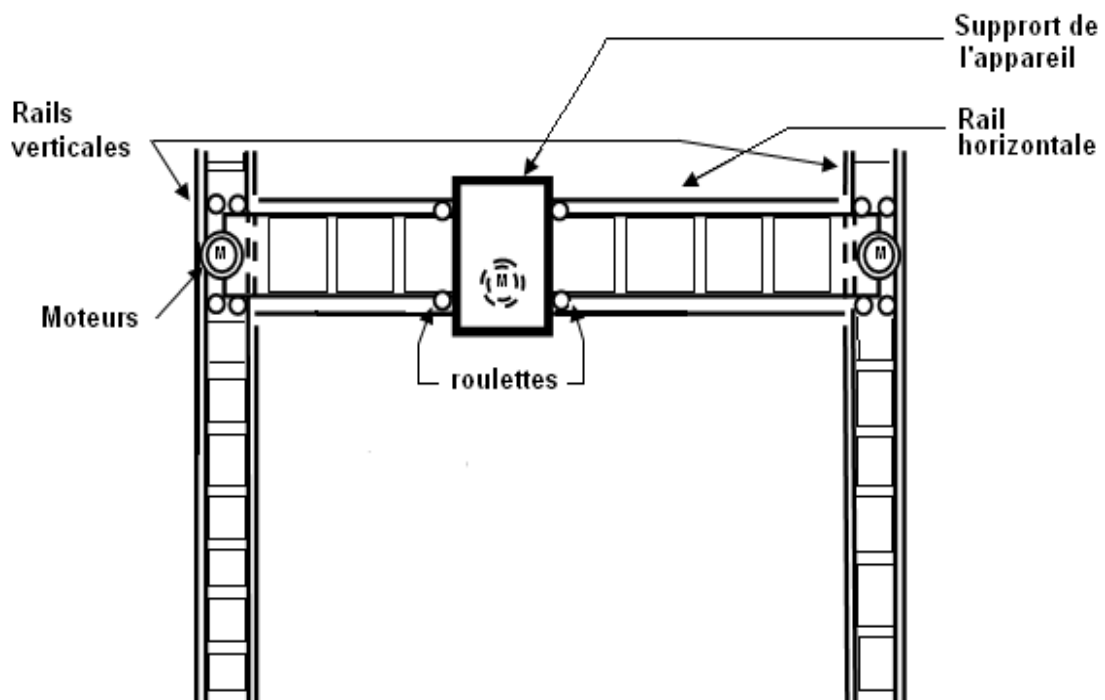
### **9. Automatisation de détection**

Pour la détection, on va prendre plusieurs petites sections (par exemple  $1 \text{ m}^2$ ) comme échantillon. On fait ensuite des calculs de probabilités et de statistiques pour en tirer une conclusion sur les fissurations de la cible entière. L'automatisation qu'on va concevoir, donc, est un système simple et léger avec l'appareil de détection pour que par exemple quatre ventouse peuvent le tenir la cible.

Dans ce paragraphe, le but est d'automatiser entièrement la détection des fissures dans le béton : balayage de la surface à analyser, et saisie et stockage des données pour le traitement : existence de fissure et coordonnées des fissures. Pour le balayage de la surface à analyser, il faut concevoir :

- (1) des rails correspondants aux dimensions de la cible (mur en béton, pont, barrage).  
Des premiers rails assurent le mouvement de balayage horizontale et des seconds le mouvement de balayage verticale ;
- (2) des petites roulettes pour pouvoir faire glisser l'appareil de détection ;
- (3) un support pour que l'appareil soit démontable de détection par exemple la fixation de l'appareil soit quatre ventouse donc ce support doit être un matériel de surface plane;
- (4) des petits moteurs pour assurer le mouvement de l'appareil sur le plan.

Ce dispositif à concevoir est schématisé à la Fig.3.5.



*Figure 3.5 : Schéma global du système d'asservissement du balayage*

#### **a) Les rails**

Ce sont des plastiques durs et plus légers que possible et assez tendus pour supporter le poids de tous les équipements fonctionnant avec l'appareil (les trois petits moteurs, les petites roulettes, l'appareil, le support de l'appareil) et les mouvements de balayage de l'appareil. Deux rails verticales qui sont fixés à la face de la cible (mur, pont,...) à l'aide de quatre grandes ventouses et assurent le support du déplacement verticale ; et un rail horizontal : mobile verticalement à l'aide de deux moteurs commandés parallèlement placés aux deux extrémités. Ce rail maintient sa position horizontale pendant tout son déplacement.

#### **b) Les roulettes**

Ce sont des très petits roulements mécaniques de très faible frottement (négligeable) pour que les mouvements soient libres. On en a besoin au nombre de 12 comme on les voit à leurs dispositions sur la Fig.4.18 dont 4 roulettes pour chacune des deux extrémités du rail horizontal, fixées à ces mêmes extrémités, et se glissent dans les deux rails verticaux ; et 4 roulettes se glissant dans le système de rail horizontal et fixés aux 4 coins du support de l'appareil.

### c) Le support de l'appareil

C'est une plaque en plastique plane léger qui peut supporter le poids de l'appareil par deux petites ventouses. Elle doit aussi supporter le poids d'un moteur fixé en elle qui assure le déplacement horizontal de l'appareil.

### d) Les moteurs

Ce sont des moteurs à courants continus électriques de 12 V commandés par le système. On utilise trois moteurs [15] tel que deux moteurs de mêmes natures pour le déplacement verticale, qui ont de puissance assez pour faire monter l'ensemble du système, et d'assurer le mouvement descendante du poids de cet ensemble du système ; et un moteur pour le déplacement horizontal de l'appareil de détection et qui doit être à double sens pour assurer le mouvement de va et vient (gauche-droite et droite-gauche) jusqu' aux deux extrémités du rail horizontal.

