

UNIVERSITE DE YAOUNDE 1
REPUBLIQUE DU CAMEROUN

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE
POLYTECHNIQUE



CS 06047

DÉPARTEMENT DES GÉNIES ÉLECTRIQUE
ET DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

Laboratoire d'Électronique et de Traitement du Signal

**Contribution à la compression des données
multimédia dans le contexte de l'enseignement à
distance, appliquée aux réseaux dégradés.**

THESE DE DOCTORAT / Ph.D.

Présentée et soutenue publiquement par :

M. Jean M'BOLIGUIPA

Maître ès Sciences de Physique

Spécialité :

ELECTRONIQUE ET TELECOMMUNICATIONS

Jury:

Président : M. Maurice TCHUENTE, Professeur, Recteur de l'Université de Douala

**Directeur
de thèse :** M. Emmanuel TONYE, Professeur, Chef de Département Génies Electrique et des
Télécommunications, ENSP

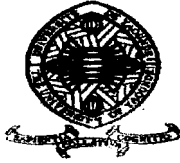
Membres : M. Alain AKONO, HDR, Maître de Conférences, ENSP.
M. Pierre ELE, Dr, Chargé de cours, ENSP

Rapporteurs : M. Jean – Michel JOLION, Professeur, Directeur de l'Ecole Doctorale I.I.S., INSA de Lyon
M. AWONO ONANA, Maître de Conférences, Directeur de l'IUT de Douala

Yaoundé, le 05 Septembre 2003

UNIVERSITE DE YAOUNDE 1
REPUBLIQUE DU CAMEROUN

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE
POLYTECHNIQUE



DÉPARTEMENT DES GÉNIES ÉLECTRIQUE
ET DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

Laboratoire d'Électronique et de Traitement du Signal

**Contribution à la compression des données
multimédia dans le contexte de l'enseignement à
distance, appliquée aux réseaux dégradés.**

THESE DE DOCTORAT / Ph.D.

Présentée et soutenue publiquement par :

M. Jean M'BOLIGUIPA

Maître ès Sciences de Physique

Spécialité :

ELECTRONIQUE ET TELECOMMUNICATIONS

Jury:

Président : M. Maurice TCHUENTE, Professeur, Recteur de l'Université de Douala

**Directeur
de thèse :** M. Emmanuel TONYE, Professeur, Chef de Département Génies Electrique et des
Télécommunications, ENSP

Membres : M. Alain AKONO, HDR, Maître de Conférences, ENSP.
M. Pierre ELE, Dr, Chargé de cours, ENSP

Rapporteurs : M. Jean – Michel JOLION, Professeur, Directeur de l'Ecole Doctorale I.I.S., INSA de Lyon
M. AWONO ONANA, Maître de Conférences, Directeur de l'IUT de Douala

Yaoundé, le 05 Septembre 2003

DEDICACE

A mon épouse M'BOLIGUIPA Sylvie et ma fille M'BOLI Nanie pour leur indéfectible soutien moral,

A mes parents monsieur FOSSENDE François et madame FAKPIO Marienne.

REMERCIEMENTS

Qu'il me soit permis ici de remercier tous ceux qui ont de près ou de loin contribué à la réalisation de cette thèse.

Mes remerciements vont particulièrement aux personnes suivantes :

- Pr. Maurice TCHUENTE pour avoir accepté de présider ce jury.
- Pr. Jean – Michel JOLION pour ses critiques scientifiques et pour avoir accepté d'être Rapporteur.
- Pr. AWONO ONANA pour avoir accepté d'être Rapporteur de cette thèse.
- Pr Alain AKONO pour l'honneur qu'il me fait de participer à ce jury.
- Pr. Emmanuel TONYE pour qui les mots me manqueront certainement pour lui exprimer ma gratitude sans limite. Vous avez accepté de diriger ce travail, que Dieu vous bénisse.

Je tiens aussi à remercier la Coopération Française et l'UNESCO pour le financement des travaux de cette thèse.

Mes remerciements vont également au Dr NGOHE EKAM et Dr Edouard ONDOUA pour les conseils scientifiques qu'ils m'ont donné. Que le Dr Pierre ELE reçoive également mes sincères remerciements pour non seulement les conseils scientifiques, mais aussi le soutien moral et matériel apporté durant les moments les plus difficiles! Que Dr Vincent de Paul ONANA et Dr Joseph MVOGO reçoivent ici mes sincères remerciements pour les conseils pratiques qu'ils m'ont donné.

Que mon frère Serge MINTSA reçoive également mes sincères remerciements pour son apport technique dans la réalisation matérielle de cette thèse!

Je remercie les collègues doctorants Raoul NANJI YOSSI, Melouta MEZOM pour les multiples encouragements ainsi que tous les membres du LETS qui ont contribué par leur présence à rendre le climat de travail attrayant.

Au Tout Puissant JEHOVAH qui nous a accordé la force et l'intelligence nécessaires pour atteindre nos objectifs.

RESUME

La transmission sur un canal dégradant d'images photographiques couleurs compressées par la norme JPEG, dans le cadre de l'enseignement à distance, nécessite la prévention des effets du bruit sur les données décompressées. Le codage de canal réalise dans une certaine mesure, une protection des données contre les perturbations par l'insertion des bits de redondance. Cependant, lorsqu'il s'agit de faire face à des perturbations introduites par les systèmes d'acquisition des données, l'opérateur ou le canal de transmission, les techniques de pré-traitement et de post-traitement de l'image sont nécessaires. Des méthodes classiques d'amélioration d'images existent : les techniques de rehaussement (recadrage de la dynamique, égalisation d'histogramme, etc) et les méthodes de restauration : le filtrage inverse, le filtrage de Wiener, etc.

Ces méthodes ne permettent pas toujours la suppression du bruit dans l'image reconstruite. Dans ce travail quatre méthodes d'amélioration d'images photographiques sont proposées. Deux de rehaussement : la loi de puissance modifiée et la correction par mesure de distance entre les pixels reconstruits et la moyenne des pixels originaux. Deux de restauration : la correction par atténuation et la combinaison de cette dernière avec le filtre de Wiener. Ces méthodes permettent la correction des bruits additif, de codage et du système d'acquisition.

La loi de puissance modifiée permet aussi bien un pré-traitement qu'un post-traitement de l'image. La correction par mesure de la distance réduit considérablement le bruit de la transformation RGB \rightarrow YCbCr sans modifier le contraste de l'image. La correction par atténuation supprime ce bruit ainsi que des dégradations provoquées notamment par le système d'acquisition comme la défocalisation, le canal de transmission notamment le bruit blanc, le speckle et le bruit de grain de film.

Insérée dans le schéma de compression JPEG, la technique d'atténuation corrige ces bruits et améliore le taux de compression de l'ordre de 1 à 3%. La loi de puissance modifiée présente une série d'images à contraste variable dont le choix de l'image définitive dépend de l'opérateur.

Des méthodes d'amélioration sont proposées pour corriger une image reconstruite par la norme JPEG et dégradée à la fois par des bruits de codage, du système d'acquisition et du canal.

ABSTRACT

The transmission on a noisy channel of photographic images colours pressed by the JPEG standard, within the framework of the education in distance, requires the prevention of the effects of the noise in the inverse transformed data. The channel coding realizes to a certain extent, a protection of the data against the disturbances by the insertion of the bits of redundancy. However, when it is a question of facing disturbances introduced by the systems of purchase of the data, the cameraman or the channel of transmission, the techniques of pre-processing and of post - processing of the image are necessary. Classical methods of the improvement of images exist : the techniques of raising (dynamic centering, the equalization of histogram, etc.) and the methods of restoration : the inverse filtering, the Wiener filtering, etc.

These methods do not always allow the suppression of the noise in the reconstructed image. In this work four methods of improvement of photographic images are proposed. Two of the enhancing : the modified law of power and the correction by the measure of distance between reconstructed pixels and the average of the original pixels. Two of the restoration : the correction by attenuation and the combination of this last one with the Wiener's filter. These methods allow the correction of the additive, coding and the system of purchase noises.

The modified law of power allows as well a pre-processing as a post - processing of the image. The correction by measure of the distance reduces considerably the noise of the transformation $RGB \rightarrow YCbCr$ without modifying the contrast of the image. The correction by attenuation suppresses this noise as well as damages caused by the system of purchase as misfocus, the channel of transmission notably the white noise, speckle and the noise of grain of film.

Inserted into the JPEG compression scheme, the technique of attenuation suppresses these noises and improves the compression ratio of the order of 1 to 3 %. The modified law of power presents a series of variable contrast images that the definitive choice which depends on the observer.

Methods of improvement are proposed to correct JPEG reconstructed image and degraded at the same moment by the coding, system of purchase and channel noises.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE	I
REMERCIEMENTS	II
RESUME	III
ABSTRACT	IV
TABLE DES MATIERES	V
LISTE DES ACRONYMES	VIII
LISTES DES SYMBOLES	IX
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES TABLEAUX	XV
INTRODUCTION GENERALE	1
1- Contexte	1
2- Problématique	2
3- Méthodologie	2
4- Objet de l'étude	3
5- Intérêt de l'étude	3
6- Objectifs	4
7- Résultats attendus	4
8- Plan de la thèse	4
9- Contribution et perspectives	5
Première partie : PRINCIPES USUELS EN TRAITEMENT DE DONNEES MULTIMEDIAS	6
Chapitre 1 : ETAT DE L'ART DES TRAITEMENTS DES DONNEES MULTIMEDIAS	7
1.1- INTRODUCTION	8
1.2- LE MULTIMEDIA	8
1.3- LES TYPES DE DONNEES	8
1.3.1- Les données de type texte	9
1.3.2- Les données de type graphique	9
1.3.3- Les données de type sonore	9
1.3.4- Les données de type MIDI	9
1.3.5- Définition de l'image	9
1.3.6- Conclusion	10
1.4- LA THEORIE DE L'INFORMATION	10
1.4.1- L'information : aspects qualitatif et quantitatif	10
1.4.2- Information et incertitude	10
1.4.3- Entropie et information	11
1.4.4- Entropie thermodynamique et entropie « informationnelle »	11
1.4.5- Propriétés de l'entropie	11
1.4.6- Objet de la théorie de l'information	12
1.4.7- Conclusion	12
1.5- LE CODAGE DE L'INFORMATION	12
1.5.1- Introduction	12
1.5.2- Modélisation d'une chaîne de traitement de données multimédias	13
1.5.3- L'acquisition des données	14
1.5.4- Le codage de source	20
1.5.5- La compression des données	35
1.5.6- Le codage de canal	49
1.5.7- L'entrelacement	50
1.6- LA TRANSMISSION DES DONNEES	51
1.7- L'EVALUATION DE LA QUALITE DES IMAGES RECONSTRUITES	51
1.7.1- Introduction	51
1.7.2- Les mesures de qualité subjectives	52
1.7.3- Les mesures de qualité objectives	52
1.8- LES NORMES DE COMPRESSION	55
1.8.1- Introduction	55
1.8.2- Les normes de codage des images fixes	55

1.8.3- Conclusion partielle.....	57
1.9- CONCLUSION DU CHAPITRE 1.....	57
Chapitre 2 : ANALYSE ET TRAITEMENT D'IMAGES PHOTOGRAPHIQUES COULEURS.....	58
2.1.- INTRODUCTION.....	59
2.2.- LE BRUIT DANS L'IMAGE.....	59
2.2.1- Définition.....	59
2.2.2- Le bruit dans une chaîne de traitement d'images fixes : cas du codage JPEG.....	60
2.2.3- Quelques modèles de dégradations et leur caractérisation.....	61
2.2.4- Conclusion.....	64
2.3.- LES METHODES DE REHAUSSEMENT D'IMAGES.....	64
2.3.1- Introduction.....	64
2.3.2- Rehaussement d'images.....	65
2.3.3- Rehaussement par modification non adaptative d'histogramme : l'égalisation d'histogramme.....	67
2.3.4- Rehaussement par filtrage.....	68
2.3.5- Rehaussement d'image couleur.....	68
2.3.6- Conclusion partielle.....	68
2.4.- LES METHODES DE RESTAURATION D'IMAGES.....	69
2.4.1- Introduction.....	69
2.4.2- Définitions.....	69
2.4.3- Modèle général de restauration d'images.....	70
2.4.4- Restauration par filtrage de Wiener.....	70
2.5- CONCLUSION DU CHAPITRE 2.....	72
Chapitre 3: METHODOLOGIE DE CONCEPTION.....	73
3.1- INTRODUCTION.....	74
3.2- SYNOPTIQUE DU SYSTEME D'AMELIORATION DE L'IMAGE PHOTOGRAPHIQUE COULEUR BRUITEE.....	80
3.3- PRESENTATION DES DIFFERENTES ETAPES DES METHODES UTILISEES.....	82
3.3.1- Le schéma JPEG plus souple aux manipulations.....	82
3.3.2- Le schéma JPEG mode séquentiel modifié.....	82
3.3.3- Méthode de rehaussement par loi de puissance modifiée (LPM).....	82
3.3.4- Méthode de correction du bruit de la transformation mathématique RGB - >YCbCr.....	82
3.3.5- Combinaison des méthodes de rehaussement et de correction précédentes avec un filtre de restauration connu.....	83
3.4- DESCRIPTION DES METHODES.....	83
3.4.1- Etude comparative des schémas de compression JPEG avec et sans tables de quantification.....	83
3.4.2- Rehaussement d'images photographiques couleurs par loi de puissance modifiée.....	85
3.4.3- Rehaussement par mesure de la distance entre les pixels reconstruits et la moyenne des pixels originaux.....	88
3.4.4- La méthode de correction d'images bruitées par une transformation mathématique interne au schéma de codage JPEG : cas du bruit de la transformation RGB -> YCbCr.....	90
3.4.5- Réduction du contraste de l'image dé bruitée.....	96
3.4.6- Rehaussement d'images photographiques couleurs compressées par JPEG avec ou sans tables de quantification.....	98
3.4.7- Restauration d'images photographiques couleurs compressées par JPEG avec ou sans tables de quantification.....	98
3.4.8- Application des trois méthodes (atténuation, filtrage de Wiener et loi de puissance modifiée) dans un contexte de bruits généralisés.....	99
3.4.9- Modification du schéma de compression JPEG par l'introduction de la méthode d'atténuation : correction par anticipation et amélioration du taux de compression.....	100
3.5- CONCLUSION DU CHAPITRE 3.....	101

Deuxième partie : COMPRESSION JPEG SANS TABLES DE QUANTIFICATION ET AMELIORATION D'IMAGES.	102
Chapitre 4 : ETUDE COMPARATIVE DES SCHEMAS DE COMPRESSION JPEG AVEC OU SANS TABLES DE QUANTIFICATION.	103
4.1- INTRODUCTION.	104
4.2- OBJET DE L'ETUDE.	105
4.3- RAPPEL DE METHODOLOGIE.	105
4.4- ETUDE COMPARATIVE DES SCHEMAS DE COMPRESSION JPEG AVEC OU SANS TABLES DE QUANTIFICATION.	106
4.4.1- Etude de la variation d'entropie en fonction du facteur de qualité f_q .	106
4.5- CONCLUSION DU CHAPITRE 4.	111
Chapitre 5 : REHAUSSEMENT ET RESTAURATION D'IMAGES PHOTOGRAPHIQUES COULEURS COMPRESSEES ET DECOMPRESSEES PAR JPEG.	112
5.1- INTRODUCTION.	113
5.2- RAPPEL DE METHODOLOGIE.	113
5.3- REHAUSSEMENT D'IMAGES PHOTOGRAPHIQUES COULEURS PAR LOI DE PUISSANCE MODIFIEE.	114
5.3.1- Expérience.	114
5.3.2- Conclusion.	119
5.4- REHAUSSEMENT D'IMAGES PHOTOGRAPHIQUES COULEURS DEGRADEES PAR LE BRUIT DE LA TRANSFORMATION RGB -> YCBCR.	119
5.4.1- Expérience.	119
5.4.2- Résultats et analyse.	121
5.4.3- Conclusion.	126
5.5- RESTAURATION D'IMAGES PHOTOGRAPHIQUES COULEURS DEGRADEES PAR LE BRUIT DE LA TRANSFORMATION RGB -> YCBCR.	126
5.5.1- Expérience.	126
5.5.2- Résultats et analyse.	127
5.5.3- Conclusion.	129
5.6- COMPRESSION ET DECOMPRESSION D'IMAGES PHOTOGRAPHIQUES COULEURS PAR JPEG.	130
5.6.1- Evolution des paramètres statistiques d'une image à chaque étape de la compression JPEG ATQ.	130
5.6.2- Application de la compression JPEG ATQ.	134
5.6.3- Application de la compression JPEG STQ.	142
5.6.4- Etude comparative des compressions JPEG ATQ et STQ.	148
5.7- COMPRESSION ET DECOMPRESSION D'IMAGES PHOTOGRAPHIQUES COULEURS DANS UN CONTEXTE DE BRUITS GENERALISES : ASSOCIATION DES METHODES DE RESTAURATION ET DE REHAUSSEMENT.	150
5.7.1- Expérience.	150
5.7.2- Résultats et analyse.	152
5.7.3- Conclusion.	158
5.8- MODIFICATION DU SCHEMA DE COMPRESSION JPEG PAR INTRODUCTION DE LA METHODE D'ATTENUATION : CORRECTION DU BRUIT PAR ANTICIPATION ET AMELIORATION DU TAUX DE COMPRESSION.	159
5.8.1- Expérience.	159
5.8.2- Résultats et analyse.	160
5.8.3- Conclusion.	161
5.9- CONCLUSION DU CHAPITRE 5.	161
CONCLUSION GENERALE.	164
ANNEXE A : Traitement du signal.	168
ANNEXE B : Les transformations en compression d'images.	168
ANNEXE C : Tables utilisées en compression JPEG.	171
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.	177

LISTE DES ACRONYMES

BMP	Bitmap.
CCITT	Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique.
CCIR	Comité Consultatif International des Radiocommunications.
CIE	Commission Internationale d'Eclairage.
CLP	Codage des Longueurs de Plage.
DCT	Discret Cosine Transform.
DQE	Detective Quantum Efficiency.
EQM	Erreur Quadratique Moyenne.
FFT	Fast Fourier Transform.
GIF	Graphics Interchange Format.
H.261	Norme de codage vidéo développé par l'ITU-T pour la vidéoconférence.
ITU-T	International Telecommunications Union.
IFS	Iterative Function System.
JPEG	Joint Photographic Expert Group.
JPEG-ATQ	Joint Photographic Expert Group Avec Tables de Quantification.
JPEG-ATQ-AA	Joint Photographic Expert Group Avec Tables de Quantification et Avec Atténuation.
JPEG-ATQ-SA	Joint Photographic Expert Group Avec Tables de Quantification et Sans Atténuation.
JPEG-STQ	Joint Photographic Expert Group Sans Tables de Quantification.
JPEG-2000	Joint Photographic Expert Group 2000. Norme remplaçant JPEG.
JBIG	Joint Bi-level Image experts Group.
KLT	Karhunen – Loeve Transform.
LPM	Loi de Puissance Modifiée
MOS	Metal Oxyd Silicom.
MPEG-1	Moving Picture Expert Group – 1.
MPEG-2	Moving Picture Expert Group – 2.
MPEG-4	Moving Picture Expert Group – 4.
MPEG4-VTC	MPEG4-Visual Texture Coding.
MSE	Mean Square Error.
PNG	Portable Network Graphics.
RGB	Red – Green – Blue.
RVB	Rouge – Vert – Bleu.
RSB	Rapport Signal sur Bruit.
RLE	Run Length Encoding.
RLC	Run Length Coding.
SVH	Système Visuel Humain.
TCD	Transformation en Cosinus Discrète.
UIT-T	Union Internationale des Télécommunications – standardisation des Télécommunications.

LISTES DES SYMBOLES

CI :	Contenu informationnel.
p, p_i :	Probabilité d'occurrence d'un symbole.
E:	Entropie informationnelle.
S:	Entropie thermodynamique.
f :	Distance focale.

G_r :	Grossissement.
T_i :	Taille de l'image.
T_o :	Taille de l'objet.
O :	Ouverture du diaphragme.
d :	Diamètre de l'ouverture.
DQE :	Rendement quantique équivalent.
QE :	Rendement quantique.
R :	Composante rouge.
G :	Composante verte.
B :	Composante bleue.
Y :	Luminance.
C_b :	Chrominance bleue.
C_r :	Chrominance rouge.
$T(u,v)$:	Image numérique transformée.
$f(x,y)$:	Image numérique d'origine.
$d(x,y,u,v)$:	Noyau de la transformation directe.
$i(x,y,u,v)$:	Noyau de la transformation inverse.
G_R :	Matrice représentative de $f(x,y)$.
$I_{u,v}$ ou $I(u,v)$:	Image formée par le noyau de la transformation inverse.
$g(x,y)$:	Image numérique d'entrée.
$W(u,v)$:	Transformation directe de Walsh.
$H(u,v)$:	Transformation directe de Hadamard.
\bar{x} :	Ensemble de vecteurs aléatoires.
\bar{m}_x :	Vecteur moyen de l'ensemble.
C_x :	Matrice de covariance de l'ensemble des vecteurs.
\bar{e}_i :	Vecteur propre.
λ_i :	Valeur propre.
$h_k(z)$:	Fonctions de Haar.
$\sigma_v^2(k,l)$:	Variance des coefficients transformés.
G_{TC} :	Gain du codage par transformée.
EQM_R :	Erreur quadratique moyenne de reconstruction.
$\psi_{a,\tau}(t)$:	Fonctions ondelettes.
$\psi(t)$:	Ondelette mère.
$W(a,\tau)$:	Transformée en ondelettes temps – continu.
C :	Condition d'admissibilité.
$W_d(k,l)$:	Transformée en ondelettes temps – discret.
GD :	Gamme dynamique.
ρ :	Réflectance.
C_o :	Echelle liminaire de luminance.
N_q :	Niveau de quantification.
$Q(x)$:	Signal quantifié.
e_q :	Erreur de quantification.
$p_x(x)$:	Fonction de densité de probabilité.
EQM_q :	Erreur quadratique moyenne de quantification.
$x_e(k,l)$:	Signal échantillonné.
d_i :	Niveau de décision.
Δ :	Pas de quantification.
σ_x^2 :	Variance du signal d'entrée.

σ_q^2 :	Variance du signal quantifié.
\bar{z}_i :	Prédiction linéaire optimale.
$F(j,k)$:	Image d'entrée.
$\tilde{F}(j,k)$:	Image de sortie dont on veut évaluer la qualité.
$d(F,\tilde{F},q)$:	Différence ou distance entre $F(j,k)$ et $\tilde{F}(j,k)$.
$e(j,k)$:	Image erreur.
$I_i(x_i,y_i)$:	Intensité lumineuse de l'image.
$I_o(x_o,y_o)$:	Intensité lumineuse de l'objet.
$h_s(x_i,y_i)$:	Intensité lumineuse correspondant à un point lumineux source.
N_T :	Puissance du bruit thermique à la sortie du système.
$H_E(f)$:	Fonction de transfert équivalente du filtre du photo-détecteur électrique.
$h(x,y)$:	Fonction de transfert d'un filtre.
$G(j,k)$:	Image à rehausser.
$P_f(f)$:	Fonction de distribution cumulative de la variable f .
$f_d(x,y)$:	Image dégradée.
$f_r(x,y)$:	Image restaurée.
$h_d(x,y)$:	Fonction de transfert du système de dégradation.
$h_r(x,y)$:	Fonction de transfert du système de restauration.

LISTES DES FIGURES

Figure 1.1 : Modèle d'image.
 Figure 1.2 : Chaîne de traitement de données multimédias.
 Figure 1.3 : Système d'acquisition optique.
 Figure 1.4 : Formation d'image.
 Figure 1.5 : Courbes de sensations colorées d'un observateur moyen.
 Figure 1.6 : Les 3 composantes du codage source.
 Figure 1.7 : Premier niveau de décomposition.
 Figure 1.8 : Deuxième niveau de décomposition.
 Figure 1.9 : Niveaux de décision et de reconstruction.
 Figure 1.10 : Synoptique du codage de canal.
 Figure 1.11 : Algorithme de compression JPEG séquentiel.

Figure 2.1 : Mise à l'échelle linéaire.
 Figure 2.2 : Mise à l'échelle avec coupure.
 Figure 2.3 : Modèle de restauration d'images.

Figure 3.1 : Modèle d'image.
 Figure 3.2 : Modèle de rehaussement proposé.
 Figure 3.3 : Modèle de restauration proposé.
 Figure 3.4 : Modèle de bruit de transformation.
 Figure 3.5 : Modèle de choix du codeur JPEG basé sur l'entropie.
 Figure 3.6 : Modèle de correction par anticipation.
 Figure 3.7 : Modèle de rehaussement par LPM.
 Figure 3.8 : Modèle de rehaussement par mesure de distance (MD).
 Figure 3.9 : Modèle d'atténuation et de correction d'atténuation (ACA).
 Figure 3.10 : Modèle associatif de restauration ACA+LPM

Figure 3.11 : Modèle associatif de restauration ACA+filtre de Wiener.
 Figure 3.12 : Synoptique d'amélioration d'images photographiques.
 Figure 3.13 : Modèle de choix du codeur JPEG basé sur l'entropie.
 Figure 3.14 : Choix de la variable puissance p' par l'approche directe.
 Figure 3.15 : Modèle de rehaussement par LPM, approche polynomiale.
 Figure 3.16 : Variation des β_i en fonction des θ_i .

Figure 4.1a : Variation d'entropies de Y, Cb, Cr pour Test1.
 Figure 4.1b : Variation d'entropies de R, G, B pour Test1.
 Figure 4.2a : Variation d'entropies de Y, Cb, Cr pour Test2.
 Figure 4.2b : Variation d'entropies de R, G, B pour Test2.
 Figure 4.3a : Variation d'entropies de Y, Cb, Cr pour Test3.
 Figure 4.3b : Variation d'entropies de R, G, B pour Test3.

Figure 5.1 : Image Eamac et son histogramme.
 Figure 5.2 : Image Nanie et Variation de $\sum RSB = f(p')$.
 Figure 5.3 : Images Nanie rehaussée par approche polynomiale.
 Figure 5.4 : Monsieur original.
 Figure 5.5 : Flamant original.
 Figure 5.6 : Monsieur rehaussé par $p = 2$ et $p' = 1.05$.
 Figure 5.7 : Flamant rehaussé par $p = 2$ et $p' = 1.05$.
 Figure 5.8: Monsieur rehaussé ($p' = 1.2$)
 Figure 5.9: Flamant rehaussé ($p' = 1.4$)
 Figure 5.10: Flamant rehaussé ($p' = 1.8$)
 Figure 5.11 : Test1 original
 Figure 5.12 : Test2 original
 Figure 5.13 : Test1 dégradée.
 Figure 5.14 : Test2 dégradée.
 Figure 5.15a : Test1 recadrée.
 Figure 5.15b : Test1 égalisée.
 Figure 5.15c : Test1 corrigée.
 Figure 5.15d : Test1 rehaussée par LPM ($P = 1.05$).
 Figure 5.16a : Test2 recadrée.
 Figure 5.16b : Test2 égalisée.
 Figure 5.16c : Test2 corrigée.
 Figure 5.16d : Test2 rehaussée par LPM ($P = 1.05$).
 Figure 5.17a : Test1 atténuée.
 Figure 5.17b : Test1 filtrée par Wiener.
 Figure 5.17c : Test1 atténuée et filtrée.
 Figure 5.18a : Test2 atténuée.
 Figure 5.18b : Test2 filtrée par Wiener.
 Figure 5.18c : Test2 atténuée et filtrée.
 Figure 5.19a : Test1 Ima_T.
 Figure 5.19b : Test1 Ima_T_SE.
 Figure 5.19c : Test1 Ima_T_SE_TCD.
 Figure 5.19d : Test1 Ima_T_SE_TCD_Q.
 Figure 5.20a : Test2 Ima_T.
 Figure 5.20b : Test2 Ima_T_SE.
 Figure 5.20c : Test2 Ima_T_SE_TCD.

Figure 5.20d : Test2 Ima_T_SE_TCD_Q.

Figure 5.21a : Test1 ATQ.

Figure 5.21b : Test1 ATQ recadrée.

Figure 5.21c : Test1 ATQ égalisée.

Figure 5.21d : Test1 ATQ rehaussée par LPM.

Figure 5.21e : Test1 ATQ corrigée.

Figure 5.22a : Test2 ATQ.

Figure 5.22b : Test2 ATQ recadrée.

Figure 5.22c : Test2 ATQ égalisée.

Figure 5.22d : Test2 ATQ rehaussée par LPM.

Figure 5.22e : Test2 ATQ corrigée.

Figure 5.23a : Test1 ATQ.

Figure 5.23b : Test1 ATQ atténuée.

Figure 5.23c : Test1 ATQ filtrée par Wiener.

Figure 5.23d : Test1 ATQ atténuée puis filtrée par Wiener.

Figure 5.24a : Test2 ATQ.

Figure 5.24b : Test2 ATQ atténuée.

Figure 5.24c : Test2 ATQ filtrée par Wiener.

Figure 5.24d : Test2 ATQ atténuée puis filtrée par Wiener.

Figure 5.25a : Test1 JPEG STQ.

Figure 5.25b : Test1 STQ recadrée.

Figure 5.25c : Test1 STQ égalisée.

Figure 5.25d : Test1 STQ rehaussée par LPM.

Figure 5.25e : Test1 STQ corrigée.

Figure 5.26a : Test2 JPEG STQ.

Figure 5.26b : Test2 STQ recadrée.

Figure 5.26c : Test2 STQ égalisée.

Figure 5.26d : Test2 STQ rehaussée par LPM.

Figure 5.26e : Test2 STQ corrigée.

Figure 5.27a : Test1 STQ.

Figure 5.27b : Test1 STQ atténuée.

Figure 5.27c : Test1 STQ filtrée par Wiener.

Figure 5.27d : Test1 STQ atténuée puis filtrée par Wiener.

Figure 5.28a : Test2 STQ.

Figure 5.28b : Test2 STQ atténuée.

Figure 5.28c : Test2 STQ filtré par Wiener.

Figure 5.28d : Test2 STQ atténué puis filtrée par Wiener.

Figure 5.29a : Test1 original.

Figure 5.29b : Test1 bruité par BBG.

Figure 5.29c : Test1 image JPEG.

Figure 5.29d : Test1-JPEG-LPM (p = 1.09).

Figure 5.29e : Test1-JPEG-Atténué.

Figure 5.29f : Test1-JPEG-Atténué+LPM (p = 1.09).

Figure 5.29g : Test1 Atténué + Wiener.

Figure 5.29h : Test1 Atténué + Wiener + LPM (p = 1.09).

Figure 5.29i : Test1 JPEG ATQ + Wiener.

Figure 5.29j : Test1 Wiener + LPM (p = 1.09).

Figure 5.30a : Test1 bruité par BBG + BGF + BM.

Figure 5.30b : Test1 image JPEG.

Figure 5.30c : Test1-JPEG+LPM (p = 1.09)..

Figure 5.30d : Test1-JPEG-Atténué.
Figure 5.30e : Test1 Atténué+LPM ($p = 1.09$).
Figure 5.30f : Atténué + Wiener.
Figure 5.30g : Atténué + Wiener + LPM ($p = 1.09$).
Figure 5.30h : JPEG ATQ + Wiener.
Figure 5.30i : Wiener + LPM ($p = 1.09$).

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Transformations et leurs performances.
Tableau 1.2 : Erreur quadratique moyenne du quantificateur uniforme optimal avec des entrées non uniformes.
Tableau 1.3 : Présence de redondances dans les images.
Tableau 1.4 : Codages de compression usuels.

Tableau 2.1 : Principaux types de bruits.

Tableau 4.1 : Caractéristiques des images étudiées.
Tableau 4.2 : Valeurs d'entropies pour les deux schémas de compression pour Test1.
Tableau 4.3 : Valeurs d'entropies pour les deux schémas de compression pour Test2.
Tableau 4.4 : Valeurs d'entropies pour les deux schémas de compression pour Test3.
Tableau 4.5 : Valeurs des paramètres statistiques des images compressées et décompressées par JPEG ATQ.
Tableau 4.6 : Valeurs des paramètres statistiques des images compressées et décompressées par JPEG STQ.

Tableau 5.1 : Entropies des 2 images originales.
Tableau 5.2 : Valeurs des paramètres statistiques.
Tableau 5.3 : Paramètres statistiques des images dégradées.
Tableau 5.4 : Caractéristiques du bruit de transformation.
Tableau 5.5a : Paramètres statistiques donnés par le recadrage dynamique.
Tableau 5.5b : Paramètres statistiques donnés par égalisation d'histogramme.
Tableau 5.5c : Paramètres statistiques donnés par la mesure de distance entre pixels reconstruits et la moyenne des pixels originaux.
Tableau 5.5d : Paramètres statistiques donnés par LPM.

Tableau 5.6a : Paramètres statistiques donnés par les 3 filtres pour Test1.
Tableau 5.6b : Paramètres statistiques donnés par les 3 filtres pour Test2.

Tableau 5.7a : Evolution des paramètres statistiques lors de la compression JPEG ATQ de Test1.
Tableau 5.7b : Evolution des paramètres statistiques lors de la compression JPEG ATQ de Test2.

Tableau 5.8a : Paramètres statistiques des images rehaussées et issues de Test1.
Tableau 5.8b : Paramètres statistiques des images rehaussées et issues de Test2.
Tableau 5.9a : Paramètres statistiques des images restaurées et issues de Test1.
Tableau 5.9b : Paramètres statistiques des images restaurées et issues de Test2.

- Tableau 5.10a : Paramètres statistiques des images rehaussées par JPEG STQ et issues de Test1.
- Tableau 5.10b : Paramètres statistiques des images rehaussées par JPEG STQ et issues de Test2.
- Tableau 5.11a : Paramètres statistiques de l'image Test1 compressée JPEG STQ puis filtrée par les 3 filtres.
- Tableau 5.11b : Paramètres statistiques de l'image Test2 compressée JPEG STQ puis filtrée par les 3 filtres.
- Tableau 5.12 : Paramètres statistiques de l'image Test1 perturbée par 3 bruits dont le bruit blanc gaussien.
- Tableau 5.13 : Paramètres statistiques de l'image Test1 perturbée par 5 bruits connus dont : le bruit de mauvaise mise au point, le bruit de la transformation RGB -> YCbCr, le bruit blanc gaussien, le bruit de grain de film (salt & pepper), le bruit multiplicatif (speckle).
- Tableau 5.14 : Comparaison des taux de compression.

INTRODUCTION GENERALE

1. CONTEXTE

L'échange d'informations entre partenaires d'un même pays ou de pays différents constitue un enjeu considérable pour le développement économique et social. Il est pour la formation des personnes (enseignants, étudiants et autres) un élément essentiel à leur adaptation aux technologies de l'information et de la communication en perpétuelle évolution. Dans le cadre de l'enseignement à distance, il renforce l'intégration et accroît l'accès à l'éducation.

L'enseignement à distance entre les pays, dont l'objectif principal est le transfert ou l'échange d'informations, de savoirs et savoirs faire, porte sur des données de type textes, graphiques, sonore, images fixes et animées, etc. Les formats et codages de ces données doivent être adaptés aux contraintes de transfert ou d'échange.

Il y a des contraintes liées notamment :

- au stockage de cette information sur les supports existants,
- aux capacités de traitements des machines notamment les performances des ordinateurs disponibles,
- à l'acquisition des données à traiter (fidélité des appareils de mesure, durée d'acquisition, etc.),
- aux canaux de transmission (bande passante disponible, qualité du matériel, perturbations dans le réseau),
- aux débits de transmission,
- aux types d'applications (temps réels ou non).

L'information brute, de par sa taille, ne peut atteindre le destinataire sans une opération de compression robuste et appropriée. L'exploitation d'un ou plusieurs standards de compression non adaptatifs à des fins de formation à distance est un des objectifs que nous nous sommes fixés. Cette contribution exploratoire porte sur des données de type images photographiques fixes en couleur.

Les données envoyées et reçues peuvent subir des dégradations provoquées par divers bruits. Par exemple du bruit inhérent aux méthodes de traitements de données, ou causé par les appareils utilisés lors de l'acquisition des données. Cela nécessite des opérations de pré traitement et de post traitement permettant notamment le filtrage des données.

Tout en ayant présent à l'esprit le contexte de ce travail qui est l'enseignement à distance, les aspects amélioration des données images et leur compression en constituent les parties essentielles. Par conséquent, les aspects multimédia, codage de canal, transmission des données et réseaux dégradés n'ont pas reçu un développement détaillé. La première version de ce travail présentant ces parties a eu un volume considérable dépassant les normes en la matière. Aussi, vu l'absence des essais de transmission des données, nous avons jugé utile de ne pas approfondir cet aspect de l'enseignement à distance.

2. PROBLEMATIQUE

Etant donné un bruit dû aux défauts des appareils de mesure lors de l'acquisition de l'image ou introduit par les transformations mathématiques utilisées dans le schéma de compression ou provoqué par le canal de transmission, la question à laquelle nous essayerons de répondre est de savoir : quelle amélioration de l'image reconstruite après compression JPEG à base de Transformée en Cosinus Discrète (TCD) obtient-on dans la combinaison d'approches suivantes :

1. méthodes de rehaussement et de restauration classiques,
2. méthodes de rehaussement et de restauration proposées comme :
 - a- l'ajustement des pixels de l'image reconstruite à l'aide de la moyenne des pixels originaux,
 - b- l'optimisation des coefficients Y, Cb, Cr de l'image reconstruite après perturbation de l'image par le bruit de la transformation RGB \rightarrow YCbCr,
 - c- le rehaussement d'image par la loi de puissance modifiée ?

Quelle influence ces méthodes ont – elles sur le taux de compression ?

3. METHODOLOGIE

Plusieurs méthodes de compression des données multimédias font l'objet de développement commercial et dont les sigles détaillés dans un glossaire plus loin sont les suivants :

- H261 [68],
- MPEG1 [99],
- MPEG2 [100],
- MPEG4 [101],
- JPEG [146], [22], [139], etc.

D'autres ont été normalisées plus récemment : c'est le cas de JPEG2000 [131], [72].

Le standard JPEG est grandement utilisé en compression d'images fixes à niveaux de gris ou en couleur.

Dans ce travail, nous proposons 4 méthodes d'amélioration de la qualité d'une image photographique couleur traitée par la compression JPEG en présence des dégradations dues à la transformation mathématique interne au schéma de codage. L'une des méthodes est introduite dans le schéma de codage JPEG. Puis nous évaluons l'impact de cette méthode sur le taux de compression obtenu en utilisant le schéma de compression JPEG séquentiel qui utilise les tables de quantification et celui qui n'utilise que le facteur de qualité.

La capacité d'amélioration de l'image décompressée par 3 de ces méthodes est discutée en considérant différents bruits. Puis les résultats sont comparés avec ceux obtenus par des méthodes classiques d'amélioration telles que le recadrage de dynamique, l'égalisation d'histogramme et le filtrage de Wiener..

4. OBJET DE L'ETUDE.

Il est évident que dans le contexte de l'enseignement à distance, différents formats de données sont utilisés notamment les graphiques, les textes, les images fixes ou animées. Dans notre étude nous prenons uniquement en compte les données de type images fixes, en particulier les photographies couleurs, de caractéristiques 24 bits par pixel et mises au format BMP. La compression JPEG, déjà normalisée, nous sert de méthode de compression des données. Des modifications sont proposées pour adapter ce codage aux exigences de notre méthode. Le contexte de dégradation des données dans lequel cet enseignement est supposé se dérouler oblige à proposer des méthodes de pré-traitement et de post-traitement d'images qui soient en mesure de restituer des données moins dégradées.

5. INTERET DE L'ETUDE.

Il s'agit de mettre à la disposition de l'utilisateur un ensemble de méthodes de rehaussement et de restauration d'images dégradées par des bruits de différentes sources. Il s'agit notamment des bruits dus :

- au système d'acquisition,
- à la mauvaise manipulation de l'opérateur,
- au codeur lui-même (bruit de transformation, de quantification, etc),

- au dégradation du canal (à l'exemple des turbulences atmosphériques).

Ainsi lorsque les données traitées et transmises sont reçues, le système d'amélioration mis en place aide l'utilisateur à corriger les dégradations persistantes. Aussi certaines méthodes d'amélioration sont incluses dans le schéma de codage et de décodage.

