

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Filière Électronique  
Spécialité Électronique des systèmes embarqués

présenté par

Melle HEDJALLA KENZA

&

Melle MENNICHE FELLA

---

# Filtre Médian et ses Versions Améliorées pour la Réduction du Bruit Impulsionnel dans Les Images Radiographiques de Soudures

---

Proposé par : Mr NACEREDDINE NAFAA & Mr GUESSOUM ABDERREZAK

Année Universitaire 2018-2019



**REMERCIEMENTS:**

*Tout d'abord, nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté et la patience d'élaborer ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer nos remerciements les plus vifs et notre gratitude la plus totale à nos encadreurs Mr Nacereddine Nafaa et Mr Guessoum Abderrezak qu'ils nous ont orientés par leurs conseils bien utiles et leurs soutiens tout le long de notre travail.*

*Nos sincères remerciements s'adressent à nos enseignants de département d'Electronique de **Blida** et à tous les enseignants de notre cursus d'étude.*

*Nos remerciements vont aussi à la direction du centre de recherche et technologie industriel (CRTI) Chéraga-**Alger** pour leur accueil.*

*Enfin, nous adressons nos remerciements à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce mémoire.*



## DEDICACES

J'ai l'immense plaisir de dédier ce travail à:

-Ceux qui j'adore le plus au monde; mes chers et affectueux parents qui m'ont toujours encouragé et poussé vers la réussite, merci d'avoir supporté mes sauts d'humeurs, mes crises de nerfs, merci d'avoir fait de moi ce que je suis et de m'avoir éclairé le chemin.

-Mes adorables sœurs, mon cher et unique frère.

-Ma chère et meilleure amie, mon adorable binôme Fella merci de m'avoir partagé les idées, les moments forts en travail, les instants de pure folie, merci de m'avoir partagé tous ces souvenirs.

-Mes chères amies d'études, merci pour vos conseils et vos encouragements, mais aussi pour les bons moments qui ont contribué à rendre ces années inoubliables.

-Et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.

***Hedjalla Kenza***



## DEDICACES

J'ai l'immense plaisir de dédier ce travail à:

-Ceux qui j'adore le plus au monde; mes chers et affectueux parents qui m'ont toujours encouragé et poussé vers la réussite, merci d'avoir supporté mes sauts d'humeurs, mes crises de nerfs, merci d'avoir fait de moi ce que je suis et de m'avoir éclairé le chemin.

-Mes adorables sœurs, mes chers frères.

-Ma chère et meilleure amie, mon adorable binôme Kenza merci de m'avoir partagé les idées, les moments forts en travail, les instants de pure folie, merci de m'avoir partagé tous ces souvenirs.

-Mes chères amies d'études, merci pour vos conseils et vos encouragements, mais aussi pour les bons moments qui ont contribué à rendre ces années inoubliables.

-Et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail.

***Menniche Fella***

---

**ملخص:** يشير الاختبار غير المدمر إلى فحص للأجزاء أو التجمعات باستخدام طرق لا تغير هيكلها الدائم واستخدامها اللاحق. هي التصوير الشعاعي الذي يستخدم على نطاق واسع في فحص الفولاذ المصبوب أو CND واحدة من التقنيات المستخدمة في المفاصل الملحومة الموجودة في العديد من المنشآت الصناعية مثل الهيدروكربونات , صناعة الطيران , السيارات,.....إلخ.

في فحص الأشعة السينية غير المدمر , غالباً تكون الصور الشعاعية التي تم الحصول عليها ملوثة بضوضاء الصورة , و التي تتأثر بعدة عوامل و هي عملية امتصاص الإشعاعات المؤينة و الرقمنة و هيكل الشاشة المعلوماتية و دقة الصورة فيلم ..... الخ يمكن لهذا الضجيج بالتالي أن يعيق موثوقية الكشف عن التوقف و خاصة أصغرها : لهذا السبب اقترحنا في هذا الموضوع الماستر تطبيق أساليب الحد من الضوضاء التي تسمى أيضا "التصفية" بشكل أكثر دقة التصفية باستخدام المرشح الوسيط و هذه المشتقات وفقا لطبيعة الضوضاء الضوضاء الإشعاعية التي تم تشغيلها ( الضوضاء النبضية الضوضاء العشوائية و الفلفل و الملح ) .

**كلمات المفاتيح:** اختبار غير مدمر | لتصوير الشعاعي الصناعي , مرشح متوسط

---

**Résumé :** Le contrôle non destructif (CND) désigne tout examen de pièces ou d'assemblages utilisant des méthodes, qui n'altèrent pas leur structure permanente ainsi leur utilisation ultérieure. Une des techniques utilisées dans le CND est la radiographie qui est largement utilisée dans l'inspection d'aciers moulés ou d'assemblages soudés présents dans plusieurs installations industriels telles que les hydrocarbures, l'aéronautique, l'automobile, etc. Dans le contrôle non destructif par radiographie, les images radiographiques obtenues sont souvent entachées de bruit image dont plusieurs facteurs contribuent à sa formation, à savoir le processus d'absorption du rayonnement ionisant, la numérisation, la structure de l'écran renforceur, la granularité du film, etc. Ce bruit peut ainsi entraver la fiabilité de détection des discontinuités et surtout les plus petites d'entre-elles : c'est pourquoi nous proposons dans ce sujet de master l'application de méthodes de réduction du bruit dites aussi « filtrage » plus précisément le filtrage, avec le filtre médian et ses versions améliorées selon le caractère de bruit radiographique mis en jeu : le bruit impulsif (bruit aléatoire, poivre et sel).

**Mots clés :** radiographie industrielle; bruit impulsif ; filtre non-linéaire ; filtre médian.

---

**Abstract:** Non Destructive Testing (NDT) refers to any examination of parts or assemblies using methods that do not alter their permanent structure and their subsequent use. One of the techniques used in NDT is radiography, which is widely used in the inspection of molded steels or welded joints present in several industrial installations such as hydrocarbons, aeronautics, automobiles. In non-destructive X-ray inspection, the radiographic images obtained are often tainted with image noise, which is influenced by several factors, namely the process of absorption of ionizing radiation, digitization, the structure of the informational screen, the granularity of film, etc. This noise can thus hinder the reliability of detection of a discontinuity and especially the smallest of it: this is why, we propose in this master subject the application of noise reduction methods also called "filtering" more precisely the filtering with the median filter and its improved versions according to the character of radiographic noise brought into play: impulse noise (random noise, pepper and salt).

**Keywords:** industrial radiography; impulsive noise; nonlinear filter; median filter,

---

## Listes des acronymes et abréviations

ASWM : Filtre médian commuté adaptatif

CND : contrôle non destructif

CWM : filtre médian pondéré centré

DWM : Filtre médian pondéré directionnelle

MAE : l'erreur moyenne absolue

PSNR : le pic du rapport signal à bruit

SM : filtre médian standard

SSIM : Similarité structurelle

SWM : filtre médian commuté

TSM : Le filtre médian à trois états

RGB : Red, Green, Blue

CCD : Charge Coupled Device

JPEG: Joint Photographic Experts Group

TIF: Tagged Image File

PNG: Portable Network Graphics

## Table des matières

I.1 Introduction.....	3
I.2 Soudage .....	4
I.2.1 Historique : .....	4
I.2.2 Définition du Soudage : .....	5
I.2.3 Procédés de soudage : .....	6
I.2.4 Description d'un joint soudé : .....	6
I.2.5 Défauts de soudure : .....	7
I.3 Le contrôle non destructif : .....	9
I.4 Radiographie industrielle : .....	9
I.4.1 Historique : .....	9
I.4.2 Définition de la radiographie : .....	10
I.4.3 Principe de la radiographie : .....	10
I.4.4 Production des rayons X : .....	12
I.4.5 Principe de la radiographie par rayon X: .....	13
I.4.6 Les rayonnements électromagnétiques : .....	14
I.4.7 Absorption des rayons X et gamma : .....	16
I.4.8 Application de la radiographie a l'opération soudure : .....	17
I.4.9 Considérations liées à la qualité de l'image radiographique : .....	18
I.4.10 Domaine d'application du rayon X ou gamma : .....	18
I.4.11 Identification du défaut de soudure par radiographie .....	19
I.5 Conclusion .....	20
II.1 Introduction.....	21
II.2 Image Numérique et différentes méthodes d'analyse d'image.....	21
II.2.1 Image Numérique.....	21
II.3 L'image de radiographie industrielle.....	24
II.3.1 Causes d'une mauvaise qualité d'image .....	25
II.4 Schéma général du système de vision des radiogrammes .....	25
II.5 La numérisation des images radiographiques .....	26
II.6 Prétraitement .....	27
II.7 Réduction du bruit ou filtrage .....	27
II.7.1 Modèles de bruit et types des filtres .....	28

II.7.2 Filtrage fréquentiel.....	29
II.7.3 Filtrage spatial .....	30
II.8 Rappel sur le bruit d'image .....	32
II.8.1 le bruit additif.....	44
II.8.2 Le bruit multiplicatif .....	32
II.9 Bruit impulsionnel .....	32
II.9.1 Le bruit impulsionnel poivre et sel.....	33
II.9.2 Le bruit impulsionnel aléatoire uniformément réparti.....	33
II.10 Mesures de performance.....	34
II.11 Conclusion .....	35
III.1 Introduction.....	36
II.2 Etat de l'art du filtrage pour le bruit impulsionnel .....	36
III.2 Le filtre médian.....	37
III.2.1 Définition du filtre médian .....	37
III.2.2 Le temps d'exécution .....	69
III.2.3 Discussion des Résultats.....	70
III.3 conception du l'interface graphique.....	85
III.4 Conclusion .....	72



## Liste des figures

Fig. I. 1 Schéma représentatif d'un joint soudé .....	7
Fig. I. 2 Les différents types des défauts de soudage .....	8
Fig. I. 3 Montage de base pour la radiographie sur film .....	11
Fig. I. 4 Tube à rayons X.....	13
Fig. I. 5 Onde électromagnétique .....	14
Fig. I. 6 Spectre électromagnétique .....	15
Fig. I. 7 Absorption des rayons X par la matière.....	17
Fig. II. 1 Pixels et niveaux de gris .....	22
Fig. II. 2 Image numérique matricielle .....	23
Fig. II. 3 Image radiographique d'un joint soudé.....	24
Fig. II. 4 Schéma du système de vision dédié aux films radiographiques .....	26
Fig. II. 5 Organigramme des différents types de filtre.....	29
Fig. II. 6 Modèle du filtrage spatial basé sur la convolution (réponse impulsionnelle) .....	30
Fig. III. 1 Exemple de filtre médian .....	38
Fig. III. 2 image « 40 SW » .....	39
Fig. III. 3 Exemple de filtrage médian (a) Image Radio dégradée avec un bruit aléatoire avec une probabilité de 30%, (b) Résultats du filtrage avec un filtre médian de 3x3 .....	40
Fig. III. 4 Exemple de filtrage médian (a) Image Radio dégradée avec un bruit poivre et sel avec une probabilité de 30%, (b) Résultats du filtrage avec un filtre médian de 3x3 .....	40
Fig. III. 5 Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit impulsionnel aléatoire traité par le filtre SM.....	42
Fig. III. 6 Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit poivre et sel traité par le filtre SM.....	43

Fig. III.7 Exemple de filtrage CWM (c) Image Radio dégradée avec un bruit aléatoire avec une probabilité de 30%, (d) Résultats du filtrage avec un filtre CWM de 3x3 .....	44
Fig. III. 8 Exemple de filtrage CWM (c) Image Radio dégradée avec un bruit poivre et sel avec une probabilité de 30%, (d) Résultats du filtrage avec un filtre CWM de 3x3 .....	44
Fig. III. 9 Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit aléatoire traité par le filtre CWM .....	45
Fig. III. 10 Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit poivre et sel d'une image traité par filtre CWM .....	46
Fig. III. 11 Schéma de commutation avec détecteur d'impulsions médian .....	47
Fig. III. 12 Exemple de filtrage SWM (E) Image Radio dégradée avec un bruit aléatoire avec une probabilité de 30%, (F) Résultats du filtrage avec un filtre SWM de 3x3 .....	48
Fig. III. 13 Exemple de filtrage SWM (E) Image Radio dégradée avec un bruit poivre et sel avec une probabilité de 30%, (F) Résultats du filtrage avec un filtre SWM de 3x3.....	48
Fig. III.14 Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit aléatoire traité par le filtre SWM .....	49
Fig. III. 15 Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit poivre et sel traité par le filtre SWM.....	50
Fig. III. 16 Schéma de commutation avec détecteur d'impulsions médiane (SM) et le CWM.	51
Fig. III. 17 Exemple de filtrage TSM (G) Image Radio dégradée avec un bruit aléatoire avec une probabilité de 30%, (H) Résultats du filtrage avec un filtre TSM de 3x3.....	52
Fig. III. 18 Exemple de filtrage TSM (G) Image Radio dégradée avec un bruit poivre et sel avec une probabilité de 30%, (H) Résultats du filtrage avec un filtre TSM de 3x3 .....	52
Fig. III. 19 Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit aléatoire traité par le filtre TSM .....	53
Fig. III. 20 Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit poivre et sel traité par le filtre TSM .....	54
Fig. III. 21 Quatre directions de détection d'impulsion .....	55
Fig. III.22 Exemple de filtrage DWM(I) Image Radio dégradée avec un bruit aléatoire avec une probabilité de 30%, (J) Résultats du filtrage avec un filtre DWM de 3x3.....	56
Fig. III. 23 Exemple de filtrage DWM (I) Image Radio dégradée avec un bruit poivre et sel avec une probabilité de 30%, (J) Résultats du filtrage avec un filtre DWM de 3x3. ....	57

Fig. III. 24 Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit aléatoire traité par le filtre DWM.....	58
Fig. III. 25 Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit poivre et sel traité par le filtre DWM.....	59
Fig. III. 26 Exemple de deux échantillons d'une fenêtre 3x3 qui contiennent un pixel corrompu. Les lignes rouges représentent la moyenne standard pour chacun des neufs pixels de la fenêtre. La ligne verte représente la moyenne pondérée .....	60
Fig. III. 27 Exemple d'une fenêtre d'observation dans.....	62
Fig. III. 28 Exemple de filtrage ASWM(K) Image Radio dégradée avec un bruit aléatoire avec une probabilité de 30%, (L) Résultats du filtrage avec un filtre ASWM de 3x3.....	63
Fig. III. 29 Exemple de filtrage ASWM (M) Image Radio dégradée avec un bruit poivre et sel avec une probabilité de 30%, (N) Résultats du filtrage avec un filtre ASWM de 3x3 .....	64
Fig. III. 30 Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit aléatoire traité par le filtre ASWM .....	65
Fig. III. 31 Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit poivre et sel traité par le filtre ASWM .....	66
Fig. III. 32 Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit aléatoire traité par les dérivés améliorés du filtre médian de 3x3.....	66
Fig. III. 33 Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit aléatoire traité par les dérivés améliorés du filtre médian de 5x5.....	67
Fig. III. 34 Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit aléatoire traité par les dérivés améliorés du filtre médian de 7x7 .....	67
Fig. III. 35 Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit poivre et sel traité par les dérivés améliorés du filtre médian de 3x3 .....	68
Fig. III. 36 Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit poivre et sel traité par les dérivés améliorés du filtre médian de 5x5.....	68
Fig. III. 37 Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit poivre et sel traité par les dérivés améliorés du filtre médian de 7x7 .....	69

## Liste des tableaux

TAB.I. 1	<i>Quelque défaut de soudure par radiographie.....</i>	19
TAB. III. 1	<i>Résultats du PSNR ET MAE de l'image « 40SW » bruité par bruit aléatoire et poivre et sel .....</i>	39
TAB. III. 2	<i>Résultats de PSNR,MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit aléatoire de pourcentage variant de 10% jusqu'au 50% traité par le filtre SM .....</i>	41
TAB. III. 3	<i>Résultats de PSNR,MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit poivre et sel de pourcentage vari de 10% jusqu'au 50% traité par le filtre SM .....</i>	42
TAB. III. 4	<i>Résultats de PSNR,MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit aléatoire de pourcentage vari de 10% jusqu'au 50% traité par le filtre CWM.....</i>	45
TAB. III. 5	<i>Résultats de PSNR,MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit poivre et sel de pourcentage vari de 10% jusqu'au 50% traité par le filtre CWM.....</i>	46
TAB. III. 6	<i>Résultats de PSNR,MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit aléatoire de pourcentage vari de 10% jusqu'au 50% traité par le filtre SWM .....</i>	49
TAB. III. 7	<i>Résultats de PSNR,MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit poivre et sel de pourcentage vari de 10% jusqu'au 50% traité par le filtre SWM .....</i>	50
TAB. III. 8	<i>Résultats de PSNR,MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit aléatoire de pourcentage vari de 10% jusqu'au 50% traité par le filtre TSM.....</i>	53
TAB. III. 9	<i>Résultats de PSNR,MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit poivre et sel de pourcentage vari de 10% jusqu'au 50% traité par le filtre TSM .....</i>	54
TAB. III. 10	<i>Résultats de PSNR,MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit aléatoire de pourcentage vari de 10% jusqu'au 50% traité par le filtre DWM .....</i>	57
TAB. III. 11	<i>Résultats de PSNR,MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit poivre et sel de pourcentage vari de 10% jusqu'au 50% traité par le filtre DWM .....</i>	58
TAB. III.12	<i>Résultats de PSNR,MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit aléatoire de pourcentage vari de 10% jusqu'au 50% traité par le filtre ASWM.....</i>	64
TAB. III. 13	<i>Résultats de PSNR,MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit poivre et sel de pourcentage vari de 10% jusqu'au 50% traité par le filtre ASWM.....</i>	65
TAB. III. 14	<i>Temps d'exécution pour masque 3x3.....</i>	69

---

# Introduction générale

---

La radiographie est l'ensemble des techniques permettant de réaliser des clichés à l'aide de rayons X des structures internes d'un patient ou d'un composant mécanique (la radiographie en général). Le cliché obtenu est appelé une radiographie. L'application la plus courante est la radiographie médicale, dans laquelle les clichés traduisent l'opacité plus ou moins marquée des tissus ou organes par une teinte plus ou moins claire.

Dans le cas d'application aux contrôles de pièces mécaniques, la radiographie est une technique de contrôle non destructif (CND) qui est utilisée pour décrire tout examen de pièces ou d'assemblages utilisant des méthodes qui n'altèrent pas leur structure. Cette technique est utilisée, par exemple, pour l'inspection de certaines pièces en aluminium moulées destinées à l'aéronautique. La radiographie est également beaucoup utilisée dans le domaine de la sécurité, notamment pour le contrôle des bagages dans les aéroports, mais aussi pour le contrôle des frets maritimes et routiers (contrôles douaniers). Dans le domaine de l'industrie cette technique est très utilisée pour l'inspection de soudures. Les soudures sont largement utilisées dans beaucoup de secteurs tels que la pétrochimie, l'aéronaval, la construction automobile, les réacteurs d'énergie nucléaire et l'électronique. Les zones contrôlées peuvent présenter divers types de défauts de soudure tels que des porosités, des retassures ou des fissures, des manques de fusion. Les clichés obtenus par radiographie sont examinés par des experts en radiographie appelés aussi interpréteurs, dont le rôle est de détecter, reconnaître et quantifier des défauts éventuels. Cependant, la qualité des images radiographiques, la surépaisseur de la soudure, le mauvais contraste, le bruit et les faibles dimensions des défauts rendent leur travail très difficile.

Dans ce contexte, la conception d'un système de vision par ordinateur a pour but de mettre à la disposition de l'expert l'ensemble des possibilités offertes par les techniques de traitement numérique d'images : amélioration d'image, élimination du bruit, segmentation et quantification de l'information, classification et la prise de décision.

Le traitement numérique des images recouvre l'ensemble des procédés d'extraction d'informations qualitative des images numériques, allant du prétraitement jusqu'à l'extraction de la zone de l'objet à identifier. On assiste aujourd'hui à l'utilisation d'algorithmes de traitement d'image qui sont de plus en plus performants et spécifiques. C'est pourquoi, dans notre application, nous devons tenir compte, lors de l'implémentation des différents algorithmes, de la nature des images des films radiographiques à traiter.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés au premier maillon de la chaîne de vision c.à.d. le prétraitement et plus exactement l'élimination du bruit dans l'image radiographique. Ce dernier peut être obtenu pour diverses raisons : le mode de transmission des rayonnements ionisants, l'existence de l'écran renforceur, la nature du film, l'attaque des produits chimiques composant le révélateur lors du développement du film, etc. Il est à signaler que la prise en charge de cette étape influence énormément sur le résultat final de l'identification du défaut de soudure. En effet, un mauvais filtrage conduit à une mauvaise segmentation de l'image radiographique et qui va induire, à son tour, une description erronée de l'objet à identifier.

Notre mémoire s'articule sur trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous donnons un aperçu sur le soudage, les défauts de soudure et le contrôle non destructif par la radiographie industrielle.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons notamment : des notions sur le traitement numérique d'image, les types de bruit d'image, en particulier le bruit impulsionnel et les critères utilisés pour évaluer la performance des méthodes de filtrage.

Enfin dans le troisième chapitre nous donnons les différents algorithmes de filtrage non-linéaire utilisés et les résultats de leur application sur l'image radiographique d'une soudure où, des comparaisons sont faites grâce à de tableaux de valeurs et sont illustrées par des graphes pour un souci de clarification. Aussi, dans ce chapitre, nous présentons l'interface graphique réalisée dans le cadre de notre travail.

# Chapitre I soudage, contrôle non destructif et radiographie industrielle

---

## I.1 Introduction

Parmi les procédés d'assemblages, le soudage occupe une place importante dans toute les branches d'industrie, car il permet d'adapter au mieux, les formes de construction aux contraintes qu'elles sont appelées à supporter en service.

Le soudage est une opération qui consiste à réunir deux ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage, de manière à assurer la continuité entre les parties à assembler soit par chauffage soit par intervention par pression ; soit par l'un ou l'autre, avec ou sans métal d'apport dans la température de fusion est du même ordre de grandeur que celle de matériaux de base.

Le Contrôle Non Destructif (C.N.D.) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader,

Soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances

La radiographie industrielle est un contrôle non destructif qui consiste à traverser le composant à contrôler avec un faisceau de rayonnement électromagnétique ionisant (rayons gamma ou X). Ce rayonnement sera plus ou moins absorbé par les défauts internes de la pièce, pour arriver jusqu'à l'autre côté de cette pièce, avec une intensité de rayonnement différente et s'incruster sur un film radiographique [1].

## I.2 Soudage

### I.2.1 Historique :

Le soudage est une pratique employée depuis l'apparition de l'utilisation des métaux. En effet, des expertises métallurgiques effectuées sur des objets métalliques archéologiques datant d'avant notre ère montrent l'exécution de soudures au sens actuel du terme, c'est-à-dire l'assemblage de plusieurs pièces élémentaires exécutées séparément, dans le but de réaliser un objet macroscopique, fini, complexe dans sa forme et/ou dans sa nature dont les différentes parties ont été unies à l'échelle atomique. Aujourd'hui de telles soudures ne sont plus utilisées que par des forgerons d'art. Cette technique d'assemblage, qui répond sans ambiguïté à la définition actuelle du soudage, est restée la seule réellement pratiquée jusqu'à la fin du dix-neuvième siècle, c'est-à-dire jusqu'à la découverte de l'acétylène et du chalumeau oxyacétylénique, même si l'on trouve quelques tentatives d'utilisation des procédés utilisant l'électricité au 19<sup>ième</sup> siècle (soudage par résistance, premières utilisations de l'arc électrique) [2][3].

Jusqu'au milieu du 19ème siècle, les procédés de soudage évoluent peu. Vers 1850 on commence à se servir du gaz pour chauffer les métaux à souder.

Fin 19ème : mise en œuvre de nouveaux procédés :

- Le soudage oxyacétylénique
- Le soudage aluminothermique
  
- Le soudage à l'arc électrique
- Le soudage par résistance

Début du 20ème siècle : le soudage s'est généralisé dans l'industrie : construction navale, aéronautique, automobiles... c'est une modification importante dans la conception et la réalisation des objets l'utilisation pour les ponts de grandes dimensions et fortes épaisseurs. Le soudage devient indissociable du développement de nombreux secteurs économiques. Dans les années trente, le champ d'application du soudage s'élargit : construction navale, automobile, aéronautique. Un nouveau métier est apparu : celui de soudeur. Il devient



nécessaire de former les ouvriers et d'organiser des cours. Le CAP de soudeur est créé en 1931.

Pendant des années, le soudage ne cesse d'évoluer sur le plan technologique.

- industrialisation de principes physiques : faisceau d'électrons, soudage au laser et aux ultra-sons

- découvertes involontaires : le soudage par explosion et par diffusion

- introduction croissante de la micro-électronique dans les équipements de soudage et développement de la robotisation, d'où une amélioration de la qualité et de la productivité.

Depuis ces dix dernières années, les innovations portent moins sur les procédés mêmes, que sur le matériel de soudage et les matériaux d'apport. Ainsi que sur les méthodes et conditions de travail, qui continuent de s'améliorer, notamment en matière d'hygiène et de sécurité.

A l'heure actuelle, les procédés industriels de soudage peuvent atteindre une puissance de 100kW/cm<sup>2</sup>.

### **I.2.2 Définition du Soudage :**

Parmi les définitions nombreuses et variées du soudage qui fournissent la littérature technique depuis trois quarts de siècle est celle qui fait appel à la notion de continuité. Selon cette définition, le soudage est une opération par laquelle on établit la continuité entre les parties à assembler, par divers moyens.