#### i. Réglage du déplacement

La vitesse du rayonnement vaut  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ms}^{-1}$ . Soit  $d$  la distance entre l'émetteur/récepteur et la face de la cible. Posons par exemple  $d = 5 \text{dm} = 5 \cdot 10^{-1} \text{m}$ . On a alors le temps d'une période d'émission/capture  $T_0$  tel que :

$$T_0 = \frac{2 \cdot d}{c} = 1.67 \cdot 10^{-9} \text{s}$$

Alors dans ce cas on a une fréquence de déplacement  $F_0$  tel que

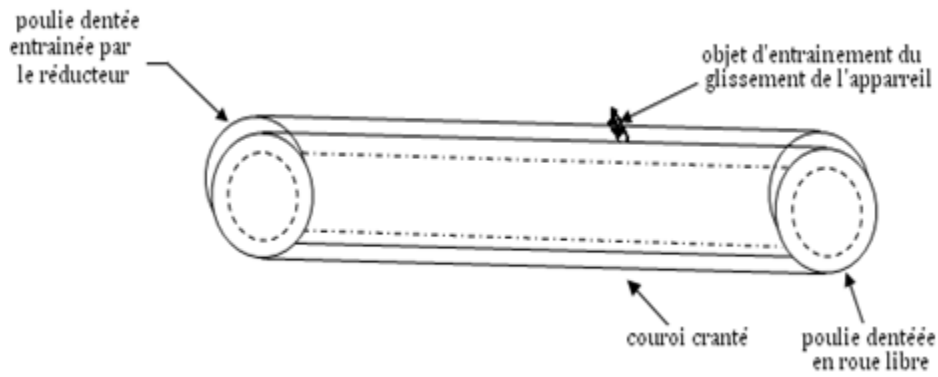
$$F_0 = \frac{1}{T_0} = 6 \cdot 10^8 \text{Hz}$$

Soit un déplacement pour une période de  $dl$  alors la vitesse de déplacement est de :

$$v = \frac{dl}{T_0} \quad \text{en ms}^{-1}$$

Pour  $dl = 0.5 \text{nm}$  on obtient :  $v = 0.3 \text{ms}^{-1}$

On va utiliser pour le mécanisme de traction du moteur un système de couroi cranté (Fig.3.6) ; un couroi cranté, fixée au rail de déplacement ; des poulies crantées, l'une fixée à l'axe du moteur qui est fixe à l'objet à mouvoir.



*Figure 3.6 : Mécanique de l'actionneur du mouvement*

### **Détermination des caractéristiques des moteurs**

- Le moteur d'entraînement horizontal :

On va choisir le moteur à aimant permanent car la puissance n'est pas exigeante pour ce déplacement horizontal. La fréquence du déplacement est de  $F_0 = 6 \times 10^8$  Hz.

Soit  $r = 3\text{cm}$  le rayon de l'engrainage du moteur :

$$d\theta = \frac{v}{r} = 10 \text{ rad.s}^{-1} = 95 \text{ tours/mn}$$

- Les moteurs d'entraînement vertical :

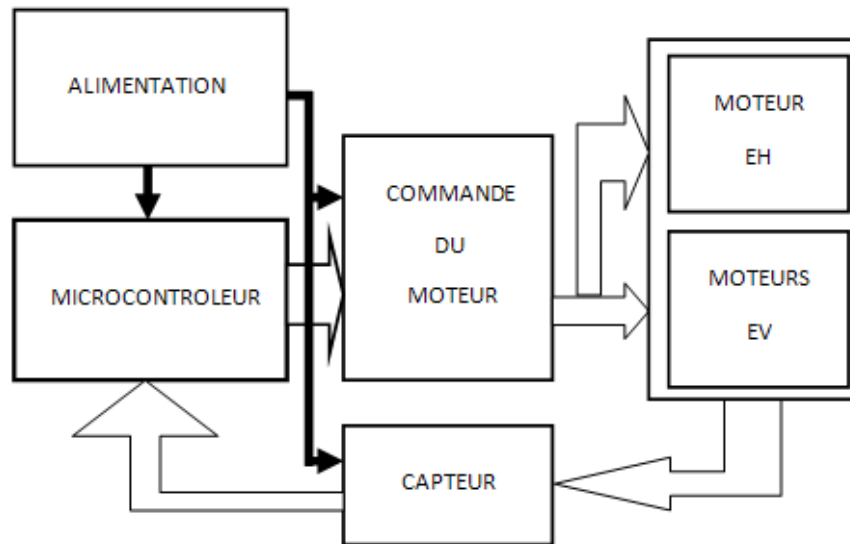
On va utiliser deux moteurs à grandes puissances car il nous faut assez de puissance pour les poids des charges. Et il faut deux moteurs pour que l'erreur de parallélisme de ce déplacement vertical soit négligeable. Le pas du déplacement  $dl$  est toujours le même que celle du déplacement horizontal mais après chaque déplacement  $dl$  il y a freinage magnétique pour un balayage horizontal, c'est la fin d'un balayage horizontal qui amorce cette déplacement  $dl$ .

#### **ii. Chaîne de commande des trois moteurs**

Dans ce système on va utiliser 4 capteurs pour détecter les positions de l'appareil pendant le balayage :

- deux capteurs  $C_3$  et  $C_4$  aux extrémités du rail horizontal pour détecter la fin de la course horizontale ;
- deux capteurs  $C_1$  et  $C_2$  aux extrémités de l'un des deux rails verticaux pour détecter la fin de la course verticale.

La chaîne d'acquisition de cette commande est illustrée à la Fig.3.7.