6. OBJECTIFS

Les objectifs visés par cette étude peuvent se résumer en trois points :

- 1- Proposer une méthode JPEG plus souple aux traitements d'images.
- 2- Proposer une méthode JPEG modifiée comme un système de décompression capable d'amélioration d'images photographiques couleurs dégradées par la compression et/ou le canal de transmission.
- 3- Proposer 4 approches d'amélioration d'images photographiques couleurs dégradées dont deux de rehaussement et deux de restauration.

7. RESULTATS ATTENDUS.

A l'issue de ce travail, nous comptons :

- proposer un nouveau schéma de compression JPEG mieux adapté aux post-traitements des images décompressées,
- identifier un ensemble de bruits et proposer des méthodes de rehaussement et restauration suffisamment efficaces pour les corriger.

8. PLAN DE LA THESE.

Le travail est divisé en deux parties.

La première partie développe les principes fondamentaux de traitement d'images et comporte 3 chapitres :

- le chapitre 1 est un état de l'art sur les traitements des données images et les contraintes qui y sont associées.
- le chapitre 2 présente des notions essentielles sur les dégradations, les techniques d'amélioration et de restauration d'images bruitées, notamment des images photographiques couleurs.
- le chapitre 3 décrit la méthodologie de notre approche en développant les différents modèles proposés pour l'amélioration et la compression d'images.

La deuxième partie traite des mises en oeuvre des méthodes pour l'amélioration d'images photographiques et est constituée de deux chapitres :

- le chapitre 4 qui offre une étude comparative des schémas de compression JPEG avec et sans tables de quantification dans le but d'apprécier les méthodes d'amélioration et de correction proposées, puis de montrer que l'utilisation de la compression JPEG sans les tables de quantification peut constituer une alternative à la compression JPEG avec tables de quantification.
- le chapitre 5 qui expose les résultats issus de la correction de trois types de bruits par les méthodes proposées en comparaison avec des méthodes classiques de rehaussement et de correction d'images puis d'une association de ces dernières.

9. CONTRIBUTION ET PERSPECTIVES.

Nous proposons une méthode de correction du bruit de la transformation RGB -> YCbCr observé sur certaines images photographiques couleur et traitée par compression JPEG. Cette méthode améliore la qualité de l'image reconstruite. En plus elle supprime d'autres bruits notamment le bruit blanc gaussien, le bruit de grain de film, le bruit multiplicatif genre speckle et le bruit causé par une lumière insuffisante lors de la prise de vue.

Nous montrons qu'une fois introduite dans le schéma de codage JPEG, cette méthode permet une augmentation du taux de compression des données.

Nous adaptons aux images photographiques couleurs une technique de rehaussement du contraste : la loi de puissance modifiée.

Nous proposons une autre approche de correction du bruit de la transformation RGB -> YCbCr qui ne modifie pas le contraste mais réduit considérablement ce bruit. Il s'agit de la correction par la mesure de la distance entre les pixels reconstruits et la moyenne des pixels originaux.

Dans le contexte de l'enseignement à distance et dans l'hypothèse d'une transmission en milieu perturbé par divers bruits il est possible de récupérer l'information en prévoyant en amont comme en aval du schéma de transmission, des méthodes de rehaussement et de restauration d'images.

Nous bouclons notre travail en indiquant comme perspectives, l'utilisation des méthodes d'améliorations proposées dans des nouveaux schémas de codage basés sur les transformées en ondelettes pour la compression et la décompression des images photographiques couleurs.

PREMIERE PARTIE :

**PRINCIPES USUELS EN
TRAITEMENT DE DONNEES
IMAGES.**

CHAPITRE I :

ETAT DE L'ART DES TRAITEMENTS DES DONNEES IMAGES

1.1 INTRODUCTION.

Afin d'aboutir à la transmission des données multimédia, de nombreuses opérations sont nécessaires côté émetteur. Dans le cas d'une image photographique couleur, le système d'acquisition (appareil photographique ou caméra numérique) fournit une première série de données qui sont généralement des pixels. Ces derniers, selon les codeurs utilisés subissent diverses transformations et codages afin d'atteindre des fichiers de pixels de taille voulue avant la transmission. Côté récepteur, les données compressées reçues et le plus souvent entachées d'erreurs, sont traitées en suivant le schéma inverse de la compression.

Dans ce chapitre nous décrivons les principales fonctions nécessaires à la compression, la transmission et la décompression des données images photographiques utilisées par la norme JPEG.

Après une brève présentation du multimédia, des rappels de la théorie de l'information sont faits. Ensuite les deux phases du codage de l'information à savoir le codage source et le codage canal sont décrites non sans avoir préalablement montrer l'importance des systèmes d'acquisition des données images et les perturbations qu'ils causent. Enfin les principales normes de compression sont abordées en mettant l'accent sur la norme JPEG. Cette dernière constitue la méthode de compression utilisée dans notre travail pour expérimenter une transmission de données compressées dans un contexte bruité.

1.2- LE MULTIMEDIA

Le multimédia se définit comme l'addition de plusieurs médias. Côté support, le multimédia signifie plusieurs matériels, de nature différente, réunis (ensemble) dans un même environnement. Ces matériels peuvent être constitués en entrée de la caméra, du microphone, du clavier, du scanner, des capteurs divers et en sortie du moniteur vidéo, des installations sonores, du matériel de traitement comme le magnétoscope, l'ordinateur et ses différentes cartes d'acquisition, etc. Côté contenu, le multimédia constitue des informations gérées par des applications. Ces informations ou données sont de plusieurs types et constituent également des médias [123].

Deux exemples de médias couramment utilisés sont l'audio et la vidéo, c'est à dire du son et des images animées. A ces deux médias s'ajoutent le texte, les graphiques, les images fixes.

1.3- LES TYPES DE DONNEES

De nombreuses informations sont mises en jeu dans le multimédia. Les principales

sont décrites dans les sections suivantes.

I.3.1- Les données de type texte.

Elles sont le type le plus utilisé dans des contenus [137], [74]. La conversion des textes en fichiers informatiques se fait par la saisie, laquelle s'effectue de différentes manières:

- Au moyen d'un clavier ;
- La reconnaissance de caractères effectuée à partir des documents numérisés.

I.3.2- Les données de type graphique.

Il existe plusieurs types de données graphiques appartenant principalement à deux grandes familles [137], [74]:

- Les données bitmaps ;
- Les données vectorielles : une image vectorielle est une image composée par un procédé informatique qui utilise des valeurs numériques pour disposer dans l'espace les formes et les couleurs [44].

Ces données graphiques peuvent être :

- de purs dessins informatiques en 2D ou 3D fixes,
- des images digitalisées fixes,
- des séquences vidéo,
- des images de synthèse animées.

I.3.3- Les données de type sonore

Elles se présentent sous différentes formes [137], [44] et peuvent être :

- de la musique utilisée comme fond sonore lors de la visualisation de documents,
- des bruits utilisés en guise d'avertissement,
- des séquences sonores déclenchées suite à un événement,
- du son échantillonné en stéréo ou en mono en fonction de la qualité désirée, etc.

I.3.4- Les données de type MIDI

Ces données ne contiennent aucun son et sont très peu volumineuses. Elles constituent une succession d'ordres qu'un ordinateur transmet à un synthétiseur. Ainsi, c'est l'ordinateur qui indique au synthétiseur quelle note jouer, pendant combien de temps et avec quelle intensité [137], [107].

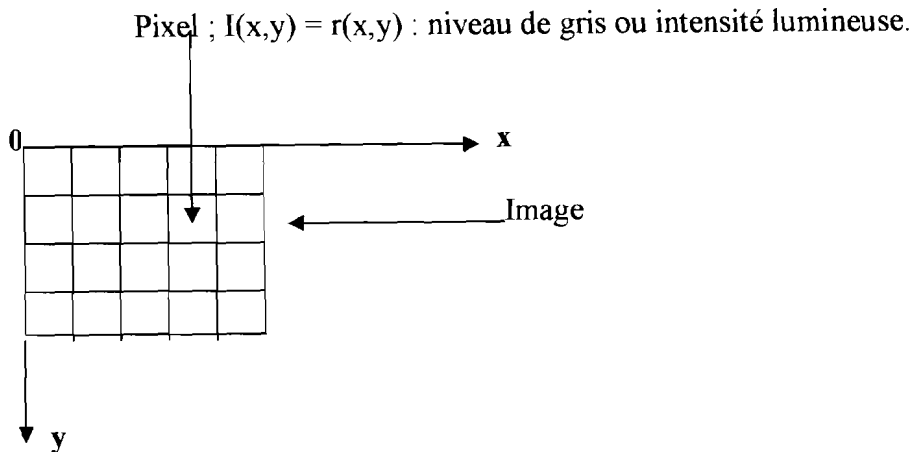
1.3.5- Définition de l'image.

Une image numérique est une matrice de points appelés pixels repérés par leur coordonnées (x, y). A chacun d'eux est associée une valeur correspondant à la mesure d'un

phénomène en ce lieu (Intensité lumineuse $I(x,y)$, Contraste $C(x,y)$, ...) tel que :

$$I(x,y) = f : R \times R \rightarrow R.$$

Figure 1.1: Modèle d'image



1.3.6- Conclusion.

Bien que de nombreuses données puissent être utilisées dans le multimédia, nous n'avons pris en compte, dans le cadre de ce travail, que les données images fixes de type photographique couleur scannées et mises au format BMP 24 bits.

I.4- LA THEORIE DE L'INFORMATION

I.4.1- L'information : aspects qualitatif et quantitatif.

Les données textes sont constituées d'un ensemble de symboles ou alphabets. Ces symboles ont une distribution non uniforme de probabilités qui révèle une organisation, laquelle est souvent déterminée par des règles formalisées en ce qui concerne les langues avec leur orthographe, leur grammaire et leur contenu phonique. Souvent, les voyelles ont des probabilités d'occurrence prédominantes et rendent le texte redondant. Cette redondance découle de ces règles formalisées nécessaires à la compréhension de l'information contenue dans la donnée texte. Elle permet aussi d'entourer un message de certaines répétitions nécessaires à sa transmission, sa réception et son identification même en présence de perturbations.

Marsault [89] explique qu'il n'y a pas d'équivalence entre la signification d'un message et l'information mathématique mesurable qu'il porte. L'information au sens humain du mot, dépend essentiellement d'un contexte, avec comme conséquence une signification relative. La qualité de l'information dépend du contexte, lequel donne à un élément d'information sa vraie signification, sa valeur c'est à dire l'intérêt que nous lui portons [144].

Dans sa théorie de l'information, Shannon [133] mesure l'information brute portée par un message grâce à l'entropie. Elle évalue la quantité d'information [88] et non sa qualité.

1.4.2- Information et incertitude.

L'information, portée par des symboles, est une connaissance, un fait ou une nouvelle, mesurable quantitativement [154].

Soit un symbole de probabilité d'occurrence p . Son contenu informationnel CI est donné par la relation suivante :

$$CI = \log_2\left(\frac{1}{p}\right) = -\log_2 p \text{ bits} \quad (1.1)$$

L'information contenue dans un symbole est donc une fonction logarithmique de sa probabilité d'occurrence. Plus petite est cette probabilité, plus grande sera l'information contenue dans le symbole ou plus grande sera l'incertitude liée au symbole. Shannon [133] souligne que les fortes probabilités correspondent aux symboles redondants, moins incertains. Lathi [79] précise que la mesure de l'information ainsi définie est valable aussi bien pour les symboles équiprobables que pour les symboles non-équiprobables.

1.4.3- Entropie et information.

Dans une source d'information discrète sans mémoire, les symboles forment une suite discrète, dont l'occurrence d'un symbole donné est indépendante de celle du symbole précédent [118]. Considérons une telle source contenant m symboles possibles s_i où $i = 1, 2, \dots, m$ et de probabilité p_i . L'entropie E est définie comme le contenu moyen d'information de la source.

$$E = \sum_i p_i CI_i = - \sum_{i=1}^{i=m} p_i \log_2 p_i \text{ bits} \quad (1.2)$$

1.4.4- Entropie thermodynamique et entropie informationnelle.

L'entropie S d'un système thermodynamique est définie comme suit [89] :

$$S = k \ln(W) \quad (1.3)$$

où W est la probabilité thermodynamique du système et $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ la constante de Boltzmann.

Contrairement à l'entropie thermodynamique qui mesure le désordre interne d'un système, l'entropie informationnelle mesure l'ordre avec lequel un message est organisé. L'information « humaine », véhiculée par le biais de structures ordonnées, est la marque d'un ordre.

1.4.5- Propriétés de l'entropie [118]

Considérons une expérience F ayant m issues possibles x_1, \dots, x_m . Chaque issue x_i a

une probabilité p_i d'apparaître, sachant que $\sum p_i = 1$ pour $1 \leq i \leq m$.

L'expérience F dont les issues x_1, \dots, x_m sont pondérées par des probabilités p_1, \dots, p_m sera formalisée par une variable aléatoire discrète X . Soit $A = \{ x_1, \dots, x_m \}$ l'ensemble des valeurs prises par X , et p_i la probabilité de l'événement $\{ X = x_i \}$ avec $1 \leq i \leq m$. Et soit Y une variable aléatoire discrète dont l'ensemble des valeurs prises est $B = \{ y_1, \dots, y_k \}$, avec les probabilités $q_j = P\{ Y = y_j \}$ $1 \leq j \leq k$. On a les propriétés suivantes:

1°/ L'entropie $E(x)$ est maximale lorsque tous les événements sont équiprobables. Alors $E(x) = \log_2 m$.

2°/ L'entropie de la variable aléatoire (X, Y) est égale à la somme de l'entropie de X et de l'entropie de Y/X : $E(X, Y) = E(X) + E(Y/X) = E(Y) + E(X/Y)$. (1.4)

3°/ L'entropie de la variable aléatoire (X, Y) est toujours inférieure ou égale à la somme des entropies de chacune des variables X, Y : $E(X, Y) \leq E(X) + E(Y)$. (1.5)

4°/ On a $E(X, Y) = E(X) + E(Y)$ si et seulement si les variables aléatoires X et Y sont indépendantes.

1.4.6- Objet de la théorie de l'information.

La théorie de l'information se propose de montrer que, sous certaines conditions, l'utilisation d'un codage permet de rendre arbitrairement faible la probabilité d'erreur sur les messages, sans diminuer le débit d'information et sans modifier le canal de transmission discret [85].

1.4.7- Conclusion.

L'entropie joue un rôle primordial dans la théorie de l'information. Bien qu'elle s'appuie sur un modèle de probabilité donné, elle définit la quantité d'information contenue dans un message. Nous l'avons utilisée dans toutes les études effectuées dans ce travail, aussi bien pour suivre l'évolution des niveaux de dégradation des images traitées que pour évaluer l'efficacité des méthodes utilisées. Elle constitue un indicateur significatif de l'appréciation de la qualité des images compressées par rapport aux images originales.

1.5- LE CODAGE DE L'INFORMATION

1.5.1- Introduction.

La bande passante limitée des canaux de transmission exige que l'information brute subisse divers traitements permettant à une version codée d'être acheminée aux utilisateurs. Ces traitements portent principalement sur la réduction du volume de l'information initiale.

Les canaux de transmission constituent souvent des causes de perturbations ou de

dégradations du message, d'où la nécessité de protéger l'information codée. Des algorithmes de détection et de correction d'erreurs effectuent cette protection. Ils sont conçus de manière à ne pas contrecarrer l'opération de compactage de données réalisée en amont d'un schéma de traitements de données. Les différentes opérations que subit l'information depuis son acquisition par différents types de capteurs jusqu'à son utilisation ne sont pas sans effet sur la qualité de l'information reçue. En ce qui concerne les images photographiques couleurs, un changement de certaines caractéristiques de l'image notamment le contraste est à prévoir.

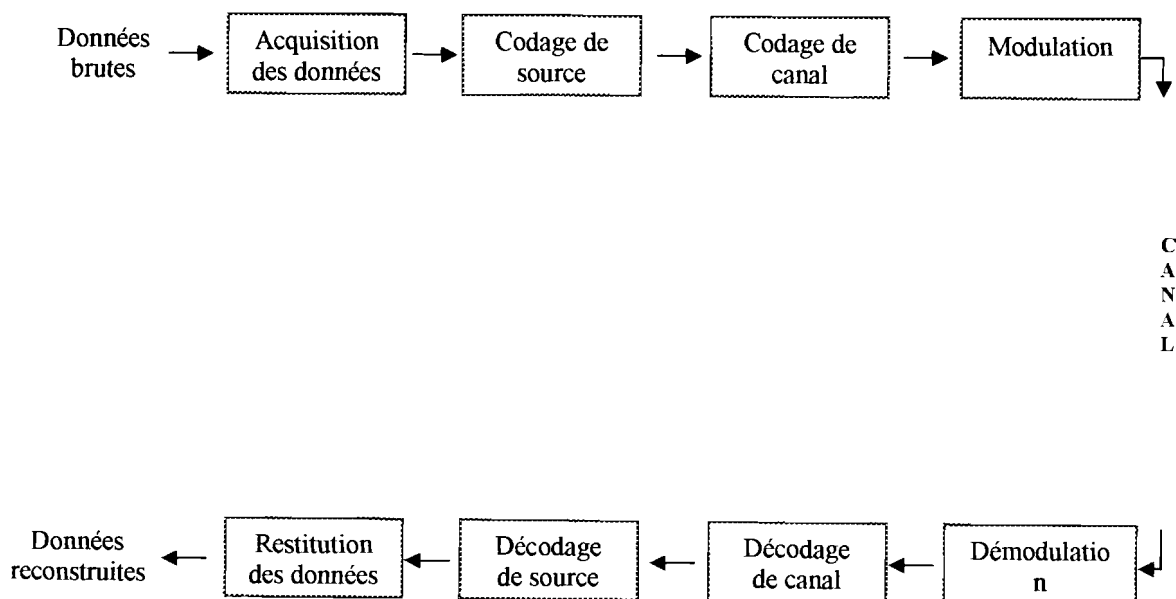
D'autre part, des effets de certaines perturbations sont manifestes sur l'image reconstruite comme le flou dû à une mauvaise mise au point lors de l'acquisition de l'image, les bruits des transformations et de quantification. Des méthodes d'évaluation de la qualité des données reconstruites permettent d'apprécier la distance entre ces données et les originales. Afin de satisfaire aux exigences d'applications rencontrées dans le multimédia comme la télévision, la visioconférence, la vidéo, etc, de nombreux schémas de compression standardisés ont été mis au point. Le codage de l'information renferme principalement deux étapes : le codage de source et le codage de canal.

Le paragraphe 1.5 présente donc les principes usuels en codage de données. Puis, sont présentées brièvement les mesures de qualité des données basées sur le système visuel humain et les mesures mathématiques ou mesures objectives.

I.5.2- Modélisation d'une chaîne de traitement de données multimédias.

La **Figure 1.2** présente les principales étapes d'une chaîne de traitement des données multimédias.

Figure 1.2: Chaîne de traitement de données multimédias.



1.5.3- L'acquisition des données

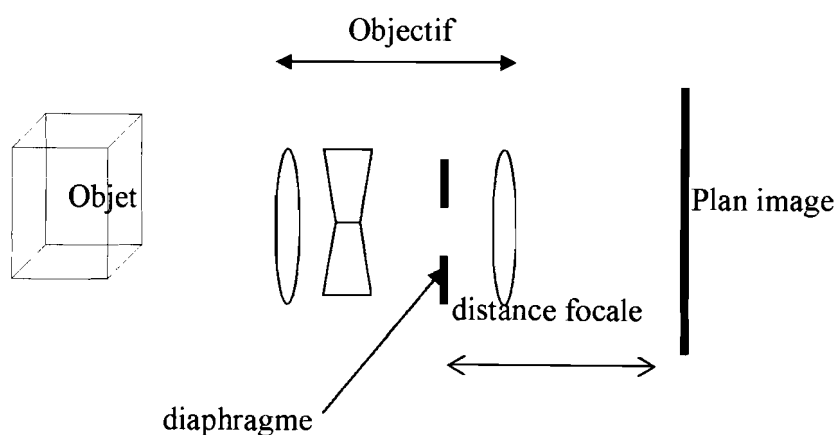
Un système de traitement d'information est constitué des trois (3) principales étapes suivantes : *acquisition*, *traitement*, *affichage*. Lors de la conception des systèmes d'acquisition d'images, il est important de tenir compte de la nature des données images afin qu'après traitement, le système visuel du récepteur puisse les observer. La qualité des images traitées dépend non seulement de l'algorithme de traitement mais aussi de la qualité des images numérisées destinées au traitement. La visualisation des images traitées à l'écran, sur papier ou sur film est importante car elle permet de juger de la qualité du traitement réalisé et de distinguer les erreurs induites par l'algorithme de celles causées par les systèmes d'affichage [103]. Le paragraphe 1.5.3.1 décrit les principales caractéristiques des systèmes d'acquisition et de restitution d'images.

1.5.3.1- Méthodes d'acquisition d'images

1.5.3.1.1- Le système optique

Dans le processus d'acquisition d'images, le système optique assure la projection d'une scène (1-D, 2-D ou 3-D) sur un plan image 2-D grâce à un objectif (**Figure 1.3**). L'objectif est constitué du diaphragme et d'un groupe de lentilles.

Figure 1.3: Système d'acquisition optique.



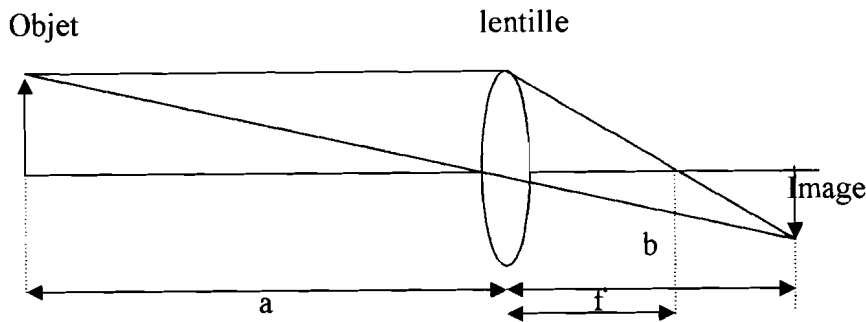
Source : [103]

C'est la lentille qui projette l'objet sur le plan image selon la relation de Descartes (**Figure 1.3**).

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad (1.6)$$

où f est la distance focale de la lentille, a la distance de l'objet à la lentille et b la distance de la lentille à l'image.

Figure 1.4: Formation d'image.



Source: [103]

La lentille est caractérisée par sa distance focale f de sorte que tous les rayons lumineux parallèles (provenant de l'infini) soient focalisés en un point appelé *foyer image* situé à la distance f du centre de la lentille. Tous les rayons lumineux passant par le centre de la lentille ne sont pas déviés.

La dimension de l'image sur le plan focal est donnée par le rapport de grossissement G_r donné par (1.7) :

$$G_r = \frac{-T_i}{T_o} \quad (1.7)$$

où T_i est la taille de l'image et T_o celle de l'objet.

Le rapport de grossissement G_r est choisi de façon à former l'image de l'objet sur la surface du capteur [103].

La qualité de la projection de l'objet sur le plan image dépend de la qualité de la lentille, du réglage du diaphragme et de la mise au point de l'objectif.

- **La qualité d'une lentille** tient à plusieurs phénomènes : l'aberration sphérique, l'aberration chromatique, l'astigmatisme et la distorsion. Ces phénomènes constituent des causes de dégradation de l'image puisqu'ils réduisent sa résolution ou la rendent floue.

- **Le diaphragme** permet non seulement de modifier l'ouverture de la caméra et donc de moduler la quantité de lumière qui atteint le capteur mais aussi de varier la profondeur de champ de l'image.

* **L'ouverture O** du diaphragme est donnée par la relation suivante :

$$O = \frac{f}{d} \quad (1.8)$$

où f est la distance focale et d le diamètre de l'ouverture.

Vu son importance, l'ouverture est généralement normalisée.

- **La mise au point d'un objectif** consiste à éloigner ou à rapprocher le groupe

de lentilles du plan image de façon à obtenir une image nette.

I.5.3.1.2- Les caméras.

Il en existe deux (2) catégories : les caméras à tube (obsolètes) et les caméras à état solide.

I.5.3.1.2.1- Les caméras à état solide.

a- Principe de fonctionnement.

La scène est projetée au moyen d'un objectif sur un réseau de capteurs discrets. Ceux-ci échantillonnent spatialement l'image et convertissent l'énergie lumineuse reçue en signal électrique.

b- Les capteurs des caméras à état solide.

Il s'agit de la photodiode et de la cellule MOS. Ces cellules photosensibles transforment l'information lumineuse incidente en charges électriques. Buil explique le processus de transformation d'un photon en une paire électron-trou dans une cellule MOS [16]. Les charges produites sont transférées de deux manières : par décalage numérique et par décalage analogique.

Les capteurs à état solide sont constitués de capteurs linéaires et de capteurs de surface ; les premiers sont formés d'une ligne de capteurs ou barrette et les seconds sont composés d'une matrice de capteurs ; les capteurs linéaires et matriciels échantillonnent spatialement l'image sans quantifier sa luminance. Chaque capteur résulte de la combinaison d'un élément photosensible et d'un dispositif de transfert de charge.

c- Caractéristiques des caméras à état solide.

- La caractéristique de transfert d'un capteur à état solide est la fonction qui lie l'intensité du signal électrique fourni à l'intensité du signal lumineux reçu.

Aussi bien les capteurs linéaires que matriciels fonctionnent par *intégration temporelle* de lumière. L'intensité lumineuse et le temps d'intégration déterminent le niveau du signal électrique de sortie. La transformation du signal lumineux en signal électrique par intégration linéaire est linéaire. Sa pente, le rendement quantique QE est remplacée par le rendement quantique équivalent DQE (Detective Quantum Efficiency) proposé par Buil [16], plus représentatif car il tient compte de la perte d'électrons dans le transfert et du bruit de l'amplificateur de sortie.

- **La résolution spatiale** est le plus petit détail de la scène pouvant être distingué après conversion du signal lumineux en signal électrique. C'est aussi le nombre maximum de

lignes horizontales et verticales qu'il est possible de distinguer sur le signal vidéo lorsqu'une trame périodique est projetée sur le capteur. La résolution spatiale est limitée principalement par l'échantillonnage avec moyennage du signal lumineux par les cellules du capteur et la diaphotie entre les cellules. L'échantillonnage avec moyennage affaiblit le contraste de l'image.

- **La sensibilité spectrale** est l'efficacité de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique pour chaque cellule en fonction de la longueur d'onde incidente.

- **Le courant d'obscurité** est celui provoqué par l'effet thermique qui génère des paires électron-trou, créant ainsi un courant parasite.

- **La non-uniformité du capteur** constitue un phénomène de dispersion de caractéristique dû au fait que les cellules ne sont pas absolument identiques.

1.5.3.1.3- Conclusion

Le système optique qui permet la projection d'un objet sur un plan présente des défauts. Ces derniers se manifestent sur l'image par une distorsion géométrique et une perte du contraste de l'image par rapport à l'objet.

Des phénomènes comme l'échantillonnage avec moyennage, la diaphotie, le courant d'obscurité et la non-uniformité des capteurs limitent la performance des capteurs à état solide. Ils contribuent à la réduction de la qualité de l'image en diminuant sa résolution spatiale.

Tous ces phénomènes concourent à l'augmentation de la différence entre l'image reconstruite et l'image originale, rendant ainsi impossible une restitution parfaite des données par les systèmes de compression. Un bruit : l'effet d'une insuffisance d'éclairage provoqué par ces phénomènes sont pris en compte dans nos travaux.

1.5.3.2- Les systèmes de couleur

1.5.3.2.1- L'œil et la couleur

La lumière qui pénètre dans l'œil provoque des réactions chimiques qui sont transformées en signaux électriques (pré codés). Ils sont transmis par le nerf optique au cerveau qui perçoit une couleur. Arrivés sur la rétine, les cellules en bâtonnets assurent une vision en faible intensité lumineuse ou vision scotopique tandis que les cellules en cônes permettent la vision des couleurs. Les cônes possèdent 3 types de pigments qui ont chacun une absorption maximale pour une longueur d'onde précise du spectre visible. Il s'agit de l'érythrolabe qui a une absorption maximale pour 560 nm et perçoit le rouge, le jaune et le

blanc, le chlorolabe qui a une absorption maximale pour 530 nm et perçoit le jaune, le vert et le blanc, enfin le cyanolabe pour 450 nm et perçoit le bleu, le rouge et le blanc.

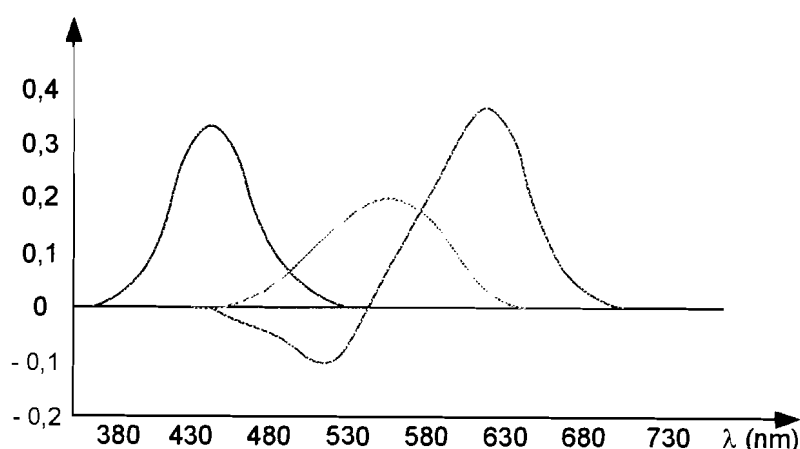
L'œil se caractérise par sa courbe de sensibilité qui s'étend d'environ 400 à 700 nm [119] avec une sensibilité maximale entre 540 et 560 nm correspondant au vert-jaune [82].

En outre cet organe présente des effets de contraste temporel et spatial. Le contraste temporel est la persistance d'une sensation lumineuse de couleur différente de celle intense que l'œil vient de percevoir. Le contraste spatial se traduit par le changement d'une couleur dû à l'influence des autres couleurs voisines perçues ensemble par l'œil.

I.5.3.2.2- Le système de couleurs Rouge, Vert et Bleu.

Le système trichromatique repose sur le fait qu'une sensation colorée quelconque peut être reproduite par un mélange des trois couleurs primaires. Ces trois couleurs sont le Rouge, le Vert et le Bleu. La Commission Internationale d'Eclairage (CIE), en s'appuyant sur des résultats empiriques [25] a adopté les trois longueurs d'onde suivantes : $\lambda(R) = 700$ nm, $\lambda(\text{Vert}) = 546$ nm et $\lambda(B) = 436$ nm. C'est ce jeu de couleurs qui permet de reproduire la gamme la plus répandue de couleurs [43] [152]. Cette commission a défini également les courbes de sensations colorées d'un observateur moyen, ou fonctions de mélange (Figure 1.5). Elles constituent des couleurs primaires additives.

Figure 1.5 : Courbes de sensations colorées d'un observateur moyen.



Source : [82], tracé repris par l'auteur.

I.5.3.2.3- La couleur en photographie et à l'écran.

La photographie se fonde sur le principe des émulsions noir et blanc. Une émulsion est constituée d'une couche d'éléments de composés halogènes d'argent qui sont photosensibles, reposant sur un support. Lorsqu'il y a exposition à la lumière, il se produit une réaction photochimique. L'utilisation d'un révélateur pendant le développement du film réduit les sels

d'argent en argent de couleur noire. Ce développement est stoppé en immergeant le film dans une solution d'acide. Puis, l'émulsion est mise dans un bain fixateur afin de retirer les grains de sels d'argent non exposés et de la stabiliser chimiquement. On obtient après séchage un grisé proportionnel à l'énergie lumineuse reçue.

La photographie couleur est basée sur le système soustractif des couleurs : jaune, magenta et cyan qui absorbent respectivement les composantes bleue, verte et rouge de la lumière blanche. Les émulsions sont composées de trois couches, disposées sur un support, chaque couche étant sensible à une bande spectrale. La première couche, jaune, est sensible au bleu. La seconde, magenta, est sensible au bleu et au vert, aussi met-on un filtre absorbant le bleu. La troisième couche, cyan, est sensible au rouge et au bleu. Dans chaque couche, la quantité d'énergie enregistrée est inversement proportionnelle à l'intensité lumineuse de la bande de longueur d'onde pour laquelle la couche est sensible. On obtient après développement et tirage les couleurs initiales composées de bleu, vert et rouge [43].

Sur un écran couleur, chaque pixel est construit à partir de trois luminophores bleu, vert, rouge pour lesquelles on réalise une synthèse additive. La qualité d'une visualisation tient au nombre de lignes et de colonnes du moniteur, du nombre de couleurs disponibles et au nombre de couleurs affichables simultanément. On dispose souvent de 256 niveaux pour chacune des trois couleurs soit $256^3 = 16777216$ couleurs différentes composables sur l'écran. Toutefois, étant limité, l'œil ne peut voir toutes ces couleurs.

I.5.3.2.4- Codage des couleurs et espaces des couleurs

Anthoine E. [6] décrit le codage des couleurs par deux méthodes :

- La méthode simple par laquelle chaque composante RGB est codée sur n bits, faisant occuper à un pixel $3 \times n$ bits ; dans ce cas l'image a 2^{nx3} couleurs.

- La méthode par palette : la couleur de chaque pixel est codée comme une référence dans une palette, celle-ci contenant les composantes RGB de la couleur ; cette méthode pallie aux insuffisances (impossibilité d'utiliser toutes les nuances disponibles, insuffisance de nuances pour une teinte donnée) de la méthode simple.

Une couleur peut être représentée à partir du spectre visible, par une représentation fréquentielle ou dans un espace de couleurs.

Il existe plusieurs espaces de couleurs [103], [6]. Pour des raisons de normalisation, la Commission Internationale de l'Eclairage a réalisé l'expérience d'égalisation de couleur par mélange additif [152]. Cette expérience a conduit à l'élaboration du système décoloré de luminance Y et chrominances Cb, Cr. Elmo explique comment ce système décoloré est obtenu

à partir du système R, G, B [33]. L'espace décoloré Y, Cb, Cr est utilisé dans le codage JPEG afin d'exploiter les propriétés de la luminance bien adaptées à la perception visuelle. Le passage de l'espace RGB à YCbCr s'effectue au moyen des relations réversibles linéaires [119]. Les formules de conversion sont les suivantes [21], [30], [53] :

$$Y = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B$$

$$Cb = -0.1687 \times R - 0.3313 \times G + 0.5000 \times B + 128 \quad (1.9)$$

$$Cr = 0.5000 \times R - 0.4187 \times G - 0.0813 \times B + 128$$

et :

$$R = Y + 1.402 \times (Cr - 128)$$

$$G = Y - 0.34414 \times (Cb - 128) - 0.71414 \times (Cr - 128) \quad (1.10)$$

$$B = Y + 1.772 \times (Cb - 128)$$

1.5.3.2.5- Conclusion

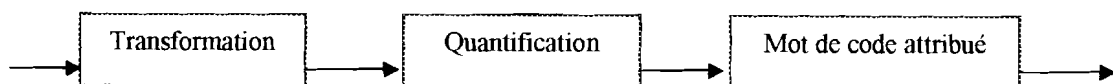
Cette partie sur les systèmes de couleurs montre toute la complexité de la vision des couleurs. En effet l'œil se caractérise par des effets de contraste temporel et spatial qui peuvent donner d'une image une couleur qui n'est pas toujours sa couleur réelle. En plus, cet organe n'est pas en mesure de voir toutes les couleurs présentes sur un écran couleur R, G, B. Il réagit mieux aux propriétés de luminance. Il est donc bénéfique d'utiliser dans les systèmes de codage des espaces de couleurs mieux adaptés à la perception visuelle comme l'espace luminance et chrominances Y, Cb et Cr. Ainsi de grandes modifications dans les chrominances n'affecteront pas considérablement la perception d'une image couleur à sa sortie d'un décodeur.

1.5.4- Le codage de source.

1.5.4.1- Modélisation du codage de source.

YUN et HUIFANG [154] présentent les 3 composantes du codage de source comme la transformation, la quantification et le mot de code attribué : voir **Figure 1.6**.

Figure 1.6: Les 3 composantes du codage de source.



1.5.4.2- Le rôle des transformations dans un schéma de compression d'images.

Le système de couleurs Rouge - Vert - Bleu (R.V.B) est très utilisé en informatique

pour l'affichage des images. Chaque pixel est donc codé en rouge, vert, bleu sur 8 bits par canal – couleur pour les images couleurs [77]. L'utilisation de ce système se justifie par la façon dont le l'œil humain perçoit les couleurs. Cet organe dispose de trois types de cônes dont chacun est sensible à l'une des trois couleurs primaires : rouge, vert et bleu. Par conséquent, n'importe quelle couleur perçue par le système visuel humain peut être considérée comme une combinaison linéaire particulière des trois couleurs primaires. Le système R.V.B, très redondant, est principalement utilisé dans l'acquisition et l'affichage des images couleurs .

Par contre, en traitement de signal couleur incluant l'image et la compression vidéo, le système de couleur luminance-chrominance est plus efficace et plus utilisé. Gonzalez et Woods [47] ont montré à l'aide de la méthode d'égalisation d'histogramme, la similitude entre la perception de couleur dans cet espace et celle dans le système visuel humain. Cette méthode améliore le contraste de l'image en rendant visible certains détails cachés de l'image originale. En plus, avec la luminance seule servant comme signal noir et blanc, le modèle de couleur luminance et chrominances est compatible avec les systèmes de télévision noir et blanc [154]. Ces propriétés de la luminance rendent le système luminance-chrominance Y, Cb, Cr plus efficace en compression d'images photographiques fixes couleurs et vidéo.

La compression de l'information peut être obtenue par une transformation mathématique en projetant les données sur une base des fonctions orthogonales. Cette transformation, dans le cas d'une image, distribue son énergie sur un nombre limité de coefficients dé-corrélées pour éviter la redondance, rendant ainsi le codage plus efficace. Cette opération provoque une compaction d'énergie du signal spatial dans le domaine fréquentiel et facilite l'élimination des informations non pertinentes par filtrage des coefficients de haute fréquence (étape de quantification), dont la disparition n'affecte pas la perception visuelle de l'image.

De nombreuses transformations mathématiques sont utilisées en compression des données. Les principales sont : les transformations linéaires, les transformations par les ondelettes et les transformations fractales.

1.5.4.3- Les transformations linéaires

Une interprétation de base du codage par transformée est décrite dans le paragraphe 1.5.4.3. Nous reprenons les travaux de Yun Q. Shi et Huifang [154], de W.K. Pratt [122] et de A.K.Jain [70].

1.5.4.3.1- Noyau d'une transformation

Considérons une image numérique représentée par un tableau $N \times N$, $f(x,y)$, où (x,y)

sont les coordonnées du pixel et f la valeur du niveau de gris ou intensité du pixel.

Soit $T(u,v)$ la transformée de $f(x,y)$ de taille $N \times N$ avec (u,v) les coordonnées dans le domaine transformé.

Les transformations directe et inverse sont définies par (1.11) et (1.12):

$$T(u,v) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) d(x,y,u,v) \quad (1.11)$$

$$f(x,y) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} T(u,v) i(x,y,u,v) \quad (1.12)$$

Où $d(x,y,u,v)$ et $i(x,y,u,v)$ sont respectivement les noyaux de transformation directe et inverse

Les noyaux de transformation satisfont aux propriétés de séparabilité (1.13) et (1.14), et de symétrie (1.15).

$$d(x,y,u,v) = d_1(x,u) d_2(y,v) \quad (1.13)$$

$$i(x,y,u,v) = i_1(x,u) i_2(y,v) \quad (1.14)$$

$$d_1(y,v) = d_2(x,u) \quad (1.15)$$

Ces noyaux de transformation sont symétriques, orthogonales et unitaires.