Le soudage est un procédé de fabrication ou de sculpture qui associe des matériaux (généralement des métaux ou des thermoplastiques) en provoquant la coalescence, souvent en faisant fondre les pièces à usiner et en ajoutant un matériau de remplissage pour former un pool de matériau en fusion (le pool de soudure) qui se refroidit pour devenir un matériau mixte. Le soudage contraste avec le brasage tendre et le brasage dur, qui impliquent la fusion d'un matériau à point de fusion inférieur entre les pièces à usiner pour former un lien entre elles, sans faire fondre les pièces à usiner.

Parmi les nombreuses méthodes de jonction des métaux, le soudage est l'un des plus pratiques et des plus rapides, ainsi que l'un des plus permanents, cette définition valable

pour n'importe quel matériau, y compris les matières plastiques, s'applique intégralement au cas des métaux et alliages, dans la mesure où l'opération consiste à établir la continuité métallique entre les parties à assembler. A l'échelle macroscopique, la continuité métallique implique l'absence, une fois l'assemblage réalisé, de toute matière non métallique interposée entre les éléments réunis. En cela, la liaison par le soudage se différencie des liaisons par rivetage, par agrafage ou même par collage [4][5].

### **I.2.3 Procédés de soudage :**

Les techniques du soudage se sont développées tellement rapidement au cours des dernières années qu'il serait impossible de donner une liste complète de tous les procédés utilisés de nos jours. On peut toutefois les classer en deux catégories : le soudage par fusion et le soudage sans fusion.

Le soudage par fusion est l'ensemble des procédés qui consistent à assembler des pièces de métal par fusion des parties en contact. Le soudage sans fusion est l'ensemble des procédés qui consistent à assembler des pièces de métal sans fusion des parties en contact. Le boulonnage, le rivetage et tous les autres modes d'assemblage du même type ne font pas parties du soudage sans fusion [6].

### **I.2.4 Description d'un joint soudé :**

Le joint soudé est la zone critique de la soudure, il détermine si une soudure peut être acceptable. Il est formé de quatre zones (Fig. I.1) [7]:

1- zone fondue

2- zone de liaison

3- zone affectée thermiquement

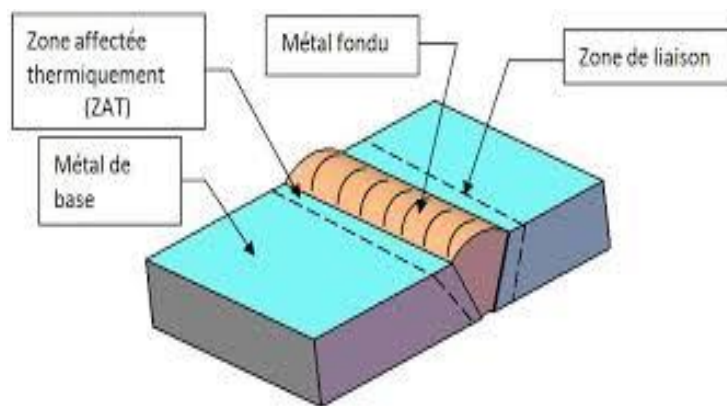
4- métal de base

- **Zone fondue** : C'est la zone durant l'opération de soudage où l'état liquide a été obtenu qu'il y ait eu ou non apport de métal.

- **Zone de liaison** : C'est la frontière entre le métal fondu et le métal de base non fondu

- **Zone affectée thermiquement** : Elle concerne le métal de base qui n'a pas fondu mais qui a subi des modifications de structure (grosseur des grains) ou physico-chimiques (natures et proportions des constituants).

- **Métal de base** : Le métal de base est la zone qui n'a pas été affectée par l'opération de soudage du point de vue des modifications physico-chimiques. Par contre cette zone peut être le siège de contraintes et de déformations.



**Fig. I. 1** Schéma représentatif d'un joint soudé

### I.2.5 Défauts de soudure :

Le manque de formation de l'opérateur ou l'application imprudente de la soudure peuvent provoquer des discontinuités dans le soudage. On observe les défauts tels que la porosité, l'inclusion du laitier, les fissures de solidification, etc., qui détériorent la qualité de la soudure et les propriétés du joint [8].

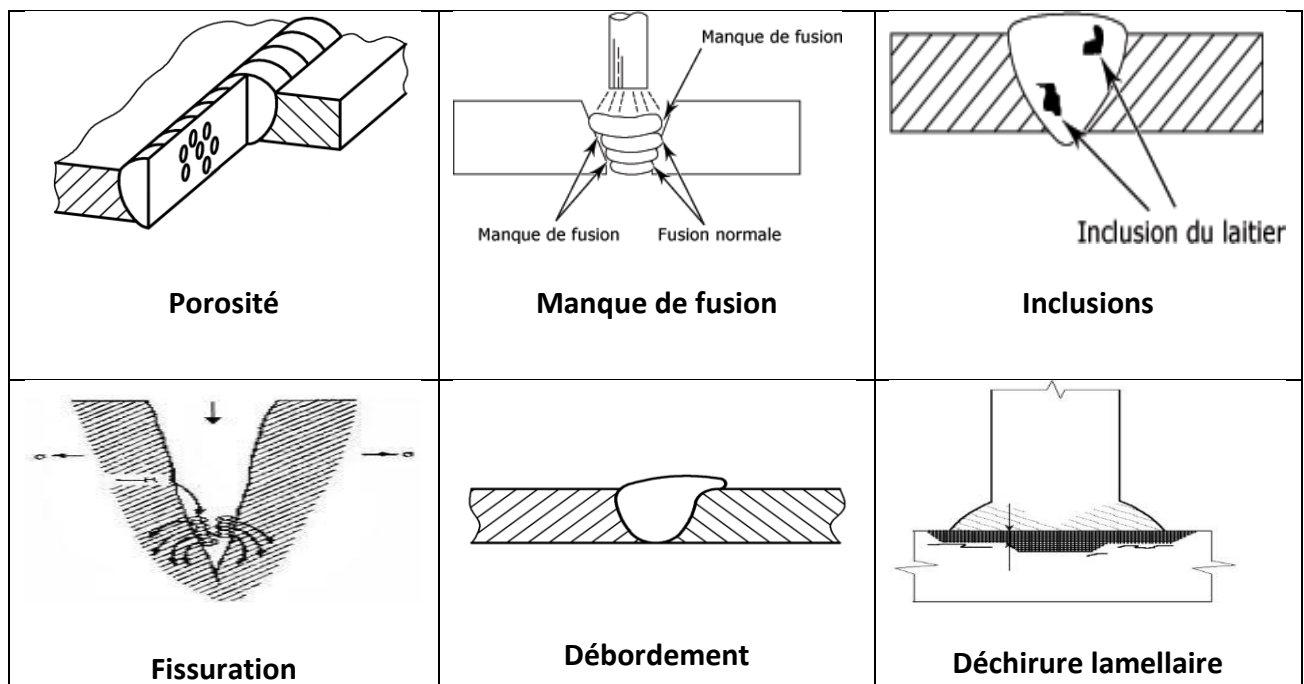
Parmi les défauts :

**Porosité** : La porosité se produit lorsque les métaux de soudure en cours de solidification contiennent des gaz. La présence de porosité dans la plupart des joints soudés est due à la présence de saleté sur la surface du métal à souder ou de produits consommables humides.

**Manque de fusion** : le manque de la fusion se pose en raison d'une entrée trop faible ou d'une traversée trop lente de la torche.

**Inclusions** : En raison du piégeage des oxydes, des fondants et des matériaux de revêtement des électrodes dans la zone de soudure, des inclusions se sont produites. Les inclusions se produisent lors de l'assemblage de plaques épaisses dans plusieurs séries à l'aide de tiges fourrées ou revêtues de flux et le laitier recouvrant une série n'est pas totalement éliminé après chaque série et avant le début de la série suivante.

**Fissuration** : Rupture dans le métal qui résulte de la présence des contraintes localisées qui dépassent la résistance limite du matériau.



**Fig. I. 2** Les différents types des défauts de soudage

**Débordement** : Le débordement est dû à des réglages incorrects ou à une utilisation de procédure incorrecte. Le débordement peut être détecté à l'œil nu et l'excès de pénétration peut être détecté visuellement.

**Déchirure lamellaire** : En raison des inclusions non métalliques, la déchirure lamellaire se produit par la direction de l'épaisseur. Ceci est plus évident dans les plaques laminées. Comme la limite de fusion est parallèle au plan de roulement dans les joints en T et dans les coins, la déchirure lamellaire se produit. En redessinant le joint et en beurrant la zone de soudure avec un matériau ductile.

### **I.3 Le contrôle non destructif :**

L'objectif des méthodes d'examen et de contrôle est de faire la distinction entre les méthodes d'essais destructifs et non destructifs et de décrire différentes méthodes d'essais non destructifs pour identifier les défauts. Les méthodes d'examen non destructifs incluent les méthodes d'examen ainsi que les méthodes de contrôle. Le contrôle non destructif (CND) permet de vérifier la qualité du matériau (repérer les discontinuités dans une pièce) sans l'endommager, soit au cours de la production, soit au cours de la maintenance. Toutes les soudures présentent des défauts. Les défauts ou les discontinuités dont la taille est trop importante sont appelés défauts inacceptables. En pratique, les défauts de petites tailles sont peu nombreux et n'affectent pas les performances de l'assemblage soudé.[9]

Les méthodes de contrôle non destructif utilisées couramment sont : le contrôle visuel, le ressuage, la magnétoscopie, la radiographie RX et  $\gamma$ , les courants de Foucault et les ultrasons.

### **I.4 Radiographie industrielle :**

#### **I.4.1 Historique :**

En 1895, le physicien allemand Wilhelm Röntgen étudie le rayonnement cathodique avec des tubes de Crookes. Il a déjà été constaté à l'époque que les rayons cathodiques peuvent franchir la paroi du tube et pénétrer de quelques centimètres dans l'air, au cours de ses travaux préliminaires il décide de recouvrir le tube d'un cache en carton noir. Il constate alors qu'un écran recouvert d'une couche de platino-cyanure de baryum placé fortuitement en face du tube devient fluorescent lors de la décharge. Or il sait qu'à cette distance, la fluorescence ne peut pas être due aux rayons cathodiques. Il éloigne encore l'écran et constate que la fluorescence persiste malgré l'augmentation de la couche d'air à traverser. Puis il intercale des objets entre l'ampoule et l'écran : une feuille de papier, une feuille d'aluminium, du bois, du verre et même un livre de mille pages. À chaque fois la fluorescence persiste : il en conclut qu'il vient de découvrir un rayonnement distinct de celui émis par la cathode, très pénétrant puisqu'il est capable de traverser la matière. Ces rayons étant inconnus jusqu'alors, il les nomme « X » du nom de l'inconnue en mathématiques.

Dans sa première communication faite à la Société Physico-Médicale de Würzburg « Sur un nouveau type de rayon » il remarque que « si l'on met la main entre l'appareil à décharges et l'écran, on voit l'ombre plus sombre des os de la main dans la silhouette un peu moins sombre de celle-ci. » Röntgen décrit la première image radiographique. Il réalise également le premier cliché radiographique le 22 décembre 1895 en intercalant la main de son épouse entre le tube de Crookes et une plaque photographique. Les parties les plus denses et épaisses sont les plus sombres sur la plaque [10].

#### **I.4.2 Définition de la radiographie :**

La radiographie, technique bien connue et répandue dans le domaine médical, est également largement utilisée pour le contrôle des pièces et des soudures dans l'industrie. Nombreux sont les progrès réalisés durant ces dernières années dans le domaine de la radiographie industrielle. En s'inspirant notamment du domaine médical, on peut citer la digitalisation, la reconstruction volumique des pièces (tomographie) ou encore la possibilité de détection de défauts microscopiques

Elle est définie comme étant un examen qui utilise un faisceau de rayonnements ionisants X et  $\gamma$  pénétrants, dirigés vers la pièce à inspecter Cette méthode présente l'avantage de fournir des images directement exploitables, toutefois, l'interprétation des images demande un fort niveau d'expertise de la part des inspecteurs. De plus, cette méthode impose des conditions de sécurité pour les travailleurs et l'environnement, qui rendent son utilisation en industrie difficile.

#### **I.4.3 Principe de la radiographie :**

La radiographie industrielle est une méthode de contrôle non destructif par émission de rayons gamma ou X. Elle vise à détecter les éventuels défauts des pièces industrielles et ouvrages, en particulier des cordons de soudure, lors de leur fabrication ou lors d'opération de maintenance. Elle est employée dans des secteurs industriels variés : chaudronnerie, pétrochimie, aéronautique, installations nucléaires, travaux publics, armement, etc.

Un récepteur radiographique placé sous l'objet examiné fixe le rayonnement immergé, ce qui se traduit par une différence de noircissement sur le film développé par voie chimique Le noircissement sur le film permet de distinguer les zones saines des zones contenant des défauts [11].

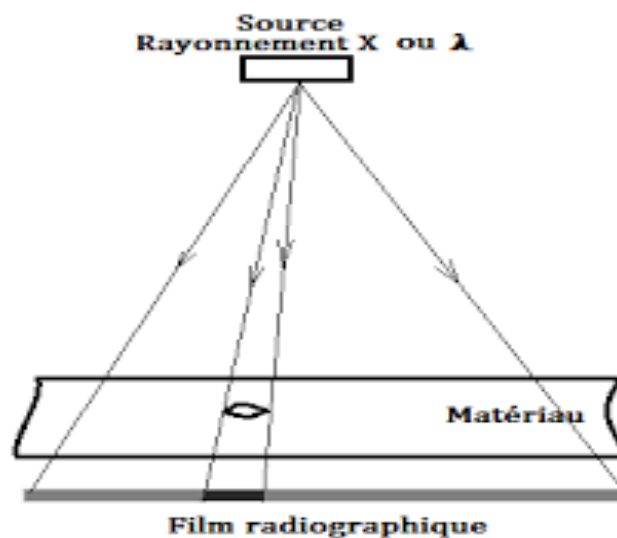
L'image est obtenue grâce à un détecteur qui est soit :

- Un film argentique
- un écran photo stimulable à mémoire réutilisable
- un ensemble de détecteurs numériques

Le principe de la méthode est basé sur l'absorption différentielle du milieu en fonction du numéro atomique des atomes le composant et de la masse volumique. Tout manque de matière induira une plus faible absorption et donc, localement, une plus forte densité optique sur le film ou un niveau de gris plus élevé dans le cas des images numériques.

La radiographie industrielle est principalement Concernée par les images d'enregistrement sur le film. Voici donc, les trois bases essentielles dans la production d'une radiographie :

- a. une source de rayonnement des rayons X ou gamma
- b. l'objet à examiner
- c. une cassette contenant le film



**Fig. I. 3** Montage de base pour la radiographie sur film

#### **I.4.4 Production des rayons X :**

Les rayons X sont produits dans des tubes à rayons X également appelés tubes de Coolidge ou tubes à cathode chaude. Le principe est le suivant : des électrons émis par une cathode (un filament, le plus souvent en tungstène, chauffé par le passage d'un courant électrique) sont accélérés par une différence de potentiel élevée (de 10 à 150 kV) en direction d'une cible constituée d'une anode en métal (en tungstène également).

Les rayons X sont émis par la cible selon deux mécanismes :

- le freinage des électrons par les atomes de la cible crée un rayonnement continu (rayonnement de freinage) dont une partie dans le domaine des rayons X ;
- les électrons accélérés ont une énergie suffisante pour exciter certains des atomes de la cible, en perturbant leurs couches électroniques internes. Ces atomes excités émettent des rayons X en retournant à leur état fondamental.

Une faible portion, 1% environ de l'énergie cinétique cédée par les électrons est rayonnée sous forme de rayons X, les 99 % restants sont convertis en énergie thermique. Les rayons X sont en effet produits à l'intérieur d'une enceinte en verre ou céramique dans laquelle règne un vide poussé (environ  $1.10^{-6}$  Pascal).

Deux électrodes sont disposées à l'intérieur de cette enceinte :

- une cathode constituée par un filament métallique qui, lorsque porté à une température élevée, émet des électrons par effet thermoélectronique,
- une anode portée à un potentiel positif par rapport à la cathode. Ce qui crée, entre les deux électrodes un champ électrique. Dans les tubes radiogènes modernes , le filament de cathode est placé à l'intérieur d'une coupelle de focalisation (ou pièce de concentration) destinée à concentrer le 8 faisceau d'électrons émis, alors que l'anode comporte une cible en tungstène destinée à recevoir les électrons émis par la cathode puis accélérés par la différence de potentiel établie entre cette dernière et l'anode.

Ce sont les interactions entre ces électrons et les atomes constituant la cible qui produisent la quasi-totalité des rayons X émis. En effet, les électrons qui passent à proximité d'un noyau atomique de la cible subissent une force d'attraction  $F$  qui les dévie de leur trajectoire



initiale. Sous l'effet de la décélération qui en résulte, il se produit une émission d'un rayonnement électromagnétique dit de freinage qui constitue le spectre continu des rayons X émis [12].

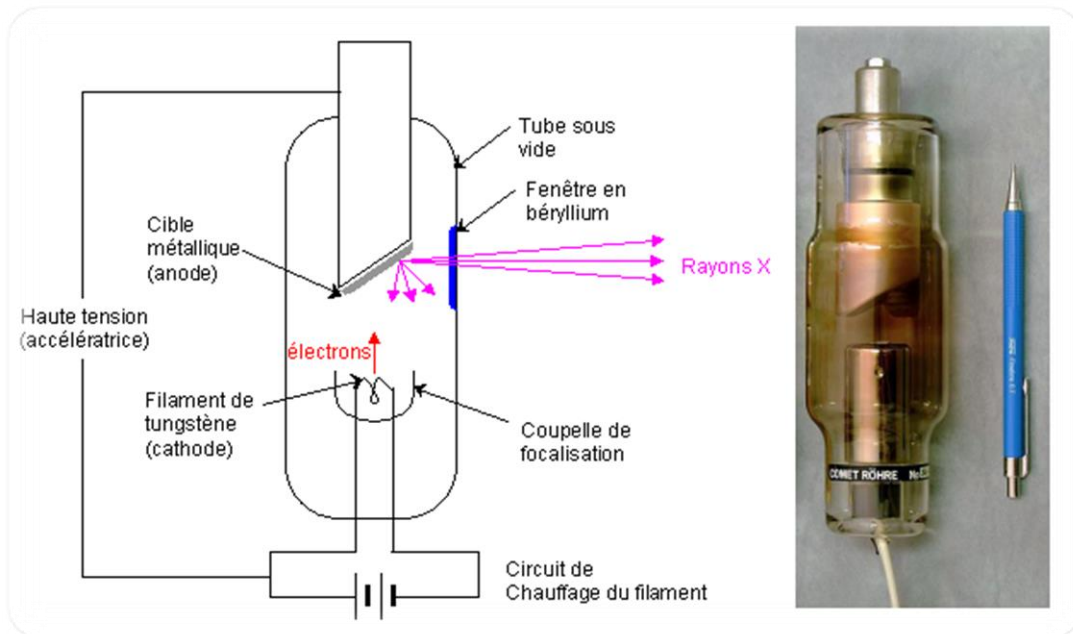


Fig. I. 4 Tube à rayons X

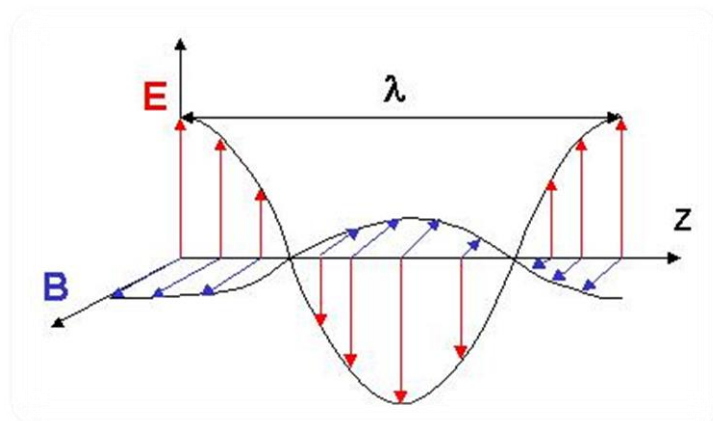
#### I.4.5 Principe de la radiographie par rayon X:

Le travail aux rayons ressemble à la prise de photos. D'un côté de la pièce, on fixe un film et, de l'autre côté, on place une source radioactive ou un tube à rayons X. Le rayonnement passe à travers la pièce et arrive sur le film. Plus la pièce est fine, moins le rayon est retenu. Le film est donc exposé au mieux. Un défaut ou une irrégularité dans la pièce va plus ou moins retenir le rayonnement que ses environs et se dégager. Le rayonnement gamma a un plus grand pouvoir de pénétration que les rayons X. La source de rayonnement utilisée, l'épaisseur de la pièce et le temps d'exposition doivent correspondre. Pour un profane, les clichés sont difficiles à interpréter. Ils doivent donc être examinés par quelqu'un d'expérimenté.

La radiographie permet en fait de visualiser le défaut internes d'une pièce .L'intensité » du rayonnement incident issu d'un générateur de rayons X ou d'un radioélément artificiel est modifiée lors de son passage à travers un matériau par les discontinuités qu'il renferme, un récepteur radiographique placé sous l'objet examiné fixe le rayonnement immerge, ce qui se traduit par une différence de noircissement sur le film développé par voie chimique. Le noircissement sur le film permet de distinguer les zones saines des zones contenant des défauts.

#### I.4.6 Les rayonnements électromagnétiques :

Les rayons X sont une forme de rayonnement électromagnétique, au même titre que la lumière visible, l'ultra-violet, l'infra-rouge, les micro-ondes, les ondes radio ou les rayons gamma. Une onde électromagnétique est due à un champ électrique et un champ magnétique perpendiculaires oscillants en phase (Fig. I.5). Elle se propage dans le vide à la vitesse de la lumière ( $c = 299792458$  m/s). Dans le cas d'une onde sinusoïdale ou monochromatique, elle a une fréquence  $\nu$  définie et une période  $T = 1/\nu$ . La longueur d'onde  $\lambda$  est la distance parcourue par l'onde en une période, soit  $\lambda = c T = c/\nu$  [13].



**Fig. I. 5** Onde électromagnétique

Structure à un instant donné des champs électriques et magnétiques, E et B, de l'onde se propageant dans la direction z.

Une onde électromagnétique réelle est généralement constituée d'une superposition d'ondes de fréquences différentes. La répartition quantitative de la puissance propagée selon la fréquence est appelée le « spectre » de l'onde

Le modèle corpusculaire du rayonnement électromagnétique est mieux adapté aux rayonnements de hautes fréquences : on considère qu'un faisceau est constitué de photons, des particules sans masse qui se déplacent à la vitesse de la lumière. Chaque photon transporte une quantité d'énergie  $E$  proportionnelle à la fréquence de l'onde  $E=hf$ , où  $h$  est la constante de Planck.

Les ondes électromagnétiques sont classées et nommées en fonction de leur domaine de fréquence (Fig. I.6). Bien que de même nature, les ondes d'un domaine de fréquence à l'autre correspondent à des mécanismes d'émission différents et exigent des techniques différentes de détection.

On appelle rayons X les ondes électromagnétiques dont les fréquences sont comprises entre  $10^{16}$  Hz et  $10^{20}$  Hz. Les longueurs d'ondes sont de l'ordre de  $10^{-8}$  à  $10^{-12}$  m, et les énergies des photons X sont comprises entre 40 et  $4 \times 10^5$  eV (1 eV correspond à  $1,6 \times 10^{-19}$  J, c'est l'énergie d'un photon dans l'infra-rouge). Ces énergies sont de l'ordre de grandeur des énergies de liaison des électrons des couches internes des atomes (de l'ordre du keV). Le domaine des rayons X se situe entre l'ultra-violet et les rayons gamma.

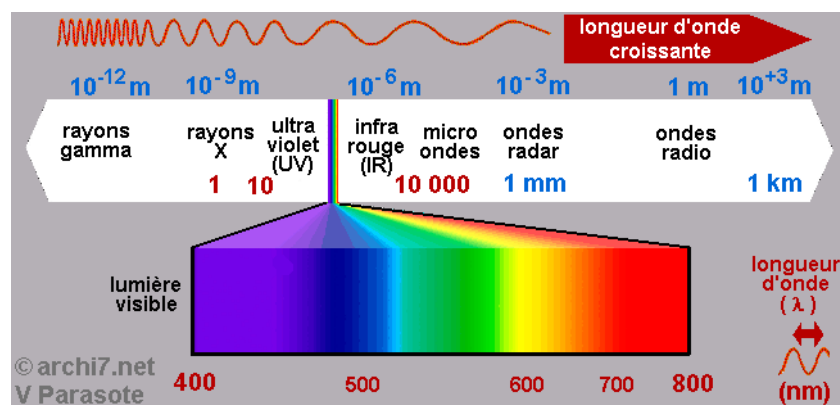


Fig. I. 6 Spectre électromagnétique

#### **I.4.7 Absorption des rayons X et gamma :**

La réduction de l'intensité du rayonnement à la pénétration d'un matériau est déterminée par réactions suivantes :

1. Effet photoélectrique
2. Effet de contrôle
3. Production par paires

Laquelle de ces réactions prédominera dépend de l'énergie de l'incident rayonnement et le matériau irradié. La nécessité de connaître les modes d'interaction de ces rayonnements électromagnétiques avec la matière devient de fait que le principe de la formation des images de défauts en radiologie repose sur l'absorption différentielle de ces rayonnements dans le matériau contrôlé. Comme le montre la figure suivante, lorsqu'un faisceau homogène de rayons X ou gamma d'intensité  $I_0$  traverse une épaisseur infiniment petite  $dx$  d'un matériau. Il subit alors une diminution d'intensité  $dI$  qui est proportionnelle à l'intensité  $I_0$  du faisceau incident et l'épaisseur  $dx$  du corps absorbant. Ce qui s'exprime sous la forme de l'équation différentielle suivante :

$$dI = - I_0 \cdot \mu \cdot dx$$

Le signe négatif indique une diminution d'intensité, avec  $\mu$  est une constante appelée coefficient d'absorption linéique du matériau, il tient compte des différents mécanismes d'absorption et aussi la nature physique du milieu absorbant et du rayonnement, il s'exprime en  $\text{cm}^{-1}$ . Si l'intensité  $I$  du rayonnement est obtenue par l'intégration de l'équation différentielle

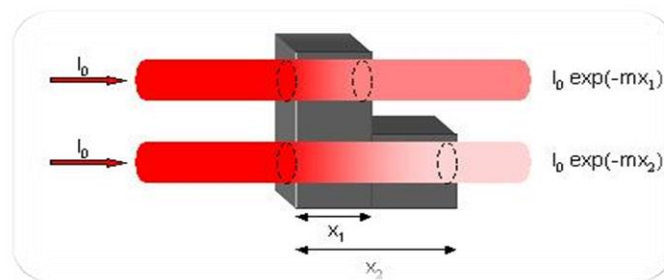
$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x)$$

Avec :

- $I_0$  : intensité de la radiation incidente
- $I$  : intensité de la radiation transmise
- $x$  : épaisseur du spécimen
- $\mu$  : coefficient linéaire d'absorption pour le matériau

Pratiquement, les rayonnements X ou gamma sont polychromatiques, ils sont alors constitués de radiations de différentes longueurs d'ondes. Lorsque l'intensité  $I_0$  correspondant à chacune d'elles traverse un matériau dont le numéro atomique est connu,

elle est absorbée proportionnellement à la puissance 3 de la longueur d'onde  $\lambda$  de la radiation considérée. En fait, l'interaction des rayonnements X ou gamma avec les électrons gravitant autour des atomes des matériaux, provoque une absorption. Pour chaque matériau, cette absorption est exprimée selon la nature de la source de rayonnement utilisée et son énergie par la notion d'épaisseur de demi-transmission désignée par le symbole  $e_{0.5}$ .