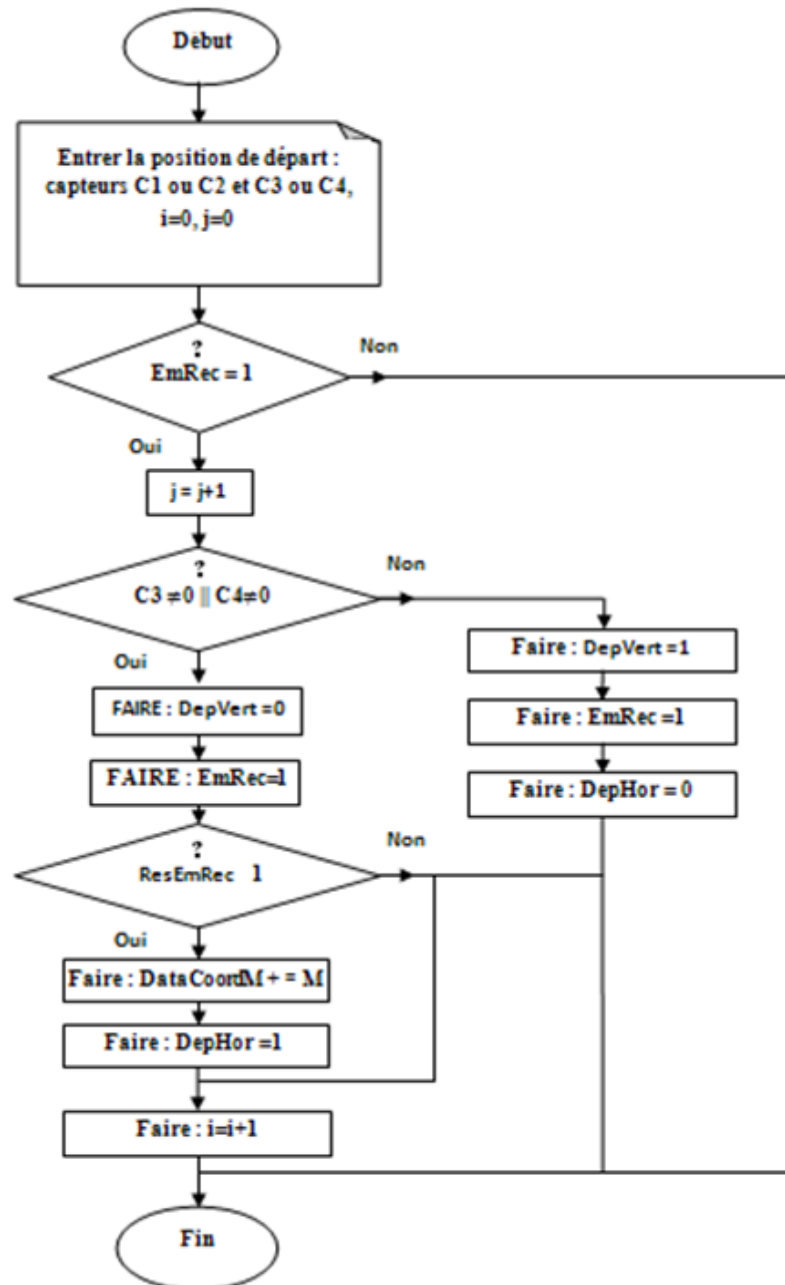
*Figure 3. 7 : Chaine d'acquisition de commande du déplacement*

avec EH le moteur d'entraînement horizontal et EV le moteur d'entraînement vertical

L'algorithme de commande de déplacement est représenté par l'organigramme (Fig.3.8).

- Si on commence du capteur  $C_1$  vers le capteur  $C_2$  :





*Figure 3. 8 : Algorithme de déplacement*

où  $C_k$  représente l'état du  $k^{\text{ème}}$  capteur, les compteurs  $i$  et  $j$  les compteurs de coordonnées  $Ox$  et  $Oy$ ,  $EmRec$  l'état de l'émission réception,  $DepVert$  l'état du déplacement vertical,  $DepHor$  l'état du déplacement horizontal,  $DataCoordM$  stockage des coordonnées  $M$ .

- Si on commence du capteur  $C_2$  vers le capteur  $C_1$  : on a le même algorithme que précédent mais seulement remplace  $C_1$  par  $C_2$  et  $C_2$  par  $C_1$ .

### **iii. Système de coordination**

Comme on doit enregistrer les coordonnées des points fissurés, nous allons donc adopter pour le système de coordonnée un repère d'axes  $Ox$  et  $Oy$ .

On obtient les nombres de déplacement  $NH$  horizontal et  $NV$  vertical pour une longueur de déplacement horizontal  $LH$  et de déplacement vertical  $LV$ , en adaptant le déplacement élémentaire  $dl$  pour l'horizontal et  $2xdl$  pour le vertical c'est-à-dire pour un abscisse  $Ox$  de pas  $dl$  et un pas d'ordonnée de  $2xdl$ .

$$NH = x = \frac{LH}{dl} \quad \text{et} \quad NV = y = \frac{LV}{2*dl}$$

Alors le nombre de point maximal à stocker est de  $N = NH*NV$ .

Donc la résolution (pixel) de l'écran qu'on va utiliser doivent être proportionnelle aux nombres de points du déplacement de fissure. Par exemple pour un système de balayage de  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ , on peut utiliser un écran de résolution  $ER$  tel que :

$$dl = 100 \text{ nm} \text{ alors } NH=10^6 \text{ et } NV=5 \times 10^5$$

$$ER = 1000 \times 500$$

## 10. Disposition de chaque bloc

### a) Bloc de générateur

La Fig.3.9 suivante représente le bloc de générateur.