1.5.4.3.2- Bases d'image

Considérons la relation (1.16), qui représente la transformation inverse :

$$f(x,y) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} T(u,v) i(x,y,u,v) \quad (1.16)$$

Désignons par G la matrice représentative de $f(x,y)$ et $I_{u,v}$ l'image "formée" par le noyau de la transformation inverse de dimension $N \times N$. $I_{u,v}$ qui vaut alors :

$$I_{u,v} = \begin{bmatrix} i(0,0,u,v) & \cdots & i(0,N-1,u,v) \\ i(1,0,u,v) & \cdots & i(1,N-1,u,v) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ i(N-1,0,u,v) & \cdots & i(N-1,N-1,u,v) \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

$I_{u,v}$ constitue une base d'image . Elle est générée par des matrices unitaires .

La transformation devient alors :

$$G_R = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} T(u,v) I_{u,v} \quad (1.18)$$

L'équation (1.18) peut s'interpréter comme un développement en série de l'image originale G_R dans un ensemble de N^2 bases d'images $I_{u,v}$, les coefficients transformés $T(u,v)$ constituant les coefficients du développement. L'image G_R est dite somme pondérée de bases

d'images.

$T(u,v)$ représente une mesure de corrélation entre l'image G_R et la base d'images $I_{u,v}$ [150]. Les bases d'images sont indépendantes de l'image d'entrée et sont définies par la transformation elle-même. Diverses transformations ont ainsi différents ensembles de bases d'images.

L'objectif fondamental du codage par transformée est qu'avec une transformation appropriée, par conséquent, un ensemble convenable de bases d'images, les coefficients transformés sont plus indépendants que les niveaux de gris de l'image originale. Il est alors possible de coder de façon optimale les coefficients, rendant le codage plus efficace et plus simple. En plus du fait que ces coefficients sont non corrélés, leurs variances diffèrent largement. Des coefficients insignifiants peuvent être ignorés sans introduire une distorsion significative dans l'image reconstruite. Aux coefficients significatifs on peut allouer plus de bits dans le codage, ce qui en améliore l'efficacité.

I.5.4.4- Transformations linéaires utilisées en compression d'images.

Les transformations présentées ici sont symétriques (séparables), unitaires et réversibles. Nous reprenons ici les travaux décrits par [154], [122], [70] et qui conduisent au choix de la transformée en cosinus discrète utilisée en compression JPEG.

I.5.4.4.1- La transformation de Fourier discrète (voir ANNEXE A).

Soit $g(x,y)$ une image numérique représentée par un tableau 2-D. x et y sont les coordonnées d'un pixel et g la valeur du niveau de gris ou intensité du pixel. La transformée de Fourier directe [27] de $g(x,y)$ est donnée de façon générale par :

$$T(u,v) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(x,y) d(x,y,u,v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(x,y) e^{-j2\pi(xu+yv)/N} \quad (1.19)$$

La transformée inverse sera :

$$g(x,y) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} T(u,v) i(x,y,u,v) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} T(u,v) e^{+j2\pi(xu+yv)/N} \quad (1.20)$$

avec

$$d(x,y,u,v) = \frac{1}{N} e^{-j2\pi(xu+yv)/N} \quad (1.21) \text{ le noyau de la transformation directe}$$

$$\text{et } i(x,y,u,v) = \frac{1}{N} e^{+j2\pi(xu+yv)/N} \quad (1.22) \text{ le noyau de la transformation inverse.}$$

Le noyau $d(x,y,u,v)$ est séparable et symétrique. En effet :

$$\begin{aligned}
d(x,y,u,v) &= d_1(x,u) d_2(y,v) \\
&= \frac{1}{\sqrt{N}} e^{[j2\pi ux/N]} \times \frac{1}{\sqrt{N}} e^{[j2\pi vy/N]} \quad (1.23)
\end{aligned}$$

L'image $I(u,v)$ de taille $N \times N$ formée par le noyau de la transformation inverse $i(x,y,u,v)$ avec $0 \leq x \leq N-1$ et $0 \leq y \leq N-1$ devient d'après (1.17) :

$$(1.24) \quad I(u,v) = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} 1 & e^{j2\pi v/N} & \dots & e^{j2\pi(N-1)v/N} \\ e^{j2\pi u/N} & e^{j2\pi(u+v)/N} & \dots & e^{j2\pi(u+(N-1)v)/N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ e^{j2\pi[(N-1)u/N]} & e^{j2\pi[(N-1)u+v]/N} & \dots & e^{j2\pi[(N-1)u+(N-1)v]/N} \end{bmatrix}$$

D'après l'équation (1.16), on obtient G , l'image originale. G est un développement en série dans un ensemble de $N \times N$ bases d'images $I_{u,v}$ dont les coefficients transformés $T(u,v)$ deviennent les coefficients du développement. G est donc une somme pondérée de bases d'images.

1.5.4.4.2- La transformation discrète de Walsh.

Lorsque $N = 2^n$, la transformation discrète de Walsh [147] d'une image $g(x,y)$ notée $W(u,v)$ est obtenue en introduisant dans (1.11) le noyau direct :

$$d(x,y,u,v) = \frac{1}{N} \prod_{i=0}^{n-1} (-1)^{[b_i(x)b_{n-1-i}(u) + b_i(y)b_{n-1-i}(v)]} \quad (1.25)$$

Le noyau inverse $i(x,y,u,v)$ est égal au noyau direct car ce dernier forme une matrice qui comporte des lignes et colonnes orthogonales.

Aussi, les transformations directe et inverse de Walsh sont :

$$W(u,v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(x,y) \prod_{i=0}^{n-1} (-1)^{[b_i(x)b_{n-1-i}(u) + b_i(y)b_{n-1-i}(v)]} \quad (1.26)$$

$$g(x,y) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} W(u,v) \prod_{i=0}^{n-1} (-1)^{[b_i(x)b_{n-1-i}(u) + b_i(y)b_{n-1-i}(v)]} \quad (1.27)$$

Contrairement à la transformation de Fourier qui s'appuie sur des termes trigonométriques, la transformation de Walsh consiste en un développement en série des fonctions de base (ou images de base) dont les valeurs sont $+1$ ou -1 . Le terme $b_k(Z)$ est le $k^{\text{ième}}$ bit dans la représentation binaire de Z .

Exemple : si $n=3$ et $Z=6$ (110 en binaire), $b_0(Z)=0$, $b_1(Z)=1$ et $b_2(Z)=1$.

1.5.4.4.3- La transformation discrète de Hadamard.

Comme précédemment, les noyaux direct et inverse sont égaux et donnés par (1.28).

$$d(x,y,u,v) = \frac{1}{N} (-1)^{\sum_{i=0}^{n-1} [b_i(x)b_i(u) + b_i(y)b_i(v)]} = i(x,y,u,v) \quad (1.28)$$

La somme dans l'exposant est modulo 2 arithmétique.

La transformation directe de Hadamard $H(u,v)$ d'une image $g(x,y)$ est [52],[75] :

$$H(u,v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(x,y) (-1)^{\sum_{i=0}^{n-1} [b_i(x)b_i(u) + b_i(y)b_i(v)]} \quad (1.29)$$

La transformation inverse :

$$g(x,y) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} H(u,v) (-1)^{\sum_{i=0}^{n-1} [b_i(x)b_i(u) + b_i(y)b_i(v)]} \quad (1.30)$$

les noyaux de Hadamard sont séparables et symétriques :

$$\begin{aligned} d(x,y,u,v) &= d_1(x,u) d_1(y,v) = i(x,y,u,v) = ii(x,u) ii(y,v) = \\ &= \left[\frac{1}{\sqrt{N}} (-1)^{\sum_{i=0}^{n-1} b_i(x)b_i(u)} \right] \left[\frac{1}{\sqrt{N}} (-1)^{\sum_{i=0}^{n-1} b_i(y)b_i(v)} \right] \end{aligned} \quad (1.31)$$

La matrice de Hadamard d'ordre le plus bas ($N=2$) vaut :

$$D_2 = H_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (1.32)$$

I.5.4.4.- La transformation de Hotelling ou transformation discrète de Karhunen-Loève .

La transformation de Hotelling [61] est basée sur les propriétés statistiques des représentations d'un vecteur. Elle porte le nom de transformation de vecteur propre ou transformation de composantes principales [154].

Considérons un ensemble de vecteurs aléatoires \bar{x} tel que :

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (1.33)$$

Le vecteur moyen de cet ensemble est défini comme suit :

$$\vec{m}_x = E[\vec{x}] \quad (1.34)$$

L'espérance mathématique d'un vecteur ou d'une matrice est obtenue en prenant celle de chaque élément. La matrice de covariance de cette population de vecteurs est :

$$C_x = E[(x - m_x)(x - m_x)^t] \quad (1.35) \text{ avec } t \text{ opérateur de transposition.}$$

Pour M échantillons de vecteurs de cet ensemble, le vecteur moyen et la matrice de covariance valent respectivement :

$$\vec{m} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \vec{x}_k \quad (1.36)$$

et

$$C_x = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \vec{x}_k \vec{x}_k^t - \vec{m}_x \vec{m}_x^t \quad (1.37)$$

Comme C_x est réel et symétrique, Noble affirme qu'il est toujours possible de trouver n vecteurs propres orthonormés [106], tel que:

$$C_x \vec{e} = \lambda_i \vec{e}_i \quad (1.38)$$

Où \vec{e}_i et λ_i désignent respectivement les vecteurs et valeurs propres.

Supposons que les valeurs propres sont classées dans l'ordre décroissant tel que $\lambda_i \geq \lambda_{i+1} \dots$ pour $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$.

Soit A une matrice dont la première ligne est formée par le vecteur propre correspondant à la plus grande valeur propre et la dernière formée par celui qui a la plus petite valeur propre.

Supposons que A est une transformation qui transforme les vecteurs \vec{x} en d'autres vecteurs \vec{y} tel que :

$$\vec{y} = A(\vec{x} - \vec{m}_x) \quad (1.39)$$

La relation (1.39) représente la transformation de Hotelling ou de Karhunen - Loève discrète.

$$\text{La moyenne de } \vec{y} \text{ est nulle [150], [140]: } \vec{m}_y = 0 \quad (1.40)$$

$$\text{La matrice de covariance } C_y \text{ de } \vec{y} : C_y = AC_x A^t \quad (1.41)$$

C_y est une matrice diagonale dont les éléments de la diagonale principale sont les valeurs propres de la matrice C_x , les autres éléments étant nuls. Les deux matrices ont les mêmes valeurs propres. Ce qui est vrai aussi pour les vecteurs propres.

La relation (1.39) est une rotation qui aligne les données suivant la direction des vecteurs propres. Et c'est cet alignement de données qui est le mécanisme qui dé-corrèle les données. C'est l'une des propriétés fondamentales de la transformation de Karhunen – Loève.

En outre, comme les valeurs propres apparaissent sur la diagonale principale de C_y , λ_i représente la variance du composant y_i le long du vecteur propre \vec{e}_i . L'autre importante propriété de cette transformation permet la reconstruction du vecteur \vec{x} .

Comme les lignes de la matrice A sont des vecteurs orthonormés, $A^{-1} = A^t$ et

$$\vec{x} = A^t \vec{y} + \vec{m}_x \tag{1.42}$$

Supposons qu'au lieu d'utiliser tous les vecteurs propres de C_x , on forme une matrice A_K à partir des K vecteurs propres correspondants aux K plus grandes valeurs propres.

Le vecteur reconstruit en utilisant A_K sera :

$$\vec{\tilde{x}} = A_K^t \vec{y} + \vec{m}_x \tag{1.43}$$

L'erreur quadratique moyenne entre \vec{x} et $\vec{\tilde{x}}$ est donnée par :

$$E_{ms} = \sum_{j=1}^n \lambda_j - \sum_{j=1}^k \lambda_j = \sum_{j=k+1}^n \lambda_j \tag{1.44}$$

Cette erreur peut être minimisée en sélectionnant les k vecteurs propres associés aux plus grandes valeurs propres.

La transformée de Karhunen – Loève est une transformation unitaire capable de dé-corréler complètement l'ensemble des variables aléatoires d'un bloc [51]. Elle consiste à diagonaliser la matrice de covariance d'un bloc image à deux dimensions. Les fonctions propres sont les fonctions de base de la transformée.

La transformation de Karhunen – Loève est optimale en ce sens qu'elle minimise l'erreur quadratique moyenne entre les vecteurs \vec{x} et leurs approximations $\vec{\tilde{x}}$.

I.5.4.4.5- La transformation de Haar (voir ANNEXE B).

La transformation de Haar [135], [70], [122] se fonde sur les fonctions de Haar, $h_k(z)$ définies sur l'intervalle continu et fermé $[0,1]$ avec z qui appartient à cet intervalle et $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$, où $N = 2^n$.

La première étape de la génération de la transformation de Haar consiste à décomposer

l'entier k comme suit :

$$k = 2^p + q - 1 \quad (1.45)$$

Où $0 \leq p \leq n-1$, $q = 0$ ou 1 pour $p = 0$

Et $1 \leq q \leq 2^p$ pour $p \neq 0$.

Par exemple, si $N = 4 = 2^2$, on aura :

k	p	q
0	0	0
1	0	1
2	1	1
3	1	2

A partir de là, les fonctions de Haar sont définies de la manière suivante lorsque z prend les valeurs ci-dessous:

$z = 0/N, 1/N, 2/N, \dots, \frac{N-1}{N} = m/N$ avec $m = 0, 1, \dots, N-1$.

$$h_0(z) \cong h_{0,0}(z) = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad \text{pour } z \in [0,1] \quad (1.46)$$

et

$$h_k(z) \cong h_{p,p}(z) = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{cases} 2^{p/2} & \frac{q-1}{2^p} \leq z < \frac{q-1/2}{2^p} \\ -2^{p/2} & \frac{q-1/2}{2^p} \leq z < \frac{q}{2^p} \\ 0 & \text{Pour } z \notin [0,1] \end{cases} \quad (1.47)$$

La matrice $z \times z$ de Haar vaut pour $N = 2$:

$$A_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (1.48)$$

Pour $N = 4$, on obtient:

$$A_4 = \frac{1}{\sqrt{4}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 \\ \sqrt{2} & -\sqrt{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2} & -\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (1.49)$$

Les matrices de Haar sont orthogonales.

La transformation de Haar est réelle et orthogonale. Elle est très rapide mais n'est pas un bon compacteur d'énergie pour les images (voir ANNEXE B).

I.5.4.4.6- La transformation en cosinus discrète (TCD).

Les noyaux direct et inverse de la transformation en cosinus discrète 2-D sont [1]:

$$d(x,y,u,v) = C(u)C(v) \cos\left[\frac{(2x+1)u\pi}{2N}\right] \cos\left[\frac{(2y+1)v\pi}{2N}\right] = i(x,y,u,v) \quad (1.50)$$

où

$$C(u) = \begin{cases} \frac{\sqrt{1}}{N} & \text{Pour } u = 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{N} & \text{Pour } u = 1, 2, \dots, N-1 \end{cases} \quad (1.51)$$

Idem pour $C(v)$; voir ANNEXES A, et B.

Ainsi, les transformations directe et inverse de TCD sont données respectivement par les relations (1.52) et (1.53) ci-dessous:

$$T(u,v) = \frac{1}{\sqrt{2N}} C(u)C(v) \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} g(x,y) \cos\left[\frac{(2x+1)u\pi}{2N}\right] \cos\left[\frac{(2y+1)v\pi}{2N}\right] \quad (1.52)$$

$$g(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2N}} C(u)C(v) \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} T(u,v) \cos\left[\frac{(2x+1)u\pi}{2N}\right] \cos\left[\frac{(2y+1)v\pi}{2N}\right] \quad (1.53)$$

1.5.4.4.7- Propriétés des transformations unitaires.

- **Conservation d'énergie et rotation.** Dans une transformation unitaire deux vecteurs \vec{v} et \vec{u} sont liés par :

$$\vec{v} = A\vec{u} : A \text{ est la matrice de la transformation.}$$

$$\|\vec{v}\|^2 = \|\vec{u}\|^2 \quad (1.54)$$

Il y a conservation de la longueur du vecteur \vec{u} dans l'espace vectoriel de dimension N de même que son énergie. Ceci signifie que chaque transformation unitaire est une rotation du vecteur \vec{u} dans l'espace vectoriel de dimension N . Les composantes de \vec{v} sont les projections du vecteur \vec{u} sur la nouvelle base. Dans le cas à deux dimensions, A.K. Jain [70] montre que :

$$\sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} |u(x,y)|^2 = \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} |v(k,l)|^2 \quad (1.55)$$

- **Compactage d'énergie et variances.** La propriété essentielle de ces transformations est de concentrer une plus grande proportion de l'énergie d'une image sur un petit nombre des coefficients transformés. Soient $m_u(x,y)$ et $C_u(x,y; x',y')$ la moyenne et la covariance des pixels et ses coefficients transformés $v(k,l)$. La variance vaut :

$$\sigma_v^2(k,l) = E\left[|v(k,l) - m_v(k,l)|^2\right] \quad (1.56)$$

- **Dé-corrélation.** Les coefficients transformés sont plus dé-corrélés et les éléments diagonaux de la matrice de corrélation sont supérieurs aux autres.

De toutes les transformations étudiées précédemment, seule la transformation de Karhunen - Loève est optimale quant aux propriétés de compactage d'énergie et de dé-corrélation des coefficients transformés [70].

1.5.4.4.8- Métriques de mesure des performances.

- **Le gain du codage par transformée G_{TC}** est une mesure de compactage d'énergie. JAYANT a montré que c'est le rapport entre la moyenne arithmétique et la moyenne géométrique des variances de tous les composants du vecteur transformé [71]:

$$G_{TC} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sigma_i^2}{\left(\prod_{i=0}^{N-1} \sigma_i^2 \right)^{1/N}} \quad (1.57)$$

σ_i étant la variance de l'élément i . Une grande valeur de G_{TC} indique une plus grande compaction d'énergie.

- **L'erreur quadratique moyenne de reconstruction EQM_R** mesure bien la performance des transformations. Wintz [150] a expliqué qu'une image peut être exprimée comme une somme pondérée des bases d'images $I_{u,v}$. Les poids $T(u,v)$ sont les coefficients transformés. Les variances $\sigma_{u,v}^2$ de ces coefficients peuvent être arrangées dans un ordre décroissant. Les coefficients deviennent insignifiants après les L premiers termes et l'image peut être bien approximée par ces derniers.

$$G_R = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} T(u,v) I_{u,v} \approx \sum_{u=0}^L \sum_{v=0}^L T(u,v) I_{u,v} \quad (1.58)$$

Cette métrique est alors donnée par la relation suivante :

$$EQM_R = \sum_{u=L}^{N-1} \sum_{v=L}^{N-1} \sigma_{u,v}^2 \quad (1.59)$$

- **Complexité de calcul :** Les transformations discrètes de Walsh, Hadamard, Fourier et en Cosinus peuvent être implémentées par l'algorithme FFT. Par contre, la transformation de Karhunen - Loève, bien qu'optimale en terme de compactage d'énergie, présente une plus grande complexité de calcul.

1.5.4.4.9- Conclusion

Une transformation performante doit satisfaire les quatre critères suivants :

- 1- Les coefficients transformés sont plus indépendants, donc moins corrélés.
- 2- Le maximum d'énergie de l'image transformée est concentré sur un petit nombre L ($L < N$) de coefficients transformés.
- 3- Une complexité algorithmique moindre.
- 4- Une faible erreur quadratique moyenne de reconstruction.

Le codage par transformée conduit aux deux résultats fondamentaux suivants :

Une dé-corrélation de la donnée d'entrée suivie d'un traitement différent des coefficients décorrélés. Certains sont purement abandonnés ou sévèrement quantifiés, d'autres finement quantifiés. Le **Tableau 1.1** montre les performances des transformations. La plus grande complexité algorithmique de la KLT la disqualifie au profit de la TCD dans le codage d'image et de la vidéo.

Tableau 1.1: Transformations et leurs performances [70].

Transformations	Compactage	Complexité algo.
TCD	Excellent	Moindre
KLT	Le meilleur	Grande
Walsh-	-	Moindre
Hadamard	Bon	Moindre
TFD	Très bon	Moindre
HAAR	Assez bon	-

I.5.4.5- La transformation en ondelettes.

I.5.4.5.1- Définitions

a- Temps continu

Les ondelettes sont des fonctions $\psi_{a,\tau}(t)$ obtenues à partir d'une fonction $\psi(t)$ de la variable t , dont les supports dans les domaines fréquentiel et spatial (temporel) sont limités [50]. Localisée et oscillante, $\psi(t)$ engendre les autres ondelettes $\psi_{a,\tau}(t)$ lorsqu'elle est contractée et translatée par un paramètre τ . Les ondelettes ainsi définies sont représentées par:

$$\psi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) \quad (1.60)$$

où $a > 0$ et $\tau \in \mathbb{R}$

La variable τ représente le changement de temps ou le paramètre de translation tandis que a est le paramètre d'échelle ou de dilatation.

Si $a > 1$, il y a expansion de $\psi(t)$ et si $0 < a < 1$, il y a contraction de $\psi(t)$.

Une ondelette est une copie translatée représentée dans une autre échelle de la fonction $\psi(t)$ appelée ondelette mère. $\psi(t)$ doit satisfaire les deux conditions suivantes:

$$1- \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (1.61)$$

2- $\psi(t)$ est carré sommable ou à énergie finie

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(t)|^2 dt < \infty \quad (1.62)$$

Soit une fonction $f(t)$ carrée sommable satisfaisant à la condition :

$$\int_0^{+\infty} |f(t)|^2 dt < \infty \quad (1.63)$$

La transformée en ondelettes temps-continu $W(a, \tau)$ de $f(t)$ est donnée par :

$$W(a, \tau) = \int_0^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi^* \left(\frac{t-\tau}{a} \right) dt \quad (1.64)$$

$k = \frac{1}{\sqrt{a}}$ est le facteur de normalisation.

La transformée inverse sera :

$$F(t) = \frac{1}{C} \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \frac{1}{|a|^2} W(a, \tau) \Psi_{a, \tau}(t) da d\tau \quad (1.65)$$

Où $C = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(w)|^2}{|w|} dw$ (1.66) représente la condition d'admissibilité que

l'ondelette mère doit satisfaire afin que la transformation existe. $\psi(w)$ est la transformée de Fourier de $\psi(t)$.

Pour un signal $g(x,y)$ à deux dimensions, la transformation directe en ondelettes temps continu est donnée par :

$$W(a, \tau_x, \tau_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x,y) \Psi_{a\tau_x\tau_y}^*(x,y) dx dy \quad (1.67)$$

La transformation inverse vaut :

$$g(x,y) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|a|^3} W(a, \tau_x, \tau_y) \Psi_{a\tau_x\tau_y}(x,y) da d\tau_x d\tau_y \quad (1.68)$$

Où $\Psi_{a\tau_x\tau_y}(x,y)$ est une ondelette à deux dimensions et C donné par (1.66).

$$\Psi_{a\tau_x\tau_y}(x,y) = \frac{1}{|a|} \Psi \left(\frac{x-\tau_x}{a}, \frac{y-\tau_y}{a} \right) \quad (1.69)$$

b- Temps discret

Pour le cas discret, $f(t)$ est remplacée par une somme discrète. Dans cet espace discret, les paramètres de dilatation a et de translation τ deviennent respectivement :

$$a = 2^k \quad (1.70)$$

$$\text{et } \tau = 2^l \quad (1.71)$$

où k et l sont des entiers.

En appliquant la discrétisation dans le domaine temporel $t = m \times T$ où T est l'intervalle d'échantillonnage supposé égal à 1, la transformée en ondelettes à temps discret sera:

$$W_d(k,l) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} f(m) \Psi_{kl}^*(m) \quad (1.72)$$

La transformée en ondelettes inverse à temps discret est donnée par :

$$f(m) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{l=-\infty}^{+\infty} d(k,l) 2^{\frac{-k}{2}} \Psi_{k,l}(2^{-k}m-1) \quad (1.73)$$

$$\text{avec } d(k,l) = \frac{W(k,l)}{C} = \frac{1}{C} \int_0^{+\infty} f(t) \Psi_{kl}^*(t) dt \quad (1.74)$$

Plusieurs classes d'ondelettes sont décrites dans de nombreux ouvrages de références [29], [145], [42], [96].

I.5.4.5.2- La transformation d'image par transformée en ondelettes discrètes.

Pour le codage d'image, l'ondelette est utilisée pour décomposer la donnée image en ondelettes. La transformée en ondelettes peut être considérée comme le produit de corrélation de la fonction $f(t)$ et des ondelettes $\psi_{a,\tau}(t)$. Elle est équivalente à la sortie d'un banc de filtres passe-bandes (passe-haut plus passe-bas) définies par les ondelettes $\psi_{a,\tau}(t)$. Ainsi, ce procédé décompose l'image en plusieurs sous-bandes.

L'utilisation de la transformation en ondelettes dans les applications de codage d'images, nécessite un procédé de codage en trois étapes : la décomposition de l'image, la quantification des coefficients transformés, le codage des coefficients quantifiés.

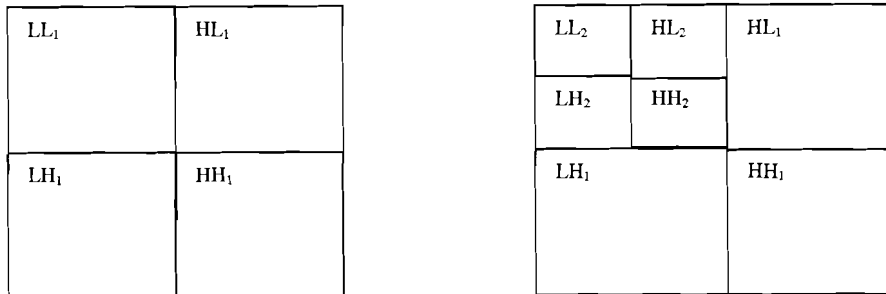
La décomposition de l'image est une opération sans perte, qui convertit une image du domaine spatial au domaine fréquentiel, où les coefficients transformés sont dé-corrélés.

L'image est d'abord partitionnée en quatre (4) sous-bandes désignées par LL_1 , HL_1 ,

LH₁, HH₁ (L =Low ; H=High), voir **Figure 1.7**. Chaque coefficient représente une zone spatiale correspondant au quart de la taille de l'image originale. Les fréquences basses représentent une large bande correspondant à $0 < |w| < \pi/2$, tandis que les hautes fréquences représentent la bande $\pi/2 < |w| < \pi$.

Pour obtenir le prochain niveau de décomposition, la sous-bande LL₁ est décomposée en quatre (4) autres sous-bandes **Figure 1.8**. Les basses fréquences du second niveau de décomposition correspondent à l'intervalle $0 < |w| < \pi/4$ et les hautes fréquences à $\pi/4 < |w| < \pi/2$. Cette décomposition peut se poursuivre autant que nécessaire.

Figure 1.7: 1^{er} niveau de décomposition **Figure 1.8:** 2^{ème} niveau de décomposition.



Source : [154]

Jayant et Noll [71] ont montré que pendant la quantification, chaque sous-bande est quantifiée différemment et selon son importance basée souvent sur son énergie ou sa variance. Des quantificateurs à pas importants traitent les sous-bandes à faible énergie alors que ceux à pas plus fins quantifient les sous-bandes de grande énergie. Il s'ensuit une faible allocation de bits pour les sous-bandes à faible énergie et beaucoup de bits pour les sous-bandes à grande énergie, ce qui améliore le taux de compression.

1.5.4.5.3- Conclusion

Généralement la grande partie d'énergie d'une image est contenue dans les bandes de basses fréquences. Seuls les coefficients de ces bandes sont conservés lors de la quantification, tandis que ceux de hautes fréquences sont nuls.

Cette brève présentation indique l'intérêt que nous portons aux ondelettes dans nos perspectives de travail post doctorale.

La transformation en ondelettes est utilisée dans de nouveaux schémas de compression comme le standard JPEG 2000 décrit au paragraphe 1.8.

1.5.4.6 Les transformations fractales.

Une fractale est un sous-ensemble A d'un espace métrique X, tel que A est extrêmement compliqué géométriquement [22], [125].

Un objet fractal est une structure géométrique qui se reproduit sans fin à toutes les échelles et est caractérisé par les propriétés suivantes :

- ses parties ont la même forme ou structure que l'objet global à la différence qu'elles sont à une échelle réduite et peuvent être légèrement déformées.
- sa forme est soit extrêmement irrégulière, soit extrêmement interrompue ou fragmentée, et ce quelle que soit l'échelle d'examen.
- il contient des éléments distinctifs dont les échelles sont très variées et couvrent une très large gamme.

Un objet fractal est dit self-similaire ou auto-similaire s'il est composé de N copies de lui-même, chacune étant une réduction d'un facteur r selon toutes les coordonnées de l'objet global [125] (auxquelles des transformations affines, comme les translations ou rotations peuvent ou non être appliquées). Exemple, la poupée russe qui renferme en elle une poupée plus petite, qui à son tour renferme une troisième poupée similaire et ainsi de suite.

En prenant en considération l'auto-similarité, on peut représenter les images (les formes redondantes) par un nombre restreint de paramètres, plutôt que de stocker les images de chaque feuille de chaque arbre. Le théorème de M.F Barnsley appelé IFS (Iterated Functions System) stipule qu'il est possible et préférable de faire appel à une fonction relativement simple qui génère n'importe quel niveau de détails de l'image [9]. La compression par les fractales utilise les similarités au sein de la même image à différentes échelles. Le système de fonctions itératives (IFS) utilise une transformation affine contractante. Elle consiste en une transformation linéaire suivie d'une translation.

Le système de codage d'image peut alors utiliser seulement les paramètres des transformations dans l'IFS au lieu des données de l'image originale pour le stockage ou la transmission, conduisant ainsi à des taux de compression élevés.

1.5.5- La compression des données.

Les données images, une fois numérisées, renferment de façon générale une forte proportion d'éléments redondants. Il existe des redondances statistiques et des redondances psychovisuelles. Afin de satisfaire aux contraintes de bande passante des canaux de transmission et des capacités de stockage des médias, les schémas de traitement des données contiennent des méthodes de réduction du volume de l'information à transmettre ou à stocker. C'est cette opération de réduction qui constitue la compression [137]. Ces méthodes exploitent les redondances de l'information en utilisant principalement une compression non et/ou conservative. Ces deux types de compression sont décrits dans les paragraphes 1.5.5.2.et

1.5.5.4.

1.5.5.1- Les théorèmes de Shannon.

Les théorèmes de la théorie de l'information s'appliquent à une source d'information stationnaire, sans mémoire et discrète. Bien qu'ils ne soient plus valides dans des cas pratiques difficiles, ils fournissent toutefois des limites théoriques importantes pour le codage d'image et de la vidéo. Ils peuvent également être utilisés pour l'évaluation de la performance des différentes techniques de codage. Ils sont présentés dans les ouvrages de référence [133], [154].

1.5.5.2- La compression non conservative.

1.5.5.2.1- Le sous-échantillonnage.

Le système de couleurs luminance et chrominances Y, Cb, Cr est utilisé dans de nombreux standards de compression [119]. Il s'agit ici de tirer profit de la sensibilité plus grande de l'œil aux informations de luminance par rapport à celles de chrominances [6]. Aussi, des coefficients Y, Cb, Cr obtenus après transformation des composantes R, G, B de l'image couleur, seule la luminance Y subit le moins de dégradation possible. Pour un lot de 4 pixels par exemple, on échantillonne 4 fois Y et une fois Cb et Cr : c'est la compression par sous-échantillonnage de chrominances, de taux 4 : 1 : 1, utilisée dans le standard JPEG de base. Il réduit la taille de l'image d'environ 50% et sans perte de qualité apparente [137]. Les standards qui utilisent cette opération améliorent considérablement leur taux de compression par le taux de sous-échantillonnage. Nous l'avons utilisée dans nos travaux.

1.5.5.2.2- La quantification.

L'effet d'une transformation sur une image est une redistribution non uniforme de l'énergie sur ses coefficients. Un petit nombre de coefficients reçoivent une grande partie de l'énergie tandis qu'un nombre important en reçoit une infime partie. Une réorganisation de ces coefficients de façon à regrouper tous ceux à énergie significative sur une partie du tableau image les prépare à une quantification efficace. Les coefficients à faible énergie ou de hautes fréquences sont sévèrement quantifiés par rapport à ceux de forte énergie.

Une image couleur transformée dans le système de couleurs luminance et chrominances possède 3 types de coefficients. Ils varient chacun entre 2 limites qui définissent leur gamme dynamique GD [103] donnée par la relation (1.75) :

$$GD = -(\log_{10} \rho_1 - \log_{10} \rho_2) \text{ udo} \quad (1.75)$$

où ρ_1 et ρ_2 représentent respectivement la plus forte (sans exposition à la lumière) et la plus

faible réflectance (exposition du support à la saturation); udo : l'unité de densité optique.

La quantification consiste à diviser la gamme dynamique GD en un nombre fini d'intervalles et à attribuer à toutes les valeurs d'un intervalle une seule valeur de luminance ou des chrominances. Cette attribution se fait par arrondi ou par troncature. C'est une opération de lissage au cours de laquelle une certaine quantité de l'information est perdue. Le caractère irréversible de cette perte indique que la quantification est une étape destructrice donc non conservative de la compression des données.

La quantification dépend du support physique et du système visuel de l'observateur. Avant d'appliquer la quantification, il importe donc de connaître la plus petite différence de luminance perceptible à l'œil (ou échelle liminaire de luminance) donnée par la loi de Weber-Fechner :

$$\frac{\Delta Y}{Y} = C_{\omega} \quad (1.76)$$

où Y représente la luminance.

$$\text{Pour de nombreux observateurs } 0.01 \leq \frac{\Delta Y}{Y} \leq 0.02 \quad (1.77)$$

Le niveau de quantification N_q sera :

$$N_q = \frac{\log_{10} p_2 - \log_{10} p_1}{\log_{10}(1 + C_{\omega})} \quad (1.78)$$

La relation (1.78) doit être satisfaite pour éviter la visibilité du bruit de quantification sur l'image reconstruite.

1.5.5.2.2.1- La quantification scalaire.

a- Quantification uniforme.

Elle se produit lorsque la largeur des intervalles de luminance et des chrominances répartis dans la gamme dynamique est la même [45].

b- Quantification non uniforme.

Les niveaux de quantification, entièrement situés dans la gamme dynamique ne sont plus identiques. Ils sont plus serrés vers le noir et plus espacés vers le blanc. Cette approche de la quantification est mieux adaptée au système visuel humain. En effet, d'après l'expérience de Weber – Fechner, la quantité ΔY est plus faible pour les faibles luminances. En d'autres termes le système visuel humain est plus sensible aux faibles variations de luminance dans le noir que dans le blanc [103].

c- Quantification adaptative.

Elle nécessite la présence d'un buffer pour stocker les données en entrée. Une analyse statistique est effectuée sur ces données. En se basant sur cette analyse, les paramètres du quantificateur sont adaptés au changement des statistiques d'entrée afin d'obtenir une quantification à performance meilleure [154].

d- Distorsion de quantification.

D'après le théorème de codage source [133], tant que le débit binaire utilisé est plus grand que la fonction taux de distorsion $R(D)$, avec D une distorsion donnée, il est possible de transmettre la source avec une distorsion plus petite que D . Puisque la quantification est une compression destructrice, il existe une erreur ou distorsion de quantification qui peut être évaluée de façon subjective [20], [130] et objective [31]. Le phénomène de faux contours provoqué par une quantification grossière ou une quantification à nombre insuffisant de niveaux de reconstruction montre l'importance de cette opération dans le schéma de codage. L'œil étant plus sensible aux régions plus uniformes dans une image, il faut plus de niveaux de reconstruction dans ces régions que dans les autres relativement non uniformes.

L'erreur de quantification ou bruit de quantification e_q est la différence entre le signal d'entrée et le signal quantifié $x_q = Q(x)$ en sortie :

$$e_q = x - Q(x) \quad (1.79)$$

L'entrée x est généralement considérée comme une variable aléatoire ayant une fonction de densité de probabilité $p_x(x)$. La mesure objective souvent utilisée pour évaluer ce bruit est l'erreur quadratique moyenne de quantification donnée par la relation (1.80) :

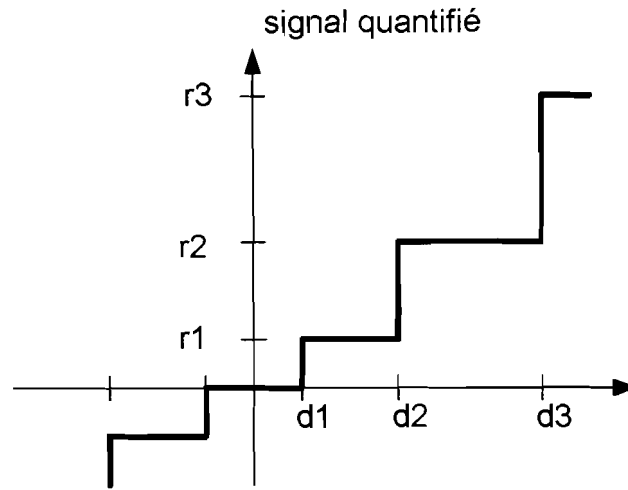
$$EQM_q = E[(x - Q(x))^2] = \int_{GD} (x - Q(x))^2 \times p_x(x) \times dx \quad (1.80)$$

où GD représente la gamme dynamique et $p_x(x)$ la densité de probabilité du signal échantillonné $x_e(k,l)$. Cette métrique de qualité objective est constituée de composantes dues au bruit granulaire (associé à l'intérieur des intervalles) et au bruit de surcharge (associé aux extrémités lorsque x tend vers l'infini) [154].

e- Quantification optimale.

La quantification d'un signal échantillonné $x_e(k,l)$ consiste à comparer la valeur de chaque échantillon à des niveaux de décision d_i . Soit x la valeur d'un échantillon $x_e(k,l)$ restreint à la gamme dynamique GD et $x_q = Q(x)$ sa valeur quantifiée. Si $d_i \leq x \leq d_{i+1}$ (1.81) alors $x_q = r_i$ représente la valeur quantifiée de l'échantillon **Figure 1.9**.

Figure 1.9 : Niveaux de décision et de reconstruction.



Source : [154]

Le problème de la quantification optimale est de trouver les niveaux de décision d_i et de reconstruction r_i qui minimisent l'erreur entre le signal échantillonné $x_c(k,l)$ et le signal quantifié $x_q(k,l)$. Les conditions nécessaires de quantification optimale ont été données par les travaux de Lloyd [83] et de Max [91] à partir d'une fonction de densité de probabilité $p_x(x)$ de l'entrée d'un quantificateur : les dérivées de l'erreur quadratique moyenne par rapport aux niveaux de décision d_i et de reconstruction r_i doivent être nulles (voir (1.82) et (1.83)).

$$(d_i - r_{i-1})^2 \times p_x(d_i) - (d_i - r_i)^2 \times p_x(d_i) = 0 \quad (1.82) \text{ où } i = 2, \dots, N;$$

$$- \int_{d_i}^{d_{i+1}} (x - r_i) \times p_x(x) \times dx = 0 \quad (1.83) \text{ où } i = 1, 2, \dots, N.$$

Fleischer [38] et Max [91] ont donné les conditions suffisantes suivantes (1.84), (1.85) et (1.86) déduites des dérivées secondes et sans restriction sur la fonction de densité de probabilité:

$$1. \quad r_i = -\infty \text{ et } r_{N+1} = +\infty \quad (1.84)$$

$$2. \quad 2 \int_{d_i}^{d_{i+1}} (x - r_i) \times p_x \times dx = 0 \quad (1.85) \text{ où } i = 1, 2, \dots, N.$$

$$3. \quad d_i = \frac{r_{i+1} + r_i}{2} \quad (1.86) \text{ où } i = 2, \dots, N.$$

On note que chaque niveau de décision (sauf en dehors des intervalles) est la moyenne arithmétique des deux niveaux de reconstruction voisins tandis que chaque niveau de reconstruction est l'aire sous la courbe représentant la fonction de densité de probabilité $p_x(x)$ et entre les deux niveaux de décision adjacents.

- **Quantificateur uniforme optimal à entrée uniformément répartie.**

Le seul paramètre qui doit être décidé dans le cas d'un quantificateur uniforme est la taille de son pas Δ . Dans le cas d'une variable aléatoire d'entrée x uniformément répartie, le bruit de quantification de surcharge n'existe pas. Et l'erreur quadratique moyenne de quantification devient :

$$EQM_q = N \int_{d_1}^{d_2} (x - Q(x))^2 \times \frac{1}{N \times \Delta} \times dx = \frac{\Delta^2}{12} \quad (1.87)$$

L'erreur quadratique moyenne de quantification est directement proportionnelle au carré du pas Δ . En conséquence, plus grande sera la taille du pas, plus grande sera l'erreur. Ou de façon pratique, une quantification grossière conduira à une grande erreur de quantification donc à une forte distorsion dans l'encodage des données.