**Fig. I. 7** Absorption des rayons X par la matière

#### **I.4.8 Application de la radiographie a l'opération soudure :**

L'une des applications de la radiographie industrielle est le contrôle non destructif des joints soudés par les rayons X dont le but est de distinguer un défaut spécifique des autres défauts dans l'image du film radiographique.

Le contrôle a pour but de mettre en évidence les caractéristiques et les dimensions du défaut, c'est à dire déterminer la qualité ou l'état d'un matériau avec l'intention d'accepter ou de rejeter ce dernier. Du point de vue industriel, cela revient à déterminer si un matériau ou une pièce répondra d'une façon satisfaisante à la fonction qui lui sera demandée, permettant ainsi :

- L'augmentation de la productivité et des bénéfices ;
- L'augmentation de la sécurité (éviter les accidents) ;
- L'augmentation de la durée de vie des installations (éviter le mauvais fonctionnement des équipements).

#### **I.4.9 Considérations liées à la qualité de l'image radiographique :**

En radiographie, la qualité de l'examen se définit par sa capacité à fournir les informations souhaitées c'est-à-dire les critères de réussite d'un cliché; ce qui introduit la notion de qualité d'image, qui repose sur nombreux paramètres dont le contraste et la netteté.

#### **I.4.10 Domaine d'application du rayon X ou gamma :**

Le contrôle radiographique par rayon X ou gamma s'applique à toute sorte de matériaux de nature différente (papier, matière plastique, matériaux métalliques).

Les paramètres qui influent sur la probabilité de détection des discontinuités dans la matière sont principalement :

- l'épaisseur et la forme des matériaux radiographiés ;
- la nature de ce matériau ;
- la forme et la nature des discontinuités affectant le matériau ;
- la position de ces défauts dans l'épaisseur contrôlée ;
- La nature de la source de rayonnement et le type du film utilisé.

Lorsqu'un défaut est mis en évidence par radiographie, il est possible d'en déterminer la nature ainsi que la dimension apparente sur le film. En revanche, l'appréciation de la profondeur du défaut constitue une opération longue et délicate.

### I.4.11 Identification du défaut de soudure par radiographie

Désignation	Description	Aspect radio	Description par images
<b>Inclusion de laitier</b> De forme et d'orientation quelconque Alignés ou en chapelet Alternées	Laitier ou autre matières étrangères, emprisonnées durant le soudage Cavitité alignées contenant du laitier ou autre matière étrangères Inclusions de laitier dues à une mauvaise technique d'exécution	Tache sombre à contour irrégulier Lignes sombres plus ou moins interrompues, parallèles aux bords de la soudure Taches sombres à contour irrégulier disposées alternativement en deux lignes parallèles	
<b>Manque de fusion</b>	Défaut à deux dimensions du à un manque de liaison entre le métal de base et le métal d'apport	Mince ligne sombre avec des bords nettement définis	
<b>Manque de pénétration</b>	Manque de fusion à la racine de la soudure	Ligne sombre continue ou intermittente au milieu de la soudure	
<b>Fissure</b> Fissure longitudinale Fissure transversale	Discontinuités produite par fracture dans le métal	Fine lignes sombre rectiligne ou non	
<b>Inclusions gazeuses</b> Soufflure sphérique Soufflure vermiculaire	Cavitité dues à des inclusions de gaz Cavitité allongées ou tubulaires dues à des inclusions de gaz	Tache sombre et à contour circulaire Tache sombre nettement définies et à contour arrondi suivant l'orientation du défaut	

TAB.I. 1 *Quelque défaut de soudure par radiographie*

## **I.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur le soudage, le contrôle non destructif par radiographie et les discontinuités les plus prépondérantes dans le soudage ainsi que la description de leur apparence dans la radiographie industrielle. Dans les chapitres qui suivent, ces films radiographiques feront l'objet du traitement numérique des images et des méthodes d'analyse et de classification en vue d'identifier les différents types de défauts soudure s'y trouvant.



# Chapitre II Traitement numérique des images des films de radiographie

---

## II.1 Introduction

Le traitement d'image est une branche de l'informatique qui s'intéresse à l'étude, la transformation, l'amélioration, et l'extraction de l'information des images numériques. Les domaines d'application de cette discipline sont très variés, à titre d'exemple, on peut citer la médecine, le contrôle industriel, la sécurité biométrique, la surveillance, l'imagerie satellitaire, etc. On désigne par traitement d'images numériques l'ensemble des techniques permettant de modifier une image numérique afin d'améliorer ou d'en extraire des informations en éliminant le plus de bruit possible tout en préservant le maximum d'informations.

De ce chapitre, le traitement d'images est l'ensemble des méthodes et techniques opérant sur celles-ci, dans le but de rendre cette opération possible, plus simple, plus efficace et plus agréable, d'améliorer l'aspect visuel de l'image et d'en extraire des informations jugées pertinentes. Ce chapitre expose des méthodes dans le domaine spatial.

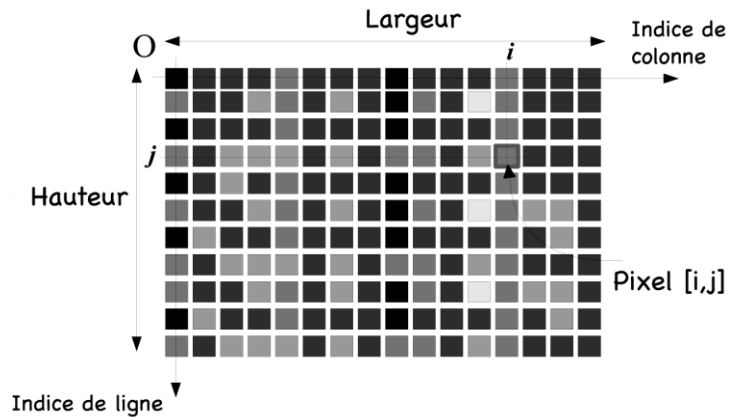
## II.2 Image Numérique et différentes méthodes d'analyse d'image

### II.2.1 Image Numérique

Une image est un signal bidimensionnel.

Une image **analogique** est par exemple celle formée sur la rétine de l'œil ou l'image obtenue par la photographie argentique classique.

Une image **numérique** est un signal numérique composé d'unités élémentaires (appelées pixels) qui représentent chacun une portion de l'image. Contrairement au cas unidimensionnel, nous étudierons uniquement les images numériques (discrètes).



**Fig. II. 1** Pixels et niveaux de gris

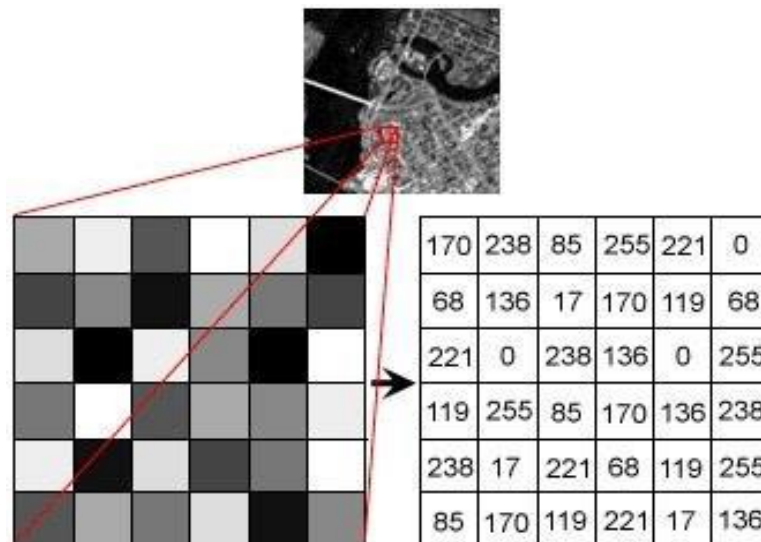
Il existe deux sortes d'images numériques : les images vectorielles et les images matricielles.

- **Les images vectorielles** : Le mot « Vectoriel » ici ne se réfère pas aux vecteurs mathématiques, mais qualifie principalement les données informatiques qui sont des instructions ou des attributs graphiques.

- **Les images matricielles** : Le format matriciel d'une image, appelé aussi "bitmap" (ou points par points) est en fait une matrice (un tableau) constituée de points colorés appelés pixels. Chaque pixel représente un point de l'image. Plus la densité des points sont élevée, plus le nombre d'informations est grand et plus la netteté de l'image est bonne.

L'image numérique est représentée sous forme d'une matrice à deux dimensions de  $M \times N$  éléments ou à trois dimensions  $M \times N \times L$ . Chaque cellule de ce tableau correspond à un pixel (abréviation de Picture Élément) de cette image. Le pixel est le plus petit élément constitutif de l'image (Fig. II.2), Chaque cellule de la matrice stocke une valeur numérique codée en binaire.

Cette valeur représente la valeur chromatique de ce pixel (noir, blanc, niveau de gris ou couleur). Les valeurs numériques sont souvent réduites à une représentation mathématique compressée. Les bits sont réinterprétés et lus par l'ordinateur afin de délivrer une version analogique de l'image en vue d'être affichée ou imprimée.



**Fig. II. 2** Image numérique matricielle

Une image numérique est définie par :

- Résolution : le nombre de pixels qui la composent en largeur et en hauteur,
- Dynamique : l'étendue des teintes de niveaux de gris ou des couleurs que peut prendre chaque pixel.
- Les images binaires (noir ou blanc): ce sont les images les plus simples. Un pixel peut prendre uniquement les valeurs noir ou blanc. C'est typiquement le type d'image que l'on utilise pour scanner du texte quand celui-ci est composé d'une seule couleur.

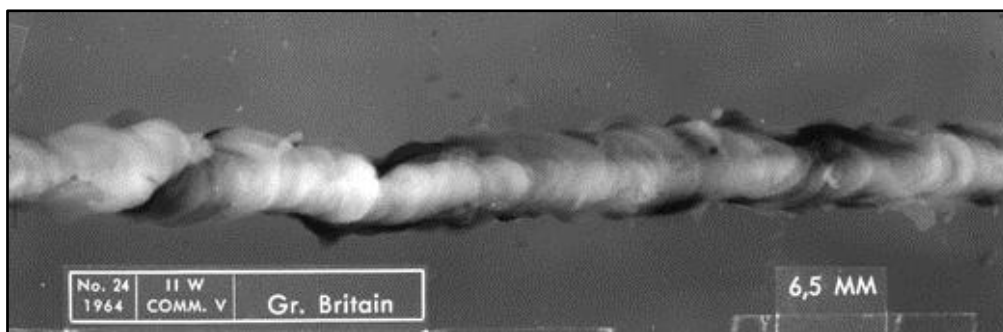
Les images couleurs: L'espace couleur est basé sur la synthèse additive des couleurs, c'est à dire que le mélange de trois composantes (par exemple (R, V, B) donne une couleur. On garde l'information couleur, ou intensité lumineuse et chromaticité. Un pixel est codé par trois valeurs numériques. La signification de ces valeurs dépend du type de codage choisi. Le

plus utilisée pour le maniement des images numériques est l'espace couleur Rouge, Vert, Bleu (R, V, B) (RGB en anglais).

Les images en niveaux de gris: en général, les images en niveaux de gris renferment 256 teintes de gris. Par convention la valeur zéro représente le noir (intensité lumineuse nulle) et la valeur 255 le blanc (intensité lumineuse maximale). Le nombre 256 est lié à la quantification de l'image. Chaque entier représentant un niveau de gris est codé sur 8 bits. Il est donc compris entre 0 et  $2^8 - 1 = 255$ . C'est la quantification la plus courante. On peut coder une image en niveaux de gris sur 16 bits ( $0 \leq n \leq 2^{16} - 1$ ) ou sur 2 bits : dans ce dernier cas le niveau de gris vaut 0 ou 1 : il s'agit alors d'une image binaire (Noir et Blanc).

### II.3 L'image de radiographie industrielle

L'information visuelle fournie par l'image de radiographie d'un joint soudé à l'exemple de celle illustrée dans Fig. II.3 est complexe, compte tenu du grand nombre de facteurs perturbateurs. Les images traitées se caractérisent par trois phénomènes particuliers :



**Fig. II. 3** Image radiographique d'un joint soudé

- Manque de contraste entre le défaut et le fond de l'image qui est dû physiquement à la disproportion entre l'épaisseur du défaut et celle de la pièce inspectée.
- Aspect granulaire du fond de l'image, perçu comme un bruit de fond, et dû à la nature granulaire de l'émulsion et aux conditions de la numérisation.

- Présence d'un gradient de fond d'image caractérisant la variation d'épaisseur de la pièce inspectée, ce gradient peut nuire à la détection de défauts de faibles dimensions et de faibles contrastes.

L'importance de ces trois phénomènes varie d'une image à l'autre, en fonction de la nature du métal, de l'épaisseur de la pièce et du type de rayonnement employé [14].

### **II.3.1 Causes d'une mauvaise qualité d'image**

Une mauvaise qualité de l'image radiographique peut apparaître sous l'une des formes suivantes (nous ne citons que quelques-unes) [14]:

- Densité trop forte, ou faible
- Contraste trop élevé, ou insuffisant
- Dépôt blanchâtre
- Distorsion de l'image

## **II.4 Schéma général du système de vision des radiogrammes**

Pour notre application, le système de vision par ordinateur dédié aux images des films radiographiques, illustré dans Fig. II.4, comporte les parties suivantes :

- Numérisation du film : Acquisition
- Amélioration de la visibilité de l'image radiographique : Prétraitement
- Extraction de la zone du défaut : Segmentation et Post-traitement (si nécessaire).
- Indexation de la base des défauts : Extraction de caractéristiques.
- Identification des défauts : Classification et prise de décision [12].

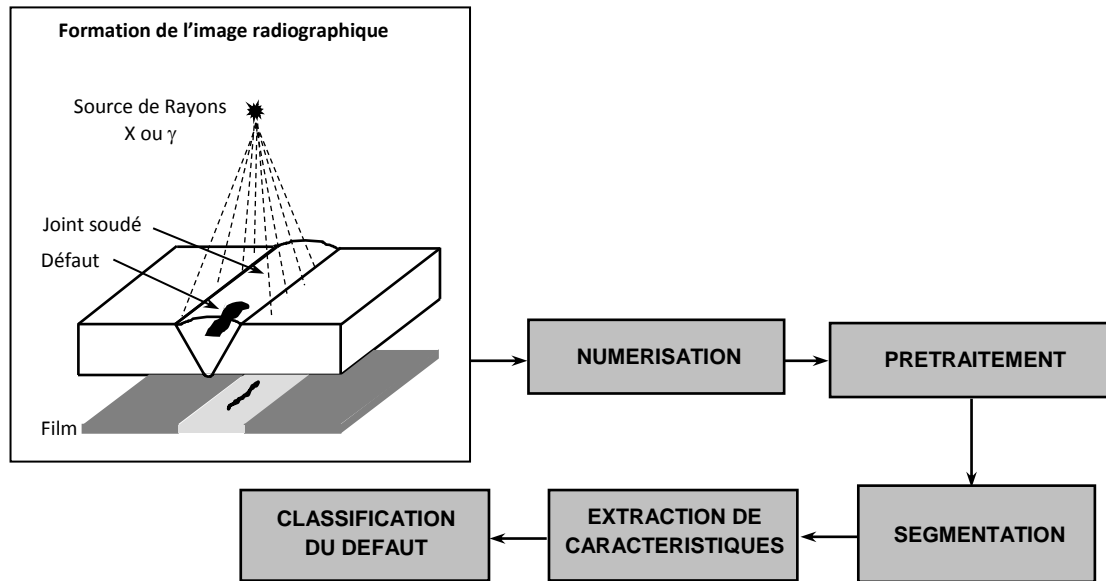


Fig. II. 4 Schéma du système de vision dédié aux films radiographiques

## II.5 La numérisation des images radiographiques

La numérisation des films radiographiques après leur exposition aux radiations constitue la première étape pour un traitement ultérieur. Elle consiste en la conversion des signaux analogiques en données numériques positives comprises entre 0 et 255 (0 : noir, 255 : blanc et entre ces deux valeurs se situent les différents niveaux de gris). Généralement, les films de radiographie sont très sombres, leur densité est assez grande, donc un scanner ordinaire ne peut donner un éclairage suffisant à travers un radiogramme. Bien sûr, des scanners spécialisés appropriés à prendre des copies de haute qualité des radiogrammes existent, mais ils sont coûteux. Pour nos images de radiographie, un scanner un AGFA Arcus II (800 dpi, 256 niveaux de gris), est utilisé. Après numérisation, les principales caractéristiques de nos images sont :

- a. Un faible contraste entre le fond de l'image et les défauts de soudures. Ces derniers possèdent des contours flous et peu marqués.
- b. Une forte granularité due à la numérisation et aux types des films utilisés en radiographie industrielle.
- c. La présence d'un gradient du fond de l'image, caractérisant la variation d'épaisseur de la pièce contrôlée.

## II.6 Prétraitement

La qualité d'une image peut être dégradée pour des raisons diverses, comme dans le cas des images de radiographie que nous avons préalablement citées. Pour améliorer la qualité de ces images, nous leur appliquons quelques prétraitements. Ces mêmes opérations sont utiles pour faciliter l'étape de segmentation, en renforçant la ressemblance entre les pixels appartenant à la même région, ou en accentuant la différence entre pixels appartenant à des régions différentes [14]. Nous pouvons citer comme méthodes de prétraitement : la restauration d'image, le rehaussement de contraste, réduction du bruit, etc.

Le but du rehaussement du contraste est d'améliorer la visibilité de l'image d'entrée, mettant en valeur les régions des objets par rapport au fond, i.e. du défaut par rapport au fond. Ceci permet à l'étape de l'extraction du défaut de mieux trouver et représenter chaque défaut dans l'image. Il existe une collection de techniques qui ont pour but d'améliorer l'apparence des images numériques ou les transformer en rendant leurs apparences meilleures pour les traitements qui sont en aval. Il existe plusieurs techniques pour rehausser le contraste. Les techniques les plus répandues utilisent le recadrage de dynamique et l'égalisation de l'histogramme. Le recadrage de dynamique est l'application d'une transformation dans le but est de redistribuer les niveaux de gris de l'image afin de leur faire occuper une bande de valeurs plus large [12]. Cependant il est bien reconnu que l'utilisation des informations globale est souvent insuffisante pour obtenir un bon rehaussement. Pour y remédier, des techniques de rehaussement adaptatives ont été proposées dans cette application telles que celles basées sur : les propriétés statistiques de l'image dont la moyenne et la variance [12], la mesure d'hétérogénéité [15,16], la morphologie mathématique, etc.

Le prétraitement par réduction du bruit ou filtrage d'image sera développé plus en détail dans les sections suivantes et particulièrement, la réduction du bruit par le filtre médian et ses dérivées puisque ils font l'objet du travail réalisé dans ce mémoire.

## II.7 Réduction du bruit ou filtrage

Une image est généralement affectée par des perturbations, désignées sous le terme de bruit d'image. Ce bruit, qui peut nuire à la qualité de l'étape de traitement suivante, à savoir,

la segmentation, est dû au dispositif et aux conditions d'acquisition. Souvent, il est modélisé par un signal aléatoire (centré, additif, multiplicatif) de haute fréquences.

Le bruit dans les images radiographiques obtenues par les rayons X ou gamma est caractérisé par ses hautes fréquences et le manque de corrélation spatiale. Les filtres passe-bas sont les outils les plus utilisés pour atténuer le bruit dans une image radiographique.

La réduction du bruit est typiquement effectuée par le moyennage spatial. Selon les caractéristiques du bruit, d'autres filtres tels que les filtres médians (bruit impulsif), les filtres gaussiens (bruit blanc gaussien), les filtres adaptatifs (bruit blanc) et les filtres de Kalman (bruit coloré) peuvent également être utilisés pour des tâches plus complexes de la réduction du bruit [12].

Les images radiographiques présentent une variation substantielle selon la technique de contrôle radiographique utilisée ainsi que la nature du matériau examiné, ce qui rend difficile de choisir un filtre standard pour l'élimination de bruit. Par conséquent, le bon choix est normalement fait empiriquement, en prenant en considération que l'utilisation de ces filtres ne doit pas modifier l'information appropriée sur ces images [15].

### **II.7.1 Modèles de bruit et types des filtres**

A chaque étape de l'acquisition d'une scène, des perturbations (rayures, poussières, caméra, amplification, quantification) vont détériorer la qualité de l'image. Ces perturbations sont regroupées sous le nom de "bruit d'image"[18].

Le bruit est souvent modélisé de la façon suivante :

- Bruit additif
- Bruit multiplicatif
- Bruit convolutif

A cet effet, on utilise des filtres appropriés, pour réduire l'amplitude des variations d'intensité à l'intérieur des régions. Les filtres utilisés peuvent être :

#### **Filtres linéaires stationnaires :**

Leurs principal inconvénient est qu'ils introduisent l'effet de flou .en étalant les transitions entre les régions. Parmi ces filtres, on peut citer par exemple le filtre gaussien.



### Filtres non linéaires :

Ce type de filtres résout en partie le problème des filtres linéaire, cependant ils introduisent des modifications irréversibles sur l'image. Les filtres non linéaires les plus utilisés sont les filtres d'ordre et les filtres morphologique. Un exemple de filtre d'ordre est le filtre médian qui sélectionne le pixel de la fenêtre d'analyse ayant la valeur médian. Quant au filtrage morphologique, il est obtenu par un filtrage séquentiel alterné utilisant des fermetures et des ouvertures morphologiques.

### Filtre adaptatifs :

Ce type de filtres à l'avantage d'ajuster sa structure ou ses coefficients, quand la fenêtre d'analyse est à l'intérieur d'une région ou dans le cas de présence d'un contour (frontière entre deux régions). Ainsi, il est possible de lisser l'image sans élargissement des zones de transition.

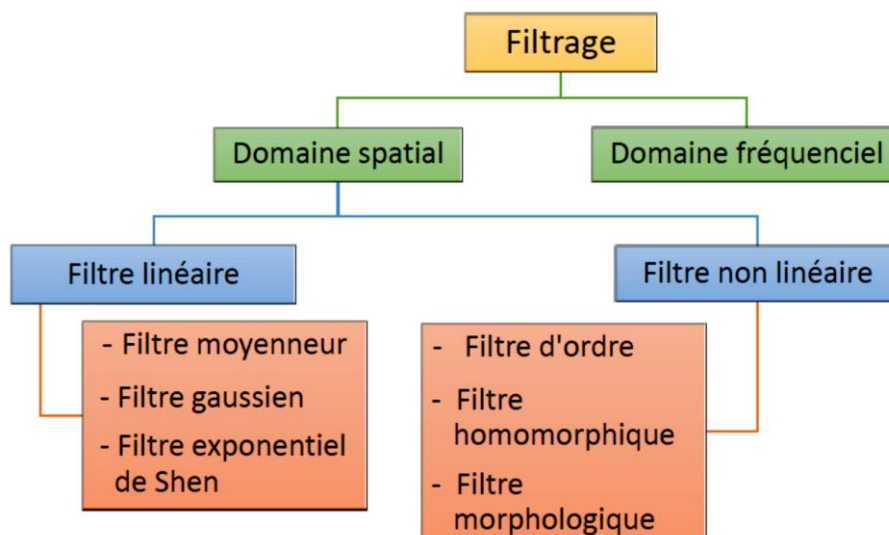


Fig. II. 5 Organigramme des différents types de filtre

### II.7.2 Filtrage fréquentiel

Pour garder ou supprimer des fréquences du signal à l'aide d'un filtre il existe deux manières de procéder :

- dans le domaine spatial : produit de convolution entre le signal et le filtre ;
- dans le domaine fréquentiel : produit entre les spectres du signal et du filtre.