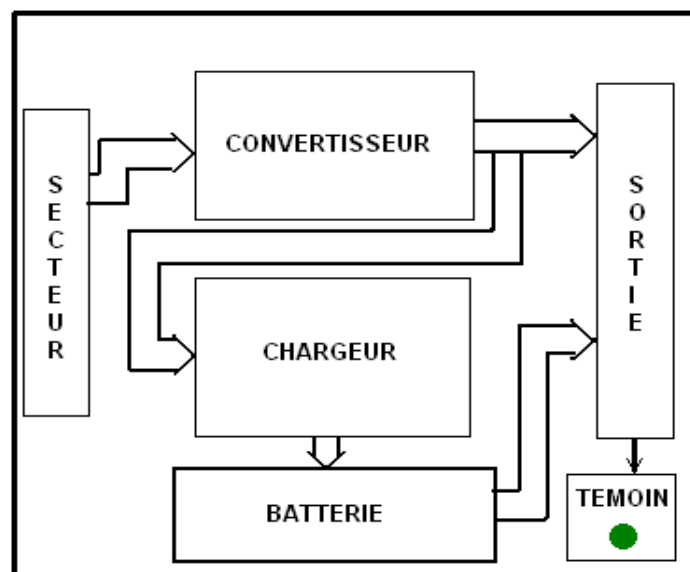


Figure 3. 9 : Disposition des sous-blocs du bloc générateur

### b) Bloc de traitement

Le bloc de traitement est simplifié la Fig.3.10 suivante :

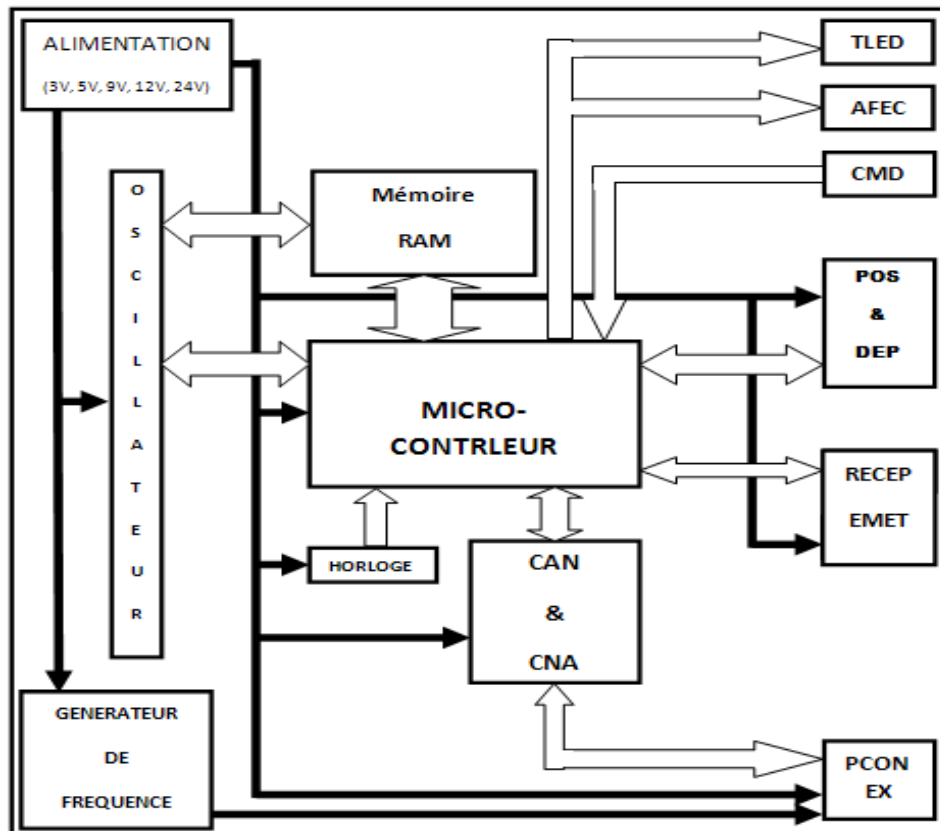


Figure 3.10 : Disposition des sous-blocs du bloc traitement

où les ports :

- TLED pour le témoin LED de fonctionnement
- AFEC l'affichage écran
- CMD la commande
- POS&DEP le positionnement et déplacement
- RECEP/EMET l'émission/réception de spectre
- PCON/EXT le port de connexion extérieur

### c) Système de câblage

D'après l'automatisation, notre système de détection doit être le plus léger que possible, alors il y a des blocs qui sont au sol avec le contrôle ; des blocs qui sont la haut avec l'appareil de détection et le système d'automatisation. Par exemple : le générateur de rayons X a un convertisseur de très haute tension contenant un transformateur (plus de kilogramme), donc au sol. De la chaîne d'acquisition, l'unité de traitement et l'unité de stockage sont au sol avec le système de contrôle.

Donc comme on voit à la chaîne d'acquisition, les blocs de circuits électroniques tels

que le générateur de fréquence, la sonde, l'alimentation sont avec l'appareil de détection. Et les restes (convertisseur de très haute tension, unité de traitement, unité de stockage) sont au sol avec le système de contrôle (microordinateur).

Pour le système de câblage on va utiliser des câbles coaxiaux blindés : un pour la transmission des données de la détection et un aussi pour le système de commande à distance. Quant au transport du courant de très haute tension on va utiliser des files très blindés comme celle de la THT d'un écran vidéo ou téléviseur. Enfin le fil de l'alimentation du secteur est un simple fil monofibré comme l'on utilise dans la vie quotidienne.

Notons que ces câbles devraient être souples pour ne perturber les mouvements de déplacements de l'appareil afin d'avoir un balayage parfait de l'appareil de détection.