Par ailleurs, comme $EQM_q = \sigma_q^2$, si on suppose x une variable aléatoire à moyenne nulle, la variance de l'entrée x sera donnée par la relation suivante :

$$\sigma_x^2 = \frac{(N \times \Delta)^2}{12} \quad (1.88)$$

La racine carré du rapport signal sur bruit (RSB_{mc}) au sens des moindres carrés vaudra :

$$RSB_{MC} = 10 \times \log_{10} \frac{\sigma_x^2}{\sigma_q^2} = 20 \times \log_{10} N \quad (1.89)$$

$$\text{Si } N = 2^n, \text{ on aura : } RSB_{MC} = 6.02 \times n \text{ dB} \quad (1.90)$$

Ce résultat atteste que si on utilise le code binaire naturel pour coder les niveaux de reconstruction d'un quantificateur uniforme ayant une entrée uniformément répartie, à chaque augmentation de bits dans le codage, il y a accroissement de 6.02 dB du RSB_{MC} .

Max J., Paez et Glisson ont montré que le quantificateur uniforme symétrique optimal ayant à l'entrée une variable aléatoire à distribution uniforme présente la plus petite valeur de l'erreur quadratique moyenne de quantification [91], [115].

- **Quantificateur uniforme optimal avec des entrées à distribution non uniforme.**

Les conditions suffisantes d'optimalité d'une quantification (1.84), (1.85) et (1.86) ne sont valables que pour une distribution uniforme de la variable d'entrée. Des procédures numériques ont été proposées pour définir les quantificateurs uniformes optimaux. Max J. avait fourni une quantification uniforme de pas Δ à partir d'une entrée à distribution gaussienne [91].

Paez et Glisson avaient trouvé un pas de taille Δ pour des signaux d'entrée à distribution de Laplace et Gamma [115].

Dans les trois cas, la distribution avait une moyenne nulle et un écart type égal à 1. Les résultats résumés dans le **Tableau 1.2**, ont montré que bien que l'erreur quadratique moyenne de quantification diminue avec l'augmentation du niveau de quantification, sa valeur reste faible dans le cas d'une entrée à distribution uniforme [154].

Tableau 1.2 : Erreurs quadratiques moyennes du quantificateur uniforme optimal avec des entrées à distributions non uniformes.

Niveaux de quantification →	2	4	8	16
Distributions ↓				
Uniforme	$8.33 \cdot 10^{-2}$	$2.08 \cdot 10^{-2}$	$5.21 \cdot 10^{-3}$	$1.30 \cdot 10^{-3}$
Gaussienne	0.363	0.119	$3.74 \cdot 10^{-2}$	$1.15 \cdot 10^{-2}$
Laplace	0.500	0.1963	$7.17 \cdot 10^{-2}$	$2.54 \cdot 10^{-2}$
Gamma	0.668	0.320	0.132	$5.01 \cdot 10^{-2}$

Source : [154], [91], [115].

e- Conclusion

En compression des données images, la faible sensibilité de l'œil humain aux variations de la couleur est exploitée pour réduire la taille des fichiers en effectuant le sous échantillonnage des canaux de chrominances. Cette opération est réalisée dans certains schémas de compression JPEG. Nous avons utilisé la compression par sous échantillonnage des chrominances de taux 4:1:1. Plusieurs méthodes de quantification scalaire existent. Dans la compression JPEG c'est une quantification scalaire uniforme qui est utilisée et que nous avons expérimenté (voir chapitres 4 et 5).

1.5.5.2.2- La quantification de la couleur.

Lorsqu'on applique directement une quantification scalaire sur les composantes R, G, B on ne tient pas compte des propriétés de non-linéarité du système visuel humain. Pour en tenir compte, on transforme séparément chaque composante selon le schéma transformation linéaire ou non linéaire -> quantification linéaire -> transformation inverse. Le système visuel est plus sensible dans le bleu, moyennement dans le vert et peu sensible dans le rouge [43].

Ces transformations fournissent des coefficients plus adaptés à l'œil humain. Par exemple la transformation R G B -> YCbCr fournit une composante luminance Y dont les variations sont plus facilement perçues par l'œil que les variations de chrominances Cb et Cr [6]. Seuls ces coefficients sont quantifiés [119].

1.5.5.3- Les redondances d'une information.

La faisabilité de la compression vidéo et de l'image incombe aux deux types de redondances que sont la redondance statistique et la redondance psychovisuelle.

1.5.5.3.1- La redondance statistique.

Il en existe deux sortes : **la redondance inter-pixel** et **la redondance du codage**. La redondance inter-pixel est la dépendance statistique entre les pixels d'une image ou d'un groupe d'images (vidéo). Ces pixels sont corrélés à divers degrés. On distingue deux catégories de redondance inter-pixel : la redondance spatiale et la redondance temporelle.

La redondance spatiale est la corrélation statistique entre les pixels à l'intérieur d'une image ou redondance intra-image [154]. On sait que les signaux de télévision correctement échantillonnés ont des coefficients d'auto corrélation le long d'une ligne ou d'une colonne (avec un écart de 1 pixel) dont les valeurs sont très proches de 1. Cela veut dire que les valeurs d'intensité des pixels d'une même ligne ou colonne sont très corrélés, ce qui est normal dans la mesure où les valeurs d'intensité dans une image changent de façon continue d'un pixel à un autre. L'étude des fonctions d'auto corrélation effectuée sur plusieurs images par Kretzmer à la fois dans les directions horizontale et verticale a montré qu'elles sont linéaires pour certaines images et exponentielles pour d'autres [76]. La fonction d'auto corrélation est maximale (valeur 1) sur l'axe de symétrie centrale et varie de 0.97 à 0.99 pour un écart de 1 ou 2 pixels. La suppression d'une partie de la redondance spatiale dans une image, permet la compression de l'information qu'elle contient.

La redondance temporelle est la corrélation statistique entre les pixels d'une succession de frames dans une séquence vidéo ou une image temporelle : c'est la redondance inter-frames [154]. Elle est très forte sur des images prises à cadence élevée par une caméra. En 1969 Mounts a expliqué que pour un vidéophone avec un signal à mouvement modéré dans la scène, en moyenne moins de 10% de pixels changent leur niveau de gris entre deux frames consécutives d'une quantité de 1% de l'amplitude maximale [98]. Kretzmer, auparavant avait montré que la corrélation entre deux frames consécutives étaient de 0.80 et 0.86 [76]. Ces résultats montrent que les pixels à l'intérieur des frames successives font apparaître une forte similarité ou corrélation.

La redondance temporelle est exploitée en vidéo dans le codage prédictif compensé en mouvement décrit au paragraphe 1.5.5.4.6.

La redondance du codage existe dans les différents types de codage. Par exemple l'utilisation du codage à longueur variable permet d'obtenir des codes de longueur moyenne plus petite que si le code binaire naturel de longueur fixe était utilisé. Ainsi le code binaire naturel est plus redondant que le code de longueur variable [154]. Les codages de Huffman et arithmétiques fournissent des codes de longueurs différentes et sont utilisés dans le schéma de compression JPEG.

1.5.5.3.2- La redondance psychovisuelle.

Alors que la redondance inter pixel est liée aux données vidéo et image, la redondance psychovisuelle provient des caractéristiques du système visuel humain (SVH). La perception du SVH est différente de celle d'une caméra. Dans ce système, l'information n'est pas perçue de façon égale : une information peut être plus importante qu'une autre [154]. Ceci implique que si on applique moins de données pour représenter moins d'information visuelle importante, la perception n'en sera pas affectée. Dans ce cas on note qu'une telle information visuelle est psychovisuellement redondante et par conséquent sa suppression conduit à une compression de données.

Tableau 1.3 : Présence de redondances dans les images.

Redondances	Spatiale	Temporelle	Codage	Psychovisuelle
Images fixes	Oui	Non	Oui	Oui
Vidéo	Oui	Oui	Oui	Oui

1.5.5.3.3- Conclusion

La compression JPEG tire profit des redondances statistiques dont la redondance spatiale, qui est forte entre les pixels d'une image photographique couleur. La redondance du codage est exploitée dans l'utilisation des codes de compression à longueurs variables que sont les codes de Huffman et les codes arithmétiques utilisés dans la compression JPEG.

1.5.5.4- La compression conservative.

Les techniques conservatives ou réversibles assurent une compression sans perte d'information qui permet de reconstruire les messages dans leur forme initiale exacte par une opération de décompression. Bien qu'elles soient moins intéressantes en terme de taux de compression que les méthodes non conservatives, les techniques réversibles restent très utiles

du fait qu'elles divisent par deux la taille des fichiers. Le modèle d'une source d'information fournit une représentation simplifiée du mode de production des messages par la source. Différents modèles sont donc décrits ainsi que quelques résultats fondamentaux du codage d'une source d'information, de quelques caractéristiques des codes et de principaux types de codage utilisés en compression des données. Cette description est basée essentiellement sur les ouvrages de référence suivants : [89], [88] et [109].

1.5.5.4.1- Modèles de source d'information.

Le modèle fournit de bonnes probabilités d'occurrence pour rendre le codeur efficace. La compression conservative des données utilise la modélisation statistique et la modélisation à base de dictionnaire.

1.5.5.4.1.1- Modèle de source sans mémoire ou à mémoire nulle.

C'est le modèle le plus simple d'une source d'information. Dans ce modèle, les symboles générés par la source sont indépendants les uns des autres. L'extension de ce modèle permet un codage par blocs de symboles [154].

1.5.5.4.1.2- Modèle statistique.

Dans le modèle statistique un seul symbole est lu et codé à chaque fois en utilisant la probabilité d'apparition des caractères.

1.5.5.4.1.3- Modèle par dictionnaire.

Le schéma de compression qui utilise un dictionnaire lit les données et recherche un groupe de symboles apparaissant dans un dictionnaire. Si une chaîne équivalente est trouvée, un pointeur ou un index dans le dictionnaire est émis au lieu du code pour le symbole. Plus l'équivalence est longue plus le taux de compression est convenable. Le dictionnaire est statique en ce qu'il doit accompagner le texte, ajoutant de ce fait un sur-coût au texte compressé. C'est pour cela qu'un schéma de dictionnaire adaptatif est utilisé, basé sur le principe de remplacements d'acronymes dans la littérature technique [88].

1.5.5.4.1.4- Modèle auto régressif.

Ce modèle est défini par l'équation suivante :

$$S_j = \sum_{k=1}^{k=l} a_k S_{ik} + x_j \quad (1.91)$$

où s_j est le symbole source présent, s_{ik} les l symboles observés, a_k des coefficients et x_j l'actuelle entrée du modèle.

Lorsque $l = 1$, le modèle auto régressif est d'ordre 1 ce qui signifie que le symbole source

courant est une fonction linéaire de son précédent.

1.5.5.4.1.5- Modèle de Markov.

De nombreuses sources de données sont dépendantes par nature. Cela veut dire que la source a une mémoire en ce sens que l'état précédent a une influence sur l'état présent. Par exemple il existe une corrélation inter pixels dans les images numériques : les pixels ne sont pas indépendants. De même il existe des dépendances entre les caractères dans un texte. Le modèle permet de refléter ce type de dépendance. Une source de Markov d'ordre 1 est caractérisée par l'équation de probabilités conditionnelles ou de transition suivante :

$$p(s_j) = p(s_j / s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{il}) \quad (1.92)$$

les symboles $s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{il}$ sont choisis dans la source S d'information.

1.5.5.4.1.6- Conclusion

Le codeur JPEG utilise les modèles statistique et de Markov des données.

1.5.5.4.2- Différents types de codes.

Les codes blocs sont des codes qui associent à chaque symbole source un mot de code fixé.

Un code exclusivement décodable est un code décodable sans ambiguïté. Un code non singulier est un code dont tous les mots de code sont distincts. Un code décodable exclusivement est instantané s'il est possible de décoder chaque mot de code dans une séquence de symbole sans savoir les mots de code qui suivent. Dans ce cas aucun mot de code n'est le préfixe de quelques autres mots de code.

Le code compact ou code à redondance minimale a une longueur minimale parmi tous les autres codes exclusivement décodables [154].

1.5.5.4.3- Codages statistiques.

1.5.5.4.3.1- Code de Shannon-Fano.

Claude Shannon de Bell Labs et R. M. Fano du M. I. T. [88] ont développé presque en même temps la méthode de compression basée sur la connaissance de la probabilité d'occurrence de chaque symbole dans un message. Etant donné ces probabilités, une table des codes peut être construite. Ces codes possèdent les propriétés suivantes :

- des codes différents ont un nombre de bits différent.
- les codes des symboles de faible probabilité ont plus de bits et les codes de probabilité élevée ont moins de bits.
- bien que des codes aient des longueurs différentes, ils peuvent être décodés de façon unique.

La production des codes de longueur variable rend la compression des données possible. Lorsque ces codes sont organisés sous forme d'arbre binaire, leur décodage devient plus

facile. Marc Nelson présente l'algorithme dans son ouvrage [88].

1.5.5.4.3.2- Codes de Huffman.

Le codage de Huffman de base [63] s'appuie sur un modèle d'ordre 0 (sans mémoire) qui est sans contexte. Il est optimal. Il fournit des codes de longueur variable. Tant que ce codage est limité à des fichiers de petite taille, le problème de transmission des tables de codage au décodeur n'affecte pas considérablement le taux de compression. Mais le nombre de données de modélisation augmente lorsqu'on passe d'un modèle d'ordre 0 à un modèle d'ordre 1, ce qui annule le gain obtenu en taux de compression. Le codage de Huffman adaptatif permet d'utiliser un modèle d'ordre plus élevé sans ajouter des données de modélisation (supplémentaire). Une description détaillée se trouve dans [88] et [89].

1.5.5.4.3.3- Codes arithmétiques.

Les codages de Shannon-Fano [37] et de Huffman [63] sont deux approches différentes de générer des codes de longueur variable sachant une table de probabilités pour un ensemble de symboles donné. Leur limite réside dans l'utilisation d'un nombre entier de bits pour chaque code. Ils ne sont donc pas optimaux, mais en constituent une meilleure approximation.

Le codage arithmétique [151], plus efficace et plus complexe ne produit pas un seul code pour chaque symbole. Mais il produit un code pour un message entier. Chaque symbole ajouté à un message modifie de façon incrémentale le code de sortie. Ainsi l'effet réel de chaque symbole d'entrée sur le code de sortie peut être un nombre fractionnel de bits au lieu d'un nombre entier. De cette manière le codage arithmétique (seul) approche la quantité d'information exacte d'un message. Le codage arithmétique est orienté flux et non blocs [89].

Pour son efficacité ce codage a été adopté par les normes JBIG et JPEG. Il a été appliqué avec succès au codage d'images à deux niveaux [78].

1.5.5.4.4- Codage par dictionnaire.

1.5.5.4.4.1- Code LZ77.

Ce code utilise un dictionnaire adaptatif et permet d'atteindre un taux de compression plus important. L'algorithme LZ77 forme un dictionnaire constitué de toutes les chaînes de caractères présentes dans la fenêtre sur le flot d'entrée déjà lu [155]. Lorsque de nouveaux groupes de symboles seront lus, l'algorithme recherchera des équivalences avec les chaînes de caractères trouvées dans la fenêtre des données déjà lues. Ces équivalences sont codées sous forme de pointeurs qui sont envoyés vers le flux de sortie.

1.5.5.4.2- Code LZ78.

L'algorithme LZ78 construit son dictionnaire à partir de tous les symboles déjà rencontrés dans le texte d'entrée [156]. Chaque symbole est ajouté en suivant un processus incrémental : la 1^{ère} fois qu'il apparaît, son 1^{er} caractère est ajouté au dictionnaire, puis à la deuxième apparition les deux premiers, ainsi de suite jusqu'au symbole entier à la i^{ème} apparition. Bien que les chaînes de LZ78 soient extrêmement longues, le codage fournit des taux de compression élevés. Terry Welch a fourni une adaptation de ce codage qui est plus efficace [149], [88]. C'est le codage LZW.

1.5.5.4.3- Codage à longueur de plage (C.L.P.) ou Run Length Encoding RLE.

Il est basé sur le modèle de Markov du premier ordre. La plage indique la répétition d'un symbole tandis que la longueur de plage représente le nombre de symboles répétés ou le nombre de symboles consécutifs de même valeur. Au lieu de coder ces symboles consécutifs, ce sont plutôt la longueur de plage et la valeur de ces symboles consécutifs qui le sont, rendant ainsi l'opération efficace en terme de taux de compression [154].

La CLP à une dimension est utilisée pour le codage des coefficients transformés par la TCD, quantifiés et organisés selon un parcours en zigzag. Ils sont constitués d'un grand nombre de coefficients successifs nuls (plage de zéros) qui sont encadrés par quelques valeurs non nulles.

La CLP est utilisée dans le codage d'images fixes. Une variante du codage CLP [65], [28] est employée dans la norme JPEG.

1.5.5.4.5- Le codage prédictif.

Présenté pour la première fois en 1952 par Oliver, Kretzmer et Harrison, le codage prédictif ou différentiel code non pas le signal lui-même, mais la différence entre le signal et sa prédiction [76], [112], [55]. En utilisant la corrélation temporelle et/ou spatiale dans la prédiction, la variance du signal de différence peut être plus petite que celle du signal original ce qui rend alors le codage différentiel beaucoup plus efficace.

Une prédiction linéaire optimale peut être formulée de la manière suivante :

$$\bar{z}_i = \sum_{j=1}^{j=n} a_j \bar{z}_{i-j} \quad (1.93)$$

- z_i est une variable aléatoire du processus aléatoire temps discret z .
- \bar{z}_{i-n} sont des observations précédentes qui pourraient former une prédiction de z_i notée \bar{z}_i .
- a_j sont des coefficients réels.

La sortie du prédicteur est une combinaison linéaire des n observations précédentes.

L'erreur quadratique moyenne de prédiction est une mesure de la qualité de l'efficacité du prédicteur. Elle est donnée par la relation suivante :

$$EQM_P = E[(e_p)^2] = E[(z_i - \bar{z}_i)^2] \quad (1.94)$$

avec e_p l'erreur de prédiction.

Une prédiction linéaire optimale a une erreur quadratique moyenne minimale.

Le codage différentiel joue un rôle important en codage d'image et de la vidéo. Elle est utilisée par la norme JPEG pour le codage des coefficients DC du bloc 8x8 quantifié et linéarisé. La compensation de mouvement, utilisée dans les normes de compression H.261, H.263, MPEG 1 et MPEG 2, est essentiellement une technique de codage prédictive appliquée aux séquences vidéos en impliquant les vecteurs de mouvement.

1.5.5.4.6- La compensation de mouvement.

C'est une technique de codage prédictive basée sur le déplacement, développée par Rocca F., Haskell et Limb en 1972 [128], [56]. Elle anticipe le déplacement d'un objet à partir de la connaissance des images antérieures et cherche à mettre en correspondance les parties en mouvement de l'image présente et celles de l'image précédente[51].

1.5.5.4.7- Le codage dynamique.

Le codage dynamique consiste en une combinaison de plusieurs techniques de compression et de stratégies de segmentation. Pour une application donnée, ces deux degrés de liberté sont associés pour produire un profil spécifique qui satisfait les exigences de l'application. Il ne s'agit pas d'un algorithme de compression particulier mais plutôt d'un processus permettant à un encodeur de choisir des modèles appropriés pour décrire des portions de données obtenues selon une procédure pré-définie ou automatique. Reusens et al. en ont fait une description [126].

1.5.5.4.8- Conclusion.

Le **Tableau 1.6** résume les différents codages décrits dans ce paragraphe. Il existe de nombreuses techniques de codage de compression sans perte. Le codage dynamique introduit permet de montrer d'autres méthodes de compression adaptées au multimédia. Il ne fait pas l'objet de notre préoccupation. Les codages prédictif et à longueur de plage sont utilisés dans la norme JPEG, support de notre travail.

Tableau 1.4 : Codages de compression usuels.

Types de codages	Exemples	Utilisation
Codages statistiques	Shannon – Fano - Huffman - Arithmétique	Textes Images
Codages à dictionnaires	LZ77 - LZ78 LZW LZSS RLC ou RLE	Textes Images Textes Images
Codage prédictif	Codage prédictif différentiel.	Images fixes Vidéo
Codage dynamique	Ensemble de techniques choisies de façon adaptative	Textes Images fixes Vidéo

1.5.6- Le codage de canal.

1.5.6.1- Introduction.

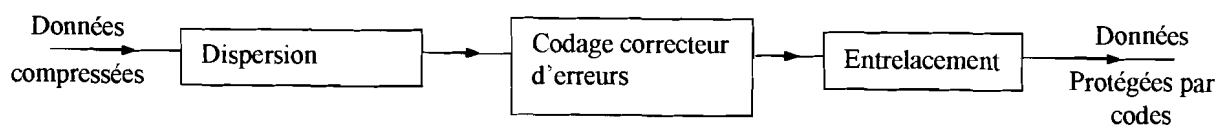
Un des principaux problèmes rencontrés lors de la transmission des données vient du fait que la probabilité d'une erreur de transmission ou de défaillance d'un équipement est en général beaucoup plus grande que les probabilités d'erreurs ou de défaillances compatibles avec le bon fonctionnement du système informatique de l'utilisateur. Ceci conduit à prendre des mesures destinées à détecter les erreurs de transmission ainsi que les défaillances des équipements et à prévoir les techniques de correction appropriées afin que l'information échangée entre les utilisateurs soit exempte de défauts. Le besoin en stockage fiable ou en transmission vidéo et audio haut-débit fiable fait que les applications de codage, de contrôle d'erreurs deviennent omniprésentes.

Le paragraphe 1.5.6 présente quelques principes de base du codage de canal.

1.5.6.2- Modélisation du codage de canal [146]

Les opérations de codage de canal ont pour but de préparer le signal avant l'émission. Elles peuvent être modélisées par les trois (3) opérations que sont la dispersion d'énergie (pour les applications vidéo), le codage détecteur et correcteur d'erreurs et l'entrelacement:

Figure 1.10 : Modèle du codage de canal.



Source : [127]

1.5.6.3- Principes de base du codage de canal

Le codage de canal introduit de la redondance à l'information comprimée en vue non seulement de protéger les données contre les erreurs, mais aussi de faciliter la détection et la correction de ces dernières. L'introduction de cette redondance se fait de manière structurée sans compromettre le gain en bande passante obtenu lors de la phase de compression.

Le codage de canal se fonde sur les propriétés de l'algèbre linéaire, principalement la notion du champ de Galois $GF(p)$ [114]. Dans ce champ binaire les opérations $+$ et $*$ sont modulo 2. Les mots de code peuvent être représentés par des polynômes dont les coefficients sont les bits 0 ou 1 et qui constituent les éléments d'un message binaire. Un message binaire peut être considéré comme un vecteur à une dimension ou à deux dimensions s'il se présente sous la forme d'un tableau ou d'une matrice de bits de k lignes et n colonnes. Les propriétés d'orthogonalité de 2 vecteurs ou matrices sont à la base du principe de détection et de correction d'erreurs lors du décodage des données. En effet lorsque le produit de la matrice génératrice du code et de la matrice de contrôle d'erreurs est nul (donc deux matrices orthogonales !), il n'y a pas d'erreur détectée ; par contre s'il est non nul, il y a erreur et le processus de correction peut être enclenché.

De nombreux codes de détection et de correction d'erreurs existent ainsi que les méthodes sur lesquelles ils s'appuient. On trouve une description détaillée dans des ouvrages de références [108], [118], [85], [26].

1.5.6.4- Conclusion

Le codage de canal permet la protection des données compressées en introduisant dans ces dernières des bits redondants. Selon les applications, divers codes de détection et de correction sont utilisés.

1.5.7- L'entrelacement

Dans un système de télécommunications, on constate souvent que les erreurs ne se produisent pas de manière isolée, mais surgissent par rafales. Pour éviter les erreurs consécutives qui dépasseraient la capacité de correction du décodeur, on modifie l'ordre de transmission des octets de manière à éloigner les bits consécutifs. De cette manière, une salve d'erreurs prolongée affecte les octets répartis dans deux paquets différents, au lieu de toucher un plus grand nombre d'octets dans un seul paquet [127]. Une technique de l'entrelacement consiste en ceci :

- Avant la transmission, on mémorise une suite de mots de code dans une mémoire en forme de matrice de m lignes et n colonnes.

- On y fait entrer, ligne après ligne, m mots de code de longueur n . Puis on lit la mémoire colonne par colonne afin de transmettre tous les symboles.

- A la réception, on fait entrer le train numérique dans une matrice identique, colonne par colonne et le message de données est restitué en lisant la matrice ligne par ligne [85].

1.6- LA TRANSMISSION DES DONNEES

A la sortie du codeur de canal, les données numériques doivent être transmises aux utilisateurs qui se trouvent à des distances diverses. A ce stade du traitement de l'information, des procédures pour la transmission sont mises en œuvre pour assurer à l'utilisateur une bonne qualité de service. Les utilisateurs peuvent recevoir l'information en mode de transfert simplex (c'est le cas des images de télévision, des émissions de radio diffusion, du fax, etc.) ou en mode full-duplex (la téléphonie, données informatiques sur Internet lorsqu'il s'agit de transfert de fichiers sur demande, causerie entre correspondants en messagerie électronique, etc.). Qu'il y ait interactivité ou non, la transmission des données est une phase de la communication qui doit s'entourer de méthodes de transfert efficaces qui assurent presque l'intégralité de l'information transmise et reçue.

Qu'il s'agisse de la communication téléphonique, de l'échange des données entre ordinateurs proches, éloignés et situés dans un même service, une même ville, un pays ou plusieurs pays, des règles bien définies gèrent cet échange. A ce niveau, les réseaux informatiques et ceux de télécommunications jouent un rôle important dans l'organisation du transfert des données.

La raison d'être des réseaux est de faire communiquer plusieurs ordinateurs ensemble ou plusieurs hommes ensemble. Divers protocoles sont utilisés pour assurer la communication entre les ordinateurs. Les protocoles définissent la façon dont la transmission se déroule. Les communications étant souvent internationales, il n'existe pas de protocole universel [39]. Il existe plusieurs protocoles dont certains sont plus utilisés que d'autres.

D'importants détails sur les réseaux et protocoles figurent dans des ouvrages de références [123], [124].

1.7- L'EVALUATION DE LA QUALITE DES IMAGES RECONSTRUITES.

1.7.1- Introduction.

La qualité d'une image reconstruite est un facteur important dans l'appréciation de l'efficacité d'un schéma de compression. Par exemple, lorsque deux méthodes de compression fournissent la même quantité de données compressées, la meilleure est celle qui a la bonne qualité d'image. Les images ou les séquences d'images vidéo produites étant

destinées à des besoins humains, on devrait s'attendre à ce qu'une métrique de qualité prenne en compte la façon dont le système visuel humain perçoit les objets.

Qu'il s'agisse de la compression vidéo ou d'image fixe, la littérature regorge de mesures de qualité visuelle pour évaluer non seulement la qualité de l'image, mais aussi pour évaluer la capacité des codeurs en terme de compromis taux de compression / qualité [10], [8], [2], [35]. Yun Q. S. et Huifang S. [154] ont identifié deux principales catégories de métriques de qualité visuelle : les mesures de qualité subjective et les mesures de qualité objective. Elles sont décrites dans les paragraphes qui suivent.

I.7.2- Les mesures de qualité subjectives.

Une des méthodes utilisées pour juger de la qualité fait appel à des observateurs humains. Une séquence vidéo est produite et dans laquelle on fait varier des paramètres de codage. Les observateurs sont alors invités à évaluer de façon subjective sur la base d'une échelle de mesure à cinq (5) niveaux, le degré de dégradation [130], [20].

Une autre méthode considère une image toute entière. Les images sont générées avec différents paramètres de codage. En fixant certains et en variant d'autres paramètres, la qualité résultante peut être utilisée pour étudier l'effet de l'un des paramètres (ou d'un ensemble de paramètres) sur l'encodage. Gonzalez et Woods l'ont utilisé pour étudier l'effet de variation des nombres de niveau de quantification sur la qualité de l'image [47].

On peut identifier les images avec la même mesure subjective à partir d'un ensemble d'images. A partir de cet ensemble, on produit dans l'espace des paramètres d'encodage, des courbes d'iso préférence utilisées pour étudier l'effet des paramètres sous investigation. Huang en a fait une application en étudiant l'effet de la variation à la fois de la résolution d'image et des nombres de niveaux de quantification sur la qualité d'image [62].

L'évaluation subjective est coûteuse en nombre d'images, d'observateurs et en temps [130], [59] et [148]. Nous n'avons pas utilisé ces mesures dans notre travail.

I.7.3- Les mesures de qualité objectives.

Afin de mesurer la fidélité de l'image de sortie par rapport à l'image d'entrée, on utilise dans la pratique des formules mathématiques simples qui permettent une mesure au premier ordre des dégradations introduites par les systèmes dans l'espace image. Ces critères sont présentés dans les ouvrages classiques de traitement d'images [129], [121], [113].

I.7.3.1- Mesure de distance.

La qualité d'une image est déterminée par la différence ou encore par la distance entre l'image de sortie et l'image d'entrée [113]. Soit une image \tilde{F} dont on veut évaluer la qualité par rapport à une image F de taille N par M .

* La première classe de mesure de distance, entre \tilde{F} et F est définie par :

$$d \{F, \tilde{F}, q\} = \left\{ \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N |F(j,k) - \tilde{F}(j,k)|^q \right\}^{1/q} \quad \text{pour } q \geq 1 \quad (1.95)$$

Il est évident que la distance est minimale si $F(i,j) = \tilde{F}(i,j)$, pour tous les (i,j) ; donc \tilde{F} n'est pas dégradée par rapport à F . A partir de différentes valeurs de q dans l'équation (1.95), on obtient :

$$q = 1 \quad d \{F, \tilde{F}, 1\} = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N |F(j,k) - \tilde{F}(j,k)| \quad (1.96)$$

qui est la somme totale de la valeur absolue des différences.

$$q = 2 \quad d \{F, \tilde{F}, 2\} = \left\{ \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N |F(j,k) - \tilde{F}(j,k)|^2 \right\}^{1/2} \quad (1.97)$$

qui est la distance Euclidienne.

$$q = \infty \quad \lim_{q \rightarrow \infty} (d \{F, \tilde{F}, q\}) = \text{Max}_{j,k} |F(j,k) - \tilde{F}(j,k)| \quad (1.98)$$

qui est l'erreur maximale de reconstruction.

Propriété : si $q_1 > q_2 \geq 1$, alors :

$$d \{F, \tilde{F}, q_1\} \leq d \{F, \tilde{F}, q_2\} \quad (1.99)$$

L'un des inconvénients majeurs de cette mesure est qu'elle dépend du nombre de pixels dans l'image, c'est pour cela que l'on utilise une mesure ramenée au pixel.

* La deuxième classe de mesure de distance ou norme L_q est définie par :

$$L_q \{F, \tilde{F}\} = \left\{ \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N |F(j,k) - \tilde{F}(j,k)|^q \right\}^{1/q} \quad \text{pour } q \geq 1 \quad (1.100)$$

A partir des différentes valeurs de q dans L_q , on obtient :

$$q = 1 \quad L_1 \{F, \tilde{F}\} = AD = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N |F(j,k) - \tilde{F}(j,k)| \quad (1.101) \quad \text{qui est la}$$

différence moyenne ou AD (Average Difference).

$$q = 2 \quad L_2\{F, \tilde{F}\} = \text{RMSE} = \left\{ \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N |F(j,k) - \tilde{F}(j,k)|^2 \right\}^{1/2} \quad (1.102) \text{ qui est la}$$

racine de l'erreur quadratique moyenne ou RMSE ("Root Mean Square Error").

Souvent, au lieu de L_2 , on utilise aussi L_2^2 qui est l'erreur quadratique moyenne ou MSE ("Mean Square Error").

$$(L_2\{F, \tilde{F}\})^2 = \text{MSE} = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N |F(j,k) - \tilde{F}(j,k)|^2 \quad (1.103)$$

Ces deux mesures ont les mêmes propriétés pour leurs minima et maxima, cependant la MSE est plus sensible aux grandes différences que la RMSE.

D'une manière générale, on retrouve plus souvent dans la littérature l'utilisation de cette classe de mesure que la première, car la norme L_q ne dépend pas du nombre de pixels dans l'image.

1.7.3.2- Critères issus du traitement du signal.

Si l'on considère que l'image originale est un signal en entrée d'un système physique, $f(j,k)$ et que l'image dégradée correspond au signal de sortie du système, $g(j,k)$, alors l'image de différence peut être considérée comme étant un bruit, $e(j,k)$, c'est-à-dire :

$$g(j,k) = f(j,k) + e(j,k) \quad (1.104)$$

Dès lors, il est possible d'exprimer le rapport signal à bruit ("Signal Noise Ratio") d'un tel système :

$$\text{SNR} = 10 \text{Log}_{10} \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N [g(j,k)]^2}{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N [e(j,k)]^2} \quad (\text{dB}) \quad (1.105)$$

Une autre manière d'exprimer ce rapport est d'utiliser une mesure de distance du type MSE, d'où :

$$\text{SNR} = 10 \text{Log}_{10} \frac{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N [g(j,k)]^2}{\text{MSE}} \quad (\text{dB}) \quad (1.106)$$

A partir de là, on définit le "Peak Signal Noise ratio" ou PSNR :

$$\text{PSNR} = 10 \text{Log}_{10} \frac{(\text{valeur max du signal})^2}{\text{MSE}} = 10 \text{Log}_{10} \frac{255^2}{\text{MSE}} \quad (\text{dB}) \quad (1.107)$$

Le PSNR est couramment utilisé dans la littérature par les électroniciens,

puisqu'il représente la puissance du signal et celle du bruit.

1.7.3.3- Conclusion.

Nous avons présenté là quelques métriques de qualité. La liste n'est pas exhaustive. Pour notre travail nous avons utilisé les métriques issues du traitement de signal que sont l'erreur quadratique moyenne (EQM ou MSE) et le rapport signal à bruit (RSB).

1.8- LES NORMES DE COMPRESSION.

1.8.1- Introduction.

De nombreux standards de codage d'images existent. Certains ne traitent que des images fixes (JPEG, JPEG-LS, MPEG-LC, VTC, ...) tandis que d'autres s'occupent en même temps de la vidéo et des images fixes : H261, MPEG 1, MPEG 2, MPEG-4. De nombreuses références développent le codage vidéo [57], [66], [97], [100]. Les travaux de Santa-Cruz et al. [131] sur la comparaison des performances des standards d'images fixes en donnent une description détaillée et les limites de chaque standard. Nous présentons quelques normes de compression d'images fixes.

1.8.2- Les normes de codage des images fixes.

1.8.2.1- La norme MPEG-4 VTC.

C'est l'algorithme dans la norme MPEG-4 [67] pour compresser les textures visuelles et les images fixes qu'on trouve dans les modèles de photo 3-D, les mailles animées, etc. ou de simples images fixes. L'algorithme est basé sur la transformée en ondelettes discrètes. Une caractéristique exceptionnelle de MPEG-4 VTC est sa capacité à coder arbitrairement des objets. Plusieurs objets peuvent être codés séparément, à différentes qualités possibles, puis reconstitués au décodeur pour former l'image reconstruite.

1.8.2.2- Le standard PNG (Portable Network Graphics).

C'est une recommandation W3C pour le codage d'images fixes, mise au point pour remplacer la norme GIF, et possédant plus de fonctionnalités [153]. L'algorithme utilise un schéma prédictif et le codage entropique. La prédiction est faite sur les trois plus proches voisins et il y a cinq prédicteurs qui peuvent être sélectionnés ligne par ligne. Le codage entropique utilise l'algorithme LZ77 associé au codage de Huffman. Le PNG effectue une compression sans perte et traite des images à niveau de gris et en couleur.

1.8.2.3- La norme JPEG –2000.

C'est la norme de codage d'images fixes la plus récente de l'ISO/ITU-T [72]. Elle fournit non seulement une excellente efficacité de codage, mais aussi une bonne qualité d'image. Elle offre la possibilité d'accéder à l'image fixe compressée. Santa Cruz et al ont montré, dans leur étude comparative des caractéristiques du standard JPEG-2000 et d'autres anciens standards, la supériorité de JPEG-2000 en caractéristiques et en performance de taux de distorsion [131].

JPEG-2000 est basée sur la transformation en ondelettes discrètes [7], [80], la quantification scalaire, la modélisation du contexte, le codage arithmétique et le taux d'allocation post-compression. Elle permet un accès aléatoire aux données (à cause du codage indépendant des blocs et de la structure en paquets) et un codage d'images par régions d'intérêt [24].

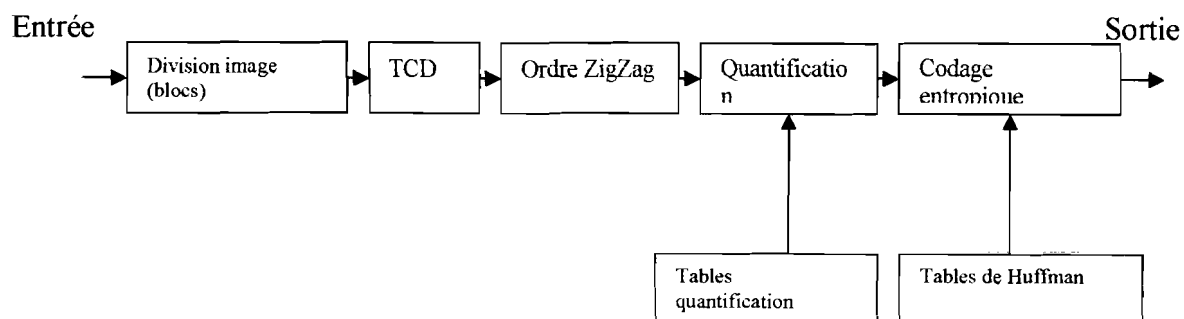
1.8.2.4- JPEG : Norme de codage d'images fixes.

Mise au point par l'UIT et l'ISO en 1992, la norme JPEG 10918-1 ou recommandation T.81, est une norme internationale de compression d'images fixes. Elle assure un codage avec perte et sans perte d'images fixes et est constituée de 4 modes d'opération [21], [154], [30], [117] : le mode séquentiel à base de TCD , le mode progressif à base de TCD, le mode sans perte et le mode hiérarchique.

L'algorithme pour le codage avec perte est basé sur un schéma de codage par transformée en cosinus discrète. C'est le schéma de base de JPEG et suffit à plusieurs applications. Afin de satisfaire les besoins en compression sans perte comme dans le cas des images médicales, un schéma sans perte s'appuyant sur le codage prédictif a été développé. On trouve une description de ces 4 modes dans les ouvrages de Pennebaker et Mitchell [117] et [139] et dans les documents de l'ITU-T [21].

La **Figure 1.11.** le synoptique du codage JPEG séquentiel à base de TCD.

Figure 1.11: Algorithme de compression JPEG séquentiel.



Source : [89]

1.8.2.5- Tables de quantification et facteur de qualité.

Le standard JPEG utilise des tables de quantification non normatives(ANNEXE C), établies à partir des critères expérimentaux psychovisuels [89]. Elles sont donc susceptibles d'être modifiées par un utilisateur. Il est alors possible d'utiliser un générateur de matrices de quantification $Q(i,j)$ qui dépend d'une variable appelée facteur de qualité f_q . Ce générateur est donné par la formule (1.108) :

$$Q(i, j) = 1 + \left(1 + \alpha(i^n + j^n)\right) f_q \quad (1.108)$$

où α et n sont deux paramètres qui permettent d'ajuster les variations des coefficients. Dans notre travail ils valent l'unité.

Le facteur de qualité est une variable qui détermine la différence entre des bandes adjacentes de même niveau de quantification. Plus f_q est élevé, plus l'image reconstruite est dégradée et plus le taux de compression sera élevé.