Dans le domaine fréquentiel il y a Trois familles :

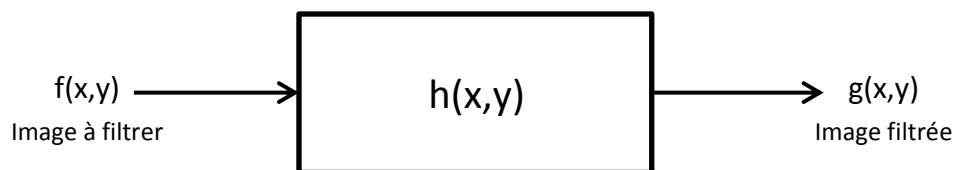
- Filtrage passe-bas
- Filtrage passe-haut
- Filtrage passe-bande (et aussi coupe-bande)

### Principe général du filtrage fréquentiel

- Calculer la transformée de Fourier  $X(f)$  du signal  $x(t)$  à filtrer où  $t$  et  $f$  désignent le temps et la fréquence, respectivement.
- Calculer la transformée de Fourier  $F(f)$  du filtre  $f(t)$
- Multiplier les spectres  $x_{filtré}(f) = X(f).F(f)$
- Calculer la transformée de Fourier inverse du spectre obtenu pour obtenir le signal filtré  $x_{filtré}(t)$

### II.7.3 Filtrage spatial

- Il permet l'élimination du bruit, et amélioration de la « qualité »
- Plusieurs opérations de rehaussement d'images se font sur des voisinages des pixels ou sur des régions font sur des voisinages des pixels ou sur des régions d'intérêt.
- Ceci est dû au fait que les voisinages en question peuvent apporter des informations utiles sur les niveaux d'illumination ou les détails de la scène.



**Fig. II. 6** Modèle du filtrage spatial basé sur la convolution (réponse impulsionnelle)

- L'entrée du système est l'image à filtrer ou le pixel courant qui est défini par  $f(x,y)$
- La réponse impulsionnelle du filtre est  $h(x,y)$
- La sortie (l'image filtrée) sera  $g(x,y)$
- La relation qui définit le filtrage est :  $g(x,y) = f(x,y) * h(x,y)$ .

## **Filtres spatiaux pour la réduction de bruit**

### *A- FILTRES LINEAIRES*

Ces filtres possèdent des caractéristiques spectrales, on parle ainsi de filtre passe-bas (l'image devient floue) ou de filtre passe-haut (les contours ressortent).

Voici quelques exemples de filtres réducteurs de bruit :

- Filtre moyenneur ;
- Filtre gaussien ;
- Filtre exponentiel de Shen ;

Le principal inconvénient des filtres linéaire est que la réduction de bruit s'accompagne d'un étalement des transitions entre régions.

### *B- Filtres non linéaires*

Le filtrage non-linéaire est une opération qui remplace la valeur de chaque pixel par une combinaison non-linéaire des valeurs de ses pixels voisins, ce type de filtre pallie l'inconvénient majeur des filtres linéaires dont la présence des valeurs aberrantes même après filtrage et la mauvaise conservation des transitions. Différents filtres non-linéaires ont été développés dans la littérature où le domaine de leur utilisation est très vaste. Les opérateurs les plus courants en traitement d'images sont :

- Les filtres d'ordre (exp. Filtre médian)
- Les filtres homomorphique
- Les filtres morphologiques

Ils ont le défaut d'infliger des déformations irréversibles à l'image résultante. La théorie de ces filtres est que chacun fondé sur des bases mathématiques ou empiriques différentes [19]. Ils permettent donc de réduire efficacement le bruit dans une image [20]. Un de leur avantage, est de permettre de s'adapter à la nature du point considéré (pixel utile ou pixel de bruit) [21]. Deux aspects du lissage sont concernés par le filtrage non linéaire :

- **Le bruit impulsif** : les filtres linéaires éliminent mal les valeurs aberrantes.
- **L'intégrité des frontières** : on souhaiterait éliminer le bruit sans rendre flous les frontières des objets [17].

## II.8 Rappel sur le bruit d'image

Trois types de bruit sont généralement présents dans une image: le bruit additif gaussien, le bruit additif impulsionnel [22-23] et le bruit de speckle (de structure) multiplicatif.

### II.8.1 Le bruit additif

Généralement, le terme "bruit additif" est utilisé pour décrire le bruit de sources: thermique (électronique), pixels défectueux, erreurs de transmission de bits et d'autres sources externes. Ce bruit peut être défini de la façon suivante: Etant données une image non bruitée  $I$ ,  $I_A$  la même image avec un bruit additif  $A$ , alors chaque pixel de location  $(i,j)$  est caractérisé par la relation:

$$I_A(i,j) = I(i,j) + A(i,j) \quad (2.1)$$

Exemples de bruits additifs : bruit gaussien et bruit impulsionnel.

### II.8.2 Le bruit multiplicatif

Le bruit multiplicatif est dû à la distribution non uniforme des rayons X. Le chatoiement « speckle » est l'ensemble de petites taches rapidement fluctuantes qui apparaissent dans la texture instantanée d'une image et qui lui donnent un aspect granuleux. La principale caractéristique de ce bruit est que les pixels d'une zone homogène seront d'autant plus bruités que leur niveau de gris est élevé. Ce bruit peut être défini de la façon suivante: Etant données une image non bruitée  $I$ ,  $I_B$  la même image avec un bruit multiplicatif  $B$ , alors chaque pixel de location  $(i,j)$  est caractérisé par la relation:

$$I_B(i,j) = I(i,j) \cdot B(i,j) \quad (2.2)$$

## II.9 Bruit impulsionnel

Dans ce mémoire, nous nous sommes focalisés sur le bruit impulsionnel dont son élimination ou, du moins, sa réduction dans l'image radiographique industrielle constitue l'objectif principal de notre travail.

Les deux modèles de bruit les plus communément employés dans la littérature pour décrire un bruit impulsionnel sont le modèle de bruit impulsionnel poivre et sel et le modèle de

bruit impulsionnel aléatoire uniformément réparti [24]. Ce bruit se caractérise par des pixels isolés avec un niveau de gris très différent de celui des pixels environnants. Le bruit impulsionnel, n'affecte que certains pixels de l'image. Ce bruit est dû soit à des erreurs de transmission de données, soit à la défaillance d'éléments du capteur CCD, soit à la présence de particules fines sur le capteur d'images.

Dans le cas de notre application, à savoir le contrôle des joints soudés par radiographie, il est à noter que l'image du film radiographique peut présenter un bruit impulsionnel dont la cause est souvent l'attaque du film par les produits chimiques contenus dans la solution de révélation durant le développement du radiogramme.

On caractérise le bruit impulsionnel par le pourcentage  $p$  de pixels modifiés : plus  $p$  est élevé, plus l'image est dégradée.

Considérons une image originale non bruitée  $X$  avec une dynamique de niveau de gris  $[d_{min}, d_{max}]$ , les deux modèles de bruit impulsionnel sont décrits ci-après.

### II.9.1 Le bruit impulsionnel poivre et sel

Le bruit impulsionnel poivre et sel ne peut prendre comme valeurs de niveau de gris que le maximum ou le minimum de la dynamique de l'image et cela de façon aléatoire dans le plan image. Le niveau de gris du pixel localisé en  $(i,j)$  de l'image  $Y$  bruitée s'exprime comme étant

$$Y_{ij} = \begin{cases} d_{min}, & \text{avec la probabilité } p/2, \\ d_{max}, & \text{avec la probabilité } p/2, \\ X_{ij}, & \text{avec la probabilité } 1 - p, \end{cases} \quad (2.3)$$

Où  $p$  est la probabilité d'apparition du bruit impulsionnel poivre et sel.

### II.9.2 Le bruit impulsionnel aléatoire uniformément réparti

Le bruit impulsionnel aléatoire uniformément réparti peut prendre comme valeurs de niveau de gris toutes les valeurs possibles de la dynamique de l'image. Il est réparti spatialement aussi de manière aléatoire sur l'image. Le niveau de gris du pixel localisé en  $(i,j)$  de l'image  $Y$  bruitée s'écrit comme :

$$Y_{ij} = \begin{cases} d_{ij}, & \text{avec la probabilité } p, \\ X_{ij}, & \text{avec la probabilité } 1 - p, \end{cases} \quad (2.4)$$

## II.10 Mesures de performance

- **Erreur quadratique moyenne (MSE)**

L'image restaurée  $g$  est toujours comparée à l'originale  $f$  pour déterminer son rapport de ressemblance. Ce critère est le plus utilisé. Il est basé sur la mesure de l'erreur quadratique moyenne (MSE) calculée entre les pixels originaux et dégradés:

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f_{ij} - g_{ij})^2 \quad (2.5)$$

Où  $(M, N)$  est la taille de l'image,  $f_{ij}$  et  $g_{ij}$  sont les niveaux de gris des pixels sur les images originale et restaurée, respectivement. Il est vraisemblable que l'œil tienne beaucoup plus compte des erreurs à grandes amplitudes, ce qui favorise la mesure quadratique moyenne [25].

- **Rapport crête signal sur bruit (PSNR : Peak Signal to Noise Ratio)**

Au lieu de mesurer la distorsion, cette valeur mesure la fidélité, puisqu'elle est proportionnelle à la qualité. Tout de même, elle est une fonction de MSE ; sa définition et son utilisation proviennent du domaine du traitement de signal:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{\sum_i \sum_j L^2}{\sum_i \sum_j (f_{ij} - g_{ij})^2} \right) (dB) \quad (2.6)$$

- **Erreur absolue moyenne (MAE : Mean Absolute Error)**

Moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts. Ces quatre indicateurs servent surtout à comparer plusieurs modèles ou prévisions par rapport à une série d'observations, ou encore plusieurs méthodes entre elles. L'indicateur suivant permet en outre la comparaison entre séries d'écarts.

$$MAE = \frac{1}{M \times N} \sum_i \sum_j |f_{ij} - g_{ij}| \quad (2.7)$$

Où  $f_{ij}$  et  $g_{ij}$  désignent la valeur des pixels de l'image original et de l'image restaurée, respectivement. Pour une image codée sur 8 bits, 255 est le niveau de gris maximum de l'image.  $(M, N)$  est la taille de l'image [26].

- **Indice de Similarité Structurale (SSIM : Structural Similarity)**

L'indice de similarité structurale SSIM permet de mesurer la similarité entre deux images d'une manière plus proche de la perception subjective humaine qui est plus sensible aux changements dans la structure. Cet indice est le produit de 3 composantes :  $l(f,g)$  le terme de comparaison de la luminance (variations diverses de luminance, normalisation),  $c(f,g)$  le terme de la comparaison du contraste et  $s(f,g)$  le terme de la comparaison structurale (flou, bruit, accentuation, etc.).

$$SSIM = [l(f, g)]^\alpha [c(f, g)]^\beta [s(f, g)]^\gamma \quad (2.8)$$

où  $s(f, g) = \frac{\sigma_{fg} + c_3}{\sigma_f \sigma_g}$ ,  $c(f, g) = \frac{2\sigma_f \sigma_g + c_2}{\sigma_f^2 + \sigma_g^2 + c_2}$ ,  $l(f, g) = \frac{2(1+R)}{1+(1+R)^2 + \frac{c_1}{\mu_f^2}}$  avec  $R = \frac{\mu_g}{\mu_f} - 1$ .

$\alpha$ ,  $\beta$ , et  $\gamma$  sont des paramètres qui définissent l'importance des trois composantes  $l$ ,  $c$  et  $s$ .

$c_1$ ,  $c_2$  et  $c_3$  sont des constantes.  $\mu_f$ ,  $\mu_g$  sont les moyennes et ;  $\sigma_f$ ,  $\sigma_g$  et  $\sigma_{fg}$  sont les écarts-types et l'inter-corrélation.

## II.11 Conclusion

Nous avons introduit au début de ce chapitre les notions de base qui servent de fondement à la compréhension de différentes techniques de traitement d'images. Nous avons présenté la chaîne de vision par ordinateur dédiée à la détection et l'identification des défauts de soudures éventuellement présents dans les radiographies des joints soudés où nous nous sommes étalées sur les caractéristiques l'image radiographique qui fait l'objet de notre application dans ce mémoire. Nous avons aussi fait une brève revue des travaux sur le débruitage d'image où les méthodes étudiées appartiennent à deux catégories de filtrage : dans le domaine spatial et le domaine fréquentiel. Par ailleurs, nous avons présenté les types de bruit image : additif et multiplicatif où le bruit additif impulsionnel a été étudié en détail et ce ; dans le cas du bruit aléatoire ou bien du bruit poivre & sel. A la fin, nous avons présenté et formulé les critères d'évaluation des méthodes de filtrage à savoir, PSNR, MAE et SSIM.

# Chapitre III Présentation des résultats du filtrage

---

## III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le filtre médian et ses dérivés qui vont constituer le premier bloc de notre chaîne de traitement. L'étude bibliographique et le test de différentes méthodes de filtrage récemment publiées ont permis de mettre au point des filtres très performants. Le principe de ces filtres est basé, entre autres, sur le calcul de la moyenne pondérée, de l'écart-type pondérée des niveaux de gris de la fenêtre d'observation considérée, des tests avec des valeurs de seuils choisis empiriquement, etc. Aussi, dans ce chapitre, nous présentons les résultats des différents filtres appliqués sur une image radiographique de soudure où, les comparaisons entre les différents algorithmes ont été menés grâce à aux critères d'évaluations de : PSNR, MAE, SSIM et temps d'exécution. L'analyse des performances des filtres implémentés est étudiée pour le bruit poivre et sel et le bruit aléatoire lorsque le pourcentage de pixels bruités évolue dans l'intervalle [10% 50%] et lorsque la taille de la fenêtre de calcul varie dans l'ensemble {3×3, 5×5, 7×7}.

## III.2 Etat de l'art du filtrage pour le bruit impulsionnel

Les images radiographiques présentent une variation substantielle selon la technique de contrôle radiographique utilisée ainsi que la nature du matériau examiné, ce qui rend difficile de choisir un filtre standard pour l'élimination de bruit. Par conséquent, le bon choix est normalement fait empiriquement, en prenant en considération que l'utilisation de ces filtres ne doit pas modifier l'information appropriée sur ces images.



Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'utilisation du filtre médian et ses dérivées qui sont des filtres passe-bas non-linéaires. Leur avantage par rapport aux autres outils de lissage est qu'ils éliminent convenablement le bruit avec un effet minimal de flou sur les contours ce qui permet la préservation des frontières nécessaire pour les étapes suivantes de la chaîne de vision par ordinateur des images radiographiques. Cette chaîne est dédiée à la détection et l'identification des défauts de soudure dans le contrôle par radiographie.

Nous avons étudié le filtre médian et ces voisins connus comme le filtre Médian Standard (SM) [28], le filtre Médian Pondéré Centré (CWM) [29], le filtre médian commuté (SWM) [30], le filtre médian à trois états (TSM) [31], le filtre médian pondéré directionnel (DWM) [35] et enfin le filtre médian commuté adaptatif (ASWM) publié par [33]. Ces différents filtres sont reconnus comme des méthodes efficaces en termes de suppression du bruit impulsionnel. Tous les algorithmes sont implémentés de manière récursive. Comme images test, nous avons adopté les images radiographiques puisqu'elles font l'objet de notre travail. Cela ne nous a pas empêché d'utiliser d'autres images de test standard à l'instar de Lena pour valider les différents algorithmes implémentés en confrontant leurs résultats avec ceux obtenus par les auteurs.

### **III.3 Le filtre médian**

#### **III.3.1 Définition du filtre médian**

Le filtre médian est un filtre numérique non linéaire, souvent utilisé pour la réduction de bruit. La réduction de bruit est une étape de prétraitement classique visant à améliorer les résultats de traitements futurs (détection de bords par exemple). La technique de filtre médian est largement utilisée en traitement d'images numériques car il permet sous certaines conditions de réduire le bruit tout en conservant les contours de l'image.

L'idée principale du filtre médian est peut se résumer comme suit :

- On classe les pixels voisins du pixel courant par ordre croissant du niveau de gris.
- On prend la valeur médiane des pixels classés et on l'affecte au pixel courant [12].

On peut définir l'opération du filtrage médian utilisant une fenêtre  $W \times W$  comme suit :

$$g_{(x,y)} = \text{median}_{(i,j) \in R(x,y)} \{f_{(i,j)}\} \quad (3.1)$$

Où

$f_{(x,y)}$  Représente la valeur du niveau de gris de l'image brute au pixel de coordonnées,  $(x, y)$

$g_{(x,y)}$  Représente la valeur du niveau du gris de l'image filtrée au pixel de coordonnées,  $(x, y)$

$R_{(x,y)}$  Représente une fenêtre  $W \times W$  centrée au pixel de coordonnées  $(x, y)$ , et *MEDIAN* signifie la médiane des valeurs du niveau de gris dans la fenêtre considérée.

Nous allons détailler le filtre médian et ses quelques dérivés ci-dessous

### a. Filtre médian standard (SM)

Le filtre Médian utilisé pour atténuer les pixels isolé, d'une valeur très différente de leur entourage. Le filtre Médian n'est pas à proprement parler un produit de convolution, mais sa mise en œuvre sur l'image est assez similaire puisqu'un masque est appliqué sur l'image et collecte les valeurs des pixels. Sur l'exemple ci-dessous le masque est appliqué sur l'image et collecte les valeurs des pixels [28].

Sur l'exemple ci-dessous le masque est un  $3 \times 3 = 9$  éléments. Les neuf éléments extraits de l'image sont ensuite triés dans l'ordre croissant.

La valeur médiane d'une série est par définition celle qui sépare l'échantillon en deux parties de population égale ici on voit que c'est la valeur (41) facilement repérable à cause du tri : L'algorithme va donc remplacer la valeur originale par la valeur médiane qui vaut 41 [34].

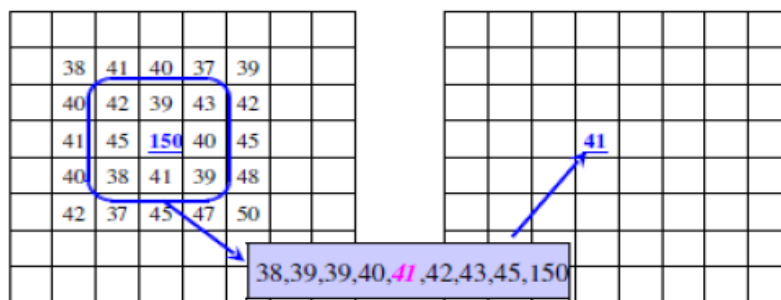
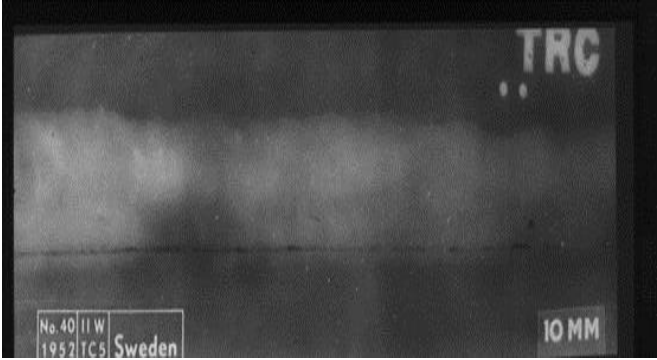


Fig. III. 1 Exemple de filtre médian

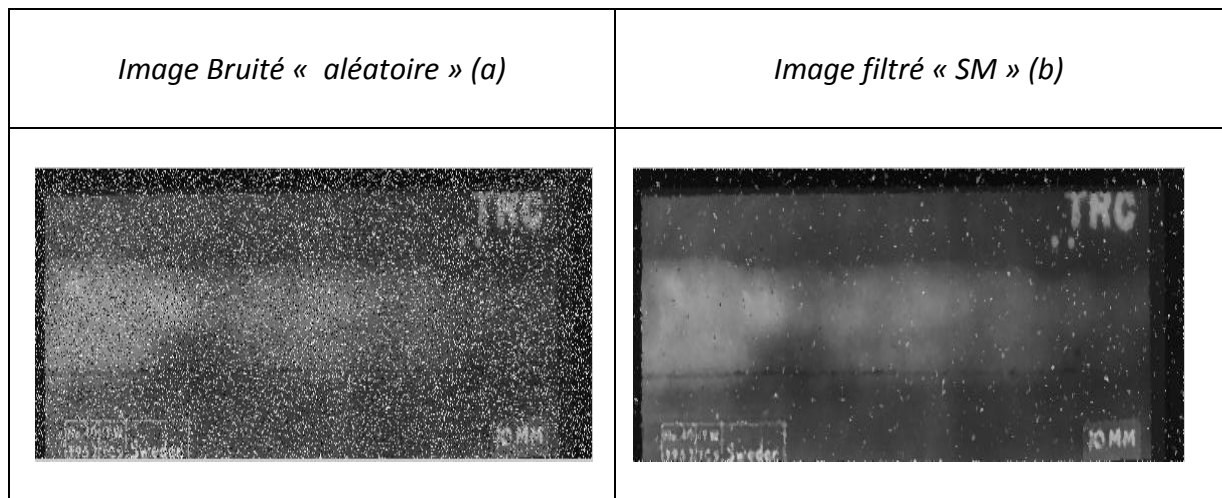
Ce filtre non linéaire permet d'éliminer des pixels isolés ou des traînées fines noyées dans des zones assez homogènes. Fig. III.3 et Fig. III.4 présente un exemple d'application de ce filtre sur l'image ("40SW") bruitée avec un bruit impulsionnel aléatoire, et poivre et sel respectivement réparti sur 30% des pixels de l'image. On peut constater que l'image résultante est plus nette, qu'il y a moins de taches isolées par rapport à l'image d'entrée. Le filtre médian permet effectivement la suppression du bruit impulsionnel mais efface les détails fins et arrondit les angles. De plus, il reste un nombre non négligeable de pixels bruités.



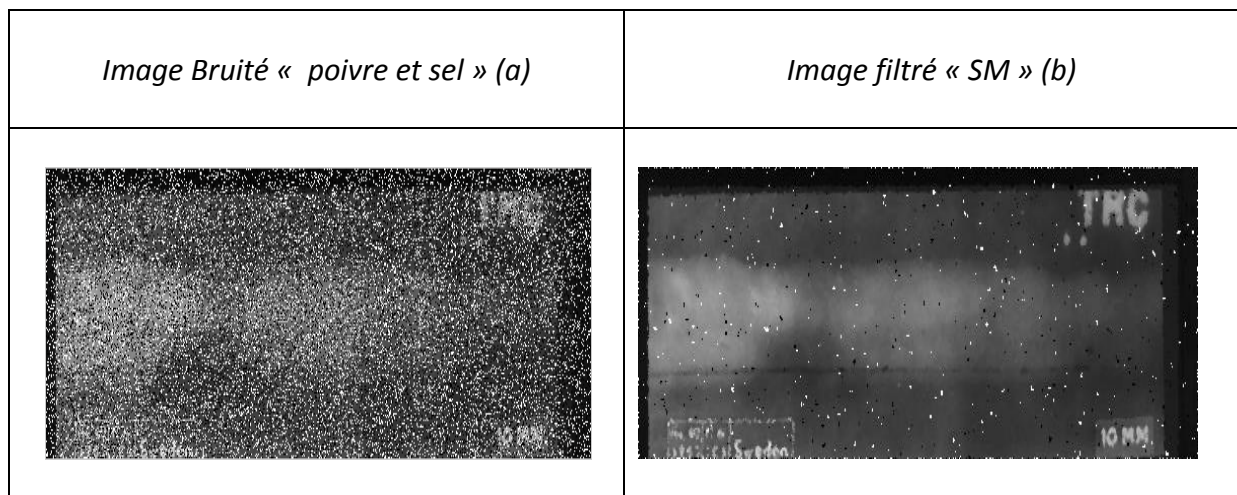
**Fig. III. 2** image « 40 SW »

Bruit	10%		20%		30%		40%		50%	
	PSNR	MAE	PSNR	MAE	PSNR	MAE	PSNR	MAE	PSNR	MAE
Bruit aléatoire	18.23	8.07	15.20	16.21	13.45	24.22	12.19	32.37	11.22	40.45
Bruit Poivre et sel	14.96	12.74	11.94	25.55	10.18	38.28	8.94	50.95	7.97	63.80

**TAB. III. 1** Résultats du PSNR ET MAE de l'image « 40SW » bruité par bruit aléatoire et poivre et sel



**Fig. III. 3** Exemple de filtrage médian (a) Image Radio dégradée avec un bruit aléatoire avec une probabilité de 30%, (b) Résultats du filtrage avec un filtre médian de 3x3



**Fig. III. 4** Exemple de filtrage médian (a) Image Radio dégradée avec un bruit poivre et sel avec une probabilité de 30%, (b) Résultats du filtrage avec un filtre médian de 3x3

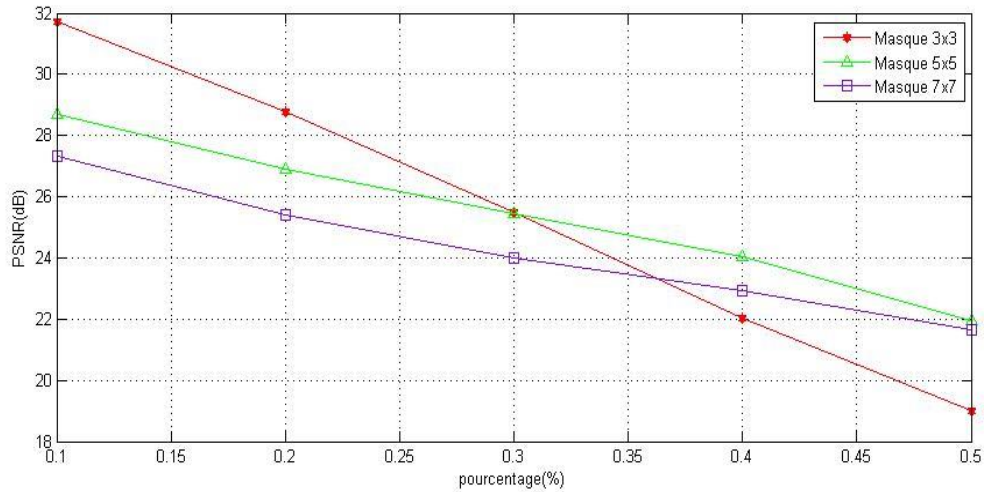
La performance de la restauration des images sont évaluées en calculant le pic du rapport signal à bruit (PSNR : Peak Signal to Noise Ratio), l'erreur moyenne absolue (MAE : Mean

Absolute Error) et aussi la similarité structurelle (SSIM : Structural SIMilarity) pour différentes fenêtres 3×3, 5×5 et 7×7. La corrélation entre les critères d'évaluations et la performance des résultats est donnée comme suit :

- Le PSNR donne des bons résultats lorsqu'il est grand
- Le MAE lorsqu'il est petit donne des bons résultats
- Le SSIM vari entre le 0 et le1 (le plus mauvais quand il égale à 0 et le meilleur quand il est égal à 1).