## CONCLUSION

Dans ce travail on a présenté différentes méthodes de détections. Après avoir recouru à la dualité ondes / corpuscules, on a pu établir des relations entre la fente de fissure à détecter et les ondes électromagnétiques utilisées. On s'est basé sur principe d'incertitude de Heisenberg et on a obtenue des résultats de calculs satisfaisants. Pour la détection des fissures dans les bétons les rayons X sont choisis de fréquence  $1 \times 10^{16}$  Hz à  $5 \times 10^{16}$  Hz pour leur facilité de pénétration dans les matériaux solides dense. On a utilisé une longueur d'onde maximale de 3 nm et on a obtenu la largeur minimale de 5  $\mu\text{m}$  avec une erreur  $\pm 1\text{nm}$  de la fente. Et on peut détecter une fente variant de 1  $\mu\text{m}$  à 5  $\mu\text{m}$  avec cet appareil. Plus la dimension de la fente est petite, plus l'incertitude est grande.

La lecture dans la détection de fissure du béton est automatique car on a conçu un système de traitement de données : un microcontrôleur et une unité de stockage mémoire pour comparer les spectres émis et reçus afin d'en tirer une conclusion. Donc on peut avoir les coordonnées des points de fissuration. L'automatisme de la détection est assuré par des rails perpendiculaires, un rail horizontal pour les mouvements de gauche-droite de l'appareil et deux rails verticaux assurant les mouvements de bas-haut du rail horizontal.

Un des avantages de ce système de détection est la facilité de sa manipulation. Le poids de l'appareil de détection de fissures dans le béton est de l'ordre de 1 kg. Son support sur la cible serait donc un simple système de quatre ventouses. On peut bien faire la détection par prises de quelques échantillons et calculer la moyenne des fissures de tous les échantillons pour en tirer la conclusion sur la totalité de fissure sur l'entièreté de la surface à analyser. Mais il y a une difficulté aux utilisateurs car ils doivent installer manuellement l'appareil à chaque échantillon et si la cible est trop haut, il faut des ascenseurs convenables pour la réinstallation de l'appareil.

Bien que les détections des fissures pour les bétons soient automatisées, on doit toujours marquer le dernier échantillon prise avant de le déplacer

Enfin, des améliorations sont encore envisageables en fonction des besoins de l'utilisateur, on pourrait par exemple concevoir des machines de réinstallation de l'appareil à chaque échantillon pour que les utilisateurs n'aient plus besoin de faire des réinstallations manuelles.

## Annexe 1 : Analyse spectrale [16]

L'analyse spectrale est l'ensemble des techniques de description des signaux dans le domaine fréquentiel. Elle permet en particulier d'obtenir les caractéristiques de la réponse d'un système linéaire en utilisant une fonction de transfert.

On peut supposer, par exemple, que le signal reproduit indéfiniment le contenu de l'enregistrement : on construit alors un modèle périodique basé sur la série de Fourier. Le signal est décrit par un spectre discret. On peut aussi supposer que le niveau du signal est négligeable en dehors de l'enregistrement : on utilise dans ce cas un modèle transitoire basé sur la transformation de Fourier qui conduit en général à un spectre continu.

Il existe un certain nombre de phénomènes naturels pour lesquels aucune de ces deux hypothèses n'est réaliste. Par exemple, un enregistrement de vagues, sans montrer de périodicité, ne montre pas non plus de décroissance nette au cours de sa durée relativement faible : on parle alors de signal à variance finie (certains préfèrent parler de puissance finie mais ce n'est pas toujours pertinent techniquement), ce qui conduit à la notion de densité spectrale. On peut alors utiliser une hypothèse un peu plus floue selon laquelle la moyenne quadratique calculée sur l'enregistrement fournit une estimation raisonnable de la moyenne quadratique du signal. Ce type d'analyse conduit encore à un spectre continu. Il se définit, comme les précédents, à partir du signal mais on peut obtenir des informations supplémentaires en considérant celui-ci comme une réalisation d'un processus aléatoire.

Pour la suite considérons un signal périodique  $x$  en fonction du temps périodique de période  $T$  :

$$x(t) = X_0 \sin(2\pi f_0 t + \varphi)$$

où  $X_0$  est l'amplitude ;  $f_0 = \frac{1}{T}$  la fréquence d'oscillation et  $\varphi$  le déphasage.

Sa transformée de Fourier est :

$$X(f) = X_0 \frac{f \cos\varphi + j f_0 \sin\varphi}{2\pi (f_0^2 - f^2)}$$

On a :

$$\text{Spectre d'amplitude : } |X(f)| = X_0 \sqrt{\frac{(f \cos\varphi)^2 + (f_0 \sin\varphi)^2}{2\pi (f_0^2 - f^2)}}$$

Spectre de phase : 
$$\Phi = \text{Arctg}\left(\frac{f_0 \sin\varphi}{f \cos\varphi}\right)$$

Soit  $y(t)$  le signal de sortie c'est-à-dire le rayon réfléchi qui a pour transformé de Fourier  $Y(f)$ . On a alors la densité spectrale d'énergie d'interaction entre l'entrée et la sortie qui est égale à  $X(f).Y^*(f)$  et comme l'entrée est réel donc la sortie est aussi réelle alors  $Y^*(f)=Y(f)$ .