1.8.3- Conclusion partielle

Plusieurs normes de compression d'images fixes existent. La norme JPEG 2000 est très efficace pour la compression des images fixes du genre images photographiques couleurs. Elle est conçue pour résister aux erreurs. Elle serait donc mieux indiquée pour une compression de données images fixes dans le cadre de l'enseignement à distance avec transmission sur des supports sujets à différents bruits.

Cependant, son apparition récente sur le marché justifie son absence dans de nombreuses applications, d'où l'utilisation dans notre travail de la norme JPEG, plus présente.

1.9- CONCLUSION DU CHAPITRE 1.

Ce long examen des principes usuels en traitement de données multimédias témoigne de la complexité du traitement de l'information entre l'émetteur et le récepteur. Bien que cette présentation ne soit pas exhaustive, les principales étapes décrites ont pour but de montrer les défauts que provoquent les systèmes d'acquisition qui influent sur la qualité des données reconstruites, les erreurs introduites par des méthodes de compression comme le sous échantillonnage et la quantification linéaire.

L'application de la compression JPEG sur une image photographique couleur fournit une image dont le RSB n'est pas grande. La méthode JPEG induit donc des erreurs sur l'image traitée.

CHAPITRE 2 :

ANALYSE ET TRAITEMENT D'IMAGES PHOTOGRAPHIQUES COULEURS

2.1.- INTRODUCTION.

L'obtention de l'image d'un objet ou d'une scène se fait par un système d'acquisition (optique ou autre) qui présente le plus souvent des imperfections. Des conditions d'acquisition extérieures au système notamment les conditions atmosphériques, les difficultés de manipulation du dispositif par l'expérimentateur, influencent la prise de vue de la scène. Lorsque les données ainsi acquises doivent être traitées par un codeur, des perturbations liées à la structure même du codeur accroissent la distance entre les données réelles et celles qui seront reconstruites. Compte tenu de ces considérations, il semble donc impossible de restituer une image parfaite à la sortie d'un codeur. La somme de ces informations indésirables introduites dans l'image constituent le bruit. Toutefois la minimisation des défauts des dispositifs d'acquisition permet d'obtenir des images de qualité acceptable.

Afin de se rapprocher de l'image réelle, de nombreuses méthodes d'amélioration d'images ont été conçues à cet effet.

Dans ce chapitre nous rappelons quelques méthodes usuelles d'amélioration d'images en parlant essentiellement des méthodes de rehaussement et des méthodes de restauration d'images dégradées. Nous présentons quelques bruits couramment utilisés en traitement d'images. Les méthodes de restauration d'images dégradées sont nombreuses. Nous ne parlons que de la restauration par filtrage inverse et du filtrage de Wiener.

2.2.- LE BRUIT DANS L'IMAGE.

2.2.1- Définition.

Le bruit est une perturbation à l'intérieur d'une bande de fréquence d'intérêt, ou la somme d'une énergie indésirable ou perturbatrice introduite dans un système de communication à partir des sources humaines ou naturelles [46].

Dans le cas d'une image, le bruit peut provenir de plusieurs sources comme le détecteur électrique (caméra), le système optique (mal conçu ou mal réglé) d'un appareil photographique, le grain de film photographique, les erreurs provoquées par le canal de transmission [122], [103].

Le bruit issu d'un détecteur ou du canal de transmission apparaît le plus souvent comme des variations discrètes de pixels isolés qui ne sont pas spatialement corrélés. Les pixels erronés sont visiblement différents de leurs voisins.

Il existe différentes sortes de bruits dont les principaux sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau 2.1 : Principaux types de bruits.

Bruits des fonctions mathématiques.	Bruits des codeurs.	Bruits des canaux de transmission.
-générateurs de bruits aléatoires.	-bruits des transformations des espaces de couleurs.	-bruit thermique.
-	-bruit d'échantillonnage.	-turbulences atmosphériques.
-	-bruit de quantification.	-
-	-bruits d'acquisition (mouvement de la caméra, défocalisation).	-

2.2.2- Le bruit dans une chaîne de traitement d'images fixes : cas du codeur JPEG.

Dans le schéma de codage JPEG mode séquentiel, certaines étapes de la compression sont le siège du bruit. Mis à part les dégradations provoquées par le système d'acquisition de l'image à savoir la dé-focalisation, le mouvement de la caméra ou de l'objet pendant la prise de vue, l'image numérique présente à l'entrée du codeur JPEG va subir plusieurs actions dégradantes comme :

- L'action de la transformation mathématique des espaces de couleurs RGB -> YCbCr.
- L'effet du sous échantillonnage des canaux de chrominances. Pour le mode séquentiel sur lequel se base nos travaux, c'est le rapport 4 :1 :1 que nous avons utilisé.
- L'action de la TCD sur les coefficients comme les arrondis des coefficients fréquentiels calculés avant la quantification.

- L'action de la quantification qui réduit considérablement les coefficients de hautes fréquences induit un bruit blanc dans l'image.

Une évaluation des effets de ces dégradations a été effectuée dans nos travaux afin de mieux apprécier les effets d'autres bruits additifs qui perturbent les données images lors de la transmission de l'information.

2.2.3- Quelques modèles de dégradations et leur caractérisation.

Des densités de probabilités ainsi que des fonctions de transfert des dégradations sont décrits dans les paragraphes qui suivent.

2.2.3.1- Modèle de système optique.

Dans les systèmes optiques possédant des ouvertures, on observe un phénomène de diffraction de la lumière, qui se manifeste souvent par des côtés flous sur des régions de l'image. De nombreuses références traitent de ce phénomène [14], [48]. Un système optique possède des aberrations lorsqu'il forme d'un objet une image qui n'est pas nette. La relation entre l'intensité lumineuse $I_i(x_i, y_i)$ de l'image et celle $I_o(x_o, y_o)$ de l'objet est donnée par l'équation de convolution suivante [122] :

$$I_i(x_i, y_i) = \iint_{\infty} h_s(x_i - x_o, y_i - y_o) I_o(x_o, y_o) dx_o dy_o \quad (2.1)$$

où $h(x_i, y_i)$ représente l'intensité lumineuse correspondant à un point lumineux source.

La transformée de Fourier de la relation (2.1) donne :

$$I_i(u, v) = H_s(u, v) \times I_o(u, v) \quad (2.2)$$

avec $H_s(u, v)$ la fonction de transfert optique et $|H_s(u, v)|$, la fonction de transfert de modulation du système optique.

Le système de formation d'image optique le plus usuel est la lentille circulaire mince.

2.2.3.2- Modèle de bruit du photo-détecteur.

Un photo-détecteur agit comme un convertisseur d'intensité lumineuse en courant électrique. Ce dernier crée un courant qui passe à travers un filtre électrique et produit une tension aux bornes de la résistance de charge. Le bruit le plus courant associé au système d'imagerie électronique est le bruit thermique. Il provient des fluctuations aléatoires des électrons dans les éléments résistifs des amplificateurs de ces détecteurs [73], [111].

Le bruit thermique peut être modélisé par un processus aléatoire gaussien additif indépendant du champ d'image détecté. Le photo-détecteur est remplacé par une source de courant idéale i_p dont le courant est linéairement proportionnel à l'intensité lumineuse incidente. La contribution du bruit thermique peut être modélisée par un courant i_T en parallèle. Ce courant représente un processus aléatoire gaussien à moyenne nulle avec une variance donnée par la relation (2.3) :

$$\sigma_{i_T}^2 = \frac{N_T}{R} \quad (2.3)$$

où N_T représente la puissance du bruit thermique à la sortie du système, donnée par la relation (2.4) selon [120] :

$$N_T = 2kT \int_{-\infty}^{+\infty} |H_E(f)|^2 df \quad (2.4)$$

où k est la constante de Boltzmann, T la température absolue, $H_E(f)$ la fonction de transfert équivalente du filtre du photo-détecteur électrique et de la résistance de charge.

Si le courant du détecteur est constant, la densité de probabilité du courant de sortie sera :

$$p(i) = \left[2\pi\sigma_{i_T}^2 \right]^{-1/2} \exp \left[-\frac{(i-i_s)^2}{2\sigma_{i_T}^2} \right] \quad (2.5)$$

où i_s est le courant moyen équivalent en sortie produit par le courant i_p du photo-détecteur passant à travers le filtre.

Si le courant émis n'est pas constant, pour de faibles intensités lumineuses, le nombre d'électrons émis par le photo-détecteur est régi par une densité de probabilité de Poisson [41] donnée par (2.6) :

$$\Pr \left(i_P = \frac{jQ}{\tau} \right) = \frac{(n_s + n_H)^j \exp[-(n_s + n_H)]}{j!} \quad (2.6)$$

avec j un nombre entier positif, n_s le nombre d'électrons émis et n_H le nombre moyen d'électrons émis causé par le courant noir du détecteur et des radiations parasites.

2.2.3.3- Modèle de bruit de grain de film.

Lors de l'exposition et du développement d'un film photographique, les grains d'halogénure d'argent qui sont exposés à une quantité suffisante sont convertis en argent métallique. Cette conversion ne se fait pas en conservant la même taille et la

même forme des grains d'argent. En plus ces grains sont distribués de façon aléatoire sur la surface du film. Cette formation irrégulière des grains d'argent constitue le bruit de grain de film. Il conduit à une incertitude dans la quantité de lumière qui passe à travers une diapositive ou réfléchi par un imprimé [95], [142].

Selwyn a montré que les fluctuations dues au bruit de grain de film peuvent être modélisées par une distribution gaussienne (2.7) de la densité de film exposé $D(x,y)$ pour une densité moyenne $u_D(x,y)$ avec une variance $\sigma_D^2(x,y)$ [132]:

$$p[D(x,y)] = [2\pi\sigma_D^2(x,y)]^{-1/2} \exp\left[-\frac{[D(x,y)-u_D(x,y)]^2}{2\sigma_D^2(x,y)}\right] \quad (2.7)$$

Falconer [127] avait modélisé la déviation standard par :

$$\sigma_D(x,y) = \alpha[u_D(x,y)]^\beta \quad (2.8)$$

où β est une constante et α est donnée empiriquement par (2.9) :

$$\alpha = 0.66 \left[\frac{a}{A}\right]^{1/2} \quad (2.9)$$

avec a la surface moyenne de grain de film et A la surface d'observation du film.

Une analyse expérimentale indique que la corrélation spatiale des fluctuations de grain de film est très faible et par conséquent le bruit de grain de film peut être considéré comme un processus de bruit blanc.

2.2.3.4- Modèle de bruit de mauvaise mise au point ou dé-focalisation.

« Le lissage d'image » provoqué par une mise au point incorrecte d'une lentille mince est décrit par la fonction de transfert suivante [157] dans le domaine de la transformée de Fourier :

$$H_T(u,v) = \frac{J_1(a \times r)}{a \times r} \quad (2.10)$$

où J_1 est la fonction de Bessel du premier ordre, $r^2 = u^2 + v^2$, et a est le déplacement. Cette mauvaise mise au point donne d'un objet une image floue.

2.2.3.5- Modèle de bruit du mouvement relatif de la caméra et de l'objet.

Pour une image acquise avec une caméra possédant un obturateur mécanique, il est possible que lors de la prise de vue, un mouvement relatif de la caméra et de l'objet photographié se produise pendant le temps T d'ouverture de l'obturateur. Il s'ensuit un flou de l'image. Soit V la vitesse constante dans la direction de l'axe x ;

la transformée de Fourier la fonction de transfert de la dégradation causée pendant le temps T est donnée par la relation (2.11), [157] :

$$H_T(u,v) = \frac{\sin(\pi VTu)}{\pi Vu} \quad (2.11)$$

2.2.3.6- Modèle de bruit des turbulences atmosphériques.

L'atmosphère terrestre agit comme un système d'image. Normalement l'indice de réfraction de l'atmosphère reste constant sur l'étendue optique d'un objet. Mais dans certaines circonstances la turbulence atmosphérique peut provoquer une variation de l'indice et peut conduire à un flou dans l'image. La réponse impulsionnelle équivalente sera :

$$H_T(x,y) = K \exp\left[-\left(\frac{x^2}{2b_x^2} + \frac{y^2}{2b_y^2}\right)\right] \quad (2.12)$$

où K est une constante d'échelle d'amplitude, b_x et b_y les facteurs de tache de diffusion qui ont été prédites et vérifiées mathématiquement par Hufnagel en 1964 [64].

2.2.4- Conclusion.

Les différents modèles de dégradations ci-dessus présentées sont liés aux systèmes d'acquisition de l'image comme le grain de film, la mauvaise mise au point de la caméra, le mouvement relatif de la caméra et de l'objet. Sauf les modèles de turbulences atmosphériques qui liés au canal. Une dégradation liée au codeur lui-même est grandement étudiée dans nos travaux : il s'agit du bruit de la transformation des espaces de couleurs RGB -> YCbCr.

2.3.- LES METHODES DE REHAUSSEMENT D'IMAGES.

2.3.1- Introduction.

Les procédés de rehaussement d'images est un ensemble de techniques qui tentent d'améliorer l'aspect visuel d'une image ou à la convertir en une forme plus adaptée à l'analyse par l'homme ou la machine. Il ne s'agit pas de garantir la fidélité de la reconstruction mais plutôt de rendre subjectivement plus agréable l'image. Pour des objectifs d'analyse d'image, on se limite à une extraction d'information nécessaire à des applications futures.

De nombreuses techniques de rehaussement existent et qui ont prouvé leur efficacité dans l'amélioration d'images pour l'observation humaine et l'analyse d'image [122]. Nous présentons quelques-unes de ces techniques que nous utilisons

dans notre travail notamment le recadrage de la dynamique, l'égalisation d'histogramme et le rehaussement par loi de puissance.

2.3.2- Rehaussement d'images.

Murat définit le rehaussement d'images comme l'ensemble des méthodes qui modifient l'apparence d'une image de manière à ce qu'un observateur ou une machine puisse extraire facilement une certaine information désirée [103].

Le rehaussement d'images s'appuie sur le contraste correspondant à la différence entre les pixels de plus fortes intensités (clairs) et ceux de plus faibles intensités (sombres). Les principales méthodes de rehaussement d'images se fondent sur l'unes des approches suivantes :

- l'approche spatiale où les méthodes opèrent directement sur l'ensemble des pixels composant l'image.
- L'approche fréquentielle ou spectrale, basée sur la modification de la transformée de Fourier de l'image, qui s'appuie sur le théorème de convolution.

Soit $f(x,y) : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ une image. Le rehaussement consiste à trouver une transformation $T : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ qui s'applique à f pour donner une image contrastée g telle que : $g : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$

$$g(x,y) = T[f(x,y)] \quad (2.13)$$

Soit $ng_e = r$ la valeur du pixel de l'image initiale ou d'entrée et $ng_s = s$ celle de l'image rehaussée ou de sortie. La fonction T s'applique sur les valeurs des pixels.

2.3.2.1- Rehaussement par manipulation du contraste.

Les images photographiques ou électroniques ont souvent un faible contraste qui résulte de leur gamme d'amplitude réduite et non linéaire. R. Nathan et F. Billingsley, ont montré que le contraste peut être amélioré par la remise à l'échelle de l'amplitude de chaque pixel [13], [105]. Une image numérique peut occuper une gamme d'amplitude différente de celle de l'originale. Plusieurs techniques existent :

- L'image de sortie traitée peut occuper toute la gamme d'amplitude de l'image originale (Figure 2.1).
- Dans la deuxième méthode, la gamme d'amplitude de l'image de sortie est limitée à une valeur minimale et une valeur maximale (Figure 2.2). Cette méthode est subjectivement préférable, surtout pour les images dont un

nombre assez petit de pixels dépasse les limites. Elle est utilisée dans le recadrage de la dynamique.

Figure 2.1 : Mise à l'échelle linéaire

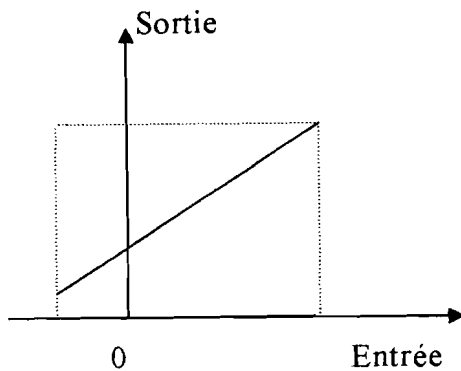
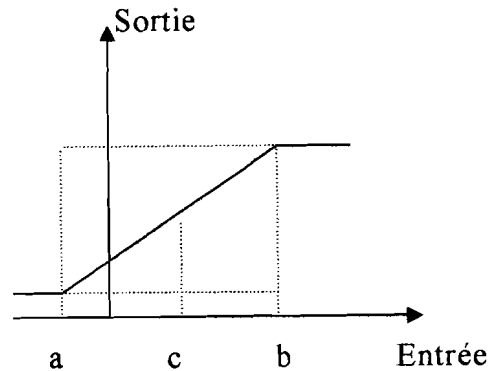


Figure 2.2 : Mise à l'échelle avec coupure.



Source : [122].

Rehaussement par recadrage de la dynamique :

La dynamique est l'intervalle $[a,b]$ qui correspond aux niveaux de gris extrêmes présents dans l'image. Pour la plupart des images, la dynamique maximale est $[0,255]$. Le recadrage de la dynamique consiste à obtenir pour l'image améliorée $g'(x')$ cette dynamique maximale [141]. Pour cela, on utilise la transformation linéaire suivante :

$$t:[a,b] \rightarrow [0,255]$$

$$x \rightarrow x' = 255 * \frac{(x - a)}{b - a}, \text{ avec } b \neq a \quad (2.14)$$

2.3.2.2- Rehaussement par modification du contraste.

La mise à l'échelle de l'amplitude des images n'utilise pas convenablement la gamme dynamique d'un système d'affichage. Les valeurs des pixels peuvent s'étendre en dehors de sa gamme ou n'occuper qu'une partie de cette dernière. Les transformations du point permettent de modifier le contraste d'une image à l'intérieur de la gamme dynamique du système afficheur. Elles sont décrites par des fonctions linéaires ou non linéaires. Certaines améliorent le contraste visuel, tandis que d'autres le réduisent. Une description détaillée de ces transformations se trouvent dans [122]. Nous retenons l'une d'elles notamment la loi de puissance donnée par la relation (2.15).

$$G(j,k) = [F(j,k)]^p \quad (2.15)$$

où $F(j,k)$ représente l'image originale et p la loi de puissance variable. La fonction carré (pour $p = 2$) fournit un meilleur résultat visuel que la fonction cube ($p = 3$) dans le cas des images à niveau de gris mais pas toujours aux images en couleur. Il s'agit d'une limitation importante à surmonter et que nous reprenons dans le chapitre 3.

2.3.3- Rehaussement par modification non adaptative d'histogramme.

L'histogramme de la luminance d'une scène naturelle quantifiée linéairement est souvent dévié vers les niveaux de gris plus noirs : une majorité de pixels possède une luminance inférieure à la moyenne. Dans de telles images les détails dans les régions plus sombres ne sont pas souvent perceptibles. Une modification d'histogramme est d'ordinaire utile pour obtenir une image plus rehaussée. Andrews, Hall et les autres ont produit une imagerie rehaussée par le procédé d'égalisation d'histogramme [3], [54]. Ce procédé rend uniforme l'image rehaussée.

Rehaussement par modification non adaptative d'histogramme: l'égalisation d'histogramme.

Soit $N_F(j)$ un nombre de pixels donné d'une image d'entrée avec $j = 1, 2, \dots, J$. L'égalisation d'histogramme cherche à produire une image G par la remise à l'échelle des points tel que l'histogramme du niveau de gris normalisé $H_G(k) = 1/k$, pour $k = 1, 2, \dots, K$.

L'algorithme de mise à l'échelle est le suivant :

- La valeur moyenne de l'histogramme est calculée ;
- Commençant à partir du niveau de gris le plus bas de l'originale, les pixels dans la bande de quantification sont additionnés jusqu'à ce que la somme soit plus près de la moyenne ; tous ces pixels sont ainsi ajustés au 1^{er} nouveau niveau de reconstruction au point milieu de la 1^{ère} bande de quantification de l'image rehaussée.
- Le processus est répété pour les niveaux de gris de valeur plus élevée.
- Si le nombre de niveaux de reconstruction de l'image originale est grand, il est possible de réajuster les niveaux de gris de sorte que l'histogramme de l'image rehaussée soit presque constant.

Une étude faite par William K. Pratt [122] permet d'obtenir la fonction de transfert de l'égalisation d'histogramme suivante :

$$g = [g_{\max} - g_{\min}] \times Pt(f) + g_{\min} \quad (2.16)$$

CHAPITRE 3 :

**METHODOLOGIE DE CONCEPTION :
MODELES D'AMELIORATION ET DE
COMPRESSION D'IMAGES PROPOSES.**

3.1- INTRODUCTION.

Nous proposons deux modèles de schémas de compression JPEG :

- l'un, plus souple aux manipulations d'images après codage,
- l'autre, capable d'anticiper la correction de certains bruits inhérents aux codeurs JPEG.

Des méthodes d'amélioration d'images photographiques couleurs compressées par JPEG mode séquentiel sont proposées. Il s'agit de :

- une méthode de rehaussement d'image par loi de puissance modifiée (LPM) [93];
- une méthode de correction de bruit de transformation mathématique : l'atténuation et la correction d'atténuation (ACA)[92] ;
- la combinaison de la méthode ACA et LPM puis ACA et le filtre de Wiener dans le cas où plusieurs bruits sont pris en compte [94].
- une méthode de correction du bruit de transformation par mesure de distance (MD) entre les niveaux de gris transformés et la moyenne de ceux de l'image originale.

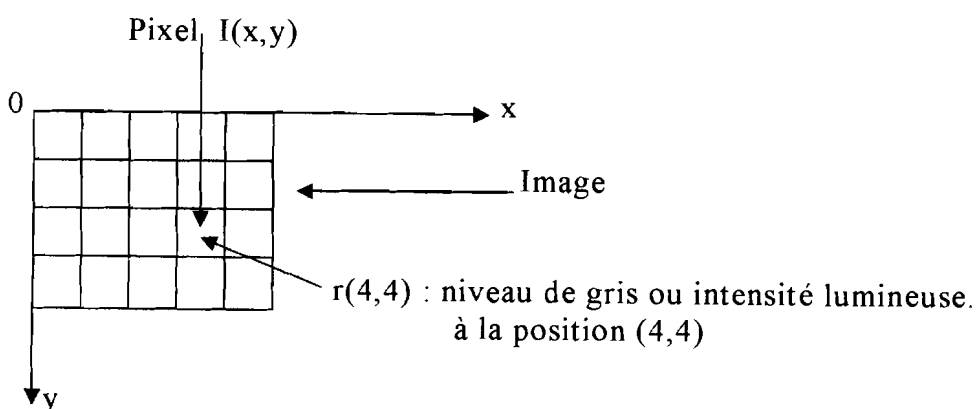
Différents modèles sont proposés dans ce paragraphe. Ils sont appliquées sur une image photographique couleur dont le modèle est présenté à la figure 3.1.

1°/ Modèle d'image.

Une image numérique est une matrice de points appelés pixels repérés par leurs coordonnées x et y. A chaque pixel est associée une valeur correspondant à la mesure d'un phénomène en ce lieu : Intensité lumineuse, représentée généralement par une fonction $I(x,y)$, tel que :

$$I(x,y) = f : R \times R \rightarrow R \quad (3.1)$$

Figure 3.1: Modèle d'image



2°/ Modèle d'amélioration d'image photographique couleur.

Soit $I(x,y) = f : R \times R \rightarrow R$ une image. L'amélioration consiste à trouver une transformation $T : R \times R$ qui s'applique à f pour donner une image contrastée g telle que :

$$g : R \times R \rightarrow R$$

$$g(x,y) = T[f(x,y)] \quad (3.2)$$

Soit $ng_e(x,y) = I_e(x,y)$ la valeur du pixel de l'image initiale (entrée) et $ng_s(x,y) = I_s(x,y)$ celle de l'image traitée (sortie). La fonction T s'applique sur les valeurs des pixels ou niveaux de gris de l'image. Les figures 3.2 et 3.3 présentent des modèles d'amélioration que nous avons proposé.

Figure 3.2 : Modèle de rehaussement proposé

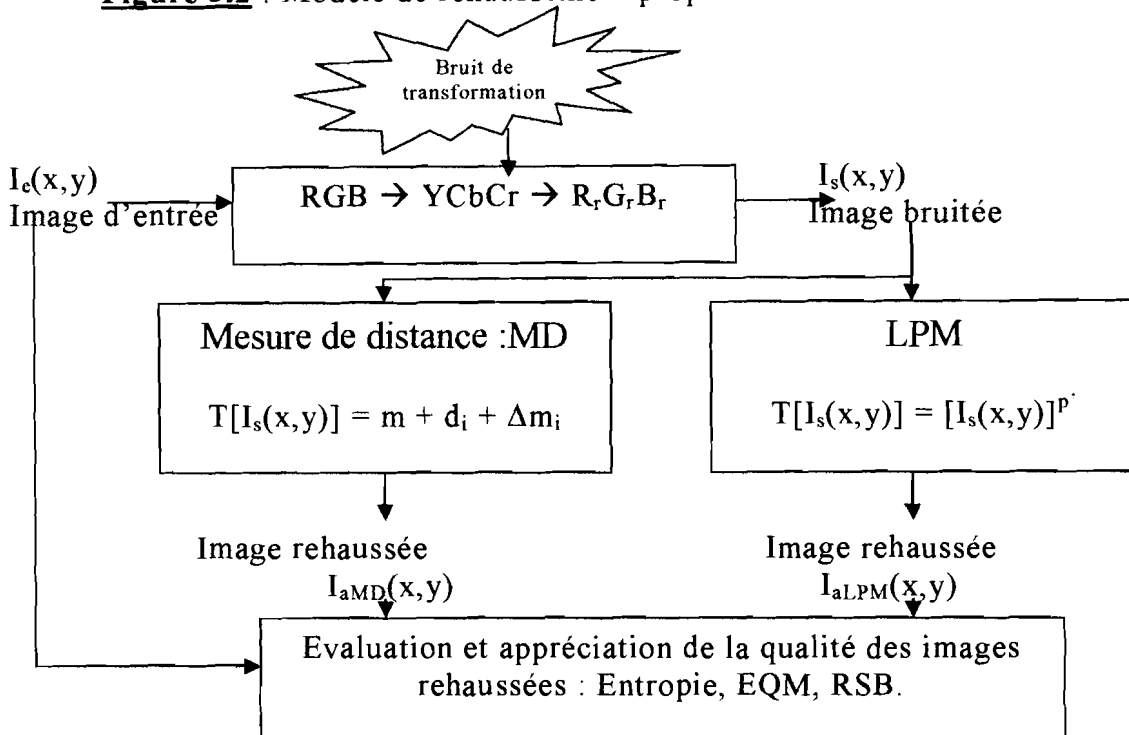
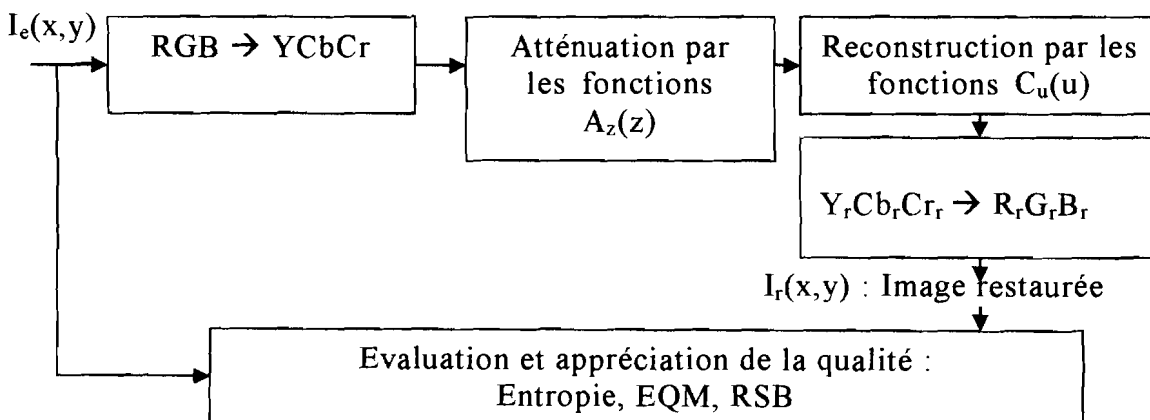


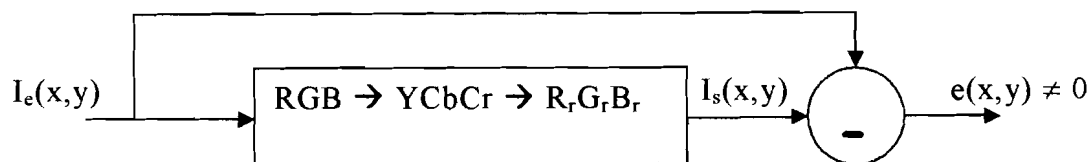
Figure 3.3 : Modèle de restauration proposé



3°/ Modèle de bruit de transformation RGB → YCbCr.

Ce produit est causé par la troncature des coefficients y , cb , cr lors de l'application de cette transformation sur certaines images.

Figure 3.4 : Modèle de bruit de transformation

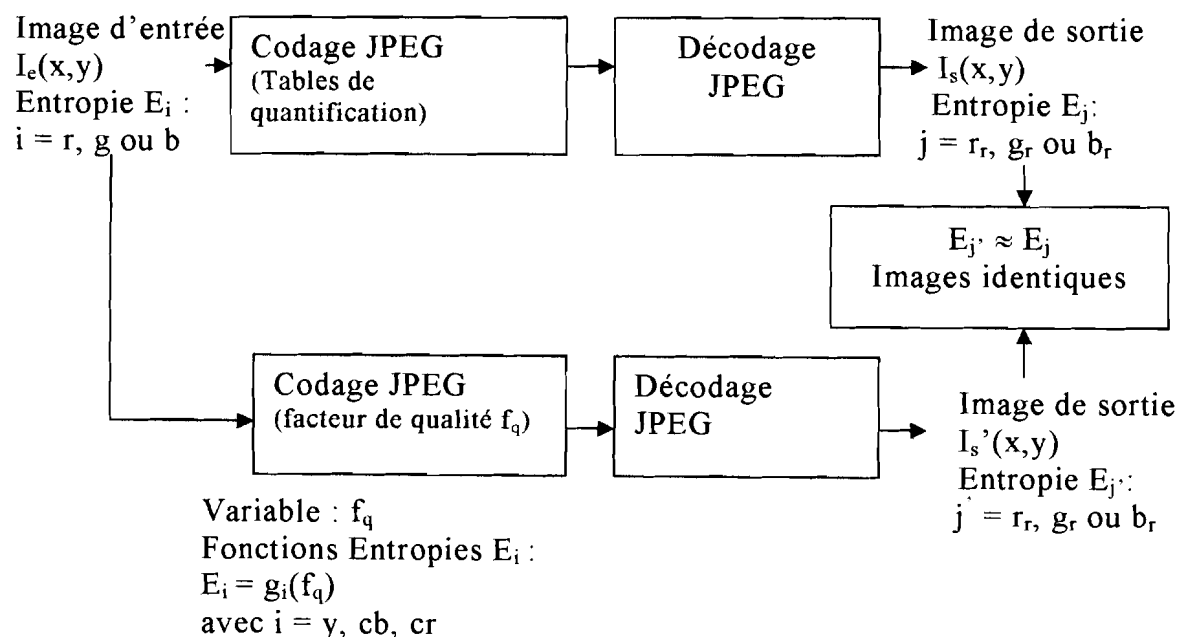


$$e(x,y) = I_s(x,y) - I_e(x,y) \neq 0 : (\text{bruit})$$

4°/ Modèle de choix du codeur JPEG basé sur l'entropie.

Le schéma de compression plus souple aux manipulations est un choix effectué entre la compression JPEG avec et sans tables de quantification. Il est basé sur le concept d'entropie, mesure de la quantité d'information d'un message. En effet si on connaît l'entropie d'une image après sa décompression, il est possible de retrouver une image équivalente en n'utilisant que le schéma de compression JPEG sans tables de quantification (JPEG STQ). La figure 3.5 présente le modèle :

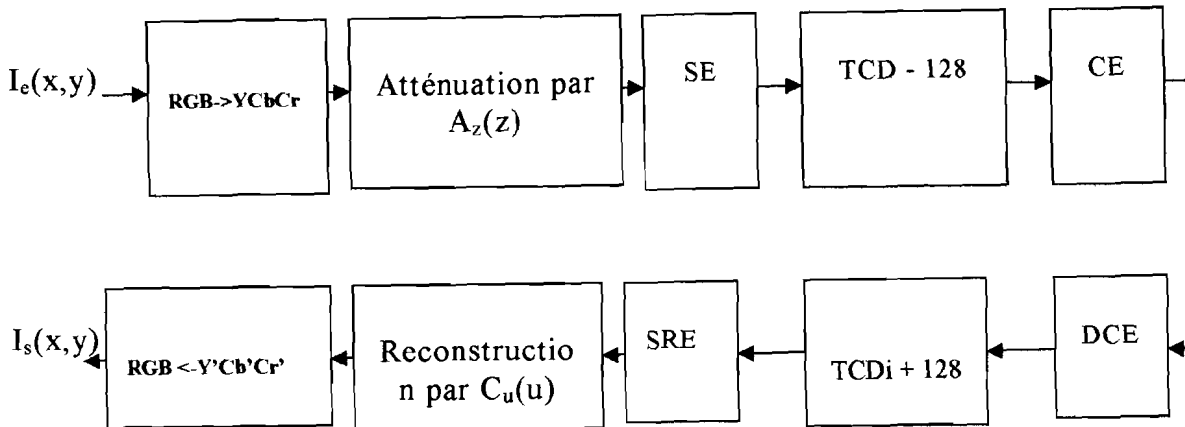
Figure 3.5: Modèle de choix du codeur JPEG basé sur l'entropie.



5°/ Modèle de correction par anticipation du bruit de transformation dans le codeur JPEG.

Le deuxième schéma, qui anticipe une correction du bruit de la transformation RGB → YCbCr, intègre dans le mode séquentiel les paramètres de correction de ce bruit. Son modèle est décrit sur la figure 3.6 :

Figure 3.6 : Modèle de correction par anticipation du bruit de transformation dans le codeur JPEG.



Où :

C : coefficient d'atténuation.

CE : codage entropique.

SSE : sous échantillonnage.

DCE : décodage entropique.

SRE : sur échantillonnage.

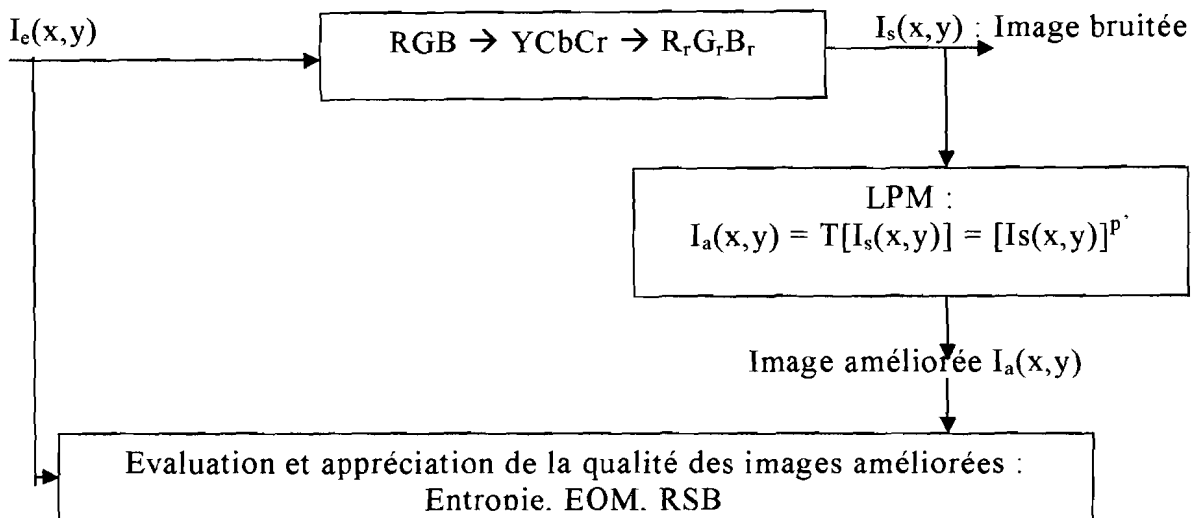
$A_z(z) = z/C$ la fonction d'atténuation avec $z = y, cb$ ou cr et C coefficient d'atténuation.

$C_u(u) = A(z)u$ les fonctions de correction d'atténuation avec $u = \beta_y, \beta_{cb}, \beta_{cr}$ les coefficients de reconstruction.

6°/ Modèle de rehaussement par LPM.

La méthode de rehaussement d'images par loi de puissance [122] que nous avons modifié (LPM) et adapté aux traitements d'images photographiques couleurs [93]. Le modèle général est présenté sur la figures 3.7.

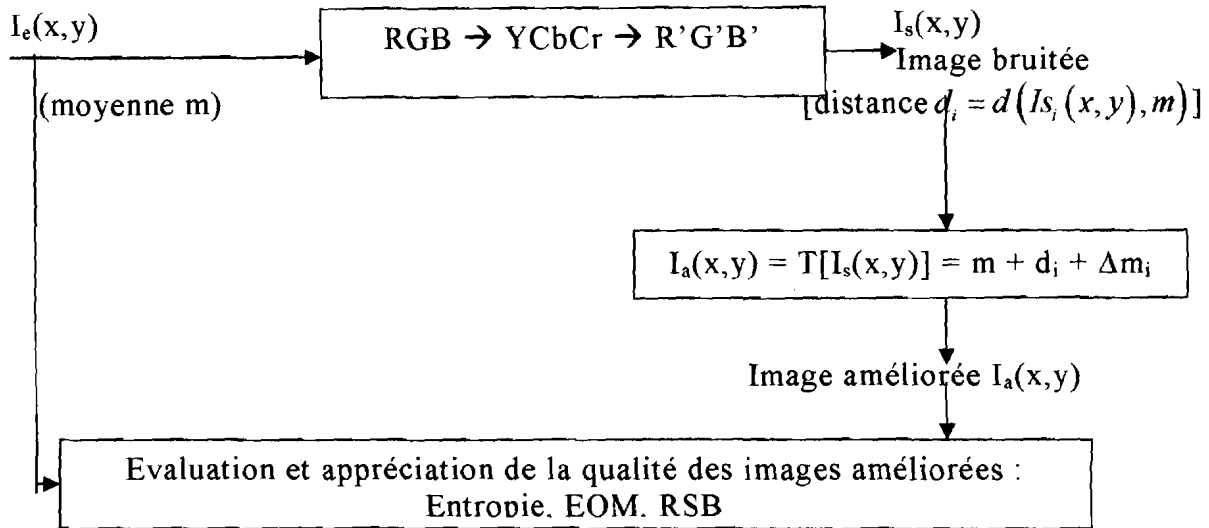
Figure 3.7 : Modèle de rehaussement par LPM.



7°/ Modèle de rehaussement par mesure de distance (MD).

Une autre méthode de rehaussement d'image perturbée par le bruit de transformation mathématique RGB → YCbCr proposée est basée sur la mesure de distance entre les pixels transformés et la moyenne des pixels originaux. Le modèle est illustré sur la figure 3.8 :

Figure 3.8 : Modèle de rehaussement par mesure de distance (MD).



Avec m : moyenne des niveaux de gris des pixels originaux,

$$m = \frac{\sum_{i=0}^{i=N \times M} I_e(x,y)}{N \times M} ; N \times M = \text{taille de l'image.}$$

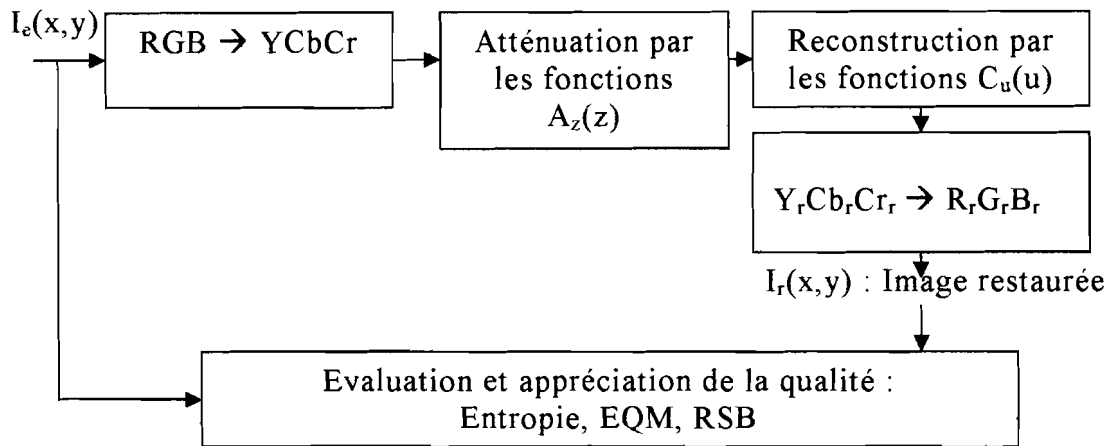
$d_i = d(I_s(x,y), m)$: distance entre le niveau de gris du pixel transformé et m .