Bruit % Masque		10	20	30	40	50
		PSNR image originale bruité	18.23	15.20	13.45	12.19
3 × 3	PSNR	<b>30.20</b>	<b>26.66</b>	22.40	18.20	14.64
	MAE	1.89	2.51	4.11	7.96	15.64
	SSIM	0.94	0.89	0.75	0.45	0.34
5 × 5	PSNR	27.27	25.12	<b>23.63</b>	<b>22.40</b>	<b>20.53</b>
	MAE	2.72	3.22	3.76	4.40	5.76
	SSIM	0.90	0.89	0.87	0.82	0.67
7 × 7	PSNR	27.30	23.56	22.09	20.98	20.11
	MAE	3.10	3.84	4.51	5.02	5.97
	SSIM	0.88	0.87	0.86	0.83	0.77

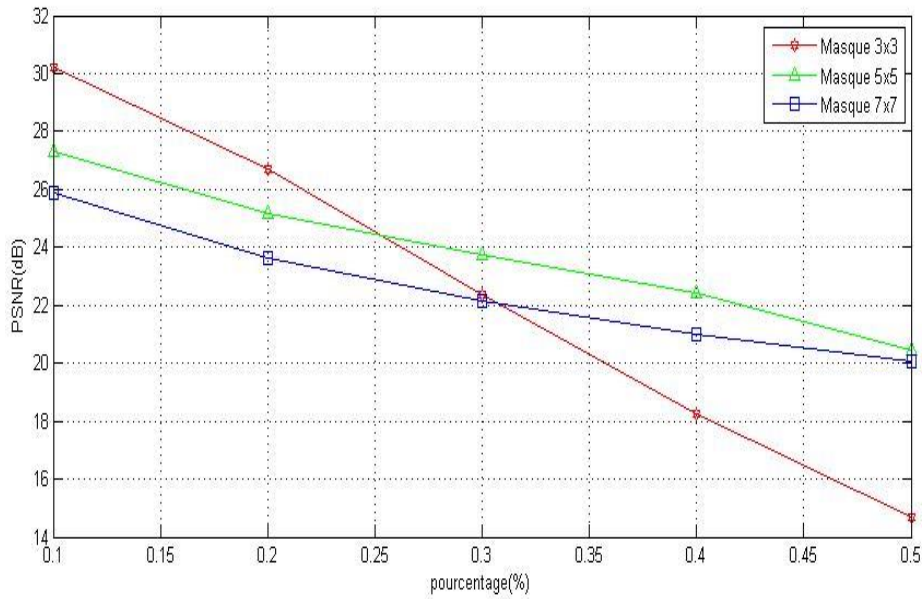
**TAB. III. 2** Résultats de PSNR, MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit aléatoire de pourcentage variant de 10% jusqu'au 50% traité par le filtre SM



**Fig. III. 5** Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit impulsionnel aléatoire traité par le filtre SM

Bruit % / Masque		10	20	30	40	50
		PSNR image originale bruitée	14.96	11.94	10.18	8.94
3x3	PSNR	<b>31.72</b>	<b>28.97</b>	25.45	22.01	18.97
	MAE	1.89	2.49	3.96	7.9	12.55
	SSIM	0.94	0.89	0.72	0.44	0.19
5x5	PSNR	28.70	26.82	<b>25.48</b>	<b>24.06</b>	<b>21.88</b>
	MAE	2.66	3.17	3.79	4.97	7.48
	SSIM	0.90	0.89	0.88	0.86	0.77
7x7	PSNR	27.30	25.45	24.02	22.90	21.64
	MAE	3.10	3.76	4.52	5.49	7.48
	SSIM	0.89	0.88	0.87	0.86	0.85

**TAB. III. 3** Résultats de PSNR, MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruitée avec un bruit poivre et sel de pourcentage varié de 10% jusqu'à 50% traité par le filtre SM



**Fig. III. 6** Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit poivre et sel traité par le filtre SM

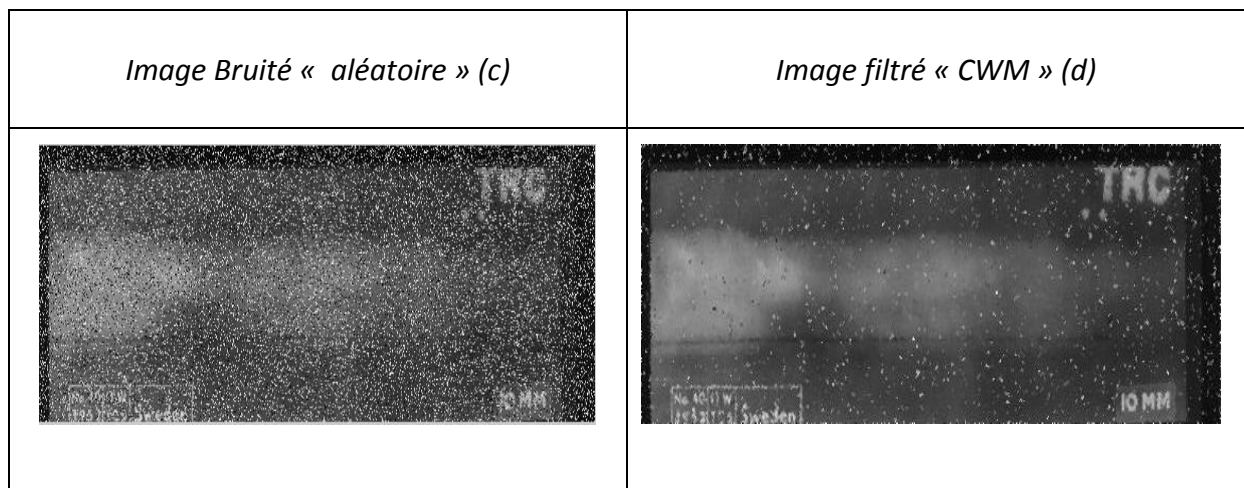
### b. Filtre médian pondéré centré (CWM)

Proposé en 1991 par Ko et Lee [29], ce filtre donne au pixel central un poids plus important qu'au reste des pixels de la fenêtre. Cette version permet un compromis entre la préservation des détails de l'image et la suppression du bruit ; plus le poids est grand, plus le filtre préserve les détails mais il est moins efficace en débruitage. Ici, nous avons choisi un poids  $W$  de 3 assez suffisante pour préserver le contour et détecter le pixel bruité, à la fois. Pour plus d'informations, on pourra se rapporter à la publication de Lin [35]. Pour illustrer le principe du filtre médian pondéré centré (CWM pour Center Weighted Median), considérons un exemple d'un filtre médian de 3x3 de fenêtre de pondération est donné par :

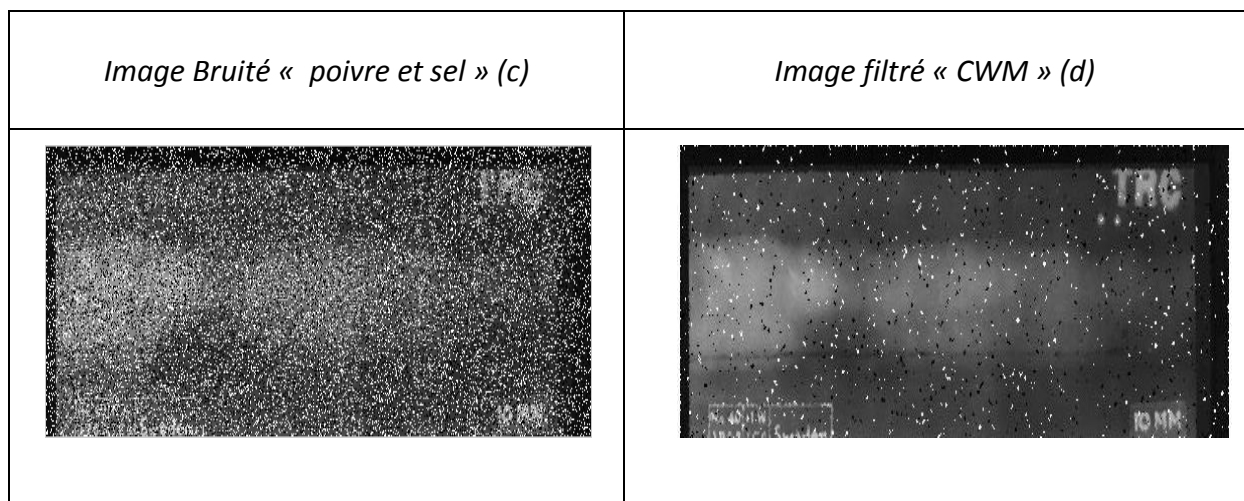
$$W = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 20 & 15 & 36 \\ 16 & 5 & 24 \\ 70 & 45 & 16 \end{bmatrix}$$

La médiane pondérée, est  $MED(W \diamond X)$  vaut :

$$\begin{aligned} & MED(20 \diamond 1, 15 \diamond 1, 36 \diamond 1, 16 \diamond 1, 5 \diamond 3, 24 \diamond 1, 70 \diamond 1, 45 \diamond 1, 16 \diamond 1) \\ & = MED(20, 15, 36, 16, 5, 5, 5, 24, 70, 45, 16) = 16 \end{aligned}$$



**Fig. III.7** Exemple de filtrage CWM (c) Image Radio dégradée avec un bruit aléatoire avec une probabilité de 30%, (d) Résultats du filtrage avec un filtre CWM de 3x3

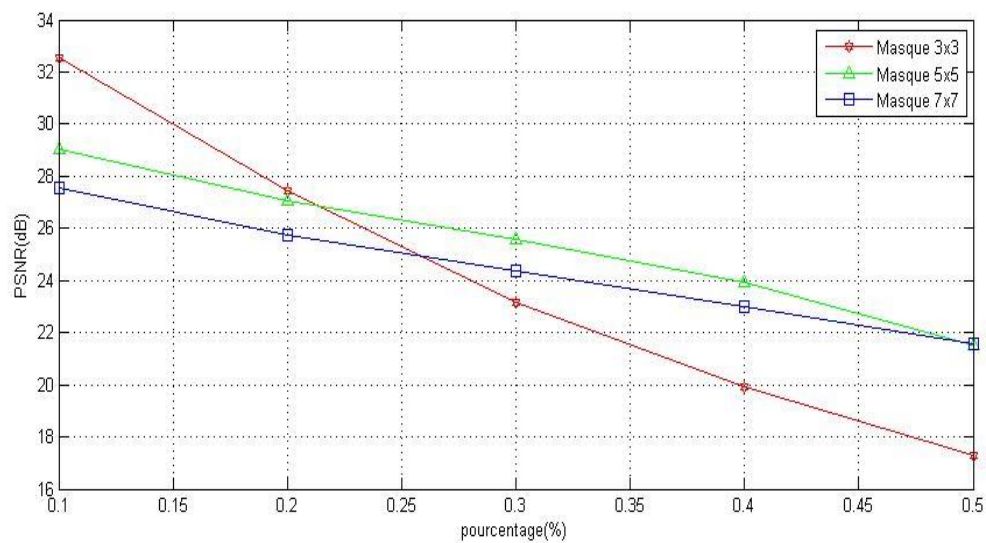


**Fig. III. 8** Exemple de filtrage CWM (c) Image Radio dégradée avec un bruit poivre et sel avec une probabilité de 30%, (d) Résultats du filtrage avec un filtre CWM de 3x3



Bruit % Masque		10	20	30	40	50
		PSNR image originale bruité	18.23	15.20	13.45	12.19
3×3	PSNR	<b>32.56</b>	<b>27.43</b>	23.18	19.93	17.29
	MAE	1.27	2.63	4.92	9.17	15.59
	SSIM	0.95	0.83	0.61	0.39	0.23
5×5	PSNR	29.06	27.08	<b>25.57</b>	<b>23.90</b>	21.53
	MAE	2.29	2.77	3.53	4.88	8.28
	SSIM	0.92	0.91	0.89	0.81	0.64
7×7	PSNR	27.53	25.74	24.34	22.99	<b>21.54</b>
	MAE	2.85	4.45	4.19	5.29	7.42
	SSIM	0.89	0.88	0.87	0.84	0.77

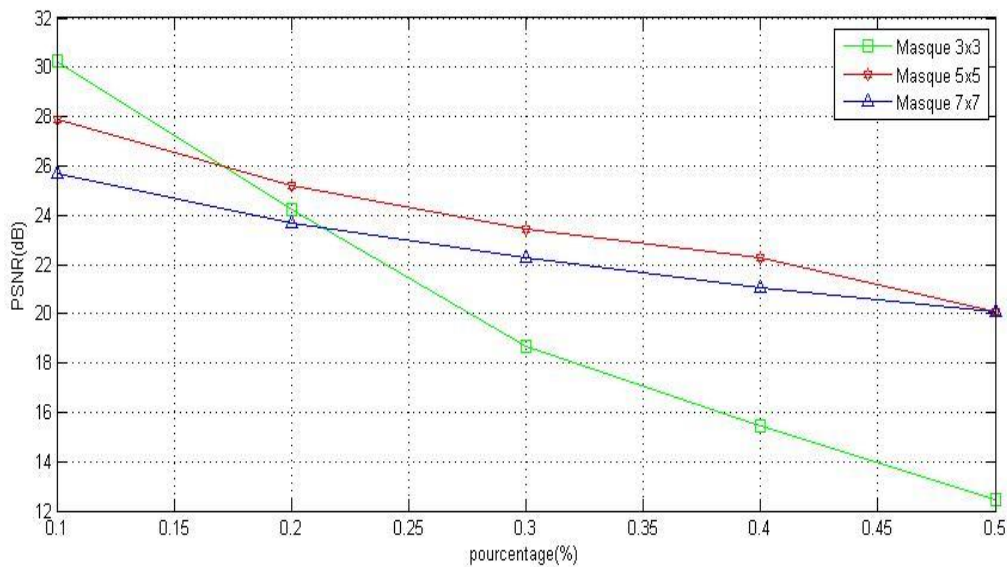
**TAB. III. 4** Résultats de PSNR, MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit aléatoire de pourcentage vari de 10% jusqu'au 50% traité par le filtre CWM



**Fig. III. 9** Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit aléatoire traité par le filtre CWM

Bruit %	Masque	10	20	30	40	50
		PSNR image originale bruité	14.96	11.94	10.18	8.94
3×3	PSNR	<b>30.23</b>	24.24	18.67	15.46	12.48
	MAE	1.31	2.59	6.52	12.75	23.86
	SSIM	0.94	0.80	0.50	0.22	0.09
5×5	PSNR	27.86	<b>25.19</b>	<b>23.41</b>	<b>22.26</b>	20.06
	MAE	2.31	2.87	3.50	4.16	5.91
	SSIM	0.92	0.91	0.90	0.86	0.72
7×7	PSNR	25.71	23.67	22.24	21.07	<b>20.10</b>
	MAE	2.97	3.57	4.23	4.96	5.74
	SSIM	0.89	0.88	0.87	0.87	0.85

**TAB. III. 5** Résultats de PSNR, MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit poivre et sel de pourcentage vari de 10% jusqu'au 50% traité par le filtre CWM



**Fig. III. 10** Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit poivre et sel d'une image traité par filtre CWM

### c. Filtre médian commuté (SWM)

Le principe de ce filtre repose sur un processus en deux étapes ; une étape de détection suivie d'une étape de décision pour le pixel considéré [30]. La détection des impulsions est basée sur la supposition qu'un pixel bruité aurait tendance à prendre une valeur de niveau de gris substantiellement différente de celles de ses pixels voisins dans la fenêtre de filtrage. Pour les régions de l'image dont les pixels sont non bruités, la variation des niveaux de gris est plutôt lisse et elles peuvent être séparées par des contours. L'étape de détection se met en place en calculant la différence entre la valeur médiane des pixels de la fenêtre de filtrage avec la valeur du pixel courant. Cette différence est comparée à un seuil pour décider ou non de la présence d'impulsions. La sortie du filtre médian de commutation est donnée par :

$$\hat{Y}_{ij} = \begin{cases} m_{ij}, & \text{si } |m_{ij} - X_{ij}| > \text{seuil} \\ X_{ij}, & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.2)$$

Où  $m_{ij}$  est la valeur médiane dans la fenêtre et le seuil est un paramètre fixe.

La valeur de seuil numérique est définie a priori ou choisie après de nombreux tests dépendants des données. La littérature montre qu'un seuil optimal au sens de l'erreur quadratique moyenne peut être obtenu pour la plupart des données réelles. Cependant, le seuil approprié pour une image particulière n'est pas nécessairement adapté à une autre. De plus, une image est souvent non stationnaire et les statistiques dans une région peuvent être différentes dans une autre partie de l'image. Ici, le seuil utilisé pour ce filtre est égal 30. La section suivante présente la méthode qui ne nécessite des connaissances a priori et définit automatiquement un seuil [26].

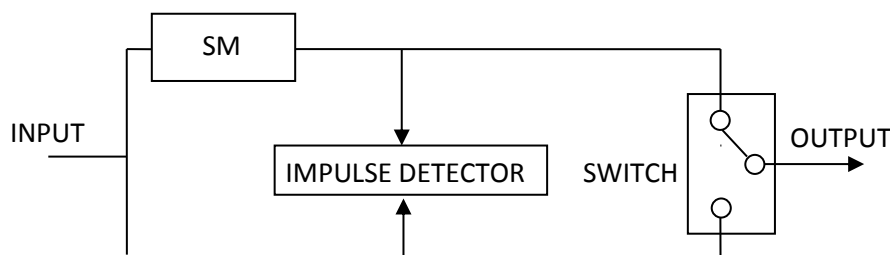
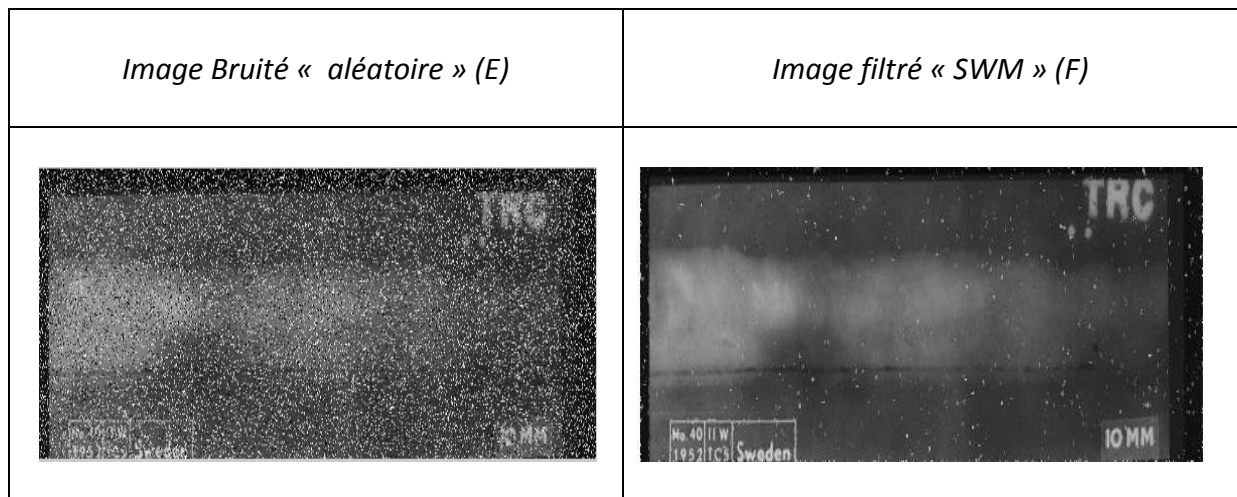
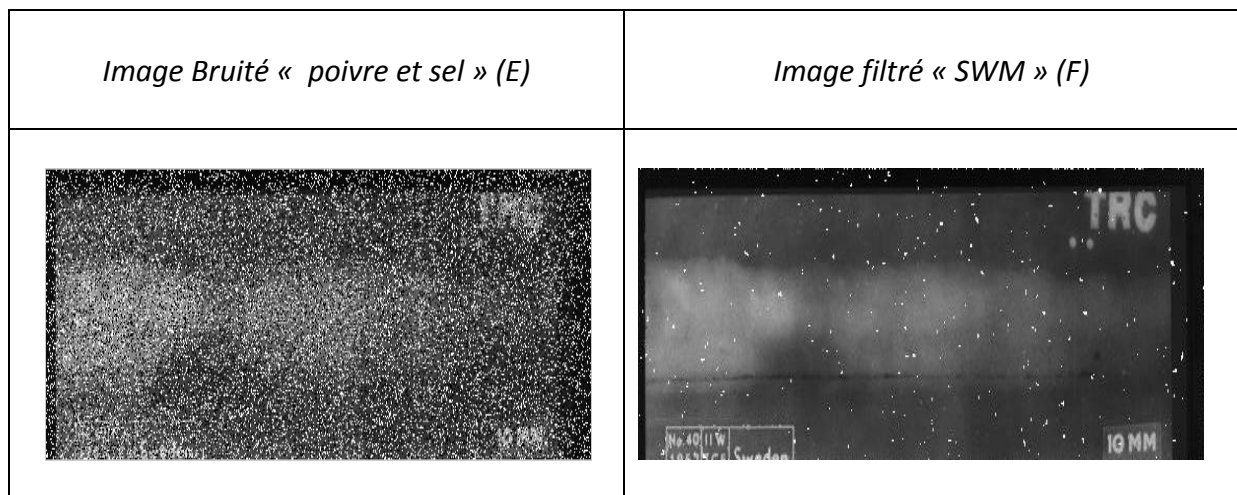


Fig. III. 11 Schéma de commutation avec détecteur d'impulsions médian



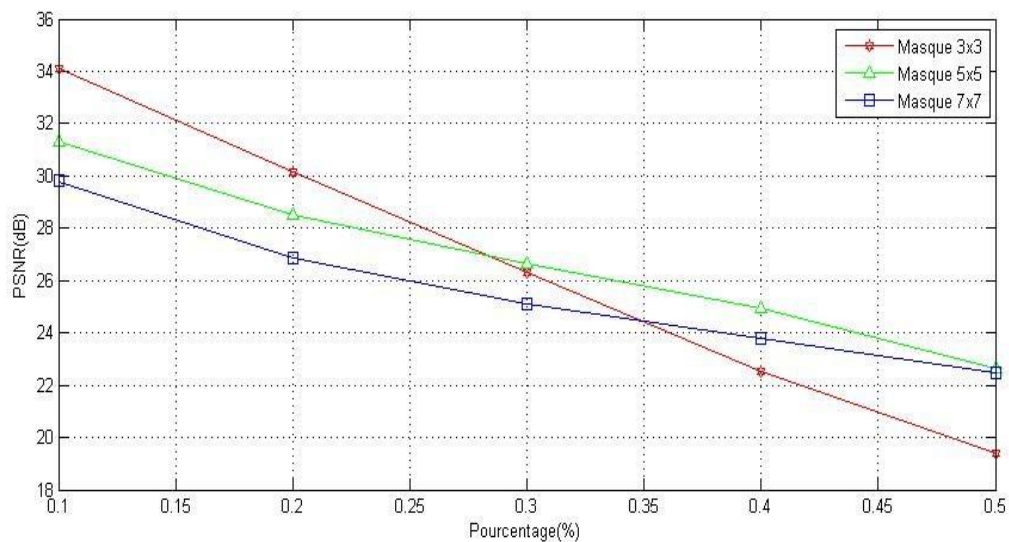
**Fig. III. 12** Exemple de filtrage SWM (E) Image Radio dégradée avec un bruit aléatoire avec une probabilité de 30%, (F) Résultats du filtrage avec un filtre SWM de 3x3



**Fig. III. 13** Exemple de filtrage SWM (E) Image Radio dégradée avec un bruit poivre et sel avec une probabilité de 30%, (F) Résultats du filtrage avec un filtre SWM de 3x3

Bruit % / Masque		10	20	30	40	50
		PSNR image originale bruité	18.23	15.20	13.45	12.19
3×3	PSNR	<b>34.20</b>	<b>30.26</b>	26.25	22.57	19.37
	MAE	0.21	0.58	1.67	4.20	8.87
	SSIM	0.99	0.96	0.83	0.63	0.44
5×5	PSNR	31.46	28.47	<b>26.76</b>	<b>25.06</b>	<b>22.65</b>
	MAE	0.39	0.73	1.09	1.81	3.92
	SSIM	0.99	0.99	0.98	0.94	0.81
7×7	PSNR	29.70	26.82	25.05	23.80	22.43
	MAE	0.55	1.03	1.54	2.11	3.32
	SSIM	0.99	0.98	0.97	0.96	0.91