Pour détecter les similarités entre les deux signaux d'entrée  $x(t)$  et de sortie  $y(t)$  on observe la fonction d'intercorrelation  $C_{xy}$  :

$$C_{xy}(t) = \int_0^{+\infty} x(\tau).y(\tau - t).d\tau = \int_0^{+\infty} x(t).y(t + \tau).d\tau$$

Densité spectrale de puissance :

$$\text{DSP} = \text{T.F}[C_{xx}(t)]$$

$$C_{xx}(t) = \int_0^{+\infty} x(\tau).x(\tau - t).d\tau$$

où  $C_{xx}$  est la fonction d'autocorrelation

## Annexe 2 : Convertisseur de tension

Si on veut utiliser le secteur, voici un type de convertisseur convenable (Fig. A.2) :

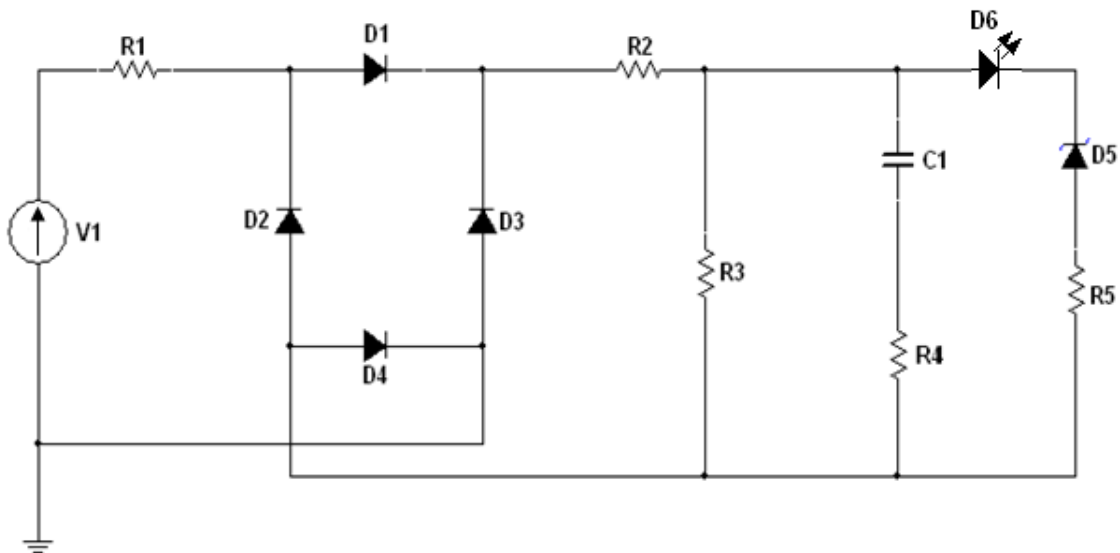


Figure A.1 : Convertisseur 220V/12V

Valeurs des composants :

- Les résistances sont :  $R1=2.2 \text{ k}\Omega$  ;  $R2=9.6 \text{ k}\Omega$  ;  $R3=1.6 \text{ k}\Omega$  ;  $R4=2.2 \text{ k}\Omega$  ;  $R5=102 \Omega$
- Les diodes D1, D2, D3 et D4 sont de types D1N4148 ; D5 diode Zener de type 1N963B ; et D6 un LED témoin du courant



### Annexe 3 : Générateur de fréquence

Le schéma d'une bascule à oscillateur à quartz est donné à la Fig. A.2

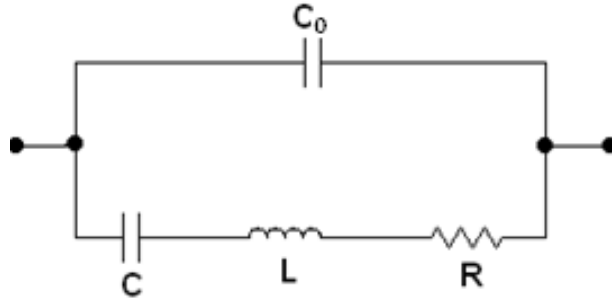


Figure A.2 : Oscillateur quartz [17]

Son impédance équivalente est :

$$Z(\omega) = \frac{\omega^2 + \frac{R}{L}\omega + \omega_s^2}{\omega C_0 (\omega^2 + \frac{R}{L}\omega + \omega_p^2)}$$

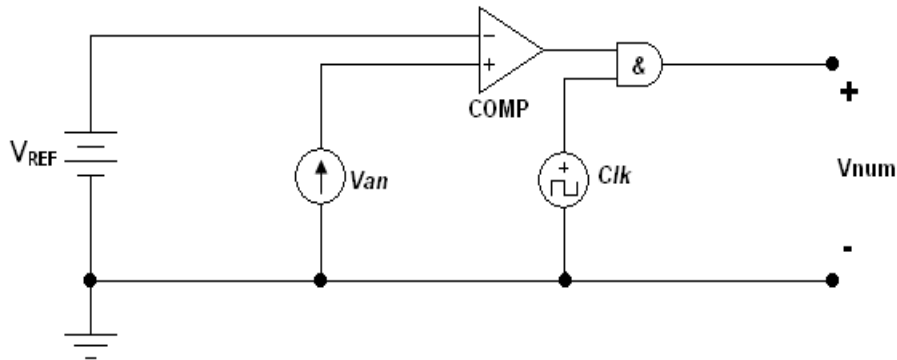
$$\text{Où} \quad \omega_s = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad ; \quad \text{et} \quad \omega_p = \frac{1}{\sqrt{\frac{LC C_0}{C + C_0}}}$$

$\omega_p$  est appelé fréquence de résonance parallèle qui correspond à  $Z(\omega)$  maximale et  $\omega_s$  est la fréquence de résonance série correspondant à  $Z(\omega)$  minimale.

## Annexe 4 : CAN/CNA et Unité de traitement

### - CAN

La Fig. A.3 présente le schéma de base du CAN.