Δm_i : termes correctifs tel que $0 \leq \Delta m_i \leq 3$ avec $i = r, g$ ou b .

8°/ Modèle d'atténuation et de correction d'atténuation (ACA).

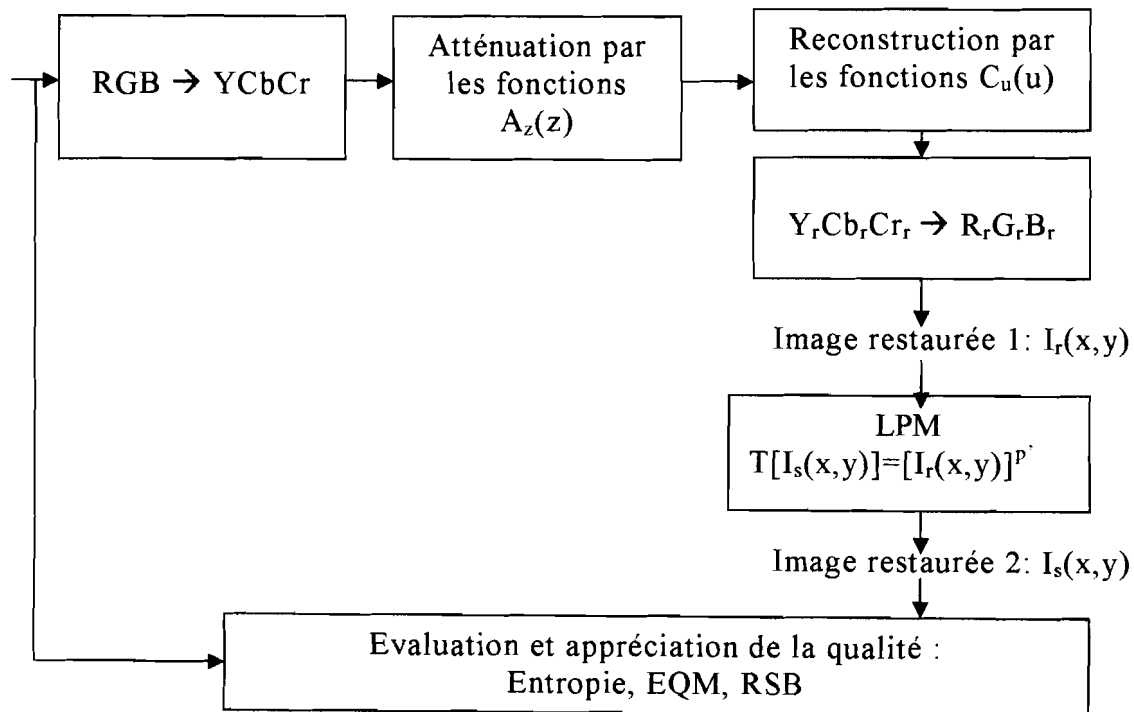
La méthode de correction du bruit de transformation mathématique s'appuie sur le principe d'atténuation des pixels de l'image originale suivi en sortie d'une optimisation de ces pixels [94]. Cette méthode exploite les propriétés des systèmes linéaires qui sont utilisés dans l'élaboration des transformations des espaces de couleurs RGB et YCbCr [119]. La figure 3.9 en donne le modèle général.

Figure 3.9 : Modèle d'atténuation et de correction d'atténuation (ACA).

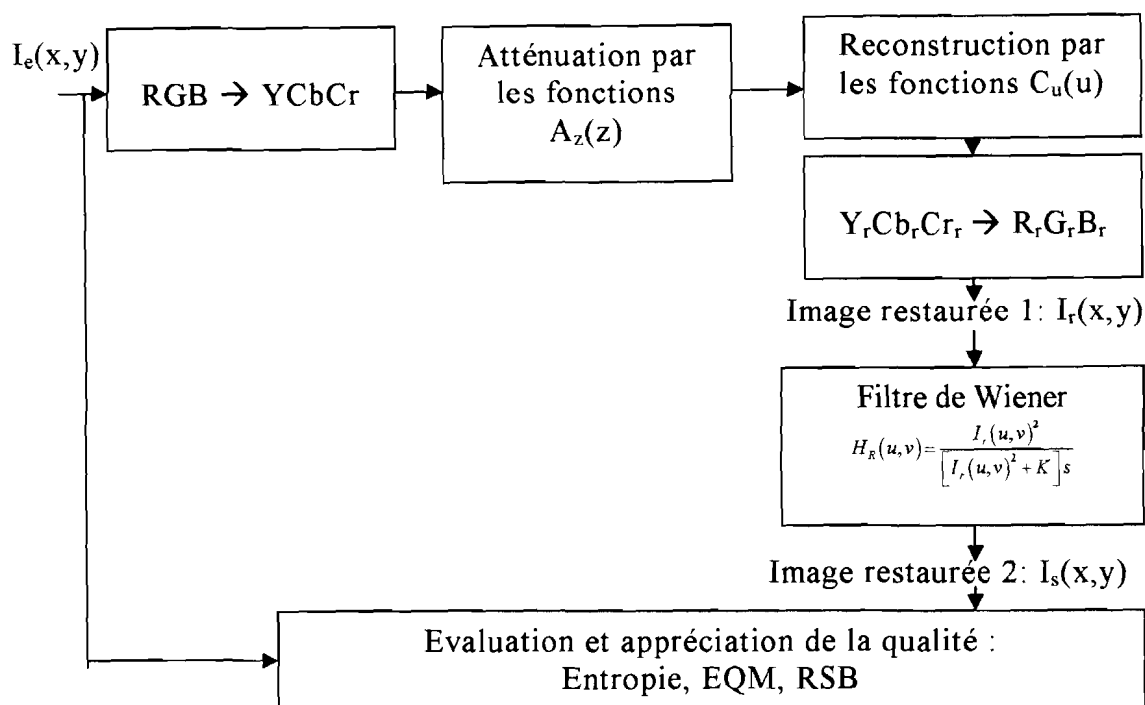


9°/ Modèles associatifs d'amélioration proposés :

a- **Figure 3.10** : Modèle associatif de restauration ACA + LPM



b- **Figure 3.11** : Modèle associatif de restauration ACA + filtre de Wiener [94].



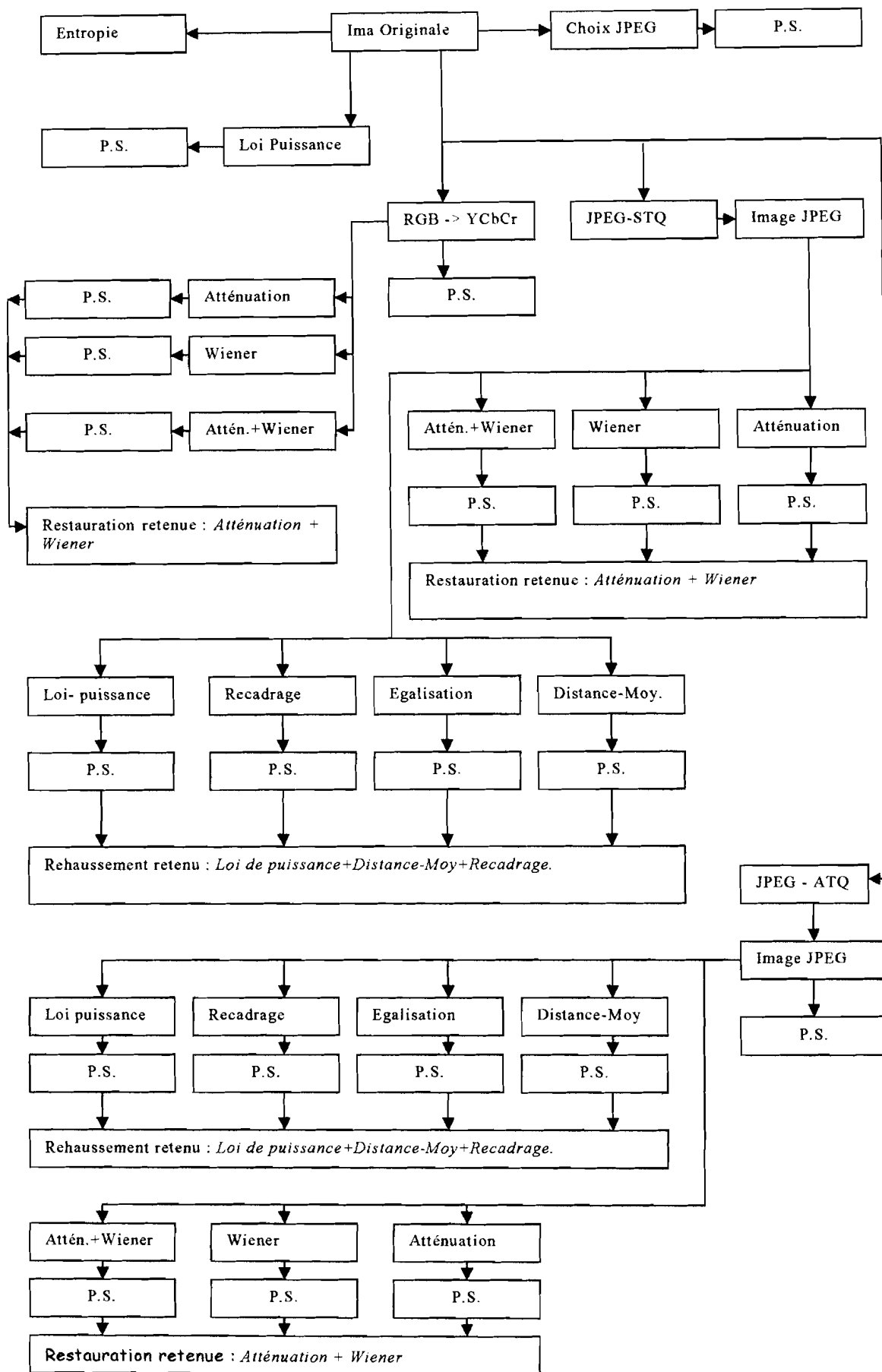
Dans ce chapitre, des propositions de solutions sont faites à certaines limites constatées dans des méthodes d'amélioration d'images notamment le rehaussement par loi de puissance, l'incapacité du filtre de Wiener à supprimer le bruit de la transformation RGB -> YCbCr et la restitution d'une image avec ses défauts initiaux par le codeur JPEG. Après une présentation du synoptique du système d'amélioration de l'image photographique bruitée, nous décrivons chacun des modèles sus-citées ainsi que d'autres nécessaires à la compréhension de notre travail et dont les résultats feront l'objet des chapitres 4 et 5.

3.2- SYNOPTIQUE GENERAL D'UN SYSTEME D'AMELIORATION DE L'IMAGE PHOTOGRAPHIQUE COULEUR BRUITEE.

Dans ce travail de thèse, nous proposons un synoptique général d'un système d'amélioration d'images photographiques couleurs traitées par la compression JPEG mode séquentiel.

Les paramètres statistiques (P.S.) dans ce schéma concernent à titre de rappel : le rapport signal à bruit (RSB), l'erreur quadratique moyenne (EQM), l'entropie. JPEG – STQ et JPEG – ATQ signifient respectivement JPEG sans et avec tables de quantification.

Figure 3.12 : Synoptique d'amélioration d'images photographiques couleurs.



L'évaluation de la qualité des images est faite par des métriques de qualité que sont l'erreur quadratique moyenne (EQM) et le rapport signal à bruit (RSB). L'entropie nous permet à chaque étape d'apprécier la quantité d'information contenue dans les différentes images.

3.3- PRESENTATION DES DIFFERENTES ETAPES DES METHODES UTILISEES.

3.3.1- Le schéma JPEG plus souple aux manipulations.

Il s'agit de remplacer le schéma de codage JPEG séquentiel avec tables de quantification (JPEG – ATQ) par celui qui utilise le facteur de qualité (JPEG – STQ). La technique est constituée de 4 étapes :

- étude de la variation de l'entropie dans les 3 canaux Y, Cb, Cr en fonction du facteur de qualité f_q .
- choix des valeurs d'entropie du schéma JPEG – ATQ sur les courbes précédentes et compression d'image à partir de ces valeurs d'entropie.
- comparaison des images obtenues par la mesure de l'EQM et du RSB.
- étude des performances des deux schémas face aux méthodes classiques d'amélioration d'images.
- justification du choix.

3.3.2- Le schéma JPEG mode séquentiel modifié.

Le schéma de codage JPEG à mode séquentiel est modifié par introduction des paramètres de correction du bruit de la transformation RGB -> YCbCr , comme le présente le modèle de la figure 3.4.

3.3.3- La méthode de rehaussement par loi de puissance modifiée (LPM).

Elle s'effectue en deux étapes :

- application de la loi de puissance classique aux images photographiques couleurs ;
- application de la loi de puissance modifiée aux mêmes images.

3.3.4- La méthode de correction du bruit de la transformation mathématique RGB ->YCbCr.

Nous procédons ici en quatre phases :

- mise en évidence du bruit de la transformation (BT) RGB -> YCbCr dans quelques images ;
- suivi de ce bruit dans les différentes étapes de la compression JPEG – ATQ ;

- correction du BT par atténuation ;
- réduction du contraste de l'image précédente.

3.3.5- Combinaison des méthodes de rehaussement et de correction précédentes avec un filtre de restauration.

Trois étapes sont nécessaires :

- correction par atténuation et correction d'atténuation (ACA) ;
- rehaussement par loi de puissance modifiée (LPM) ;
- application du filtre de Wiener sur l'image atténuée et rehaussée.

3.4- DESCRIPTION DES METHODES.

3.4.1- Etude comparative des schémas de compression JPEG avec et sans tables de quantification.

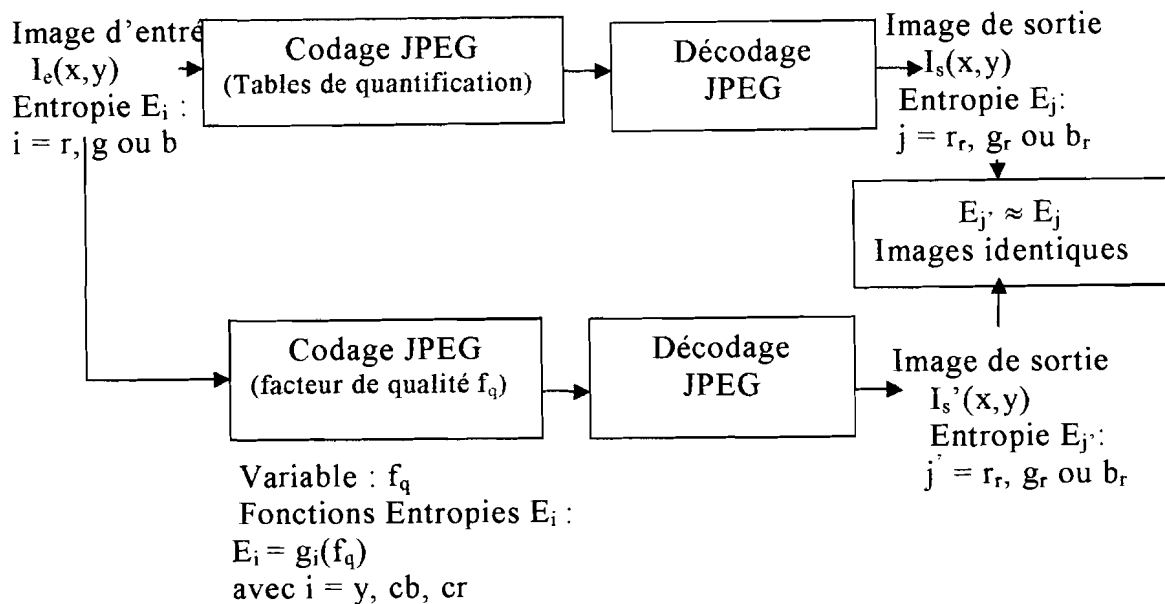
La norme JPEG a été conçue pour donner d'une image transformée une version qui soit très proche de l'originale, de qualité un peu supérieure à celle de l'image donnée par la télévision analogique. Elle restitue donc l'image avec un défaut acquis lors de son acquisition. Elle constitue un ensemble de méthodes de compression mises en cascade qui introduit chacune une déformation de données. La résultante de ces dégradations contribue à diminuer le rapport signal à bruit malgré les méthodes de restitution assez robuste conçues pour les combattre.

C'est ainsi qu'il est toujours possible d'avoir du bruit lié à ces dégradations comme le bruit de la transformation RGB \rightarrow YCbCr observé sur certaines images photographiques couleurs (voir Figure 3.2). Deux tables de quantification normalisées sont utilisées [154] par la norme JPEG. Ces tables, qui constituent des informations supplémentaires [89], sont transmises au décodeur pour permettre la restitution des données. Cette opération ne se fait pas sans réduction de la bande passante offerte. Comment peut-on se passer de ces tables pendant la transmission des données tout en conservant presque la même qualité d'image ?

Une solution connue est l'utilisation du facteur de qualité. Ce paramètre utilisé dans la version sans table de quantification du codage JPEG, permet de contrôler le rapport qualité – taux de compression. Mais comment choisir ce facteur pour que l'image reconstruite soit la plus proche possible de celle obtenue par le codage JPEG avec table de quantification ? C'est à cette question que nous avons

tenté de répondre dans cette partie du travail. La figure 3.11 présente le modèle. La méthode proposée est décrite dans les paragraphes 3.4.1.1 et 3.4.1.2.

Figure 3.13: Modèle de choix du codeur JPEG basé sur l'entropie.



3.4.1.1- Etude de la variation d'entropie en fonction du facteur de qualité.

L'expérience décrite par Lohscheller H. [84] a conduit à la série de tables de quantification utilisées pour les images de la recommandation CCIR-601 [19]. Elles ont été utilisées expérimentalement par les membres de JPEG mais ne constituent pas une exigence de la norme JPEG [146]. Il est donc possible d'utiliser une autre table de quantification qui puisse produire le même résultat sinon un plus proche de celle de la norme en ce qui concerne la qualité d'image.

Le facteur de qualité, lorsqu'il est fixé à l'avance, permet de produire une table de quantification au moment de l'exécution de l'algorithme de compression ou de décompression. Dans le cadre de l'enseignement à distance (objet de notre application de la compression JPEG), un pré-traitement des données images est souhaitable avant toute transmission. Ainsi une prédétermination de ce facteur de qualité permet une nette économie sur la bande passante lors de la transmission. Au lieu de transmettre des tables de quantification, on envoie au décodeur les seules valeurs du facteur de qualité. C'est fort de ce constat que nous avons choisi d'utiliser le facteur de qualité.

Pour les images photographiques couleurs mises au format Bitmap BMP 24 bits, un facteur de qualité est déterminé par canal Y, Cb, Cr. Lors de l'étude

préliminaire de la variation de l'entropie de l'image en fonction du facteur de qualité nous constatons que les courbes obtenues contiennent les 3 valeurs d'entropie de l'image JPEG – ATQ. En relevant les facteurs de qualité correspondants et en compressant l'image en utilisant ces derniers, on obtient une image proche sinon identique à celle donnée par la compression JPEG – ATQ.

3.4.1.2- Compression des coefficients Y, Cb et Cr à partir des valeurs d'entropie.

Il suffit donc de considérer ces trois valeurs de facteurs de qualité puis de compresser l'image en les utilisant et les transmettre au décodeur pour la reconstruction de l'image. Le chapitre 4 expose les résultats obtenus.

3.4.2- Rehaussement d'images photographiques couleurs par loi de puissance modifiée (LPM).

Le rehaussement d'images par la loi de puissance présentée par William Pratt convient aux images noir et blanc [122] où l'on obtient de bons résultats avec $p = 2$ et $p = 3$. Certes, dans le cas des images couleurs RGB, la méthode est applicable en considérant chaque canal séparément, mais les résultats ne sont pas satisfaisants.

Soit une image discrète $I(x,y)$ définie sur un ensemble de points E et dont les niveaux de gris sont des entiers compris entre deux valeurs minimale $ng_{\min}=0$ et maximale $ng_{\max}= M = 255$.

Soit une fonction $I : E \rightarrow K = \{0, 1, \dots, M\}$, ensemble de niveaux de gris, associant à un point $n(x,y)$ de E le niveau de gris $I(n)$.

Soit $p' \in \mathbb{R}^+$ tel que $p' \in [1.00, 1.01, \dots, 1.99, 2.00]$.

Soit f l'application qui à tout niveau de gris $k \rightarrow f(p) = [I(n)]^{p'} \in K$. Soit $k \in K$,

lorsque $p' \rightarrow +\infty$,

$$k = 0 \text{ ou } 1 \text{ si } k = 0 \text{ ou } 1$$

$$k = 255 \text{ si } k \neq 0 \text{ ou } 1$$

Il s'ensuit donc un déplacement des niveaux de gris de faibles valeurs vers 255. L'histogramme de l'image ainsi transformée sera constitué à la limite de 3 niveaux de gris: 0, 1 et 255. Une réduction du pas de la variable puissance p' produit une disparition progressive et lente des nuances intermédiaires, aboutissant à une image couleur très contrastée à forte luminosité contrairement au pas de variation proposé par William Pratt [122]. C'est pendant cette variation que se révèlent des détails cachés sur l'image originale.

Il semble difficile de trouver une métrique qui permette de choisir la meilleure image rehaussée et par conséquent de fixer la valeur de la variable p' pour une image donnée. Nous proposons deux approches qui aident à fixer la valeur de p' donnant la meilleure image rehaussée. Il s'agit de l'approche directe et l'approche polynomiale.

L'approche directe exploite la relation donnant le rapport signal sur bruit (RSB) de l'image à rehausser pour déduire la valeur de p' et enfin appliquer la LPM. La figure 3.12 présente le modèle.

Considérons une image $I_e(x,y)$ à faible contraste tel que :

$I_t(x,y) = T[I_e(x,y)]$ avec T la transformation $RGB \rightarrow YCbCr$ puis $YCbCr \rightarrow R_rG_rB_r$.

Soit RSB_{max} le rapport signal sur bruit de l'image transformée $I_t(x,y)$. L'image améliorée par LPM est donnée par :

$$I_a(x,y) = [I_t(x,y)]^{p'}$$

Quand p' augmente, le RSB diminue et le contraste de l'image s'accroît.

Soit n_i le niveau de gris de l'image transformée et m_i celui de l'image à rehausser par LPM tel que :

$$m_i = n_i^{p'} \quad (3.3)$$

soit $e_i = (n_i - m_i)$: l'erreur commise sur le niveau de gris rehaussé.

Considérons l'erreur quadratique moyenne eqm_i sur le niveau de gris i :

$$eqm_i = \frac{(n_i - m_i)^2}{1} \quad (3.4)$$

le rapport signal sur bruit RSB_i défini sur ce niveau de gris sera :

$$RSB_i = \frac{m_i^2}{eqm_i} = \frac{m_i^2}{(n_i - m_i)^2} \quad (3.5)$$

on obtient l'équation en m_i suivante :

$$(RSB_i - 1)m_i^2 - RSB_i \times n_i \times m_i + RSB_i \times n_i^2 = 0 \quad (3.6)$$

la résolution de cette équation donne deux racines dont la plus grande est :

$$m_{i1} = n_i \times \frac{RSB_i + \sqrt{RSB_i}}{RSB_i - 1} = n_i^{p'} \quad (3.7)$$

on obtient finalement la variable puissance p' suivante :

$$p' = 1 + \frac{\log_{10} X}{\log_{10} Z} \quad (3.8)$$

avec

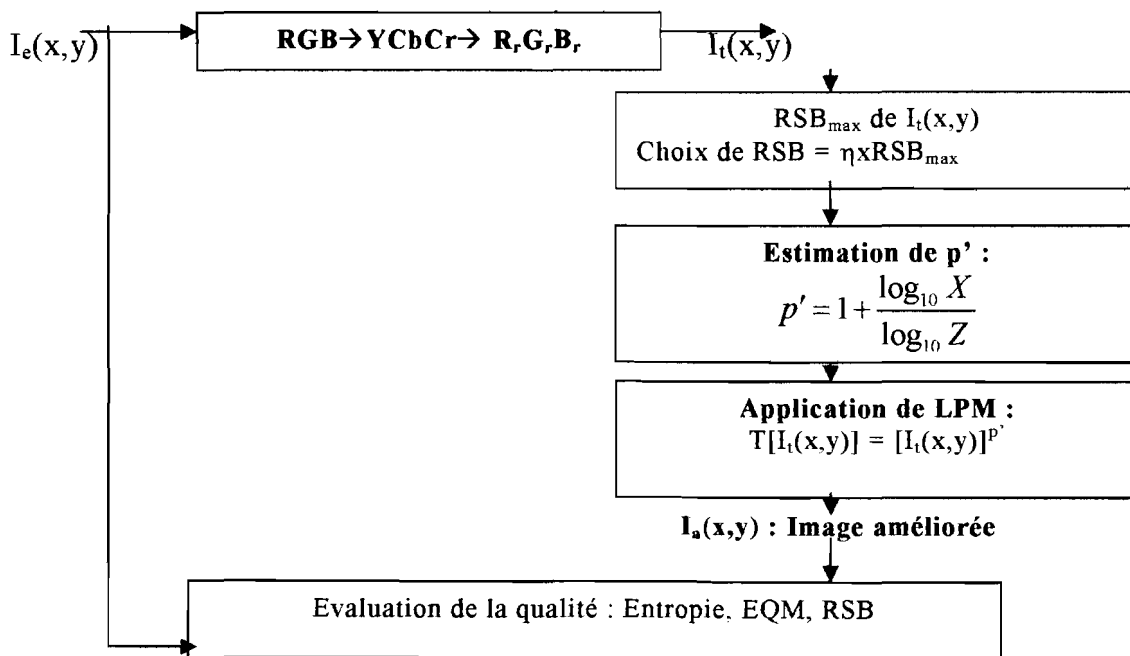
$$X = \frac{RSB_i + \sqrt{RSB_i}}{RSB_i - 1} \quad (3.9)$$

$$Z = n_i + \varepsilon = I_i(x, y) + \varepsilon \text{ tel que } 1 < \varepsilon \leq 1.0001 \quad (3.10)$$

Ainsi, à partir d'une valeur de RSB fixé à savoir :

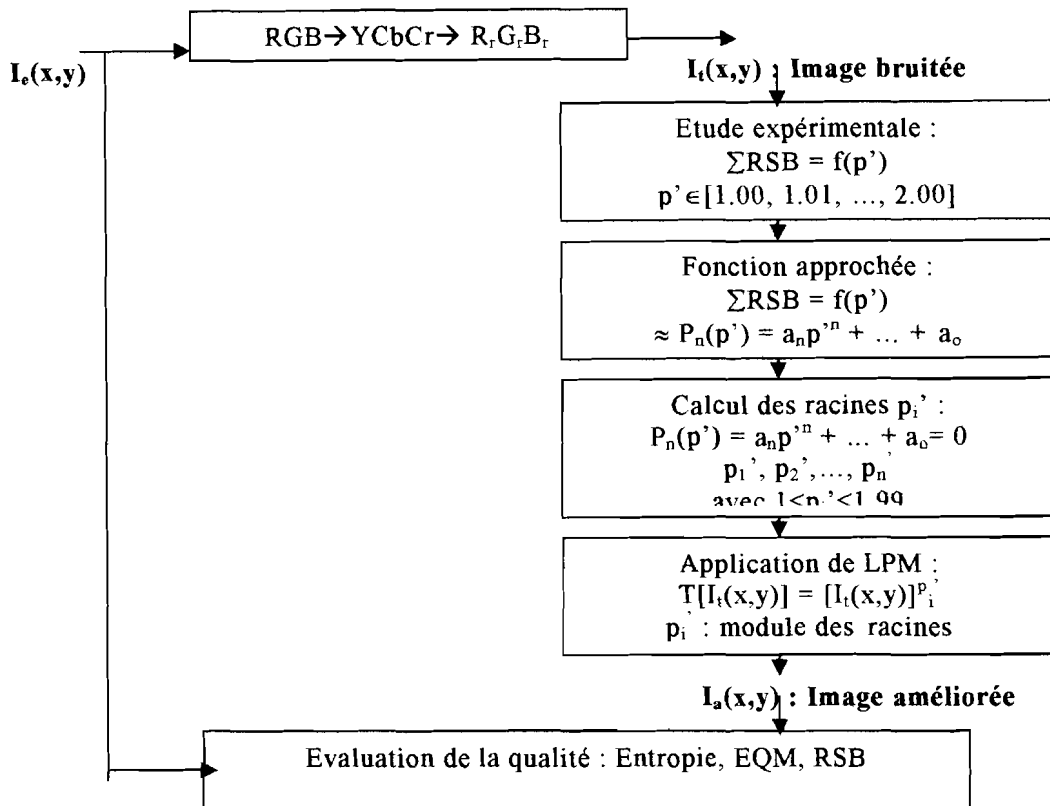
$RSB = \eta \times RSB_{\max}$ (3.11) avec η exprimé en pourcentage, il est possible d'obtenir une variable puissance p' qui fournisse l'image rehaussée désirée.

Figure 3.14 : Choix de la variable puissance p' par l'approche directe.



L'approche polynomiale s'appuie sur une étude expérimentale. En mesurant le RSB correspondant à chaque valeur de $p' \in [1.00, 1.01, \dots, 1.99]$, il est possible de retrouver par approximation polynomiale, la valeur de p' qui donnera l'image à contraste amélioré. Le modèle est fourni par la figure 3.13. ζ

Figure 3.15 : Modèle de rehaussement par LPM , approche polynomiale.



Les racines p_i' du polynôme $P_n(p')$ fournissent les valeurs de la variable puissance parmi lesquelles la bonne image rehaussée existe. Les résultats obtenus sont développés au chapitre 5.

3.4.3- Rehaussement par mesure de la distance entre les pixels reconstruits et la moyenne des pixels originaux.

Nous allons présenter une méthode de correction du bruit de transformation identifié lors du codage JPEG. En effet la transformation des espaces de couleurs RGB -> YCbCr lorsqu'elle est appliquée sur certaines images photographiques couleurs induit un bruit de type impulsif présent dans le canal vert. En mesurant la distance entre chaque pixel transformé avec la moyenne des pixels initiaux on arrive à réduire ce bruit en ajoutant ou en retranchant de cette distance une quantité entière Δm_i tel que $0 \leq \Delta m_i \leq 3$.

$$\text{Soit } m_1 = \frac{\sum_{i=0}^{i=N \times M} I_e(x,y)}{N \times M} \quad (3.12)$$

la moyenne des niveaux de gris des pixels de l'image originale. Considérons la distance euclidienne simple d entre un niveau de gris reconstruit NG_{ri} et m_1 tel que :

$$d_i^2 = (NG_{ri} - m_i)^2 \quad (3.13)$$

Soit NG_{ai} le niveau de gris du pixel à améliorer. Ce niveau de gris sera plus proche de l'original si on ajoute à la distance d_i et à la moyenne m_i un terme correctif Δm_i avec $i = r, g$ ou b , et pouvant être nul ou non nul. Ainsi le niveau de gris amélioré sera donné par la relation (3.14) :

$$NG_{ai} = d_i + m_i + \Delta m_i \quad (3.14)$$

Considérons la distance quadratique $d(NG_{ri}, m_i)^2 = |NG_{ri} - m_i|^2 = d_i^2$. On aura :

$$NG_{ai}^2 = (d_i + m_i + \Delta m_i)(d_i + m_i + \Delta m_i) \quad (3.15)$$

On obtient après développement et élimination de la valeur négative de NG_{ai} l'expression du niveau de gris amélioré suivante :

$$NG_{ai} = NG_{ri} + \Delta m_i = d_i + m_i + \Delta m_i \quad (3.16)$$

Que représente donc le terme correctif Δm_i ?

L'application de la transformation RGB -> YCbCr sur un ensemble de niveaux de gris fournit des coefficients Y, Cb, Cr non entiers. L'utilisation des coefficients Y, Cb, Cr entiers constitue une source d'erreurs sur l'image reconstruite. Une évaluation des erreurs introduites par canal peut être faite à partir des différences $d_i = d_y, d_{cb}, d_{cr}$ entre les coefficients Y, Cb, Cr non entiers et entiers. Ces différences d_i appartiennent à l'intervalle de valeurs suivantes :

$$0 \leq d_i < 1 \text{ avec } i = y, cb \text{ ou } cr.$$

En supposant que les d_i sont au dixième près, l'ensemble E_{d_i} de ces différences sera réduit à 10 éléments tels que :

$E_{d_i} = \{0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9\}$. Ainsi chaque différence d_y, d_{cb} et d_{cr} peut prendre une valeur parmi ces 10 éléments.

Considérons les coefficients $r_{\min}, g_{\min}, b_{\min}$ et $r_{\max}, g_{\max}, b_{\max}$ correspondants aux valeurs extrêmes des différences d_y, d_{cb} et d_{cr} à savoir 0 et 0.9. Le tableau ci-dessous donne ces valeurs ainsi que les variations maximales $\Delta r = r_{\max} - r_{\min}, \Delta g = g_{\max} - g_{\min}$ et $\Delta b = b_{\max} - b_{\min}$ provoquées par les d_i .

	Canal R	Canal G	Canal B
$d_y = d_{cb} = d_{cr} = 0$	$r_{\min} = -179.46$	$g_{\min} = 135.46$	$b_{\min} = -226.82$
$d_y = d_{cb} = d_{cr} = 0.9$	$r_{\max} = -177.29$	$g_{\max} = 135.41$	$b_{\max} = -224.32$
Variations maximales	$\Delta r = 2.17$	$\Delta g = -0.05$	$\Delta b = 2.50$
Variations entières	$\Delta r = 2 \text{ ou } 3$	$\Delta g = 0$	$\Delta b = 2 \text{ ou } 3$

Comme on peut le constater, ces variations maximales sont fonction des canaux R, G et B et représentent le terme correctif à ajouter aux niveaux de gris reconstruits NG_r pour réduire le bruit de la transformation RGB \rightarrow YCbCr. Ainsi, en arrondissant au demi point inférieur ou supérieur les quantités Δr , Δg et Δb , on obtient une assez bonne approximation de l'erreur commise respectivement sur les coefficients R, G et B de l'image reconstruite et représentée par Δm_i .

L'algorithme consiste en ceci :

- avant d'envoyer l'image dans le codeur on en calcule la moyenne m_l des pixels.
- une fois l'image codée et décodée, la distance $d(NG_r, m_l)$ entre chaque niveau de gris reconstruit NG_r et la moyenne m_l est calculée selon (3.13).
- l'ensemble des niveaux de gris NG_a de l'image améliorée $I_a(i, j)$ est obtenue par (3.16).

3.4.4- La méthode d'atténuation et de correction d'atténuation d'images bruitées par le codeur JPEG : cas du bruit de la transformation RGB \rightarrow YCbCr.

3.4.4.1- Introduction.

La compression JPEG à base de la transformée en cosinus discrète utilise le système de couleurs luminance-chrominance Y, Cb et Cr avant l'étape du sous-échantillonnage. Ces coefficients sont obtenus par la transformation du système de couleurs 24 bits R, G, B au système Y, Cb, Cr. Cette transformation introduit sur certaines images photographiques couleurs, un bruit impulsif prédominant dans le canal vert.

Nous décrivons dans ce paragraphe une méthode de correction de ce bruit que nous avons élaboré. Elle se fonde sur les systèmes linéaires et utilise en amont une atténuation des coefficients Y, Cb, Cr [110], [92], [94] puis à la restitution des

facteurs multiplicatifs ou coefficients de correction de chaque canal Y, Cb, Cr à reconstruire. Ces facteurs sont des proportions du paramètre d'atténuation.

Toute donnée réelle est perturbée d'une certaine manière par l'atténuation. Plusieurs algorithmes existent et qui compensent l'effet d'atténuation. Une méthode de compensation souvent utilisée est la méthode de Chang [34]. L'atténuation consiste à multiplier tous les pixels d'une image par une même quantité réelle ou non [110]. Soit $1/c = 1/\text{var}$ ce nombre ou $c = \text{var} > 0$ (3.17)

Considérons la fonction $A : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ tel que $A = A_z(z)$, qui atténue les coefficients y, cb et cr.

$z = y, cb$ ou cr représente les coefficients de l'image. Les fonctions $A_z(z)$ sont définies de la façon suivante :

$$\begin{aligned} A_y(z) &= y/c = y_a \\ A_{cb}(z) &= cb/c = cb_a \\ A_{cr}(z) &= cr/c = cr_a \end{aligned} \quad (3.18)$$

Considérons des réels $\beta_i = \beta_y, \beta_{cb}$ ou $\beta_{cr} \geq 0$ et appelés coefficients de reconstruction. Soit la fonction $C : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ tel que $C = C_u(u)$, fonction qui corrige l'atténuation des coefficients y_a, cb_a, cr_a précédents de sorte que $u = \beta_i$ avec $i = y, cb$ ou cr . Les fonctions $C_u(u)$ sont définies de la manière suivante :

$$\begin{aligned} C_{\beta_y}(u) &= y_a * \beta_y \\ C_{\beta_{cb}}(u) &= cb_a * \beta_{cb} \\ C_{\beta_{cr}}(u) &= cr_a * \beta_{cr} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Les coefficients de correction utilisés dans notre méthode proviennent d'une étude des systèmes linéaires qui interviennent dans les transformations des espaces de couleurs RGB \rightarrow YCbCr [119].

3.4.4.2- Méthodologie de restitution systématique d'une image transformée non dégradée.

La première étape de la compression JPEG consiste en une transformation de l'image de l'espace de couleur R, G, B en Y, Cb, Cr selon la relation (3.20) pour la reconstruction de l'image décompressée :

$$\begin{aligned} y &= 0.299r + 0.587g + 0.114b \\ cb &= -0.1687r - 0.3313g + 0.5b + 128 \\ cr &= 0.5r - 0.4187g - 0.0813b + 128 \end{aligned} \quad (3.20)$$

Considérons un espace vectoriel E sur un corps K de dimension n . Soit T une opération qui transforme un vecteur u de E en un autre v :

$$T u = v \quad (3.21)$$

T est univoque si chaque vecteur de E est transformé en un vecteur bien défini de E . Soit c une constante arbitraire.

Si :

$$T(cu) = c(Tu) \quad (3.22)$$

$$\alpha(u + v) = \alpha u + \alpha v$$

alors T sera dite transformation linéaire [5].

Dans le cas où E est de dimension n , tout vecteur u possède n composantes u_1, u_2, \dots, u_n et v également v_1, v_2, \dots, v_n .

Un groupe de transformations linéaires permet de passer de u à v tel que :

$$v_j = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n T_{ji} u_i \quad (3.23)$$

T_{ji} est la matrice de la transformation linéaire de la forme matricielle de l'expression (3.23).

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_j \\ \dots \\ v_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1i} & \dots & T_{1n} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2i} & \dots & T_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{j1} & T_{j2} & \dots & T_{ji} & \dots & T_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{n1} & T_{n2} & \dots & T_{ni} & \dots & T_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_i \\ \dots \\ u_n \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

Soit RGB l'espace des couleurs constitué des couleurs élémentaires rouge, vert et bleu. D'après Poynton [119], à partir de ces trois couleurs primaires on peut reconstituer toutes les autres couleurs.

Soit YCbCr l'espace des luminance et chrominances.

Comme indiqué dans [89], la compression JPEG utilise l'espace décoloré de luminance et chrominances pour optimiser la compression.