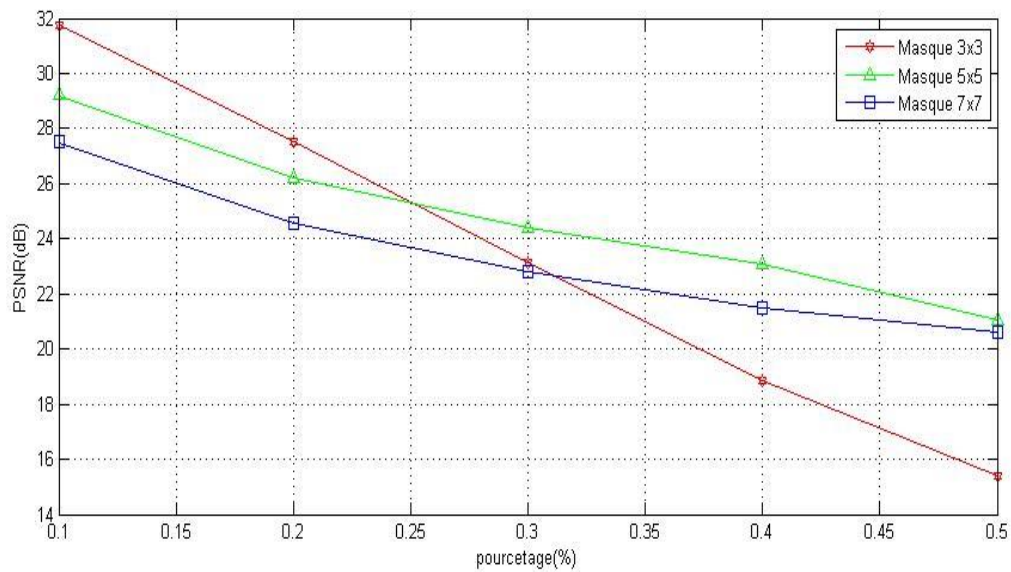
**TAB. III. 6** Résultats de PSNR, MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit aléatoire de pourcentage vari de 10% j'usquau 50% traité par le filtre SWM



**Fig. III.14** Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit aléatoire traité par le filtre SWM

Bruit %	Masque	10	20	30	40	50
		PSNR image originale bruité	14.96	11.94	10.18	8.94
3×3	PSNR	<b>31.76</b>	<b>27.54</b>	23.13	18.85	15.37
	MAE	0.26	0.67	1.76	4.58	10.07
	SSIM	0.99	0.96	0.84	0.61	0.36
5×5	PSNR	29.20	26.21	<b>24.42</b>	<b>23.05</b>	<b>21.07</b>
	MAE	0.46	0.87	1.29	1.77	2.79
	SSIM	0.99	0.99	0.98	0.97	0.91
7×7	PSNR	27.50	24.55	22.82	21.51	20.60
	MAE	0.65	1.23	1.80	2.42	3.01
	SSIM	0.99	0.98	0.98	0.97	0.97

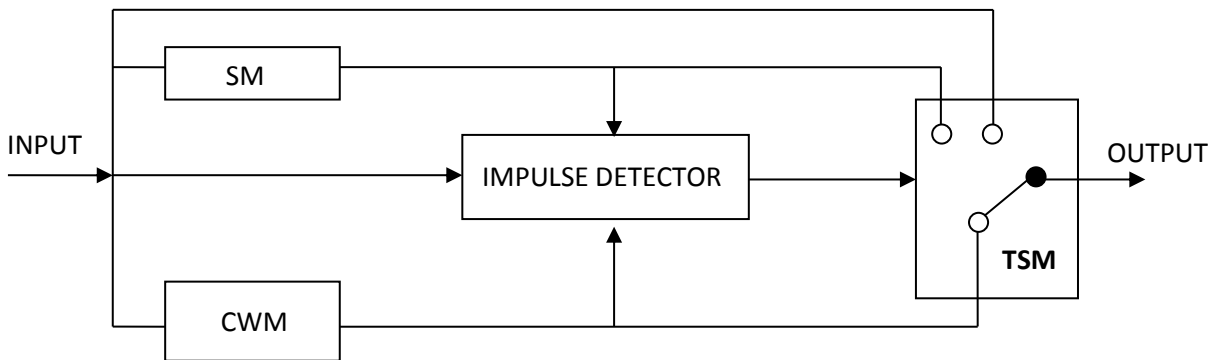
**TAB. III. 7** Résultats de PSNR, MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit poivre et sel de pourcentage vari de 10% j'usquau 50% traité par le filtre SWM



**Fig. III. 15** Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit poivre et sel traité par le filtre SWM

#### d. Filtre médian à trois états (TSM)

Chen et al. [31] ont proposé un filtre médian à trois états pour la réduction du bruit. Le principe de ce filtre cherche dans un premier temps à déterminer si le pixel est corrompu. Pour chaque pixel de l'image, les sorties des filtres CWM et SM sont comparées entre elles avec un seuil  $T$  prédéfini. Trois valeurs pour remplacer le pixel étudié sont possibles : la valeur d'origine si le pixel n'est pas bruité, la valeur de sortie du filtre médian standard ou la valeur de sortie du filtre médian pondéré centré [37].



**Fig. III. 16** Schéma de commutation avec détecteur d'impulsions médiane (SM) et le CWM

La sortie est choisie parmi les trois en utilisant le seuil  $T$  comme suit :

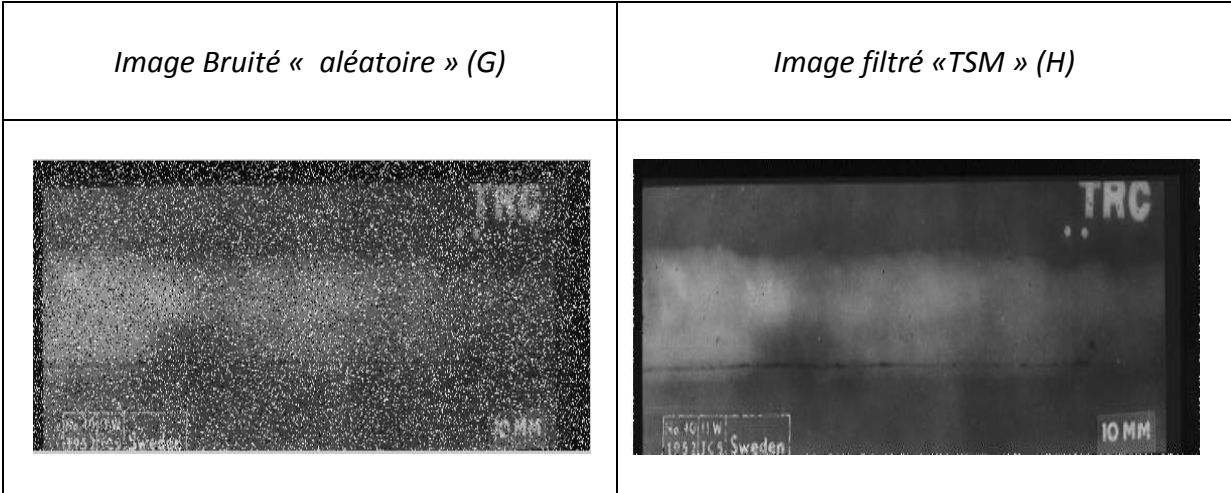
$$Y_{ij}^{TSM} = \begin{cases} X_{ij}, & \text{si } T \geq d_1 \\ Y_{ij}^{CWM}, & \text{si } d_2 \leq T \leq d_1 \\ Y_{ij}^{SM}, & \text{si } T < d_2 \end{cases} \quad (3.3)$$

Avec  $d_1 = |X_{ij} - Y_{ij}^{SM}|$  et  $d_2 = |X_{ij} - Y_{ij}^{CWM}|$

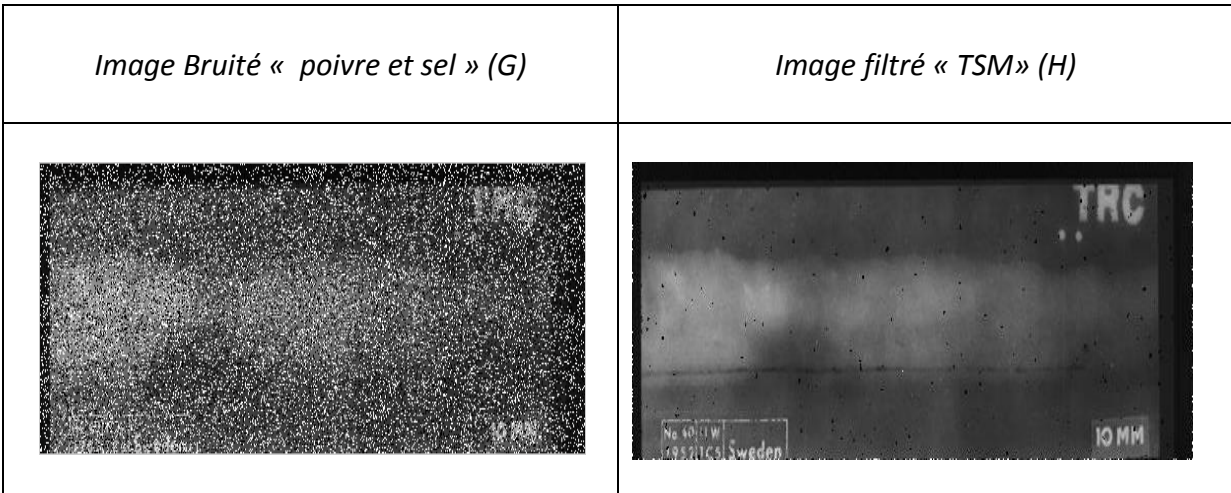
Et on a pris le seuil  $T = 20$ .

Si la distance  $d_2$  est grande (c.-à-d. supérieure au seuil  $T$ ), alors il y a de grandes chances pour que le pixel du centre de la fenêtre soit corrompu et donc pour être sûr de le corriger, on va appliquer le filtrage SM (car ce filtrage accorde moins d'importance au pixel central qui est corrompu). A l'opposé, si  $d_1$  est petite, c'est-à-dire la différence entre le pixel d'origine et le pixel filtré par SM est faible, on garde de préférence le pixel d'origine de façon à préserver

les détails. Dans le cas où  $d_2 < T < d_1$ , alors le pixel est peut être corrompu, donc on essaie de le corriger tout en lui accordant un certain poids. On applique alors le filtrage CWM. Le filtre TSM permet ainsi d'allier habilement les avantages des trois filtres précédents. On constate l'importance du seuil  $T$  qui est à choisir de façon optimale. Le seuil utilisé ici est égal à 20 et qui une valeur préconisée par l'auteur.



**Fig. III. 17** Exemple de filtrage TSM (G) Image Radio dégradée avec un bruit aléatoire avec une probabilité de 30%, (H) Résultats du filtrage avec un filtre TSM de 3x3

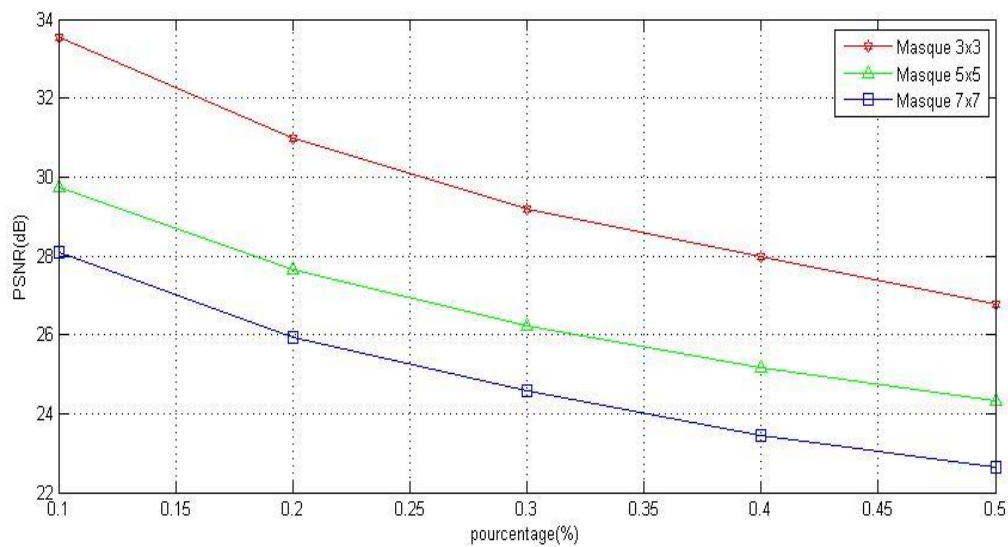


**Fig. III. 18** Exemple de filtrage TSM (G) Image Radio dégradée avec un bruit poivre et sel avec une probabilité de 30%, (H) Résultats du filtrage avec un filtre TSM de 3x3



Bruit % Masque		10	20	30	40	50
		PSNR image originale bruité	18.23	15.20	13.45	12.19
3×3	PSNR	33.55	30.99	29.99	27.99	26.79
	MAE	0.31	0.47	0.68	0.90	1.20
	SSIM	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96
5×5	PSNR	29.75	27.63	26.21	25.15	24.31
	MAE	0.75	1.04	1.33	1.62	1.93
	SSIM	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
7×7	PSNR	28.07	25.94	24.59	23.45	22.65
	MAE	1.04	1.47	1.88	2.33	2.74
	SSIM	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96

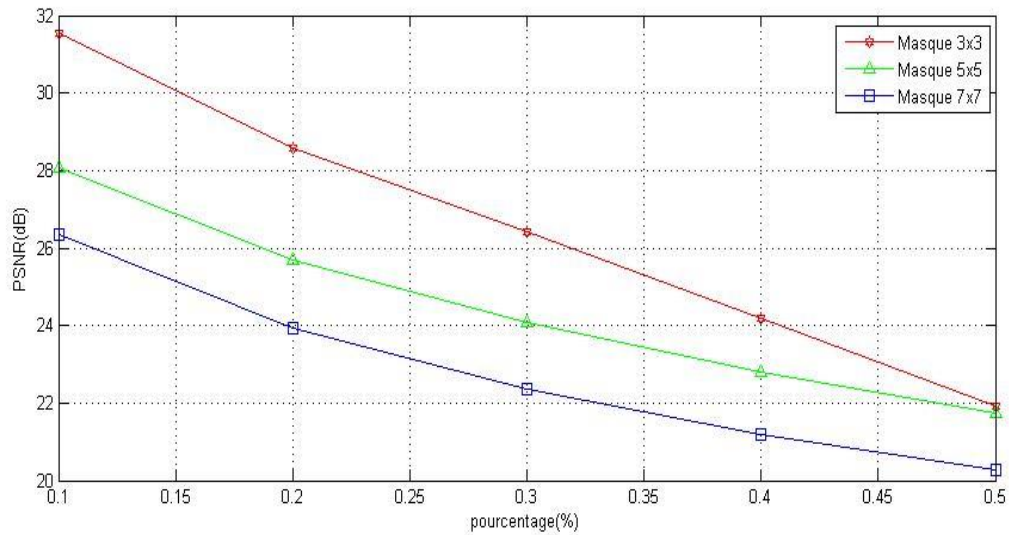
**TAB. III. 8** Résultats de PSNR, MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruitée avec un bruit aléatoire de pourcentage vari de 10% j'usquau 50% traité par le filtre TSM



**Fig. III. 19** Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit aléatoire traité par le filtre TSM

Bruit % / Masque		10	20	30	40	50
		10	20	30	40	50
3×3	PSNR image originale bruité	14.96	11.94	10.18	8.94	7.97
	PSNR	<b>31.54</b>	<b>28.57</b>	<b>26.41</b>	<b>24.17</b>	<b>21.92</b>
	MAE	0.35	0.60	1.03	1.90	3.51
5×5	PSNR	28.08	25.67	24.09	22.80	21.73
	MAE	0.84	1.22	1.62	2.08	2.65
	SSIM	0.99	0.98	0.93	0.83	0.67
7×7	PSNR	26.35	23.93	22.34	21.17	20.27
	MAE	1.18	1.75	2.34	2.94	3.54
	SSIM	0.96	0.95	0.95	0.95	0.94

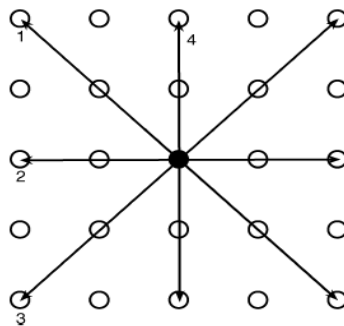
**TAB. III. 9** Résultats de PSNR, MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit poivre et selde pourcentage vari de 10% j'usquau 50% traité par le filtre TSM



**Fig. III. 20** Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit poivre et sel traité par le filtre TSM

### e. Filtre médian pondéré directionnel (DWM)

Les méthodes de débuitage à base médiane connus ont tendance à bien travailler pour restaurer les images corrompues par le bruit d'impulsion aléatoire d'une valeur avec un faible niveau de bruit, mais mal adaptées pour les images très corrompues. Le filtre proposé par les auteurs dans [32] est basé sur les différences entre le pixel courant et ses voisins alignés avec quatre directions principales (voir Fig. III.21). Ensuite, le filtre médian pondéré est associé pour obtenir un nouveau filtre médian pondéré directionnel (DWM).



**Fig. III. 21** Quatre directions de détection d'impulsion

Dans chaque direction, la pondération est utilisée pour prendre en compte la distance entre le pixel central et le pixel considéré. Il est affecté un poids plus important à un pixel proche du pixel central. Puis il n'est conservé que la valeur minimale de cette entité  $d_{ij}^k$ , qui correspond à une direction donnée et qui, comparée à un seuil  $T$ , permet de déclarer si un pixel est bruité ou non [26]. La sortie du filtre  $u_{ij}$  est une combinaison linéaire de la valeur du pixel central avec la valeur médiane. Ceci s'exprime par la formule suivante :

$$u_{ij} = \alpha_{ij} Y_{ij} + (1 - \alpha_{ij}) m_{ij} \quad (3.4)$$

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{si } r_{ij} > T \\ 1, & \text{si } r_{ij} \leq T \end{cases} \quad (3.5)$$

$$r_{ij} = \min\{d_{ij}^k : 1 \leq k \leq 4\} \quad (3.6)$$

Où,  $d_{ij}^k$  représente la somme des valeurs des niveaux de gris contenus dans chacune des quatre directions principales dans la fenêtre d'observation. Il s'exprime comme suit :

$$d_{ij}^k = \sum_{(s,t)} w_{s,t} |Y_{i+s,j+t} - Y_{ij}|, 1 \leq k \leq 4 \quad (3.8)$$

Avec

$$w_{s,t} = \begin{cases} 2, & (s,t): -1 \leq s,t \leq 1 \\ 1, & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.9)$$

$$m_{ij} = \text{médiane}\{\tilde{w}_{s,t} \diamond y_{i+s,j+t} : (s,t); -1 \leq s,t \leq 1\} \quad (3.10)$$

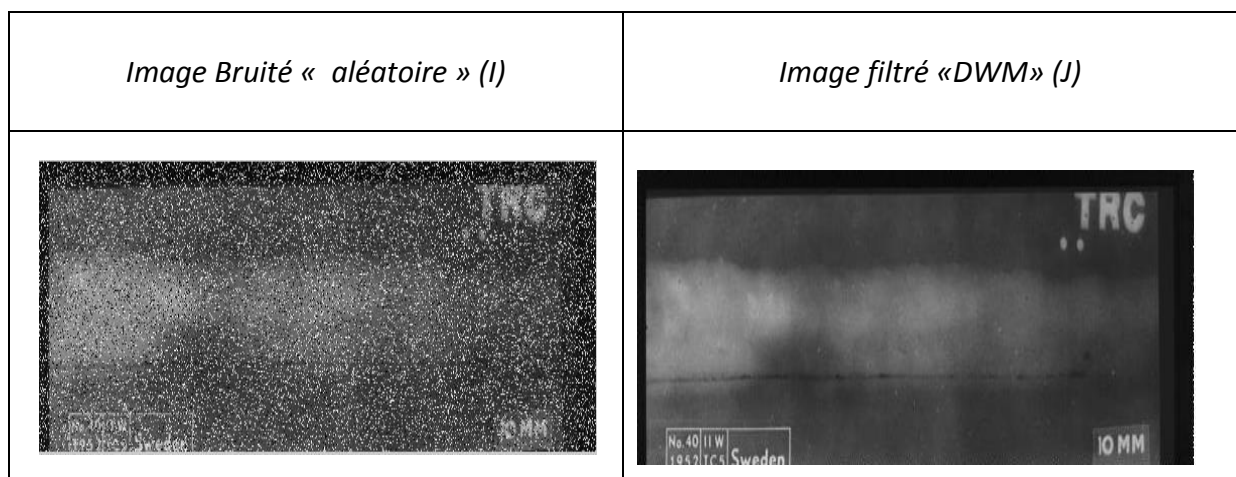
$$\tilde{w}_{s,t} = \begin{cases} w_m, & (s,t) \in s_{ij}^0, \text{ et} \\ 1, & \text{sinon} \end{cases}, \text{ et } \diamond \text{ l'opérateur de répétition.} \quad (3.11)$$

Dans son article, Dong propose de choisir le poids  $w_m = 2$ .  $s_{ij}^0$  représente la direction principale pour laquelle  $d_{ij}^k$  est minimale. Le filtre proposé est lié à un seuil  $T$  et que les auteurs proposent de le déterminer de manière itérative en fixant un seuil initial  $T_0$  et en le faisant décroître au cours des itérations. Ce qui s'écrit comme :

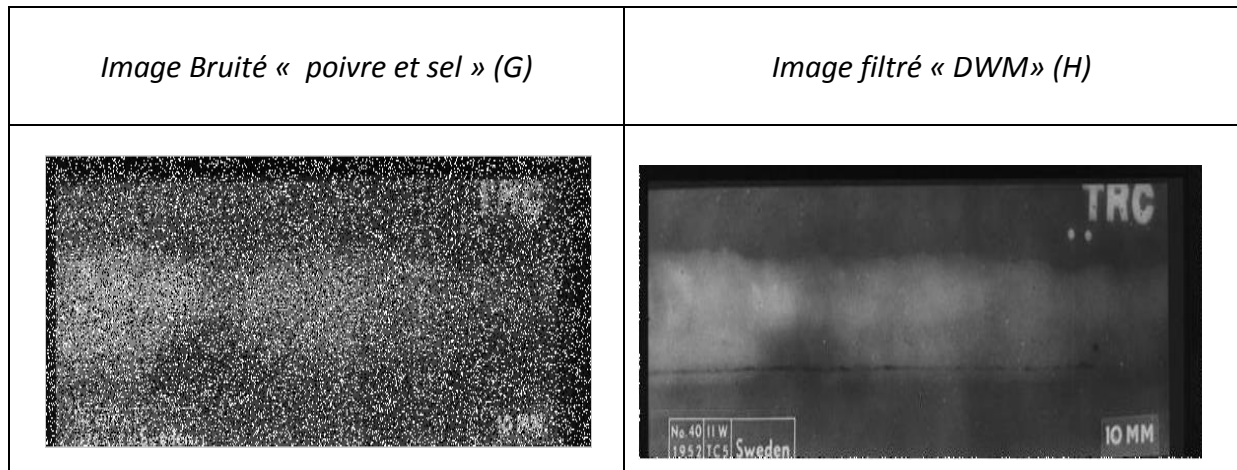
$$T_0 = 510 \quad \text{et} \quad T_{n+1} = T_n * 0.8 \quad (3.12)$$

Où,  $T_0$  est le seuil initial et  $T_n$  est la valeur du seuil obtenu à la  $n^{\text{ième}}$  itération.

De nombreuses simulations montrent que ce filtre non seulement peut améliorer les performances de suppression d'impulsion avec un haut niveau de bruit, mais peut conserver plus de fonctionnalités de détail, même des lignes fines [38]. Étendu à la restauration des images en couleurs altérées, ce filtre se comporte également très bien.



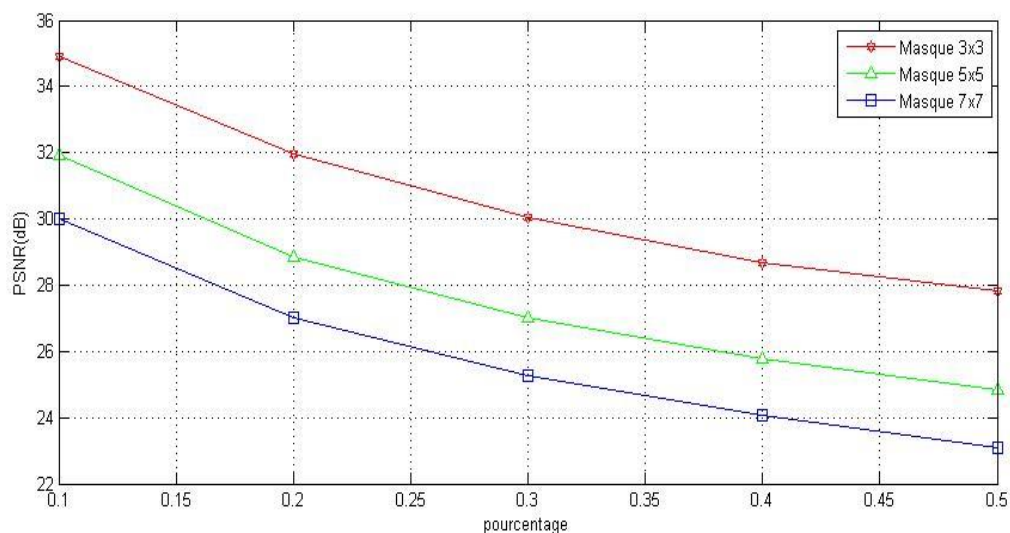
**Fig. III.22** Exemple de filtrage DWM(I) Image Radio dégradée avec un bruit aléatoire avec une probabilité de 30%, (J) Résultats du filtrage avec un filtre DWM de 3x3



**Fig. III. 23** Exemple de filtrage DWM (I) Image Radio dégradée avec un bruit poivre et sel avec une probabilité de 30%, (J) Résultats du filtrage avec un filtre DWM de 3x3.