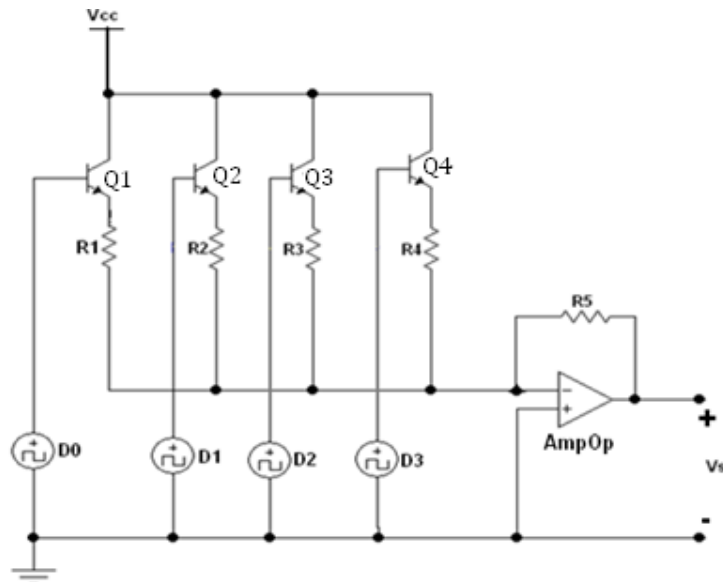


*Figure A.3 : Schéma de base du CAN [14] [18]*

avec  $V_{REF}$  la tension de référence,  $V_{an}$  la tension d'entrée analogique,  $V_{num}$  la sortie logique,  $Clk$  l'horloge, COMP un comparateur

### - CNA

Le schéma de base du CNA est illustré par la Fig.A.4.



*Figure A.4 : Schéma de base du CNA [14] [18]*

avec les valeurs des composants suivantes :

- Les résistances :  $R_1=R=1\text{ k}\Omega$ , et  $R_i=2^i R$  où  $i$  est le numéro de bit, ici quatre bits ;  
 $R_5=1\text{ k}\Omega$
- Les transistors Q1, Q2, Q3, Q4 de mêmes types, des interrupteurs commandés

- Vcc la source de tension continue
- Vs la sortie de tension analogique
- D0, D1, D2, D3 les sources de données numériques des quatre bits de fréquence  $f_i=2^i f_0$
- AmpOp est un ampli opérationnel

La Fig. A.5 suivante présente deux exemples de circuits intégrés de CAN/CNA.

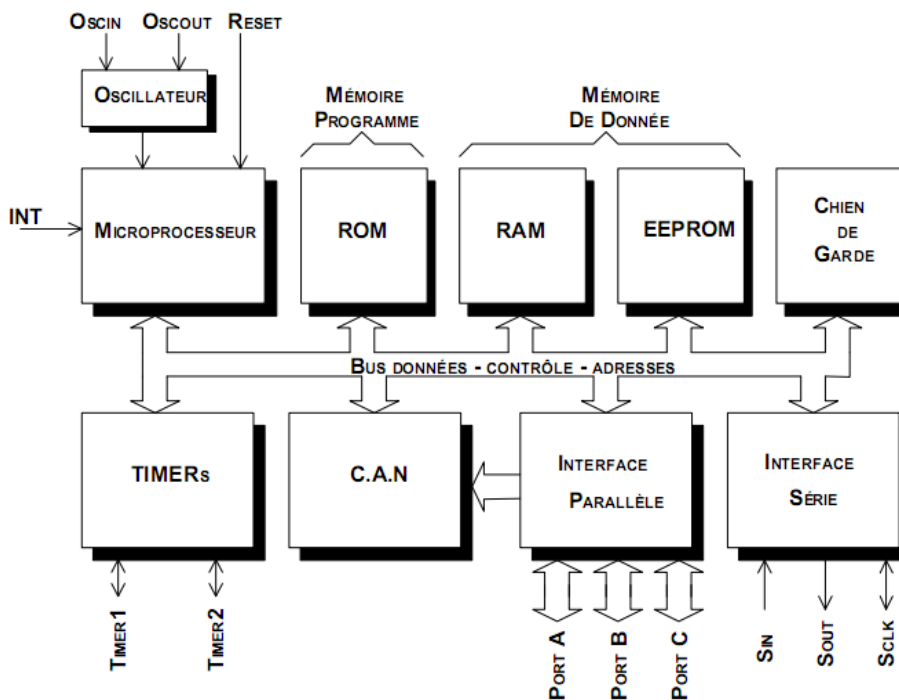


*Figure A.5 : Circuit intégré de CAN et de CNA [19]*

- Unité de traitement

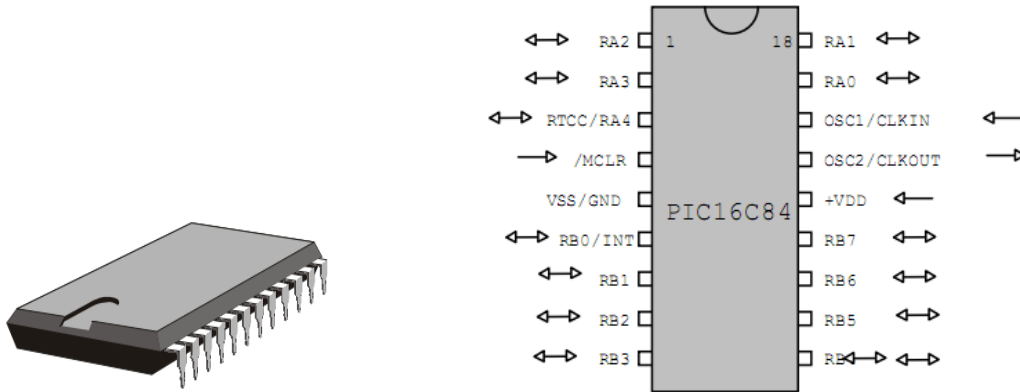
On trouve généralement à l'intérieur d'un microcontrôleur : un microprocesseur (C.P.U.), de la mémoire de donnée (RAM et EEPROM), de la mémoire programme (ROM, ou EEPROM, et autres), des interfaces parallèles pour la connexion des entrées / sorties, des interfaces séries pour le dialogue avec d'autres unités, des timers pour générer ou mesurer des signaux avec une grande précision temporelle, des convertisseurs analogique / numérique pour le traitement de signaux analogiques [19].