Considérons une image bidimensionnelle originale couleur $Im(i,j)$ dont chaque pixel est représenté par les coefficients r, g, b dans l'espace RGB et y, cb, cr dans l'espace YCbCr après la transformation RGB \rightarrow YCbCr.

On obtient :

$$\begin{aligned}
r &= y + 0 \text{ cb} + 1.402 (\text{cr} - 128) \\
g &= y - 0.34414 (\text{cb} - 128) - 0.71414 (\text{cr} - 128) \\
b &= y + 1.772 (\text{cb} - 128) + 0 \text{ cr}
\end{aligned} \tag{3.25}$$

Soit l'entier $c = \text{var}$ choisi tel que $\text{var} > 0$ de valeur maximale var_{max} et tel que :

$$A_y(z) = \frac{y}{c} = y_a = \frac{y}{\text{var}}, \quad A_{cb}(z) = \frac{cb}{c} = cb_a = \frac{cb}{\text{var}}, \quad A_{cr}(z) = \frac{cr}{c} = cr_a = \frac{cr}{\text{var}} \tag{3.26}$$

les coefficients atténués après transformation. L'image atténuée sera donnée par les relations suivantes :

$$\begin{aligned}
r_a &= y_a + 0 \text{ cb}_a + 1.402 (\text{cr}_a - 128) \\
g_a &= y_a - 0.34414 (\text{cb}_a - 128) - 0.71414 (\text{cr}_a - 128) \\
b_a &= y_a + 1.772 (\text{cb}_a - 128) + 0 \text{ cr}_a
\end{aligned} \tag{3.27}$$

Supposons que la transformation RGB \rightarrow YCbCr introduise un bruit de sorte que les coefficients restitués r_r , g_r , b_r soient différents des originaux. Considérons des réels β_y , β_{cb} , $\beta_{cr} \geq 0$ appelés facteurs multiplicatifs optimum qui permettent la restitution correcte de l'image transformée. Si ces facteurs sont bien choisis, les coefficients restitués r_r , g_r , b_r , seraient identiques aux coefficients originaux. On a :

$$\begin{aligned}
r_r &= y_a \beta_y + 0 \text{ cb}_a \beta_{cb} + 1.402 (\text{cr}_a \beta_{cr} - 128) \\
g_r &= y_a \beta_y - 0.34414 (\text{cb}_a \beta_{cb} - 128) - 0.71414 (\text{cr}_a \beta_{cr} - 128) \\
b_r &= y_a \beta_y + 1.772 (\text{cb}_a \beta_{cb} - 128) + 0 \text{ cr}_a \beta_{cr}
\end{aligned} \tag{3.28}$$

Recherchons l'image différence en faisant (3.25) - (3.28) et en remplaçant les coefficients atténués par leurs expressions respectives, voir (3.26), nous obtenons :

$$\begin{pmatrix} r - r_r \\ g - g_r \\ b - b_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y & 0 & 1.402 \text{ cr} \\ y & -0.34414 \text{ cb} & -0.71414 \text{ cr} \\ y & -1.772 \text{ cb} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_y \\ \theta_{cb} \\ \theta_{cr} \end{pmatrix} \tag{3.29}$$

avec :

$$\begin{aligned}
\theta_y &= 1 - \beta_y / \text{var} \\
\theta_{cb} &= 1 - \beta_{cb} / \text{var} \\
\theta_{cr} &= 1 - \beta_{cr} / \text{var};
\end{aligned} \tag{3.30}$$

soit la forme contractée :

$\beta_i = \text{var}(1 - \theta_i)$ (3.31) où i représente respectivement y , cb et cr .

$$\theta_i = 1 - \frac{\beta_i}{\text{var}} \quad (3.32)$$

L'expression (3.29) est la représentation matricielle de l'image différence. C'est l'expression d'un système linéaire tel que défini en (3.23).

Les fonctions θ_i sont des fonctions linéaires décroissantes de β_i . Elles représentent les différences entre les images originale et restituée dans l'espace YCbCr.

Ainsi, les différences de couleurs dans l'espace RGB sont des combinaisons linéaires des différences θ_i de couleurs dans l'espace YCbCr. A une différence de couleurs du système RGB correspond une différence de couleurs dans le système YCbCr.

Recherchons les domaines de variation de θ_i et β_i :

Si $\theta_i = 0$, $\beta_i = \text{var} = \text{var}_{\max}$

Si $\theta_i = 1$, $\beta_i = 0$.

Ainsi lorsque θ_i varie de 0 à 1, β_i varie de var_{\max} à 0. Donc :

$$0 \leq \theta_i \leq 1$$

et (3.33)

$$0 \leq \beta_i \leq \text{var}_{\max}$$

En conséquence, les coefficients optimaux qui permettent la reconstruction correcte de l'image perturbée par le bruit de la transformation RGB \rightarrow YCbCr se trouvent sur la droite d'équation (3.31) :

$\beta_i = \text{var}(1 - \theta_i)$ où i désigne respectivement y , cb et cr .

Quels types d'images obtient-on d'après les conditions (3.33)?

Pour $\theta_i = 0$, $\beta_i = \text{var}_{\max}$, alors (3.29) devient :

$$r - r_r = 0 \Rightarrow r_r = r$$

$$g - g_r = 0 \Rightarrow g_r = g \quad (3.34)$$

$$b - b_r = 0 \Rightarrow b_r = b$$

Les relations (3.34) montrent que l'image restituée est identique à l'originale s'il n'y a pas de bruit de transformation.

Pour $\theta_i = 1$, $\beta_i = 0$ alors (3.29) devient :

$$\begin{pmatrix} r-r_r \\ g-g_r \\ b-b_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y & 0 & 1.402 cr \\ y - 0.34414cb & -0.71414cr & \\ y & 1.772cb & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.35)$$

L'image restituée sera :

$$r_r = r - (y + 1.402 cr) = -179.456$$

$$g_r = g - (y - 0.34414 cb - 0.71414 cr) = 135.460 \quad (3.36)$$

$$b_r = b - (y + 1.772 cb) = 226.816$$

Les relations (3.36) montrent que l'image obtenue est une image nulle.

En parcourant donc la courbe d'équation (3.31) de l'image nulle donnée par le système (3.36) jusqu'à l'image transformée avec bruit de transformation (voir **Figure 3.16**), donnée par (3.34) on passe par une valeur du couple de points (β_i, θ_i) qui permet d'obtenir une image transformée sans bruit de transformation.

Ainsi lors de l'application de la transformation inverse YCbCr \rightarrow RGB, il suffira de multiplier chacun des coefficients Y, Cb, Cr, par les facteurs β_i correspondants à l'image optimale. La contrainte à satisfaire pour obtenir une image sans bruit de transformation est la valeur maximale de la somme des rapports signaux à bruit des trois canaux Y, Cb, Cr rencontrée. En effet en faisant varier θ_i de 0 à 1, on peut générer par programme les images correspondantes puis calculer et comparer leurs rapports signaux à bruit.

Les équations de transformation inverse YCbCr \rightarrow RGB, pour obtenir l'image reconstruite et sans bruit de transformation vérifient bien la relation (3.20).

Enfin, pour écrire l'image RGB, on remet les coefficients R, G, B dans l'intervalle $[0, 255]$.

Figure 3.16 : Variation des β_i en fonction des θ_i .



3.4.4.3- Conclusion partielle.

Cette méthode permet la suppression du bruit de la transformation RGB \rightarrow YCbCr en donnant une image à fort contraste. La méthode décrite dans le paragraphe suivant montre comment en se servant d'un système d'équations linéaires, il est possible de réduire ce contraste et d'améliorer le rapport signal à bruit.

3.4.5- Réduction du contraste de l'image débruitée.

3.4.5.1- Introduction.

Comme indiqué au paragraphe précédent, l'image reconstruite sans bruit de la transformation RGB \rightarrow YCbCr est une image très contrastée. Il est donc possible de réduire ce contraste en diminuant d'une certaine quantité n_y , n_{cb} , n_{cr} les coefficients Y, Cb, Cr corrigés.

3.4.5.2- Description de la méthode de réduction du contraste.

Soient y_c , cb_c , cr_c les coefficients corrigés et x , y , z des réels satisfaisant aux conditions suivantes :

$$0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1 \text{ et } 0 \leq z \leq 1. \quad (3.37)$$

Soient y_R , cb_R , cr_R les coefficients reconstruits, qui donnent une image moins contrastée et qui sont peu différents des coefficients initiaux y , cb , cr . Les coefficients optimisés $\beta_i = \beta_y = \beta_{cb} = \beta_{cr} = \beta$ déterminés par la précédente méthode permettent d'établir les relations suivantes :

$$y = y_a \beta$$

$$cb = cb_a \beta \quad (3.38)$$

$$cr = cr_a \beta$$

où y_a , cb_a , cr_a sont les coefficients atténués donnés par (3.26). Les coefficients reconstruits et qui fournissent une image moins contrastée sont donnés par la relation suivante :

$$\begin{aligned} y_R &= y_a \beta - ny \approx xy_a \\ cb_R &= cb_a \beta - ncb \approx ycb_a \\ cr_R &= cr_a \beta - ncr \approx zcr_a \end{aligned} \quad (3.39)$$

Les quantités permettant la réduction du contraste sont alors données par la relation (3.40) :

$$\begin{aligned} ny &\approx y_a \beta (1 - x / \beta) \\ ncb &\approx cb_a \beta (1 - y / \beta) \\ ncr &\approx cr_a \beta (1 - z / \beta) \end{aligned} \quad (3.40)$$

En considérant que les facteurs x , y , z varient de façon identique de sorte que $x = y = z$ à chaque instant, la relation (3.40) devient :

$$\begin{aligned} ny &\approx y_a (\beta - x) \\ ncb &\approx cb_a (\beta - x) \\ ncr &\approx cr_a (\beta - x) \end{aligned} \quad (3.41)$$

Ainsi après transformation, les coefficients reconstruits qui donnent une image moins contrastée sont exprimés par la relation (3.42).

$$\begin{aligned} y_R &= y_a x \\ cb_R &= cb_a x \\ cr_R &= cr_a x \end{aligned} \quad (3.42)$$

La relation (3.42) établit que lorsque $x = y = z = 0$, on retrouve les coefficients qui permettent la reconstruction d'une image nulle. Lorsque $x = y = z = 1$, on obtient des coefficients qui donneront une image moins contrastée ou atténuée. Ainsi en faisant varier les facteurs x , y et z entre les valeurs 0 et 1 les images reconstruites ont un contraste qui évolue de celui de l'image nulle à celui de l'image atténuée.

Les coefficients r_R , g_R , b_R reconstruits sont alors fournis par la relation (3.43) :

$$r_R = y_a x + 1.402 (c r_a x - 128)$$

$$g_R = y_a x - 0.34414 (c b_a x - 128) - 0.71414 (c r_a x - 128) \quad (3.43)$$

$$b_R = y_a x + 1.772 (c b_a x - 128)$$

3.4.5.3- Conclusion partielle.

Cette méthode de réduction du contraste de l'image débruitée permet une amélioration du rapport signal sur bruit. Elle complète la méthode précédente.

3.4.6- Rehaussement d'images photographiques couleurs compressées par JPEG avec et sans tables de quantification.

Il s'agit ici d'appliquer un ensemble de 4 méthodes de rehaussement à une image JPEG obtenue par les deux schémas avec et sans tables de quantification. Le but recherché est de vérifier s'il y a une différence de comportement entre les 2 schémas. Cette étude permet également de montrer si le choix du schéma sans tables de quantification est pertinent. Aussi elle permet de mettre à la disposition de l'utilisateur une carte de méthodes de rehaussement d'images JPEG. Les 4 méthodes utilisées sont :

- le recadrage de la dynamique ;
- l'égalisation d'histogramme ;
- le rehaussement par loi de puissance modifiée (LPM) ;
- la mesure de la distance entre les pixels reconstruits et la moyenne des pixels de l'image d'entrée.

Le travail consiste en une étude comparative des paramètres statistiques des images JPEG obtenues à partir des deux schémas (avec et sans tables de quantification). Ces paramètres sont l'entropie, l'erreur quadratique moyenne et le rapport signal sur bruit.

3.4.7- Restauration d'images photographiques couleurs compressées par JPEG avec et sans tables de quantification.

3.4.7.1- Introduction.

Les images photographiques sont généralement acquises dans des conditions différentes. Elles sont donc sujettes à des perturbations de diverses natures. Dans ce paragraphe nous voulons utiliser plusieurs techniques de restauration d'images JPEG obtenues à l'aide des 2 schémas de compression cités plus haut. Il s'agit de :

- la correction par atténuation suivie de la réduction du contraste.
- le filtrage de Wiener.
- l'association des deux méthodes.

Nous considérons dans un premier temps le bruit de la transformation RGB -> YCbCr, puis nous généralisons à deux autres types de bruits présentés au chapitre 2. Il s'agit du bruit causé par un mauvais éclairage de l'objet lors de l'acquisition.

3.4.7.2- Restauration d'image JPEG dégradée par le bruit de la transformation RGB -> YCbCr par atténuation des coefficients.

La méthode consiste à compresser et à décompresser une image par les deux schémas de codage JPEG (avec et sans tables de quantification), puis de comparer les paramètres statistiques obtenus dans les deux cas. L'accent est particulièrement mis sur l'entropie, l'erreur quadratique moyenne et le rapport signal à bruit.

3.4.7.3- Restauration d'image JPEG dégradée par le bruit de la transformation RGB -> YCbCr par filtrage de Wiener.

Dans ce cas l'image est compressée et décompressée par les deux schémas de codage JPEG (avec et sans tables de quantification), puis l'algorithme de filtrage de Wiener est appliqué aux deux images obtenues. Leurs paramètres statistiques sont comparés.

3.4.7.4- Restauration d'images JPEG dégradées par le bruit de la transformation RGB -> YCbCr par association des deux méthodes précédentes.

Afin de renforcer la restauration d'images face au bruit de transformation une combinaison des méthodes d'atténuation et du filtrage de Wiener est réalisée. La méthode consiste à compresser une image par chacun des deux schémas de compression JPEG (avec et sans tables de quantification) dans lesquels est introduite la technique d'atténuation. Une fois l'image obtenue, le filtre de Wiener lui est appliqué [12]. Les paramètres statistiques de ces deux images sont comparés.

3.4.8- Application des deux méthodes (atténuation et filtrage de Wiener) dans un contexte de bruits généralisés.

3.4.8.1- Introduction.

Les méthodes de correction par atténuation et par filtrage de Wiener appliquées séparément à une image JPEG présentent chacune des insuffisances. La première en renforce le contraste tandis que la seconde ne fait pas disparaître le bruit

de la transformation RGB -> YCbCr mais plutôt lui fait seulement changer de canal (du vert au bleu). En faisant suivre la correction par atténuation par le filtre de Wiener, il est possible d'améliorer l'opération de restauration.

Dans le contexte de l'enseignement à distance où les données compressées et transmises peuvent subir des perturbations d'origines diverses, une association de plusieurs méthodes de restauration peut être envisagée pendant le codage et après le décodage. Nous prenons en compte un bruit lié au contexte d'acquisition : le bruit causé par un mauvais éclairage de l'objet, le bruit de la transformation RGB -> YCbCr et des bruits additifs comme les bruits blanc gaussien et multiplicatif.

3.4.8.2- Description de l'expérience.

- Les fonctions d'auto corrélation de l'image à restaurer et du bruit additif sont calculées.
- Les densités spectrales des fonctions d'auto corrélation précédentes sont déterminées ainsi que la transformée de Fourier discrète de l'image à restaurer.
- Puis la fonction de transfert de restauration du filtre de Wiener est calculée et appliquée à l'image à restaurer.
- Enfin la transformée de Fourier inverse est appliquée aux coefficients de l'image à restaurer pour fournir l'image corrigée.
- Les paramètres statistiques de l'image sont alors comparés à ceux de l'image originale.

Les résultats sont présentés et discutés dans le chapitre 5.

3.4.9- Modification du schéma de compression JPEG par introduction de la méthode d'atténuation : correction du bruit par anticipation et amélioration du taux de compression.

3.4.9.1- Introduction.

La méthode de correction ACA va être insérée dans le schéma de codage et de décodage JPEG pour prévenir les perturbations du bruit de transformation et évaluer l'effet de cette insertion sur le taux de compression.

3.4.9.2- Insertion des méthodes d'atténuation et de réduction du contraste dans le schéma de codage JPEG.

La **Figure 3.6** présente le modèle du schéma JPEG modifié par l'introduction de la méthode ACA. Les résultats obtenus sont décrits dans le chapitre 4 de ce document.

3.5- CONCLUSION DU CHAPITRE 3.

Des méthodes de rehaussement et de restauration ont été proposées ; il s'agit de :

- la loi de puissance modifiée (LPM) adaptée aux images photographiques couleurs.
- la mesure de la distance entre les pixels reconstruits à la moyenne des pixels de l'image originale.

Des méthodes de restauration, nous avons utilisé :

- une méthode classique de restauration : le filtrage de Wiener. Une méthode de correction de l'atténuation appliquée aux coefficients YCbCr et basés sur les propriétés des transformations linéaires des espaces de couleurs RGB et YCbCr a été élaborée et qui supprime le bruit de la transformation RGB -> YCbCr. Elle renforce l'action du filtre de Wiener et permet une meilleure amélioration de l'image.

Les chapitres 4 et 5 renferment les résultats évoqués dans ce chapitre.

DEUXIEME PARTIE :

**COMPRESSION JPEG SANS TABLES DE
QUANTIFICATION ET AMELIORATION
D'IMAGES.**

CHAPITRE 4 :

ETUDE COMPARATIVE DES SCHEMAS DE COMPRESSION JPEG AVEC OU SANS TABLES DE QUANTIFICATION.

4.1- INTRODUCTION.

Le schéma de compression JPEG séquentiel de base utilise les tables de quantification afin d'améliorer la qualité visuelle des images reconstruites. Ces tables ont été établies en se basant sur les facteurs de perception visuelle [84], [19]. Leur choix est le résultat d'un compromis entre le taux de compression et la qualité de l'image. Un choix inadéquat peut provoquer l'apparition des blocs sur l'image reconstruite qui résulte d'une quantification très sévère lorsqu'il s'agit d'avoir un taux de compression très élevé. Il ne faut pas non plus réduire considérablement le taux de compression en voulant éviter l'effet de bloc car les objectifs d'économie sur les mémoires de stockage ou les contraintes de limitation en bande passante ne seront pas satisfaits.

Le but de la compression JPEG est de comprimer des images photographiques couleur ou noir et blanc en réduisant suffisamment les redondances spatiales qu'elles renferment. Les études menées avant l'établissement de la norme JPEG prenaient en compte le facteur de qualité qui est le paramètre dont la variation permet de contrôler le pas de quantification et par conséquent le taux de compression et la qualité des données décompressées. Pour de très grandes valeurs du facteur de qualité, l'image est dégradée par l'apparition des blocs dans cette dernière. Ainsi selon la qualité de service voulue une valeur de ce paramètre est choisie. Il semble que la valeur 3 puisse donner de bons résultats [88]. La norme JPEG n'a pas standardisé le facteur de qualité laissant ainsi ouvert le domaine pour d'éventuelles études.

Les résultats obtenus à l'aide de JPEG séquentiel de base avec tables de quantification sont très satisfaisants notamment en ce qui concerne la qualité de l'image reconstruite. Les taux de compression obtenus sont assez élevés (de l'ordre de 80 à 90%). Nous montrons dans ce chapitre comment, en se passant des tables de quantification normalisées, on peut se rapprocher des mêmes résultats par l'utilisation du facteur de qualité. Cette démarche est indispensable si l'on veut effectuer certaines opérations de post traitement sur une image JPEG. Elle est aussi utile lorsqu'il s'agit d'économiser une partie de la bande passante en se passant des tables de quantification.

Nous partons de l'étude des variations des paramètres statistiques de l'image en fonction du facteur de qualité fq . Les paramètres choisis sont l'erreur quadratique moyenne (EQM), le rapport signal sur bruit (RSB) qui aide à juger de la dégradation dans l'image reconstruite et par conséquent d'arrêter l'expérience en cas de besoin.

Le paramètre entropie nous permet d'apprécier la distance entre les quantités d'information contenues dans les images obtenues d'une part par JPEG séquentiel de base avec tables (JPEG ATQ) et d'autre part par la compression JPEG sans tables de quantification normalisées (JPEG STQ). En fait l'entropie nous sert ici comme un repère qui informe sur le choix de l'image la plus proche de celle fournie par la compression JPEG ATQ.

4.2- OBJET DE L'ETUDE.

L'étude porte sur des images photographiques couleurs prises dans des conditions diverses et elles présentent les caractéristiques suivantes :

- Taille : 256 x 256 pixels.
- Format : BMP avec 24 bits par pixel.
- Résolution du scanner : 300 dpi.
- Résolution d'affichage : 800 par 600 pixels.
- Ordinateur : PC – Intel – Pentium II – 300MHZ - ZENITH-DATA SYSTEMS.

Le **Tableau 4.1** complète ces caractéristiques.

Tableau 4.1 : Caractéristiques des images étudiées.

Noms	Années	Lieux	Systèmes d'acquisition	Entropies R-G-B	Somme d'entropies
Test1	2001	Yaoundé ville	Photo classique	R : 2.33 G : 2.65 B : 2.62	7.60
Test2	1999	Abidjan aéroport	Photo classique	R : 1.95 G : 2.52 B : 2.36	6.83
Test3	1993	Montpellier gare ferroviaire	Photo instantanée	R : 2.77 G : 2.84 B : 2.98	8.59

4.3- RAPPEL METHODOLOGIQUE.

L'objectif recherché ici est de remplacer le schéma de codage JPEG séquentiel avec tables de quantification ou JPEG – ATQ par celui qui utilise le facteur de qualité ou JPEG – STQ. La méthode est constituée de 4 étapes :

- 1- étudier la variation de l'entropie dans les 3 canaux Y, Cb, Cr en fonction du facteur de qualité f_q et en utilisant le schéma JPEG – STQ;
- 2- compresser l'image en se servant des tables de quantification (JPEG – ATQ), puis mesurer les entropies correspondant aux canaux Y, Cb, Cr ;
- 3- choisir les valeurs d'entropie du schéma JPEG – ATQ sur les courbes précédentes, déduire les facteurs de qualité correspondantes et compresser l'image en utilisant ces facteurs (JPEG - STQ);
- 4- comparer les images obtenues par la mesure de l'EQM et du RSB ;

4.4- ETUDE COMPARATIVE DES SCHEMAS DE COMPRESSION JPEG AVEC OU SANS TABLES DE QUANTIFICATION.

4.4.1- Etude de la variation d'entropie en fonction du facteur de qualité f_q .

a- Expérience.

Pour chaque image donnée, on applique la compression JPEG sans tables de quantification en utilisant le facteur de qualité f_q . Les courbes de variation des entropies des canaux Y, Cb, Cr et R, G, B sont tracées.

b- Résultats.

Les Figures 4.1a et b, 4.2a et b, 4.3a et b suivantes donnent ces variations. Le Tableau 4.2 présente les valeurs des paramètres statistiques des deux images pour les schémas sans et avec tables de quantification.

Figure 4.1a : Variation d'entropies de Y, Cb, Cr pour Test1.

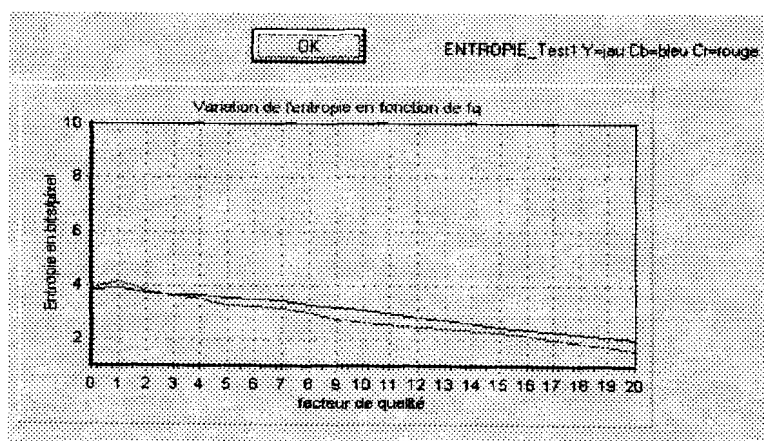


Figure 4.1b : Variation d'entropies de R, G, B pour Test1.

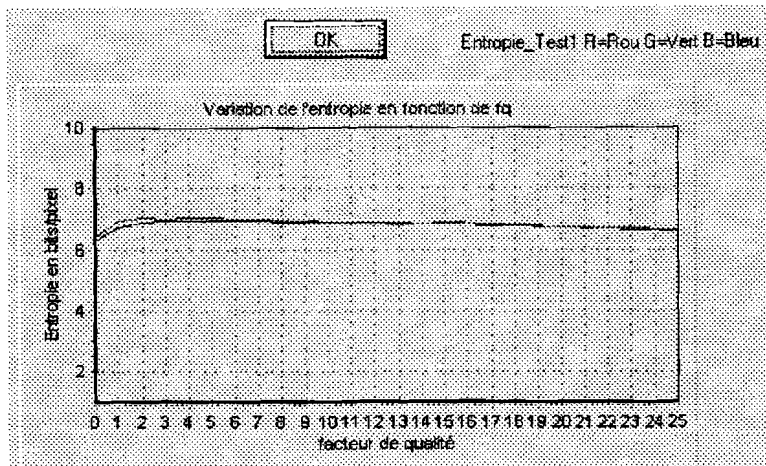


Figure 4.2.a : Variation d'entropies de Y, Cb, Cr pour Test2.

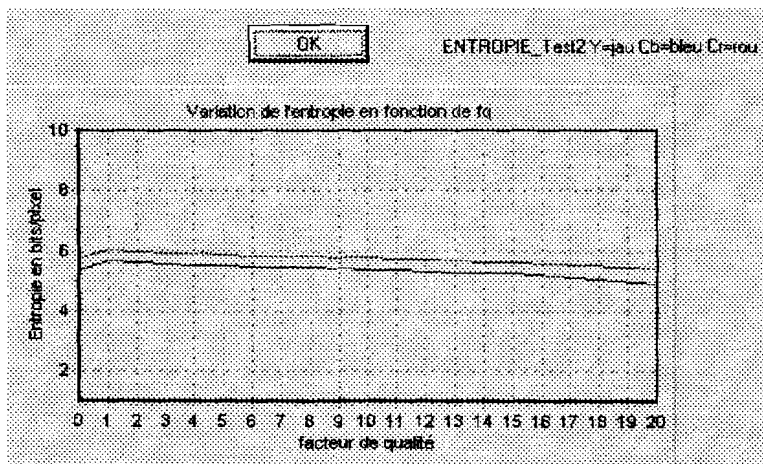


Figure 4.2.b : Variation d'entropies de R, G, B pour Test2.

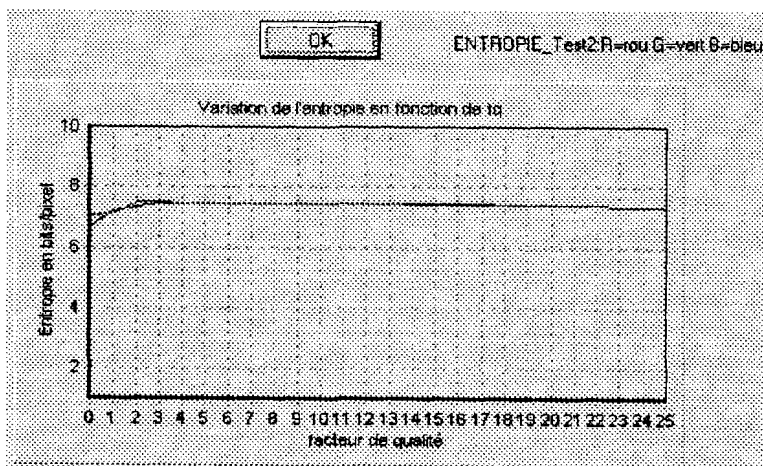


Figure 4.3.a : Variation d'entropies de Y, Cb, Cr pour Test3.

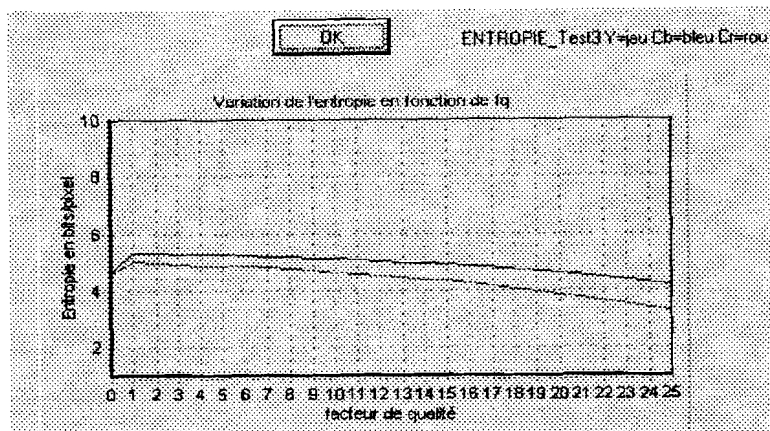


Figure 4.3.b : Variation d'entropies de R, G, B pour Test3.

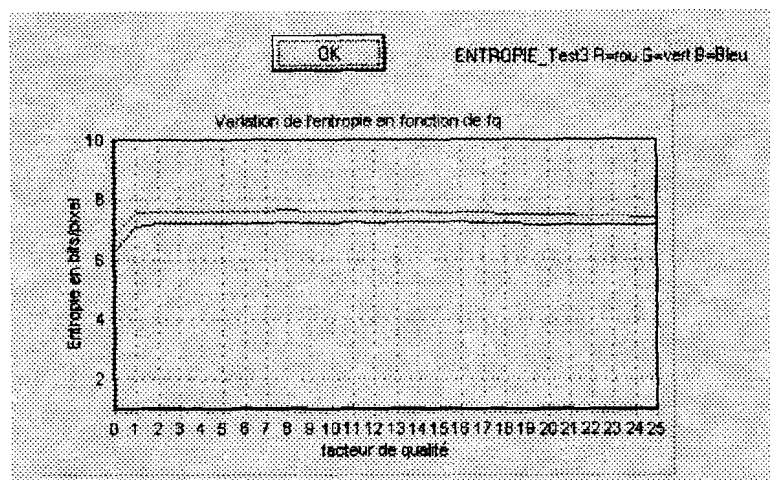


Tableau 4.2 : Valeurs d'entropies pour les deux schémas de compression pour Test1.

Entropies	JPEG-ATQ.	JPEG-STQ
Y	6.98	6.98 $f_q = 4$
Cb	2.73	2.80 $f_q = 12$
Cr	2.41	2.38 $f_q = 13$
R	6.97	6.95
G	6.95	6.96
B	7.00	7.01

Tableau 4.3 : Valeurs d'entropies pour les deux schémas de compression pour Test2.

Entropies	JPEG-ATQ.	JPEG-STQ
Y	7.31	7.31 $f_q = 5$
Cb	5.40	5.42 $f_q = 9$
Cr	5.78	5.77 $f_q = 10$
R	6.95	6.94
G	7.46	7.46
B	7.49	7.49

Tableau 4.4 : Valeurs d'entropies pour les deux schémas de compression pour Test3.

Entropies	JPEG-ATQ.	JPEG-STQ
Y	7.24	7.25 $f_q = 2$
Cb	5.04	5.06 $f_q = 11$
Cr	4.54	4.56 $f_q = 11$
R	7.24	7.29
G	7.24	7.26
B	7.61	7.65

Tableau 4.5 : Valeurs des paramètres statistiques des images compressées et décompressées avec tables de quantification (JPEG ATQ).

Paramètres statistiques	Test1	Test2	Test3
R	6.97	6.95	7.24
Entropies G	6.95	7.46	7.24
B	7.00	7.49	7.61
EQM R	1029	384	214
G	197	328	152
B	230	488	339
SNR R	14.43	12.44	17.66
G	21.52	16.39	20.26
B	20.90	16.79	18.30

Tableau 4.6 : Valeurs des paramètres statistiques des images compressées et décompressées sans tables de quantification (JPEG STQ).

Paramètres statistiques		Test1	Test2	Test3
R		6.95	6.94	7.29
Entropies	G	6.96	7.46	7.26
	B	7.01	7.49	7.65
EQM	R	920	377	200
	G	178	320	104
	B	238	481	328
RSB	R	14.94	12.43	17.95
	G	21.96	16.48	21.89
	B	20.77	16.88	18.48

c- Analyse et discussion.

D'après les résultats obtenus, on constate que les valeurs d'entropies des canaux Y, Cb, Cr de l'image compressée à l'aide des tables de quantification se retrouvent sur les courbes de variation des entropies en fonction du facteur de qualité. En choisissant ces valeurs égales ou proches de celles fournies par la compression JPEG avec tables de quantification (JPEG ATQ), on obtient des valeurs d'entropies des canaux R, G et B presque identiques. C'est ce que nous montrent les **Tableaux 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 et 4.6**. Le fait que ces valeurs dans les canaux R,G,B soient très proches montre bien la forte corrélation qui existe entre les coefficients R, G, B d'une image photographique couleur. Les **Figures 4.1b, 4.2b, 4.3b**, le confirment puisque les trois courbes dans chaque cas sont presque confondues.

En repérant sur les courbes de variation des entropies de la luminance Y et des chrominances Cb et Cr les entropies obtenues à partir de la compression JPEG ATQ, on identifie en même temps les facteurs de qualité correspondants. Ces facteurs sont utilisés lors de la compression JPEG sans tables de quantification (JPEG STQ) et permettent d'obtenir une image identique (**Tableaux 4.2, 4.3 et 4.6**) ou presque (**Tableaux 4.4 et 4.5**) de celle obtenue après compression JPEG ATQ.

Les **Tableaux 4.5 et 4.6** présentent les valeurs des paramètres statistiques des mêmes images obtenues après compression et décompression JPEG ATQ et JPEG STQ. On note également une identité (ou presque) du rapport signal sur bruit (RSB) et des écarts sur l'erreur quadratique moyenne (EQM) des coefficients R, G et B.

4.5- CONCLUSION DU CHAPITRE 4.

L'étude comparative des compressions JPEG ATQ et STQ montre qu'il est possible de retrouver les valeurs des paramètres d'une image obtenues lorsqu'on utilise les tables de quantification à partir du schéma de compression qui se sert des facteurs de qualité. L'intérêt principal en est le gain obtenu en bande passante du fait que les tables de quantification (**2x64x4x8 octets soit 4096 octets pour les deux tables utilisées par la norme JPEG**) ne seront plus transmises avec les données compressées à l'utilisateur. Il ne recevra que les trois valeurs entières des facteurs de qualité soient 24 octets si l'on considère un entier écrit sur 4 octets.

Ainsi lors du pré traitement d'une image photographique couleur en vue de sa transmission sur un canal, le choix de l'entropie permet de se passer des tables de quantification. En compressant les images avec les facteurs de qualité correspondants, on se met dans les conditions d'une compression JPEG ATQ, laquelle fournit à la décompression une image de très bonne qualité. Il est donc possible de remplacer les tables de quantification par ces facteurs pendant la transmission.

Une étude préliminaire de l'image à compresser permet, dans le cadre de l'enseignement à distance, de réduire la quantité d'information additionnelle (tables de quantification) à transmettre. Ce qui constitue un gain en bande passante non négligeable.

Le résultat de la compression JPEG STQ étant identique à celui de la compression JPEG ATQ, le schéma de compression JPEG STQ beaucoup plus souple, peut donc constituer une solution de remplacement.

CHAPITRE 5 :

REHAUSSEMENT ET RESTAURATION D'IMAGES PHOTOGRAPHIQUES COULEURS COMPRESSEES ET DECOMPRESSEES PAR JPEG.

5.1- INTRODUCTION.

Dans ce chapitre nous présentons la suite des résultats de l'application des méthodes d'amélioration d'images sur les images photographiques couleurs décrites dans le chapitre 3. Ces images sont au format BMP avec 24 bits par pixel. Avant et après les divers traitements les images sont présentées sur l'écran de caractéristiques suivantes :

Ecran Plug – and – Play sur ATI 3D Rage Pro (atir3)

Couleurs: Couleurs vraies (32 bits)

Zone d'écran : 800 par 600 pixels.

L'étude commence par l'amélioration d'images photographiques couleurs en utilisant le rehaussement par loi de puissance modifiée (LPM). Puis, un ensemble de 4 méthodes de rehaussement et de deux méthodes de restauration sont utilisées pour améliorer une image perturbée par le bruit de la transformation RGB \rightarrow YCbCr. Un examen du comportement des schémas de compression JPEG ATQ et STQ face aux méthodes de rehaussement et de restauration retenues est effectué. L'objectif étant de déterminer le schéma le plus performant. Enfin, une proposition de modification du schéma de codage JPEG est faite pour prévenir l'amélioration d'une image reconstruite et ayant subi une dégradation provoquée par un bruit de codage : le bruit de la transformation RGB \rightarrow YCbCr.

5.2- RAPPEL DE METHODOLOGIE.

Le chapitre 5 renferme des applications et résultats des méthodes introduites au chapitre 3, notamment :

- le rehaussement d'images par loi de puissance modifiée ;
- le rehaussement d'images par mesure de distance entre les pixels reconstruits et la moyenne des pixels originaux ;
- la restauration d'images dégradées par le bruit de la transformation RGB \rightarrow YCbCr en utilisant la méthode d'atténuation suivie de la correction d'atténuation ;
- étude du comportement des schémas JPEG avec et sans tables de quantification face aux différentes méthodes de rehaussement et de restauration d'images ;
- amélioration du taux de compression JPEG par anticipation de la correction du bruit de transformation RGB \rightarrow YCbCr.

5.3- REHAUSSEMENT D'IMAGES PHOTOGRAPHIQUES COULEURS PAR LOI DE PUISSANCE MODIFIEE (LPM).

5.3.1- Expérience.

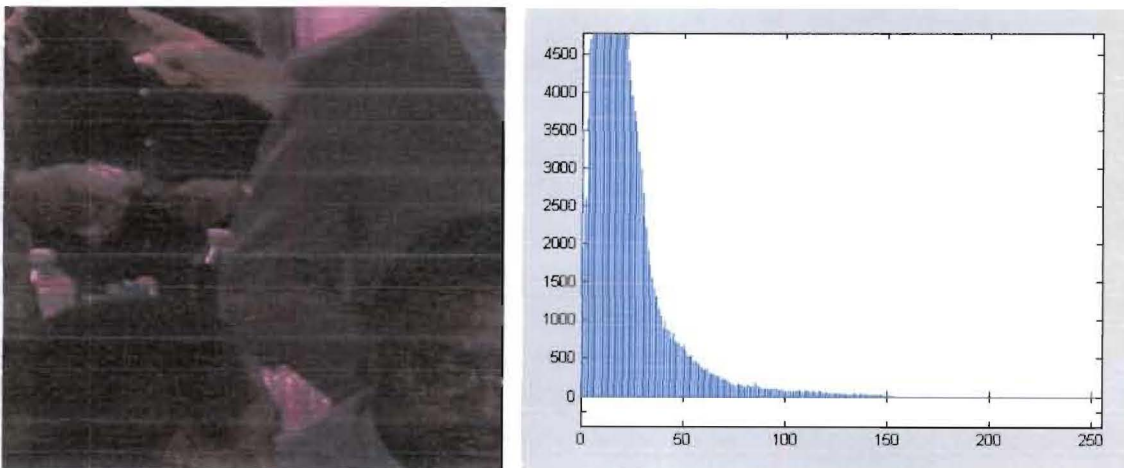
Tel que proposé par William K. Pratt [122], le rehaussement par la loi de puissance donnée par la relation (2.15) fournit avec les images en noir et blanc de bons résultats pour la valeur de la variable $p = 2$ avec $p \in \mathbb{N}^+$. Afin de l'adapter aux images photographiques couleurs, nous proposons un autre domaine de variation de la variable puissance p et la méthode devient la loi de puissance modifiée.

Afin de trouver la variable qui donne la bonne image rehaussée, nous appliquons les deux approches présentées au paragraphe 3.4.2 selon les modèles des figures 3.14 et 3.15.