Bruit % Masque		10	20	30	40	50
		PSNR image originale bruité	18.23	15.20	13.45	12.19
3x3	PSNR	<b>34.90</b>	<b>31.95</b>	<b>30.06</b>	<b>28.70</b>	<b>27.81</b>
	MAE	0.14	0.28	0.44	0.59	0.73
	SSIM	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
5x5	PSNR	31.93	28.83	27.01	25.79	24.83
	MAE	0.28	0.58	0.88	1.16	1.46
	SSIM	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
7x7	PSNR	30.00	27.03	25.26	24.07	23.09
	MAE	0.44	0.88	1.32	1.75	2.18
	SSIM	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98

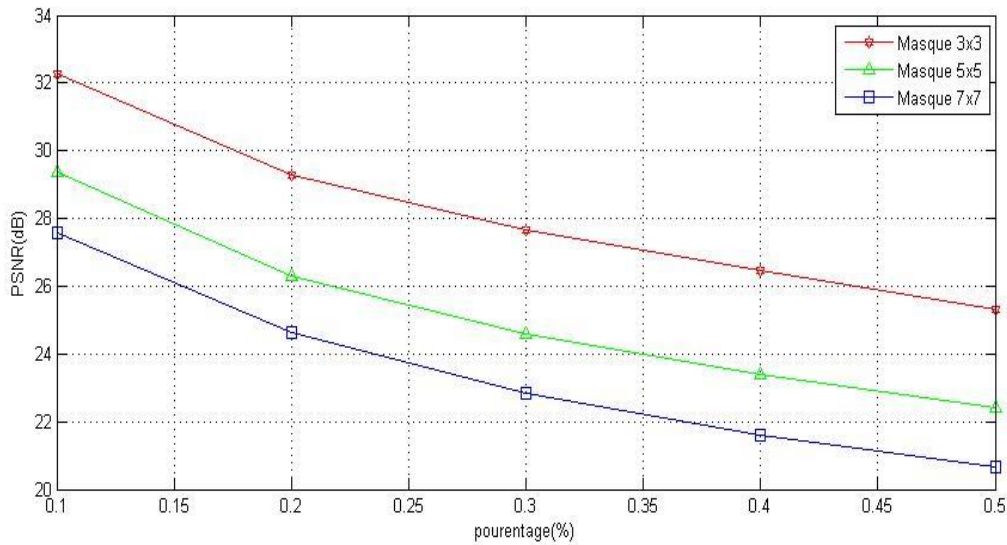
**TAB. III. 10** Résultats de PSNR, MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit aléatoire de pourcentage vari de 10% j'usqu 50% traité par le filtre DWM



**Fig. III. 24** Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit aléatoire traité par le filtre DWM

Bruit % / Masque		10	20	30	40	50
		PSNR image originale bruité	14.96	11.94	10.18	8.94
3x3	PSNR	<b>32.28</b>	<b>29.27</b>	<b>27.65</b>	<b>26.44</b>	<b>25.31</b>
	MAE	0.19	0.38	0.55	0.74	0.95
	SSIM	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
5x5	PSNR	29.38	26.29	24.60	23.37	22.41
	MAE	0.37	0.76	1.12	1.49	1.86
	SSIM	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
7x7	PSNR	27.57	24.61	22.833	21.60	20.66
	MAE	0.56	1.12	1.69	2.24	2.79
	SSIM	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97

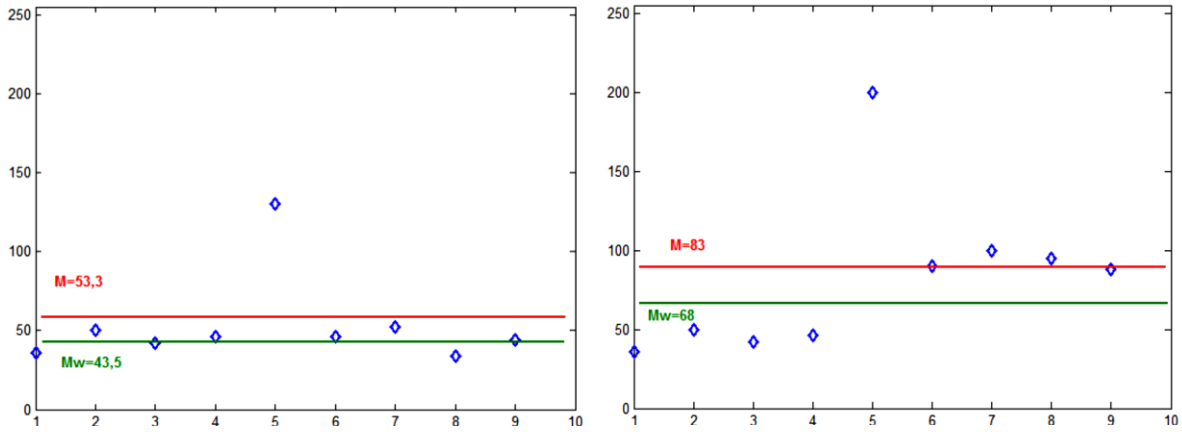
**TAB. III. 11** Résultats de PSNR, MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit poivre et selde pourcentage vari de 10% j'usqu 50% traité par le filtre DWM



**Fig. III. 25** Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit poivre et sel traité par le filtre DWM

#### f. Filtre médian commuté adaptatif (ASWM)

Le filtre proposé par Akkoul et al. [33, 26] a la même structure générale que celle du filtre SWM. L'originalité du filtre médian commuté adaptatif (ASWM : Adaptive SWitching Median) est qu'aucun seuil a priori n'est nécessaire comme dans le cas du SWM. Au lieu de cela, le seuil est calculé localement à partir des valeurs d'intensité des pixels de l'image dans la fenêtre. Plus précisément, les valeurs de la moyenne et l'écart type pondérées sont estimés dans la fenêtre courante. Les poids sont l'inverse de la distance entre la valeur moyenne pondérée des pixels dans une fenêtre donnée et du pixel considéré. Il en résulte que le bruit impulsif ne corrompt pas la détermination de ces statistiques dont le seuil est dérivé. Dans chaque fenêtre, les moyennes pondérées sont d'abord estimées de manière itérative, Ensuite, l'écart type pondéré est calculé et le seuil est déterminé. Cette procédure est expliquée dans les paragraphes qui suivent. Tout d'abord, la valeur du pixel central est comparée avec celle de la moyenne pondérée [27] qui sera un meilleur estimateur de la valeur moyenne de l'échantillon en présence d'un point aberrant (valeur  $M_w$  de Fig. III.26).



**Fig. III. 26** Exemple de deux échantillons d'une fenêtre 3x3 qui contiennent un pixel corrompu. Les lignes rouges représentent la moyenne standard pour chacun des neufs pixels de la fenêtre. La ligne verte représente la moyenne pondérée

Comme la majorité des points se situent autour de la moyenne pondérée, on peut ensuite calculer l'écart-type pondéré [27]. Il est alors possible de définir la valeur d'un seuil local (un seuil par fenêtre d'observation) qui sera une valeur proportionnelle à cet écart-type pondéré. Les données comprises entre la moyenne pondérée plus au moins ce seuil peuvent être considérées comme non bruitées. A l'extérieur, les valeurs sont considérées bruitées. Pour cette raison, les auteurs ont nommé ce filtre, filtre médian commuté adaptatif (ASWM pour Adaptive SWitching Median). La sortie du filtre suit la loi de décision suivante :

$$\hat{Y}_{ij} = \begin{cases} m_{ij}, & \text{si } |X_{ij} - M_w(i,j)| > \text{seuil} \\ X_{ij}, & \text{sinon,} \end{cases} \quad (3.13)$$

où  $M_w(i, j)$  est la moyenne pondérée,  $m_{ij}$  est la valeur médiane de la fenêtre d'observation  $W_{ij}$  et  $\text{Seuil} = \alpha \times \sigma_w(i, j)$ ,  $\sigma_w(i, j)$  est l'écart-type pondéré et  $\alpha$  est un paramètre que nous allons étudier après avoir exposé l'algorithme de calcul de la moyenne pondérée et de l'écart-type pondéré.

### Calcul de la moyenne pondérée et de l'écart type pondéré

L'algorithme de calcul de la moyenne pondérée se déroule de la manière suivante : après une phase d'initialisation de  $M_w(i, j)$  dans laquelle la valeur des poids (paramètres de



pondération) associés à chaque pixel vaut un, un processus itératif permet d'estimer cette valeur moyenne ainsi que la valeur de chaque poids. Le processus stoppe sur un critère de convergence. Suite à ce calcul, la valeur de l'écart-type pondéré est estimée.

- **Initialisation**

Dans cette phase, la valeur notée  $W_{k,l}$  des poids associés aux pixels de la fenêtre vaut l'unité. Une valeur initiale de la moyenne pondérée  $M_w(i,j)$  est calculée dans la fenêtre  $(2L+1) \times (2L+1)$  autour du pixel considéré. Cette valeur est obtenue à l'aide de l'expression suivante :

$$M_w(i, j) = \frac{\sum_{k,l} W_{k,l} X_{i+k,j+l}}{\sum_{k,l} W_{k,l}} \quad (3.14)$$

où  $X_{ij}$  est la valeur du niveau de gris de l'image  $X$  localisé en  $(i, j)$  et les  $w_{k,l}$  sont les poids associés aux pixels de la fenêtre (égaux à 1 dans cette phase d'initialisation). La variation des indices  $k$  et  $l$  est  $-L < k < L$  et  $-L < l < L$ .

- **Phase itérative**

**Etape 1:** Estimation des poids  $W_{k,l}$  et nouveau calcul de  $M_w(i, j)$ .

De manière, à ce qu'un pixel bruité ait moins d'importance qu'un pixel proche de la moyenne, la valeur des poids  $W_{k,l}$  est inversement proportionnelle à la différence entre les valeurs des niveaux de gris et la moyenne de ces mêmes niveaux. Ces poids sont obtenus comme suit :

$$W_{k,l} = \frac{1}{|X_{i+k,j+l} - M_w(i, j)| + \varepsilon_p} \quad (3.15)$$

La valeur  $\varepsilon_p$  a été ajoutée à la différence pour éviter le cas indéterminé de la division par zéro, ce qui se produit lorsque la valeur de la moyenne  $M_w(i, j)$  est égale à la valeur du niveau de gris  $X_{ij}$ .  $\varepsilon_p$  sera choisi ultérieurement.

Une nouvelle valeur de la moyenne pondérée  $M_w(i, j)$  est alors recalculée à l'aide de l'équation (3.14)

**Etape 2 : Critère d'arrêt**

La valeur de la moyenne pondérée est estimée itérativement jusqu'à la convergence de l'algorithme. L'arrêt des itérations est obtenu en comparant la différence entre les valeurs de la moyenne pondérée obtenues pour deux itérations successives avec la valeur d'un paramètre  $\varepsilon$  très petite. Ce critère de convergence s'écrit comme suit :

$$|M_w(i, j)^t - M_w(i, j)^{t-1}| < \varepsilon \quad (3.16)$$

Où  $M_w(i, j)^t$  et  $M_w(i, j)^{t-1}$  sont respectivement les moyennes pondérées obtenues à l'itération  $t$  et  $t-1$ .

Tant que cette différence est supérieure à  $\varepsilon$ , l'algorithme retourne à l'étape 1 sinon les itérations s'arrêtent.

- **Phase finale :**

Calcul de l'écart-type pondéré  $\sigma_w(i, j)$  suite au calcul de la moyenne pondérée :

$$\sigma_w(i, j) = \sqrt{\frac{\sum_{k,l} W_{k,l} (X_{i+k, j+l} - M_w(i, j))^2}{\sum_{k,l} W_{k,l}}} \quad (3.17)$$

Pour illustrer le résultat du calcul de la moyenne pondérée et ce que représente la valeur de l'écart-type pondéré, considérons l'exemple suivant pour une fenêtre d'observation de 3x3 pixels.

63	61	62
60	60	64
211	56	62

Cas (a)

$$M = 77.6, \sigma = 50$$

$$M_w = 61.8, \sigma_w = 3.4$$

66	66	62
70	241	65
64	73	64

Cas (b)

$$M = 85.6, \sigma = 58.3$$

$$M_w = 66, \sigma_w = 3.8$$

**Fig. III. 27** Exemple d'une fenêtre d'observation dans Cas (a) le pixel central n'est pas bruité. Cas (b) le pixel central est bruité

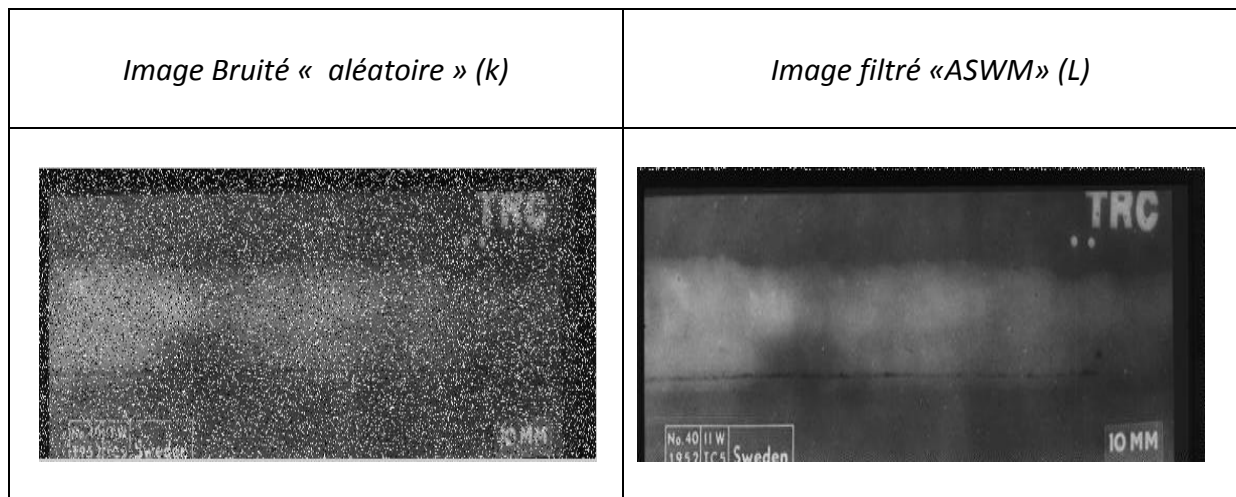
( $M$  : Moyenne,  $\sigma$  : Ecart type,  $M_w$  : Moyenne pondérée,  $\sigma_w$  : Ecart type pondéré)

Dans le cas (a), le pixel central considéré n'est pas corrompu mais la fenêtre d'observation contient un pixel bruité. De ce fait, la moyenne  $M$  des niveaux de gris de la fenêtre n'est pas le reflet réel des valeurs contenues dans cette fenêtre, l'écart type est lui aussi très élevé au regard des valeurs des niveaux de gris de la fenêtre. Il en est de même pour le cas (b). Cependant, il est constaté, à partir de la Figure III.27, que la moyenne pondérée  $M_w$  n'est pas influencée par le pixel bruité et qu'elle est un bon estimateur de la valeur moyenne, c'est le cas aussi de l'écart type pondéré.

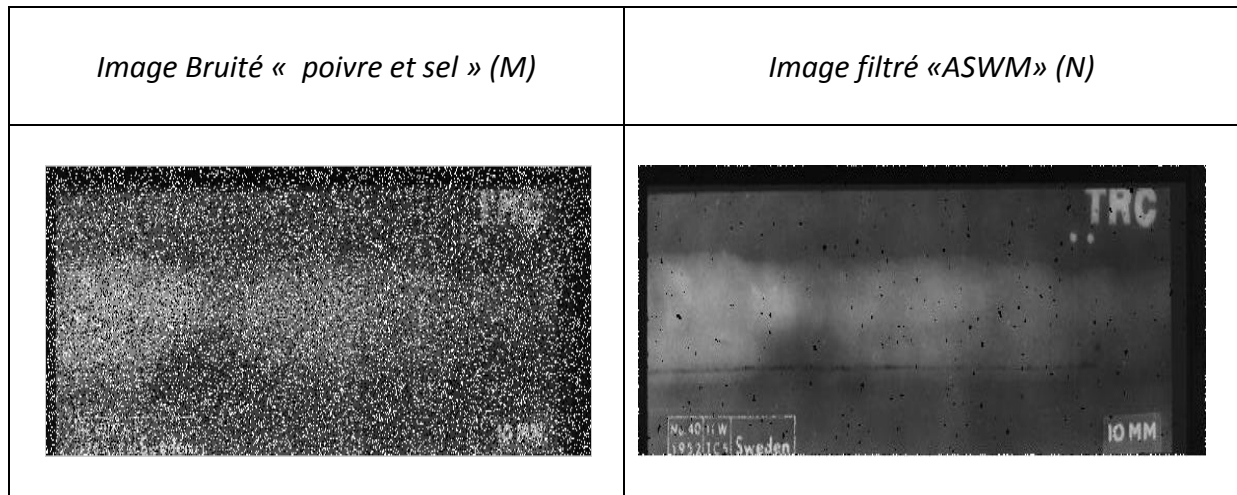
### Sélection des paramètres

La méthode proposée fait appel à quatre paramètres qui sont :

- La valeur de  $\epsilon$  pour le critère d'arrêt lors de l'estimation itérative de la moyenne pondérée  $M_w(i, j)$ .
- La valeur de  $\epsilon_p$  dans la formule de calcul des poids.
- La taille de fenêtre d'observation  $W$ .
- Et enfin, la valeur du paramètre  $\alpha$  qui multiplié par l'écart- type pondéré  $\sigma_w(i, j)$  définit la valeur du seuil.



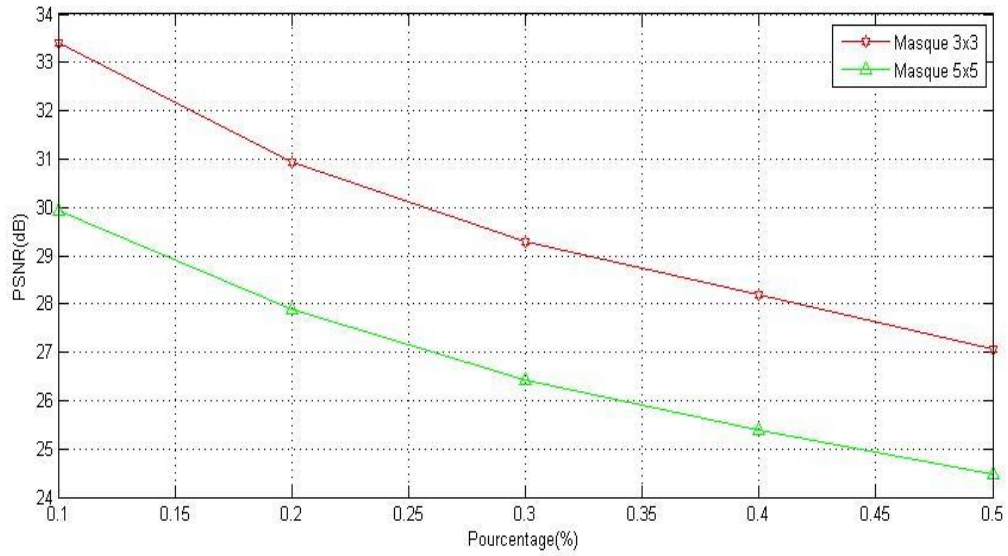
**Fig. III. 28** Exemple de filtrage ASWM(K) Image Radio dégradée avec un bruit aléatoire avec une probabilité de 30%, (L) Résultats du filtrage avec un filtre ASWM de 3x3



**Fig. III. 29** Exemple de filtrage ASWM (M) Image Radio dégradée avec un bruit poivre et sel avec une probabilité de 30%, (N) Résultats du filtrage avec un filtre ASWM de 3x3

Bruit % Masque		10	20	30	40	50
		PSNR image originale bruité	18.23	15.20	13.45	12.19
3x3	PSNR	<b>33.57</b>	<b>30.93</b>	<b>29.35</b>	<b>28.14</b>	<b>27.14</b>
	MAE	0.49	0.63	0.78	0.96	1.18
	SSIM	0.98	0.98	0.98	0.96	0.96
5x5	PSNR	29.93	27.88	26.43	25.39	24.12
	MAE	0.66	0.91	0.19	1.47	1.73
	SSIM	–	–	–	–	–
7x7	PSNR	Problèmes de mémoire				
	MAE					
	SSIM					

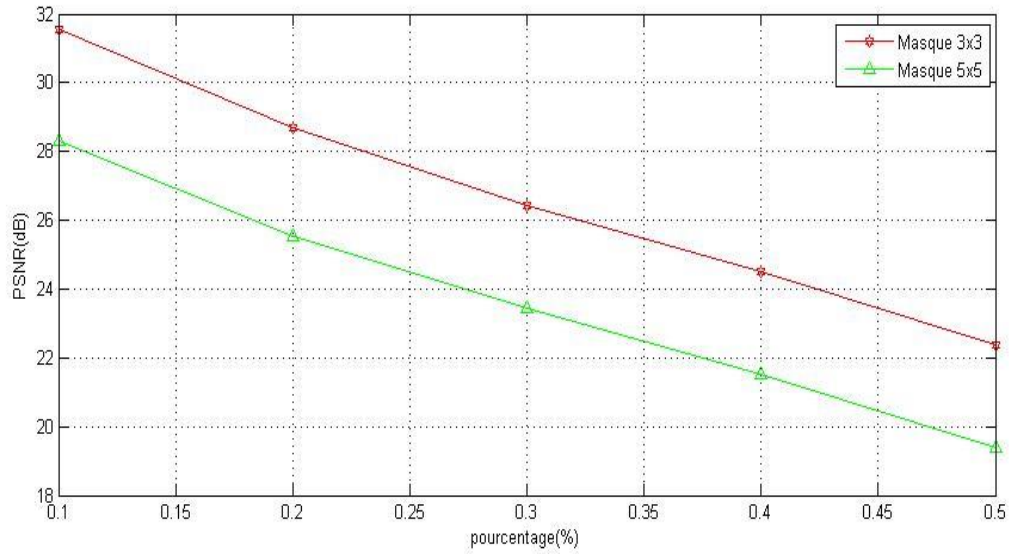
**TAB. III.12** Résultats de PSNR, MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit aléatoire de pourcentage vari de 10% j'usqu 50% traité par le filtre ASWM



**Fig. III. 30** Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit aléatoire traité par le filtre ASWM

Bruit % / Masque		10	20	30	40	50
		PSNR image originale bruité	14.96	11.94	10.18	8.94
3x3	PSNR	<b>31.56</b>	<b>28.69</b>	26.45	24.51	22.37
	MAE	0.54	0.76	1.15	1.88	3.26
	SSIM	0.98	0.98	0.93	0.83	0.69
5x5	PSNR	28.15	27.45	<b>27.01</b>	<b>26.84</b>	<b>25.72</b>
	MAE	0.72	0.91	0.99	1.02	1.32
	SSIM	–	–	–	–	–
7x7	PSNR	Problème de mémoire				
	MAE					
	SSIM					

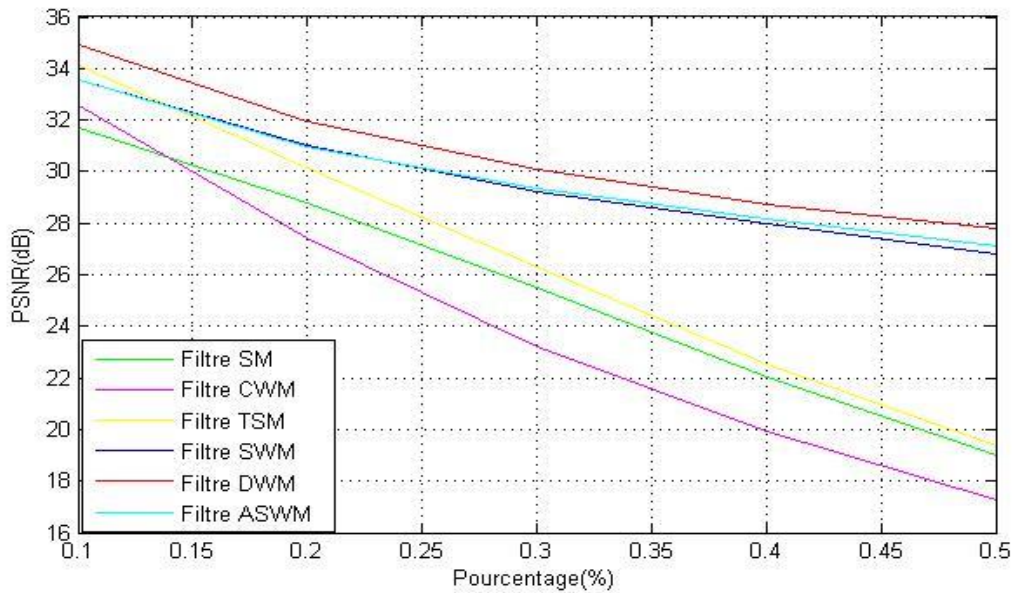
**TAB. III. 13** Résultats de PSNR, MAE et SSIM dans les trois fenêtres sur une image bruité avec un bruit poivre et sel de pourcentage vari de 10% j'usquau 50% traité par le filtre ASWM