La figure A.6 nous présente le schéma de base d'un microcontrôleur PIC:



*Figure A.6 : Schéma bloc du microcontrôleur 16C84 [19]*

On va s'intéresser aux microcontrôleurs PIC de Microchip à cause de ses variantes, de ses efficacités et ses simplicités aux manipulations. On a tout simplement besoin d'un petit mémoire d'au moins 10octets, de vitesse de quelques Mégahertz, de bus de données de 4bits. Le PIC 16C8X peut occuper bien ces critères. Exemple le PIC 16C84 [19], son boîtier et sa brochage sont représentés par la Fig. A.7 et la Fig. A.8 respectives suivantes.



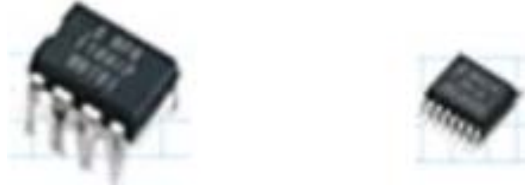
*Figure A.7 : Boîtier du PIC 16C84 [11]*

*Figure A.8 : Brochage du 16C84 [11]*

L'architecture de ce microcontrôleur est : 1 port B de 8 bits utilisable en entrée ou sortie ; 1 port de 5 fils RA0-4 , le fil R4 est aussi l'entrée du signal de commande du timer interne(RTCC) pour le 16C54 il n'a que cette fonction ; 2 bornes pour réaliser l'oscillateur : cet oscillateur peut être un oscillateur à quartz ou de type RC, un signal logique extérieur peut également être injecté sur OSC1, la broche MCLR est utilisée pour le RAZ et la programmation de la mémoire de programme (EEPROM).

### *Annexe 5 : Unité de stockage*

On va utiliser un mémoire vive pour ajouter à celle intégré dans le microcontrôleur afin de pouvoir bien stocker les données. Par exemple : le MOSTEK 4027 présenté par la Fig. A.9.



*Figure A.9: Circuit intégré de RAM* [20]

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Fissure\\_\(mat%C3%A9riau\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fissure_(mat%C3%A9riau)), Décembre 2009
- [2] <http://fr.wikiversity.org/wiki/Accueil>, Janvier 2010
- [3] Microsoft Encarta 2009
- [4] E432, « Physique des Semiconducteurs », Cours 4<sup>ème</sup> Année, Département Electronique, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 2007
- [5] [fr.wiktionary.org/wiki/fissure](http://fr.wiktionary.org/wiki/fissure), Janvier 2010
- [6] [http://www.ppsm.ens-cachan.fr/commutation-moleculaire-etat-cristallin.\\_fr.htm](http://www.ppsm.ens-cachan.fr/commutation-moleculaire-etat-cristallin._fr.htm), Janvier 2010
- [7] <http://lmc.epfl.ch/webdav/site/lmc/shared/GC%20Courses/Liaisons%20chimiques.pdf>, Janvier 2010
- [8] <http://www.volcanodiscovery.com/fr/dictionnaire/cristal.html>, Janvier 2010
- [9] E340, « Introduction à la Mécanique Quantique », Cours 3<sup>ème</sup> Année, Département Electronique, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 2006
- [10] « Optique », Cours 1<sup>ère</sup> Année, Département Cycle Préparatoire, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 2005
- [11] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil\\_principal](http://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil_principal), Février 2010
- [12] <http://www.futura-sciences.com/fr/sciences>, Février 2010
- [13] <file:///w/index.php?title=B%C3%A9ton&action=edit&section=1>, Février 2010
- [14] E431, « Transmission des données », Cours 4<sup>ème</sup> Année, Département Electronique, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 2008
- [15] E322, « Electronique de puissance », Cours 3<sup>ème</sup> Année, Département Electronique, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 2007
- [16] E341, « Théorie du Signal », Cours 3<sup>ème</sup> Année, Département Electronique, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 2008
- [17] E402, « Fonction de l'Electronique Intégrée », Cours 4<sup>ème</sup> Année, Département Electronique, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 2007

[18] E403, « Circuits Mémoires », Cours 4<sup>ème</sup> Année, Département Electronique, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 2008

[19] <http://www.robotshop.com/microcontrolleurs.html>, Février 2010

[20] <https://www.conrad.fr/webapp/wcs/stores/servlet/DemandeCatalogue1View?storeId=10001&catalogId=10001>, Février 2010

Auteur : RAKOTONOELY Jérôme  
Titre : “CONCEPTION DE FISSUOMETRE A RAYONS X ”  
Nombre de pages : 54  
Nombre de figures : 42  
Nombre de tableaux : 2

.....

***Résumé*** :

Nombreux sont les accidents des infrastructures malagasy. Nous nous sommes intéressés dans les infrastructures du génie civil : bâtiments, ponts, ... Les causes sont parfois le manque de suivi des normes en composition des matériaux constitutionnels. De ce fait de non respect des normes 80% des infrastructures en béton présentent des fissurations et des microfissurations. Un appareil à rayons X a été élaboré afin de détecter les fissures et les microfissures dans les matériaux solides comme les bétons. Pour ce faire, on émet vers la cible des rayons X qui vont se réfléchir ou se réfracter sur la surface à analyser. L'interprétation des résultats se fait par comparaison des spectres de ces rayons incidents et des rayons réfléchis.

L'ensemble comprend alors la boîte d'alimentation, l'accélérateur de particule ou générateur de fréquence, l'unité de traitement des données, l'unité de stockage de ces données, l'émetteur et récepteur de rayon X et une visualisation.

.....

Mots-clés : dualité onde/corpuscule, principe d'incertitude, onde électromagnétique, détection de fissure, rayons X, signal

Rapporteur : Monsieur RASTEFANO Elisée

Adresse des auteurs : Lot DV 09 Tsarafara II- Betafo 113  
rakotojerome02g@gmail.com