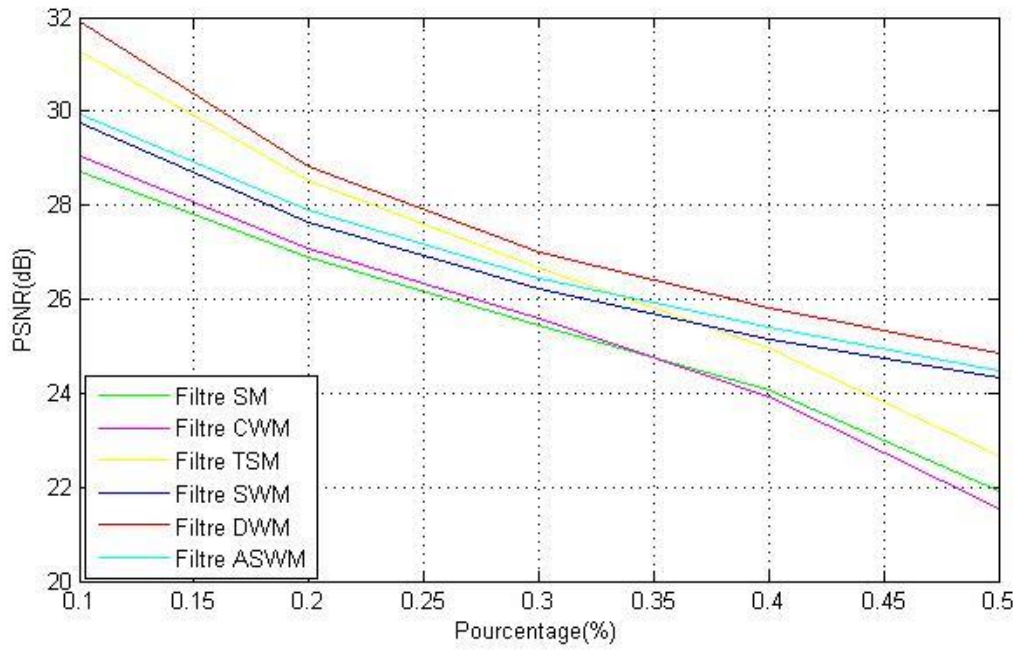
**Fig. III. 31** Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit poivre et sel traité par le filtre ASWM

### Comparaison des algorithmes utilisés basée sur PSNR/taille du masque

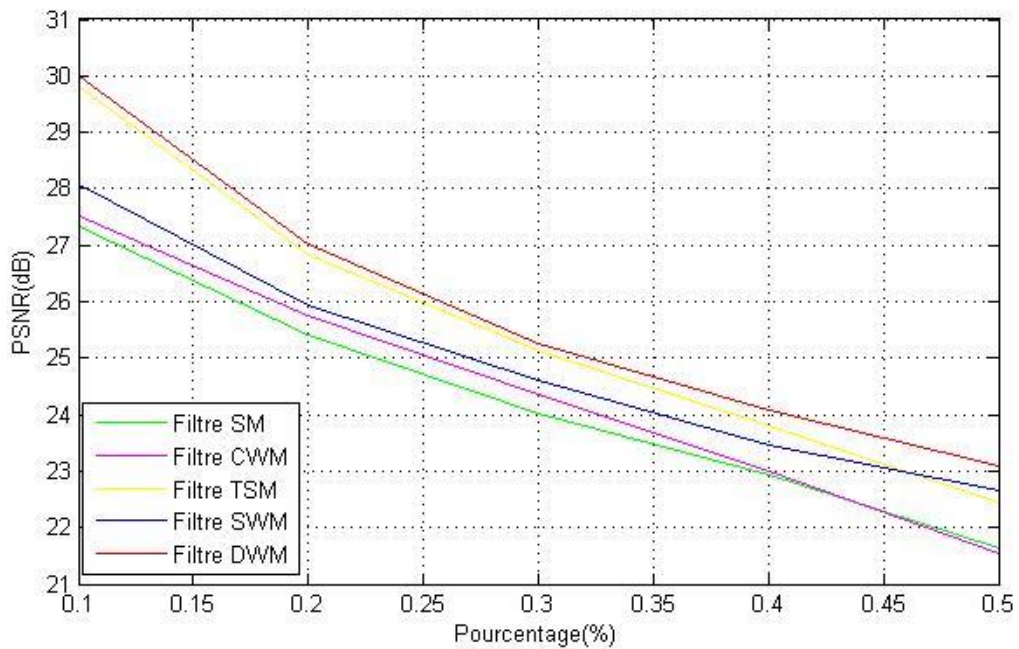
Bruit aléatoire :



**Fig. III. 32** Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit aléatoire traité par les dérivés améliorés du filtre médian de 3x3

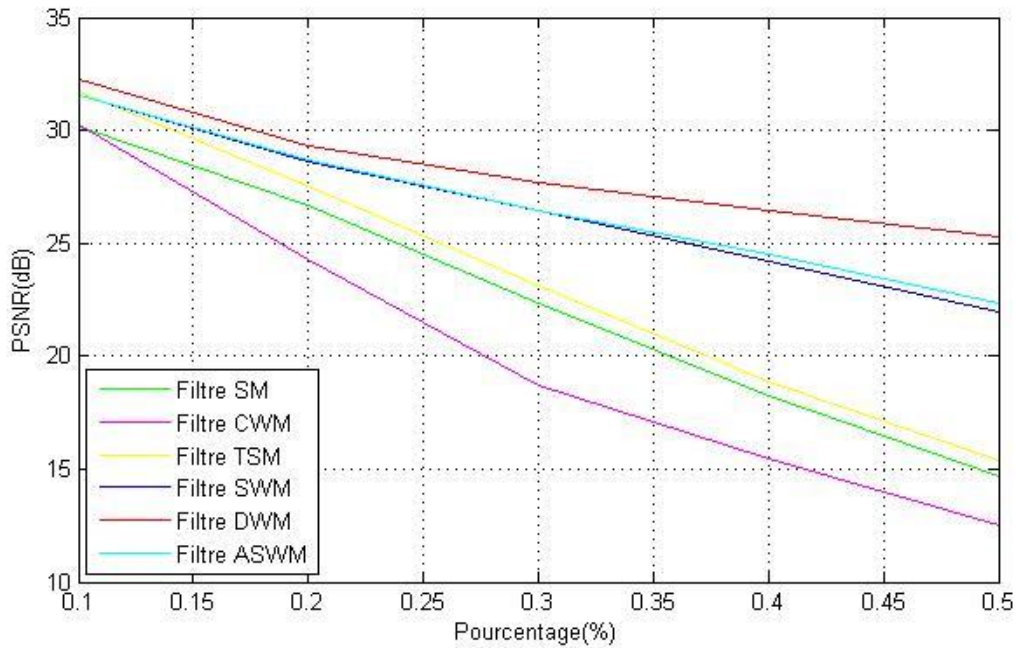


**Fig. III. 33** Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit aléatoire traité par les dérivés améliorés du filtre médian de 5x5

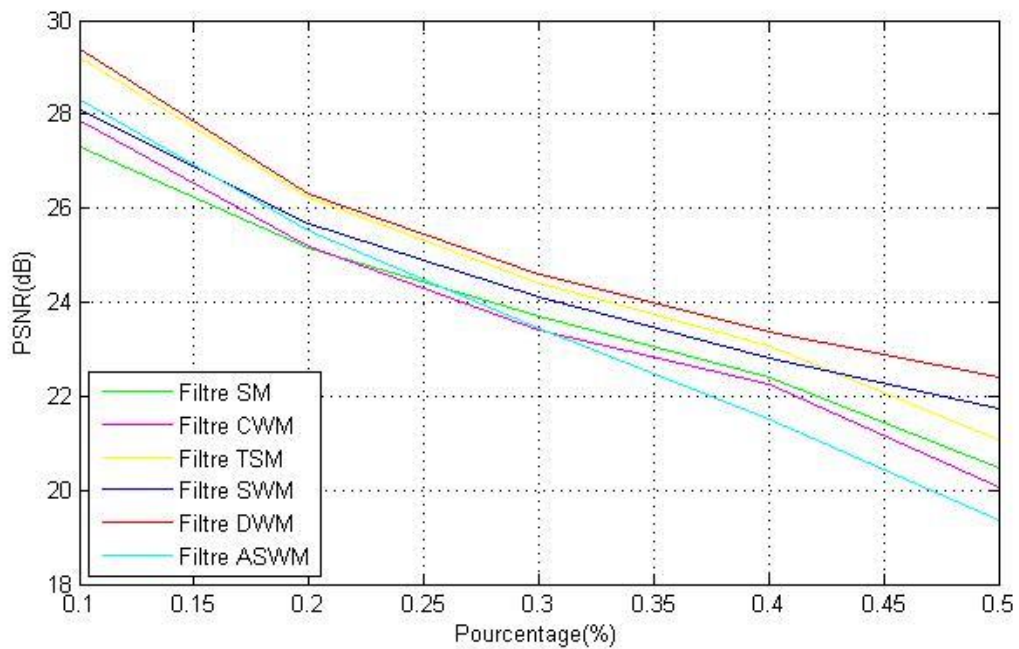


**Fig. III. 34** Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit aléatoire traité par les dérivés améliorés du filtre médian de 7x7

### Bruit poivre et sel :

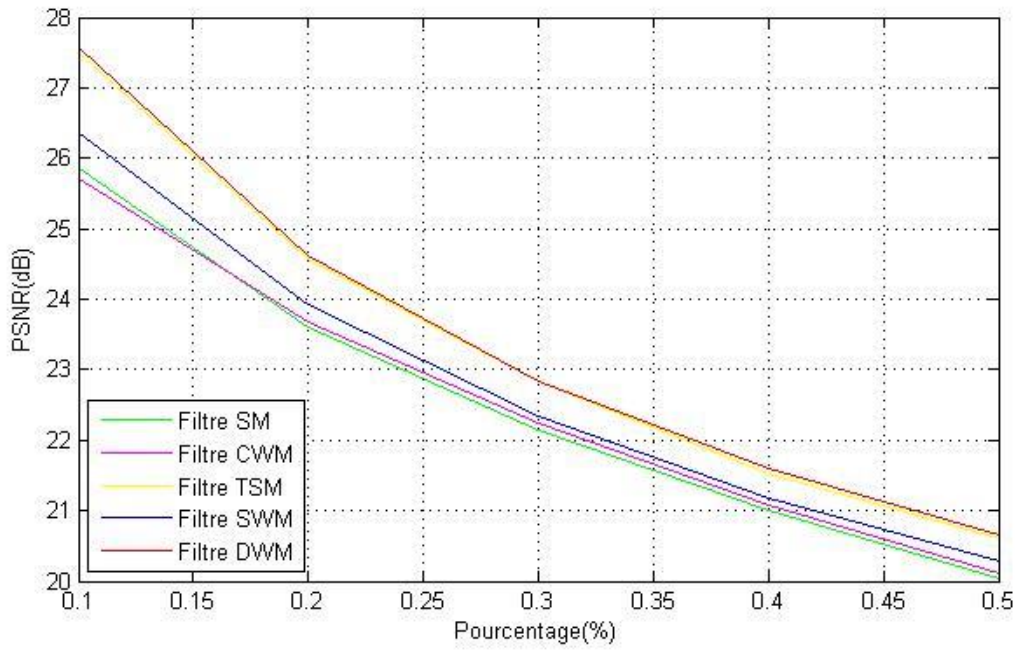


**Fig. III. 35** Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit poivre et sel traité par les dérivés améliorés du filtre médian de 3x3



**Fig. III. 36** Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit poivre et sel traité par les dérivés améliorés du filtre médian de 5x5





**Fig. III. 37** Résultats en termes de PSNR en fonction du pourcentage du bruit poivre et sel traité par les dérivés améliorés du filtre médian de 7x7

### III.2.2 Le temps d'exécution

Filtre	Temps d'exécution					
	SM	CWM	SWM	TSM	DWM	ASWM
Bruit aléatoire	0.25	0.98	0.29	1.63	11.44	29.26
Bruit poivre et sel	0.26	0.99	0.28	1.63	12.54	—

**TAB. III. 14** Temps d'exécution pour masque 3x3

### III.2.3 Discussion des Résultats

Dans cette partie expérimentale, nous avons ajouté à l'image test « 40SW » deux type de bruit impulsif (aléatoire et poivre & sel) avec des pourcentages de bruit modifiés (bruit : 10%, 20% ,30%, 40%, 50%). D'après les résultats donnés par les différents tableaux et graphes, nous remarquons ce qui suit :

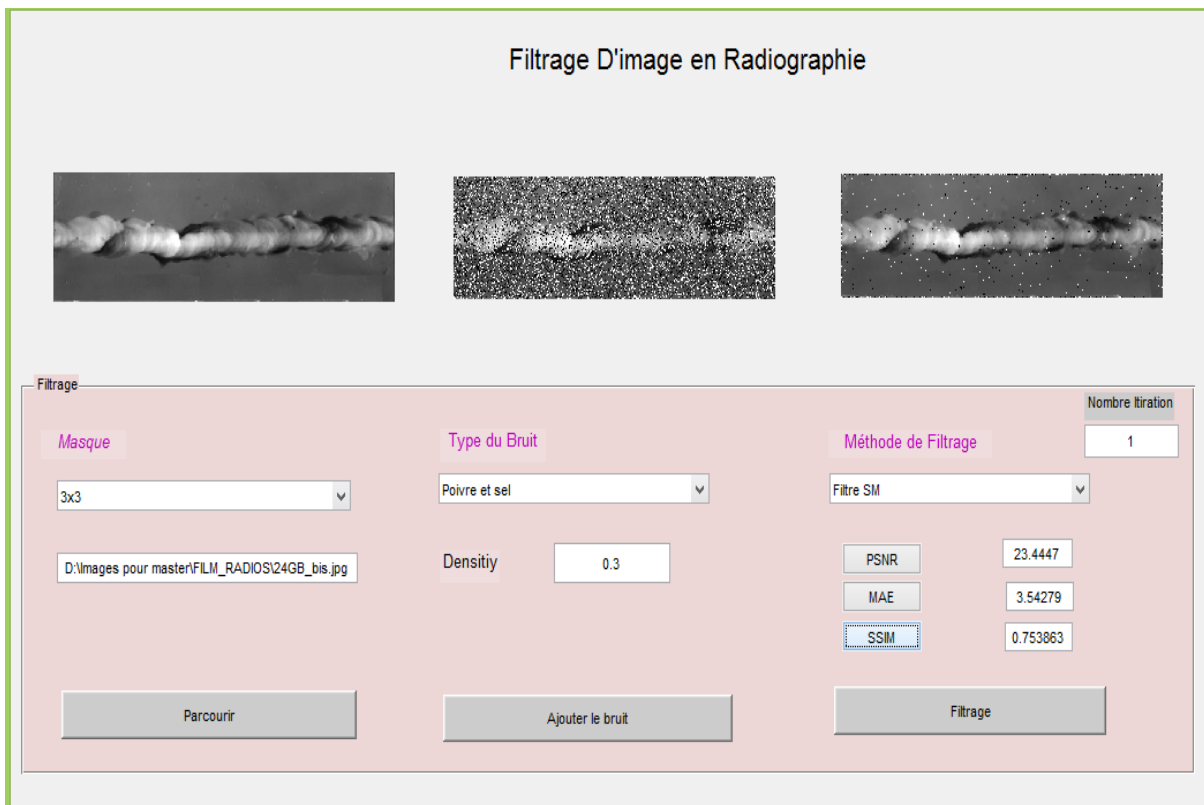
- Plus le pourcentage du bruit dans l'image est grand plus le PSNR et le SSIM diminuent et contrairement pour le MAE.
- Le bruit poivre et sel a plus d'effet sur l'image par rapport le bruit aléatoire du moment qu'on constate pour le même pourcentage du bruit, le PSNR (poivre et sel) est inférieur PSNR(bruit aléatoire).
- Malgré les bons résultats de filtrage observés par le filtre ASWM pour les images standards *Lena*, *Goldhill*, *peepers*, etc. [30], il n'est pas le plus performant en ce qui concerne les images radiographiques.
- Pour le calcul de PSNR, MAE, SSIM pour la fenêtre 7x7 et SSIM pour la fenêtre 5x5, le système plante à cause de l'insuffisance de la mémoire.
- D'après les graphes des filtres SM, CWM et le SWM, il y a des cas où les filtres donnent des bons résultats quand on utilise les fenêtres 5x5 et 7x7 que lorsqu'on utilise la fenêtre 3x3.
- Le filtre ASWM est le plus gourmand en termes de temps de calcul et à un degré moindre le filtre DWM.
- **A la lumière des résultats obtenus** dans la partie expérimentale, il apparait que le filtre **DWM** est le meilleur en ce qui concerne le filtrage des images de notre application affectées par le bruit impulsif que ce soit aléatoire ou bien poivre et sel. Ceci est confirmé par tous les critères de performance **PSNR, MAE ou SSIM** et la taille de la fenêtre de filtrage préconisée est **3x3**.

Il est à noter que les algorithmes utilisés sont implémentés sous le système d'exploitation Windows (64 bits) dans un environnement Matlab 2016 installé sur une station graphique avec un processeur i7-2600K de vitesse d'horloge 3.40 GHz et une RAM de 16.0 Go.

### III.3 Conception de l'interface graphique

L'interface graphique désigne la manière dont est présenté un logiciel à l'écran pour l'utilisateur. C'est le positionnement des éléments : menus, boutons, fonctionnalités dans la fenêtre. Une interface graphique bien conçue est ergonomique et intuitive : faite pour que l'utilisateur la comprenne tout de suite. Nous avons résumé notre travail dans une interface graphique. Elle se compose des étapes suivantes :

- 1- Parcourir l'image : quelque-soit le type de cette image JPG, TIF, PNG, etc.
- 2- Ajouter le bruit impulsionnel aléatoire ou poivre et sel ;
- 3- Sélectionner la fenêtre d'observation 3x3, 5x5, 7x7 ;
- 4- Sélectionner le type du filtre à utiliser : SM, CWM, SWM, TSM, DWM, ASWM ;
- 5- Calculer les mesures de performance PSNR, MAE, SSIM ;
- 6- Et à chaque fois que nous filtrons l'image les nombre d'itération seront augmentés.



**Fig. III.38** L'interface graphique réalisée

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous appliqués six (06) algorithmes de filtrage non-linéaires SM, CWM, SWM, TSM, DWM et ASWM sur une image radiographique d'un joint affecté par deux types de bruit impulsionnel : aléatoire et poivre & sel. A cet effet, une interface graphique interactive avec l'utilisateur est conçue sous environnement Matlab. Les résultats des expérimentations nous montrent que le filtre DWM avec un masque de filtrage de taille 3x3 est le plus performant pour l'élimination des deux types de bruit cités plus haut.

# Conclusion générale

---

La complexité grandissante des processus industriels et des pièces fabriquées, les exigences croissantes en termes de sûreté de fonctionnement ainsi que la volonté d'optimisation de la durée de vie des pièces conduisent à mettre en place des contrôles de qualité de plus en plus poussés avec plus de simplicité et de robustesse d'utilisation.

Le travail présenté dans ce mémoire aborde un cas précis mais de grande importance parmi les applications des technologies numériques dans le domaine du Contrôle Non Destructif.

La première partie de ce travail a été consacrée à la radiographie industrielle, le soudage et les différents défauts se trouvant dans un joint soudé, le contrôle non destructif en général et la radiographie en particulier où, le principe physique de cette dernière et sa mise en œuvre dans le cadre du contrôle de soudures ont été bien détaillés.

La deuxième partie de ce travail a porté sur une étape de la chaîne de vision par ordinateur dédiée à la détection et l'identification des défauts de soudures, à savoir le prétraitement par élimination du bruit ou filtrage. Ainsi le filtre médian simple et ses versions améliorées ont été implémentés et testés sur les images de notre application et ce, pour la suppression du bruit impulsionnel. Les comparaisons entre les différents filtres utilisés grâce aux critères d'évaluation de performance ont permis de déterminer le filtre le plus performant même si en termes de vitesse d'exécution, il reste assez lent pour envisager son utilisation en temps réel. Ainsi, l'amélioration de son temps d'exécution peut constituer la priorité des perspectives envisagées à court terme.

# Bibliographie

---

- [1] <http://www.technique-ingenier.fr/seartch:html/ref.bm7700>
- [2] <http://www.soudometal.fr/histoire-du-soudage-en-quelques-etapes-cles/>
- [3] [www.techniques-ingeniers.fr/search.html/procédés de soudage](http://www.techniques-ingeniers.fr/search.html/procédés%20de%20soudage) Ref.bm7700
- [4] livre Bases Métallurgiques du soudage H.GRANJON (Directeur honoraire d'école du soudage e d'applications.2éme édition/chapitre-1
- [5] <http://navybmr.com/study20%20matoral/142500/14250Ach3/pdf>
- [6] James A.Pender, Le soudage, Edition Métrique
- [7] <https://www.rocdacier.com/joint-soude-detail/>
- [8] Classification des défauts dans les soudures par fusion des métaux, avec commentaires explicatifs. *Norme of International Standard Organization, 6520-1982, 1982.*
- [9] [https://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/CND\\_RA.pdf](https://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/CND_RA.pdf)
- [10] <https://fr.scribd.com/document/391786866/2-Controle-par-Radio-gama-PDF>
- [11] Contrôle + par+ radiographie AIHE REVUE n°169 juin-juillet 2010
- [12] N. Nacereddine, 2004. Mise au point d'une méthode de détection et classification automatisée des défauts de soudure en radiographie industrielle.
- [13] <http://culturesciences.chimie.ens.fr/print/1197?print=yes&nid=1197>
- [14] Kabir Y,1999. segmentation d'image de film de radiographie dédiée au contrôle non destructif ( CND) .
- [15] El Feghi, I., S. Huang, M.A. Sid-Ahmed, M. Ahmadi, 2004. Contrast enhancement of radiograph image based on local heterogeneity measures, Int. Conf. Image Processing.
- [16] A.B. Goumeïdane, M. Khamadja, N. Nacereddine, F. Mekhalfa, Le Creusot, France, 23-25 Mai 2007. Parametric Active Contour for Weld Defect Boundary Extraction in Radiographic testing, in Proc. of SPIE 6356, 8th Inter. Conf. on Quality Control by Artificial Vision.

- [17] Antoine Manzanera, 2009 . Traitement d'image et vision artificielle, cours de TI, Unité d'Electronique et d'informatique, Université ENSTA.
- [18] W.FOURATI et M. S. BOUHLEL, *March 22-26, 2009, TUNISIA.. Techniques de Débruitage d'Images .*
- [19] [http://perso-teleco.paristech.fr/~maitre/BETI/filtrres\\_lin\\_nlin/introdu](http://perso-teleco.paristech.fr/~maitre/BETI/filtrres_lin_nlin/introdu)
- [20] [http://www.snv.jussieu.fr/~wboudier/ens/cours\\_inb2](http://www.snv.jussieu.fr/~wboudier/ens/cours_inb2)
- [21] Benoit Naegel , 2008. Traitement d'image , Cours Master 1 ISI, Université de strasbourg.
- [22] Nacereddine N., Ziou D., Hamami L., 2013 .Fusion-based Shape Descriptor for Weld Defect Radiographic Image Retrieval International Journal of Advanced Manufacturing Technology vol. 68, n° 9-12, pp. 2815–2832.
- [23] R. Missaoui, M. Sarifuddin, J. Vaillancourt, 2005. Similarity measures for efficient content-based image retrieval, *IEE Proc. Vis. Imag. Sig. Proc.* 152(6), pp. 875-887.
- [24] Chan, R. H., H. Chen et M. Nikolova. 2004. An iterative procedure for removing random-valued impulse noise. *Signal Processing Letters, IEEE* 11 (12):921-924.
- [25] A. S. ZIANOU , 2012 , *Evaluation de la qualité d'image», Université de Mentouri – Constantine, These doctorat .*
- [26] Akkoul, S. , 2010, Filtrage et déconvolution en imagerie de bioluminescence chez le petit animal .
- [27] Akkoul, S., Lédée, R., Leconge R., Harba. R 2009, Salzburg, Austria, Sep. .A new detector for switching median filter. Paper read at Proceedings of the 6th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA'09)".
- [28] Gonzalez R. C., Woods R.E., 2018, Digital Image Processing, Prentice Hall, New Jersey, USA.
- [29] Ko, S.-J. et Y. H. Lee. 1991. Center weighted median filters and their applications to image enhancement. *IEEE Transactions on Circuits and Systems* 38 (9):984-993
- [30] Sun, T. et Y. Neuvo. 1994. Detail-preserving median based filters in image processing. *Pattern Recogn. Lett.* 15 (4):341-347
- [31] Chen, T., K.-K. Ma et L.-H. Chen. 1999. Tri-state median filter for image denoising. *Image Processing, IEEE Transactions on* 8 (12):1834-1838.
- [32] Dong , Y. et S. Xu. 2007. A New Directional Weighted Median Filter for Removal of Random-Valued Impulse Noise. *Signal Processing Letters, IEEE* 14 (3):193-196.

- [33] Akkoul, S., R. Lédée, R. Leconge et R. Harba. 2010. A New Adaptive Switching Median Filter. *Signal processing letters, IEEE* 17 (6):587-590.
- [34] Baroudi A., Larabi N., 2012, « *Comparaison entre les différents filtres d'images* », Mémoire de Licence en Informatique, Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen.
- [35] Lin, Y., Y. Ruikang, M. Gabbouj et Y. Neuvo. 1996. Weighted median filters: a tutorial. *Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, IEEE Transactions on* 43 (3):157-192.
- [36] Zhou, W. et D. Zhang. 1999. Progressive switching median filter for the removal of impulse noise from highly corrupted images. *Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, IEEE Transactions on* 46 (1):78-80.
- [37] Chen, T. et Wu H. R. 2001, Space variant median filters for the restoration of impulse noise corrupted images. *Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, IEEE Transactions on* 48 (8):784-789.
- [38] Dang, D. et W. Luo. 2007. Impulse noise removal utilizing second-order difference analysis: Elsevier North-Holland, Inc., 2017-2025.