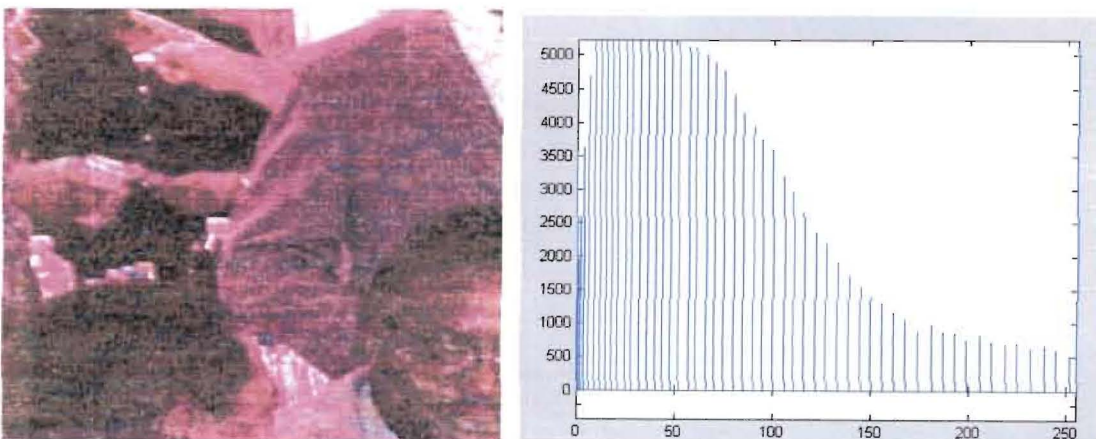
5.3.1.1 : Approche directe.

Soit l'image de la figure 5.1 et son histogramme :

Figure 5.1 : Image Eamac et son histogramme



En appliquant la relation (3.11) et en fixant $\eta = 2\%$, on obtient $p' = 1.6195$ et l'image améliorée suivante :



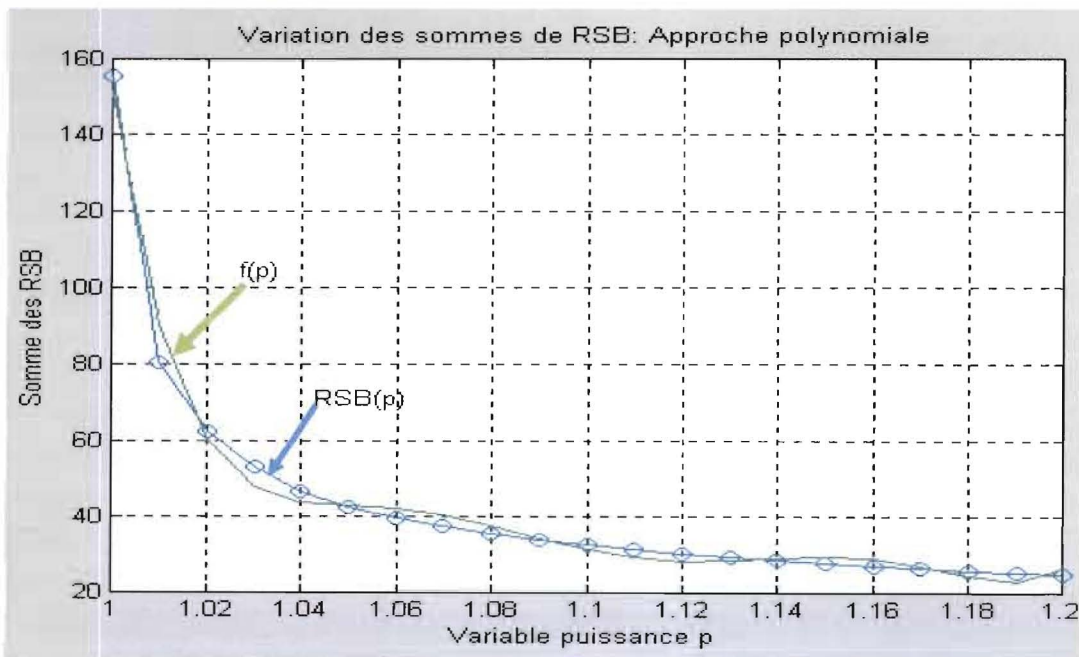
5.3.1.2 : Approche polynomiale

L'algorithme est présenté ci-après. Soit la variable réelle $p' \in \mathbb{R}^+$:

- Varier p' de 1 à 1.99 au pas de 0.01.
- Appliquer l'équation (2.15) dans laquelle p est remplacé par p' .
- Ecrire l'image $G(j,k)$ en ramenant les coefficients R, G, B dans l'intervalle de valeurs 0 à 255.
- Calculer les RSB et leur somme $\sum RSB$ pour chaque image correspondant à la valeur p' .
- Tracer la courbe $\sum RSB = f(p')$.
- Appliquer le modèle défini au paragraphe 3.4.2 figure 3.15.
- La valeur de p' est donnée par l'une des racines du polynôme d'approximation.

L'exemple de l'image Nanie donne les résultats suivants :

Figure 5.2 : Image Nanie originale et Variation de $\sum RSB = f(p')$



$$f(p') = 10^9 (0.1560p'^6 - 1.0409p'^5 + 2.8930p'^4 - 4.2856p'^3 + 3.5688p'^2 - 1.5841p' + 0.2928)$$

Les 6 racines de $f(p')$ sont complexes et dont les modules se réduisent aux 3 valeurs suivantes :

$$p_1 = 1.1993$$

$$p_2 = 1.1166$$

$$p_3 = 1.0231$$

Les 3 images produites en utilisant comme variable puissance p_1 , p_2 et p_3 montrent que l'image à retenir est celle qui est donnée par $p_3 = 1.0231$.

Figure 5.3 : Images Nanie rehaussée par approche polynomiale.

$$p_1 = 1.1993$$

$$p_2 = 1.1166$$

$$p_3 = 1.0231$$



$$\Sigma\text{RSB} = 25.06\text{dB}$$

$$30.86\text{dB}$$

$$60.55\text{dB}$$

5.3.1.3 Etude comparative des méthodes loi de puissance (LP) et LPM

L'étude porte sur 2 images photographiques couleurs au format BMP 24 bits, nommées Monsieur et Flamant qui présentent un bruit lié au contexte d'acquisition se traduisant par un arrière-plan sombre dû à un éclairage insuffisant pendant la prise de vue.

Figure 5.4: Monsieur original



Figure 5.5: Flamant



Tableau 5.1: Entropies des 2 images originales.

	Monsieur	Flamant
R	7.25	5.98
Entropie G	7.23	6.04
B	7.41	6.11

On utilise la variable puissance $p = 2$ donnée par W.K. Pratt [122] et $p' = 1.05$ fournie par l'approche directe. On obtient les images suivantes :

Figure 5.6: Monsieur rehaussé par :

$p = 2$:



$p' = 1.05$



Figure 5.7: Flamant rehaussé par :



Tableau 5.2 : Valeurs des paramètres statistiques.

Par. statistiques		Monsieur		Flamant	
		$p = 2$	$p' = 1.05$	$p = 2$	$p' = 1.05$
Entropie	R	1.68	6.72	0.08	6.52
	G	0.41	6.70	0.22	6.58
	B	0.14	6.86	0.01	6.45
EQM	R	20720	388	20339	364
	G	30805	449	18157	432
	B	18742	975	13757	586
RSB	R	3.92	16.49	5.03	17.13
	G	3.11	16.20	5.48	16.74
	B	5.36	14.70	6.74	16.37

Analyse des paramètres statistiques.

Le tableau 5.2 montre un grand écart entre les paramètres statistiques fournis par p [122] et p' que nous avons proposé. On note de très grandes valeurs des EQM obtenu à partir de p . Ces résultats montrent que les images sont de mauvaise qualité.

Avec la valeur $p' = 1.05$, on observe une légère variation de l'entropie par rapport à l'entropie des images originales (comparer Tableaux 5.1 et 5.2). Les valeurs des RSB sont nettement plus grandes que celles obtenues avec $p = 2$. Par conséquent, ces images sont de bonne qualité.

5.3.2.4- Efficacité de la loi de puissance modifiée.

Pour les valeurs de $p' > 1.05$, le contraste est davantage amélioré. Certains détails cachés sur l'image originale sont découverts. C'est ce qu'on observe sur les images Monsieur et Flamant dont l'arrière-plan est sombre initialement. Comparer les Figures 5.8, 5.10 et 5.4, 5.5. Sur l'image Flamant le mur était totalement noir sur sa version initiale. La restitution de ces détails cachés se fait au détriment des objets de l'image sur lesquels la mise au point était faite lors de la prise de la scène. Voir Figures 5.9 et 5.10, où les oiseaux disparaissent au profit du mur ! L'efficacité de la LPM est mise en évidence sur les Figures 5.8, 5.9, 5.10.

Figure 5.8: Monsieur rehaussé ($p' = 1.2$)



Figure 5.9: Flamant rehaussé ($p' = 1.4$)



Figure 5.10: Flamant rehaussé ($p' = 1.8$)



5.3.3- Conclusion.

Appliqué sur une image photographique couleur, le rehaussement par la loi de puissance modifiée améliore son contraste. Elle constitue une excellente méthode de traitement des images photographiques couleurs que nous avons élaboré.

5.4- REHAUSSEMENT D'IMAGES PHOTOGRAPHIQUES COULEURS DEGRADEES PAR LE BRUIT DE LA TRANSFORMATION RGB -> YCBCR.

5.4.1- Expérience.

L'expérience porte sur 2 images BMP 24 bits : Test1, Test 2.

Figure 5.11 : Test1 original



Figure 5.12 : Test2 original



5.4.1.1- Description de l'expérience et présentation de l'algorithme utilisé.

Nous mettons d'abord en évidence la présence du bruit de la transformation sur chacune des images. Puis nous calculons les paramètres statistiques. Ensuite nous appliquons quatre méthodes différentes de rehaussement d'images sur chacune d'elle et calculons également les paramètres statistiques avant de comparer. Il s'agit :

- du recadrage de la dynamique ;
- de l'égalisation d'histogramme ;
- de la loi de puissance modifiée (LPM) ;
- de la méthode de mesure de la distance entre les pixels reconstruits et la moyenne des pixels originaux (voir l'algorithme du paragraphe 3.4.3).

Algorithme utilisé :

- 1- Ouvrir l'image originale et récupérer ses coefficients R, G et B.
- 2- Appliquer la transformation RGB -> YCbCr.
- 3- Appliquer la transformation inverse YCbCr -> RGB.
- 4- Ecrire l'image transformée.
- 5- Calculer les paramètres statistiques (E, EQM, RSB) de l'image transformée.
- 6- Appliquer le recadrage de la dynamique sur les coefficients de luminance Y de l'image transformée. Voir modèle donné par (2.14).
- 7- Ecrire l'image recadrée.
- 8- Calculer ses paramètres statistiques (E, EQM, RSB).
- 9- Appliquer l'égalisation d'histogramme sur les coefficients de luminance Y de l'image transformée selon la relation (2.16).
- 10-Ecrire l'image égalisée et calculer ses paramètres statistiques (E, EQM, RSB).
- 11-Appliquer la loi de puissance modifiée sur les coefficients R, G, B de l'image transformée d'après le modèle de la figure 3.14.
- 12-Ecrire l'image rehaussée et calculer ses paramètres statistiques (E, EQM, RSB).
- 13-Appliquer sur les coefficients R, G, B et selon le modèle de la figure 3.8, la méthode de correction par mesure de la distance entre les pixels reconstruits et la moyenne des pixels originaux.
- 14-Ecrire l'image corrigée et calculer ses paramètres statistiques (E, EQM, RSB).
- 15-Comparer les paramètres statistiques.

5.4.2- Résultats et analyse.

Les résultats sont constitués de deux parties : la mise en évidence du bruit de la transformation RGB -> YCbCr et les effets de l'application des 4 méthodes de rehaussement.

5.4.2.1- Mise en évidence du bruit de la transformation.

a- Analyse des images transformées.

Les images transformées présentent ce bruit sous forme de grains verts dont la densité dépend de l'image, voir **Figures 5.13 et 14.**

Figure 5.13 : Test1 dégradée.



Figure 5.14 : Test2 dégradée..



b- Analyse des paramètres statistiques.

Le **Tableau 5.3** renferme les valeurs des 3 paramètres entropie E, EQM et RSB des 2 images traitées. On note une faible variation des entropies des images transformées par rapport aux originales, de petites valeurs des EQM et une forte valeur des RSB. Ce qui montre que les deux types d'images ne sont pas très différentes.

Tableau 5.3 : Paramètres statistiques sur les coefficients RGB des images dégradées

PS	Test1		Test2	
	Ori	Dégrad.	Ori.	Dégrad
Entropie	R	2.33 3.28	1.95 3.39	
	G	2.65 3.16	2.52 3.13	
	B	2.62 3.29	2.36 3.15	
EQM	R	0.97	3.99	
	G	0.20	0.72	
	B	1.20	2.48	
RSB	R	44.96	32.39	
	G	51.46	43.12	
	B	43.50	39.95	

c- Caractéristiques du bruit de transformation.

Nous présentons dans le Tableau 5.4 quelques caractéristiques de ce bruit calculées sur l'ensemble de l'image. Il s'agit de la moyenne et de l'écart type.

Tableau 5.4 : Caractéristiques du bruit de transformation.

Caractéristiques	Test1	Test2
Moyenne R	2.14	2.25
Moyenne G	0.70	0.81
Moyenne B	1.26	1.53
Ecart type R	0.96	0.69
Ecart type G	0.46	0.39
Ecart type B	0.46	0.53

Ces valeurs, bien qu'étant faibles, montrent l'importance du bruit de transformation RGB -> YCbCr selon les images étudiées. Les moyennes de ce bruit dans les canaux rouge et bleu, sont supérieures à 1 mais inférieures à 1 dans le vert. Les écarts types sont inférieurs à 1 et beaucoup plus faibles pour le canal vert.

5.4.2.2- Analyse des résultats fournis par les 4 méthodes de rehaussement.

Les résultats fournis par les 4 techniques de rehaussement sont présentés sous forme d'images et sous forme de tableaux récapitulatifs des 3 paramètres statistiques (E, EQM et RSB).

a- Analyse des images.

a.1 Le recadrage de la dynamique ne supprime pas le bruit de la transformation RGB->YCbCr ; l'image recadrée est très voisine de l'image dégradée comme le montrent les **Figures 5.13 et 15a, 5.14 et 16a**.

a.2 L'égalisation d'histogramme ne donne aucun résultat satisfaisant comme l'avait annoncé W.K. Pratt [122] : une bonne qualité d'image peut être dégradée par l'égalisation d'histogramme.

a.3 Bien que le contraste de l'image soit nettement améliorée, la loi de puissance modifiée ne supprime pas le bruit de transformation, mais le fait passer du canal vert au canal bleu comme on peut le constater sur la **Figures 5.15d et 5.16d**.

a.4 La méthode de correction par la mesure de la distance des pixels reconstruits à la moyenne des originaux fournit d'excellents résultats quant à la suppression de ce bruit (comparer **Figures 5.15c et 5.13, 16c et 5.14**).

Les figures suivantes montrent les différences entre ces techniques en terme de qualité d'images :

-> Test1

Figure 5.15 a: Test1 recadrée



Figure 5.15 b : Test1 égalisée



Figure 5.15 c: Test1 corrigée



Figure 5.15 d: Test1 rehaussée par LPM ($p=1.05$)



-> Test2

Figure 5.16a: Test2 recadrée



Figure 5.16b : Test2 égalisée



Figure 5.16c: Test2 corrigée



Figure 5.16d: Test2 rehaussée par LPM ($p=1.05$)



b- Analyse des paramètres statistiques.

Les Tableaux 5.5a, b, c, d présentent les valeurs des paramètres statistiques E, EQM et RSB fournis par les 4 techniques de rehaussement utilisées.

b.1 Pour le recadrage de la dynamique, on note dans le canal R, une légère diminution des 2 paramètres E et EQM puis une légère augmentation du RSB pour les 2 images. Cela montre qu'une amélioration des images traitées s'est produite et par conséquent, une faible réduction du bruit de la transformation RGB -> YCbCr (comparer les **Tableaux 5.3 et 5.5a**).

b.2 L'égalisation d'histogramme ne fournit aucun résultat satisfaisant.

b.3 La loi de puissance modifiée fournit des images à contraste important avec dans l'ensemble des RSB moins grands par rapport aux trois autres techniques, preuve que la qualité de l'image est réduite.

b.4 La correction par la mesure de la distance entre les pixels reconstruits et la moyenne des pixels originaux fournit un excellent résultat avec des RSB assez élevés (comparer **Tableaux 5.5c et 5.3**). D'autre part les valeurs des EQM sont très petites, preuve que les images obtenues à l'aide de cette méthode sont plus proches des images originales. Cette méthode supprime le bruit de la transformation RGB -> YCbCr.

Tableau 5.5a : Paramètres statistiques donnés par le recadrage dynamique.

Par. Stat.		Test1	Test2
Entropie	R	3.16	3.34
	G	3.16	3.13
	B	3.26	3.15
EQM	R	0.78	3.96
	G	0.20	0.72
	B	1.27	2.48
RSB	R	45.92	32.42
	G	51.46	43.12
	B	43.58	39.95

Tableau 5.5b : Paramètres statistiques donnés par égalisation d’histogramme.

Par. Stat.	Test1	Test2
Entropie	R	-
	G	-
	B	-
EQM	R	-
	G	-
	B	-
RSB	R	-
	G	-
	B	-

Tableau 5.5c : Paramètres statistiques donnés par la mesure de distance entre pixels reconstruits et la moyenne des pixels originaux.

Par. Stat.	Test1	Test2
Entropie	R	2.48
	G	2.64
	B	2.77
EQM	R	1.01
	G	0.28
	B	0.71
RSB	R	38.54
	G	47.35
	B	45.44

Tableau 5.5d : Paramètres statistiques donnés par LPM.

Par. Stat.	Test1	Test2
Entropie	R	3.16
	G	2.86
	B	3.23
EQM	R	2866
	G	3719
	B	2.48
RSB	R	7.14
	G	3.72
	B	39.95

5.4.3- Conclusion.

L'étude comparative des 4 méthodes de rehaussement appliquées à une image dégradée par le bruit de transformation RGB \rightarrow YCbCr donne des résultats intéressants pour la méthode de correction par la mesure de la distance entre les pixels de l'image reconstruite à la moyenne des pixels de l'image d'entrée. Le bruit est supprimé et le contraste de l'image corrigée est très peu modifié.

Le rehaussement par la loi de puissance modifiée, bien qu'elle modifie le canal du bruit, donne une image dont le contraste peut permettre d'identifier des détails de l'image dégradée.

L'égalisation n'a pas donné de résultats satisfaisants dans cette étude.

Dans le cadre de notre travail, les méthodes de correction par mesure de la distance et la loi de puissance modifiée peuvent être retenues pour le rehaussement d'image dégradée par le bruit de la transformation RGB \rightarrow YCbCr. Elles s'appliquent directement sur les coefficients corrélés R, G et B.

5.5-RESTAURATION D'IMAGES PHOTOGRAPHIQUES COULEURS DEGRADEES PAR LE BRUIT DE LA TRANSFORMATION RGB \rightarrow YCBCR.

Nous utilisons dans cette partie deux méthodes de restauration : la méthode de restauration par atténuation et optimisation et la méthode de filtrage de Wiener implémenté de façon simplifiée par Santiago I. Betelu [12]. Ce filtre est un filtre de lissage.

5.5.1- Expérience.

Les deux méthodes sont appliquées séparément pour corriger ce bruit. Puis elles sont associées pour la correction du même bruit. Les paramètres statistiques sont calculés puis comparés.

Le paramètre d'atténuation $\text{var} = C = 2$ et les facteurs d'optimisation ou de reconstruction $\beta_y = \beta_{cb} = \beta_{cr} = 0.8$ choisis selon l'algorithme donné en 3.4.4.2 et en prenant pour $\text{var} = c$ une valeur qui n'entraînera pas des effets de blocs sur l'image.

5.5.1.1- Algorithme de correction par atténuation et optimisation ou reconstruction :

- 1- Ouvrir l'image originale puis appliquer sur ses coefficients R,G,B la transformation RGB \rightarrow YCbCr.
- 2- Appliquer l'atténuation aux coefficients Y, Cb et Cr soit : $Y' \leftarrow Y/C$, $Cb' \leftarrow Cb/C$, $Cr' \leftarrow Cr/C$. Voir modèle de la figure 3.9.

- 3- Appliquer la correction d'atténuation sur les coefficients Y' , Cb' et Cr' en les multipliant chacun par les facteurs d'optimisation ou de reconstruction β_y , β_{cb} , β_{cr} . Ces facteurs sont fournis par l'algorithme développé au chapitre 3 paragraphe 3.4.4.2.
- 4- Ecrire l'image atténuée et corrigée.
- 5- Calculer les paramètres statistiques (E, EQM, RSB) de l'image atténuée.
- 6- Appliquer le filtre de Wiener sur l'image atténuée d'après la relation (2.28).
- 7- Calculer les paramètres statistiques de l'image filtrée.
- 8- Comparer les paramètres statistiques (E, EQM, RSB) des images atténuée et filtrée.

5.5.1.2- Algorithme du filtrage de Wiener appliqué à l'image transformée.

- 1- Ouvrir l'image originale et appliquer à ses coefficients R, G, B la transformation RGB \rightarrow YCbCr.
- 2- Appliquer la transformation inverse YCbCr \rightarrow RGB et reconstruire l'image transformée.
- 3- Appliquer le filtre de Wiener sur l'image transformée.
- 4- Calculer les paramètres statistiques (E, EQM, RSB) de l'image transformée et filtrée.

5.5.2- Résultats et analyse.

Nous présentons les cas images obtenues et les paramètres statistiques.

5.5.2.1- Analyse des images.

Les images obtenues par application de la méthode de correction par atténuation et reconstruction présentent un fort contraste. Le bruit de la transformation RGB \rightarrow YCbCr a disparu (comparer les **Figures 5.13** et **5.17a**, **5.14** et **5.18a**).

Par contre l'action du filtre de Wiener sur les images transformées fait changer le bruit de transformation du canal vert au canal bleu (**voir Figures 5.17b**, **5.18b**). Cependant, le contraste de l'image n'est pas modifié par rapport à l'image originale. L'association des deux filtres (filtre de Wiener et filtre de correction par atténuation et reconstruction) permet d'obtenir un résultat satisfaisant. En effet, le bruit de transformation a disparu puis le fort contraste de l'image atténuée s'est réduit. En plus, certains détails cachés de l'image originale apparaissent (comme les yeux sur la **Figure 5.17c**).

-> Test1

Fig. 5.17a: atténuée Fig. 5.17b: filtrée par Wiener. Fig. 5.17c: atténuée et filtrée.



-> Test2

Fig. 5.18a: atténuée Fig. 5.18b: filtrée par Wiener. Fig. 5.18c: atténuée et filtrée.



5.5.2.2- Analyse des paramètres statistiques.

Les **Tableaux 5.6a, b** regroupent toutes les valeurs des 3 paramètres statistiques E, EQM et RSB.

On note que pour toutes les images traitées, une faible variation de l'entropie pour les 3 types de filtres d'où une faible de la quantité d'information.

L'EQM est plus grande pour le filtre d'atténuation que pour celui de Wiener. L'association des deux filtres fournit des images à faible EQM montrant une nette amélioration de la qualité. Ce résultat est confirmé par les grandes valeurs du rapport signal sur bruit que l'on observe dans tous les cas étudiés (**colonne 5 des tableaux**).

Tableau 5.6a : Paramètres statistiques donnés par les 3 filtres pour Test1.

Paramètres stat	Im. Dégradée	Atténuation	Filtre Wiener	Association
R	3.28	3.34	3.17	3.24
Entropie G	3.16	3.21	2.88	3.37
B	3.29	3.32	3.25	3.35
EQM R	0.97	6166	254	129
G	0.20	2837	254	242
B	1.20	3434	254	189
RSB R	44.96	8.50	20.44	21.93
G	51.46	8.55	21.88	22.54
B	43.50	9.75	20.65	22.32
Σ RSB	139.19	26.80	62.97	66.79

Tableau 5.6b : Paramètres statistiques donnés par les 3 filtres pour Test2.

Paramètres stat	Im. Dégradée	Atténuation	Filtre Wiener	Association
R	3.39	3.53	3.12	3.50
Entropie G	3.13	3.49	3.36	3.54
B	3.15	3.37	3.15	3.38
EQM R	3.99	11175	254	129
G	0.72	1345	254	242
B	2.48	1841	254	189
RSB R	32.39	4.42	17.59	20.89
G	43.12	10.75	15.25	21.03
B	39.95	12.35	19.80	22.21
Σ RSB	115.46	27.52	52.64	64.13

5.5.3- Conclusion.

Les deux méthodes de restauration appliquées individuellement présentent chacune des insuffisances. Il s'agit d'un fort contraste pour la méthode d'atténuation et de l'incapacité à supprimer le bruit de transformation par le filtre de Wiener. En combinant les deux méthodes, le contraste est réduit et le bruit de transformation est supprimé. En plus, les EQM et les RSB sont nettement améliorés. Cette combinaison constitue donc un moyen efficace de correction du bruit de la transformation RGB -> YCbCr.

5.6-COMPRESSION ET DECOMPRESSION D'IMAGES PHOTOGRAPHIQUES COULEURS PAR JPEG.

5.6.1- Evolution des paramètres statistiques d'une image à chaque étape de la compression JPEG ATQ.

Il s'agit ici de suivre l'image dans les différentes phases de la compression JPEG ATQ. Le schéma utilisé est le schéma de compression JPEG séquentiel avec un rapport de sous échantillonnage 4 :1 :1.

5.6.1.1- Expérience.

5.6.1.1.1- Description de l'expérience.

L'étude porte sur deux images Test1 et Test2. Il s'agit de produire des images transformées (Ima_T), transformées et sous échantillonnées (Ima_T_SE), transformées + sous échantillonnées et transformées par la TCD (Ima_T_SE_TCD), transformées + sous échantillonnées + transformées par la TCD et quantifiées (Ima_T_SE_TCD_Q). A chaque étape sont calculés les paramètres statistiques.

5.6.1.1.2- Algorithmes utilisés.

a- Algorithme de construction de l'image transformée Ima_T.

- 1- Ouvrir l'image originale et récupérer ses coefficients RGB.
- 2- Appliquer la transformation RGB -> YCbCr.
- 3- Appliquer la transformation inverse YCbCr -> RGB.
- 4- Ecrire l'image transformée.
- 5- Calculer les paramètres statistiques E, EQM et RSB.

b- Algorithme de construction de l'image Ima_T_SE.

- 1- Ouvrir l'image originale et récupérer ses coefficients RGB.
- 2- Appliquer la transformation RGB -> YCbCr.
- 3- Effectuer le sous échantillonnage des coefficients de chrominances Cb, Cr.
- 4- Appliquer la transformation inverse YCbCr -> RGB.
- 5- Ecrire l'image transformée et sous échantillonnée.
- 6- Calculer les paramètres statistiques E, EQM et RSB.

c- Algorithme de construction de l'image Ima_T_SE_TCD.

- 1- Ouvrir l'image originale et récupérer ses coefficients RGB.
- 2- Appliquer la transformation RGB -> YCbCr.
- 3- Effectuer le sous échantillonnage des coefficients de chrominances Cb et Cr.

- 4- Appliquer la TCD sur les coefficients Y, Cb, Cr.
- 5- Effectuer la TCD inverse sur les coefficients Y, Cb, Cr.
- 6- Effectuer le sur échantillonnage des coefficients de chrominances Cb et Cr.
- 7- Effectuer la transformation inverse YCbCr -> RGB et écrire l'image Ima_T_SE_TCD.
- 8- Calculer les paramètres statistiques E, EQM et RSB.

d- Algorithme de construction de l'image Ima_T_SE_TCD_Q.

- 1- Ouvrir l'image originale et récupérer ses coefficients RGB.
- 2- Appliquer la transformation RGB -> YCbCr.
- 3- Effectuer le sous échantillonnage des coefficients de chrominances Cb, Cr.
- 4- Appliquer la TCD sur les coefficients Y, Cb, Cr.
- 5- Effectuer la quantification des coefficients transformés.
- 6- Appliquer la quantification inverse.
- 7- Appliquer la transformation en cosinus discrète inverse.
- 8- Effectuer le sur échantillonnage des coefficients de chrominances Cb et Cr.
- 9- Effectuer la transformation inverse YCbCr -> RGB.
- 10- Ecrire l'image Ima_T_SE_TCD_Q.
- 11- Calculer les paramètres statistiques E, EQM et RSB.

5.6.1.2- Résultats et analyse.

a- Analyse des images.

Chaque étape de la compression JPEG influence considérablement la qualité de l'image. C'est ainsi que :

a.1 La transformation des espaces de couleurs RGB en YCbCr introduit un bruit que nous avons qualifié de bruit de transformation RGB -> YCbCr, qui se traduit par la présence des grains verts dont la densité dépend de l'image (**Figures 5.19a et 5.20a**).

a.2 L'association des opérations de transformation des espaces de couleurs et du sous échantillonnage fait perdre à l'image sa couleur initiale (**Figures 5.19b et 5.20b**).

a.3 Lorsqu'aux deux opérations précédentes s'ajoutent la transformation en cosinus discrète et son inverse, l'image retrouve sa couleur mais présente encore quelques bruits de transformation RGB -> YCbCr (voir **Figures 5.19c et 5.20c**).

a.4 Lorsque la quantification des coefficients transformés est effectuée, l'image reconstruite est plus proche de l'originale en terme de qualité (voir **Figures 5.19d et 5.20d**). Toutefois, le bruit de transformation persiste mais en très faible proportion.

Les images obtenues lors de ces différentes opérations qui constituent les étapes de la compression JPEG sont présentées de la manière suivante :

-> Test1

Figure 5.19a : Test1_Ima_T



Figure 5.19b : Test1_Ima_T_SE



Figure 5.19c : Test1-Ima_T_SE_TCD **Figure 5.19d** : Test1-Ima_T_SE_TCD_Q



-> Test2

Figure 5.20a : Test2 - Ima_T



Figure 5.20b : Test2 - Ima_T_SE

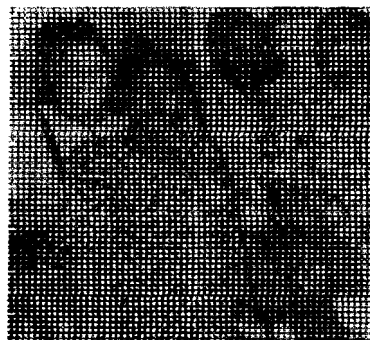


Figure 5.20c : Test2-Ima_T_SE_TCD **Figure 5.20d** : Test2-Ima_T_SE_TCD_Q



b- Analyse des paramètres statistiques.

Les paramètres statistiques obtenues pour les images à chaque étape de la compression montrent une évolution identique, notamment :

- une augmentation de l'entropie depuis l'image transformée jusqu'à l'image quantifiée (voir 1^{ère} ligne des **Tableaux 5.7a et 5.7b**) ;
- de grandes valeurs d'erreurs quadratiques moyennes EQM pour l'image transformée et sous échantillonnée (voir 2^{ème} ligne des **Tableaux 5.7a et 5.7b**) ;
- de très faibles valeurs du rapport signal sur bruit pour l'image transformée et sous échantillonnée (voir 3^{ème} ligne des **Tableaux 5.7a et 5.7b**) .

Tableau 5.7a : Evolution des paramètres statistiques lors de la compression JPEG – ATQ de Test1.

Para. Statist.	Ima. Origin.	Ima_T	Ima_T_SE	Ima_T_SE_TCD	Ima_T_SE_TCD_Q
R	2.33	3.28	4.34	6.16	6.90
Entropie G	2.65	3.16	3.89	6.16	6.93
B	2.62	3.29	2.98	6.34	6.98
R	-	0.97	5037	514.16	1026
EQM G	-	0.20	8277	111.15	196
B	-	1.29	19002	231.18	229
R	-	44.96	6.99	17.57	14.47
RSB G	-	51.46	7.53	24.07	21.55
B	-	43.50	-4.06	20.95	20.93

Tableau 5.7b: Evolution des paramètres statistiques lors de la compression JPEG – ATQ de Test2.

Para. Statist.	Ima. Origin.	Ima_T	Ima_T_SE	Ima_T_SE_TCD	Ima_T_SE_TCD_Q
R	1.95	3.13	5.25	6.58	6.95
Entropie G	2.52	3.15	4.91	6.68	7.46
B	2.36	2.36	2.64	7.06	7.49
R	-	3.99	5597	156.74	382
EQM G		0.72	10668	42.72	328
B		2.48	18999	238.67	491
R	-	32.39	4.12	16.38	12.50
RSB G		43.12	5.89	25.39	16.39
B		39.95	-5.18	20.06	16.77

5.6.1.3- Conclusion.

La compression JPEG dégrade les données dans ces phases de sous échantillonnage et de la quantification. Il s’ensuit une diminution du RSB donc de la qualité de l’image décompressée. Ainsi le schéma de codage JPEG est lui-même source de bruit pour l’image reconstruite. A ces bruits (sous échantillonnage et quantification) s’ajouteront ceux du système d’acquisition (le bougé et la dé focalisation) ainsi que les bruits du canal de transmission (bruit thermique, turbulences atmosphériques, etc).

Il importe de noter que le codage JPEG réduit considérablement le bruit de la transformation RGB -> YCbCr dans son étape de quantification sans toutefois le supprimer sur certaines images. Ce fait constitue une limitation dans le codage JPEG.

5.6.2- Application de la compression JPEG ATQ.

L’objectif recherché ici est de déterminer des méthodes de rehaussement et restauration d’images compressées et décompressées par le codage JPEG ATQ et renfermant le bruit de la transformation RGB -> YCbCr.

L’étude porte sur deux images Test1 et Test2 qui présentent une forte densité de ce bruit comme vu au paragraphe 5.4.2.1 **Figures 5.13 et 5.14.**

5.6.2.1- Rehaussement d’images photographiques couleurs.

5.6.2.1.1- Expérience.

Après avoir appliqué la compression JPEG ATQ sur chaque image, nous appliquons les quatre méthodes de rehaussement étudiées précédemment à savoir : le recadrage de la dynamique (RD), l’égalisation d’histogramme (EH), la loi

de puissance modifiée (LPM) et la mesure de la distance (MD) entre les pixels reconstruits et la moyenne de ceux de l'image originale. Les paramètres statistiques sont calculés et une comparaison des méthodes est effectuée.

Algorithme utilisé :

- 1- Ouvrir l'image originale et récupérer ses coefficients R, G et B.
- 2- Appliquer la compression et la décompression JPEG (avec tables de quantification) sur ces coefficients.
- 3- Ecrire l'image JPEG ainsi traitée.
- 4- Calculer les paramètres statistiques (E, EQM, RSB) de cette image.
- 5- Appliquer le RD sur les coefficients Y de l'image JPEG puis calculer ses paramètres statistiques (E, EQM, RSB). Voir modèle (2.14).
- 6- Appliquer l'EH – modèle (2.16)- sur les coefficients Y de l'image JPEG et calculer ensuite les paramètres statistiques (E, EQM, RSB) de l'image égalisée.
- 7- Effectuer le rehaussement par LPM de l'image JPEG puis calculer les paramètres statistiques (E, EQM, RSB) de l'image rehaussée par LPM.
- 8- Appliquer aux coefficients R, G, B de l'image JPEG la méthode MD. Calculer les paramètres statistiques (E, EQM, RSB) de l'image corrigée. Modèle de la figure 3.8.
- 9- Comparer les valeurs de E, EQM et RSB obtenues par les différentes techniques de rehaussement.

5.6.2.1.2- Résultat et analyse.

Les résultats obtenus sont constitués de deux parties : les images fournies par les 4 techniques de rehaussement et les paramètres statistiques correspondants.

a- Analyse des images.

Sur les deux images JPEG obtenues, on note une présence très réduite du bruit de transformation : voir **Figures 5.21a** (un grain vert au cou côté gauche) et **Figure 5.22a** (quelques grains verts). Le rehaussement de l'image JPEG par les 4 techniques donnent des résultats satisfaisants.

a.1 Le recadrage de la dynamique fournit une image avec un bruit de transformation très réduit (**Figures 5.21b** et **5.22b**).

a.2 L'égalisation d'histogramme donne un bon résultat sur les deux images traitées (**Figure 5.21c**). Elle n'améliore pas l'image Test2.

a.3 Le rehaussement par LPM (pour $p = 1.05$) fournit également un résultat satisfaisant sans la présence du bruit de transformation et avec un contraste amélioré (Figures 5.21d et 5.22d).

a.4 La correction par mesure de distance ne supprime pas le bruit de transformation présent sur l'image JPEG (Figures 5.21e et 5.22e).

-> Test1- JPEG ATQ

Figure 5.21a : JPEG ATQ. **Figure 5.21b** : Recadrée. **Figure 5.21c** : Egalisée.



Figure 5.21d : Test1 rehaussée par LPM ($p=1.05$). **Figure 5.21e** : Test1 corrigée



-> Test2 - JPEG ATQ

Figure 5.22a : JPEG ATQ. **Figure 5.22b** : Recadrée. **Figure 5.22c** : Egalisée.



Figure 5.22d : Test2-rehaussée par LPM ($p=1.05$) **Figure 5.22e** : Test2-corrigée.



b- Analyse des paramètres statistiques.

Les **Tableaux 5.8a** et **5.8b** présentent les paramètres statistiques obtenus dans les 5 cas étudiés. On note pour l'égalisation d'histogramme, la loi de puissance modifiée, la correction par mesure de distance des valeurs de EQM et de RSB très voisines de celles de l'image JPEG.

Tableau 5.8a : Paramètres statistiques des images rehaussées et issues de Test1.

Par.Statist.	JPEG ATQ	Recadrage	Egalisation	Loi de puis. M	Correction	
Entropie	R	6.97	7.00	6.27	5.44	6.43
	G	6.95	6.97	6.45	5.37	6.83
	B	7.00	7.02	6.39	5.47	6.89
EQM	R	1029	0.48	565	1441	1022
	G	197	0.01	567	936	198
	B	230	0.15	566	818	227
RSB	R	14.43	47.78	17.72	13.68	14.54
	G	21.52	63.08	17.63	15.62	21.53
	B	20.90	53.69	17.69	16.23	21.00

Tableau 5.8b : Paramètres statistiques des images rehaussées et issues de Test2.

Par.Statist.	JPEG ATQ	Recadrage	Egalisation	Loi de puis. M	Correction
R	6.95	6.95	4.44	7.19	6.95
Entropie G	7.46	7.48	5.52	6.90	7.46
B	7.49	7.53	5.92	6.63	7.49
R	384	49.02	4812	6286	4.00
EQM G	328	48.97	5358	1739	1.00
B	488	53.69	5364	1650	1.00
R	12.44	22.02	-10.49	5.57	32.45
RSB G	16.39	25.10	-3.19	7.83	41.62
B	16.79	26.73	1.58	13.45	43.73

5.6.2.1.3- Conclusion.

L'image JPEG ATQ peut être rehaussée par chacune des 4 méthodes. Toutefois un pré-traitement est nécessaire pour déterminer quelle image est convenablement égalisée. Mais s'il s'agit de supprimer le bruit de transformation seule la méthode d'égalisation peut être retenue pour certaines images.

5.6.2.2- Restauration d'images photographiques couleurs.

5.6.2.2.1- Expérience.

Après avoir compressé et décompressé l'image par JPEG ATQ, l'image obtenue est d'une part filtrée par le filtre de Wiener selon le modèle (2.28) utilisé au paragraphe 5.5 et d'autre part filtrée par atténuation (modèle ACA, figure 3.6). Puis les deux méthodes sont combinées et les paramètres statistiques sont calculés (modèle associatif, figure 3.11 avec codage JPEG inclu).

Les coefficients du filtre d'atténuation sont :

- coefficients d'atténuation : $\text{var} = C = 2$;
- coefficients de reconstruction : $\beta_y = \beta_{cb} = \beta_{cr} = 0.8$.

a- Algorithme du filtrage par Wiener appliqué à l'image JPEG :

1. Ouvrir l'image originale et appliquer la compression puis la décompression JPEG-ATQ.
2. Calculer les paramètres statistiques de l'image JPEG.
3. Appliquer le filtre de Wiener sur l'image JPEG.
4. Calculer les paramètres statistiques de l'image filtrée.
5. Comparer les deux séries de paramètres (E, EQM et RSB).

b- Algorithme du filtrage par atténuation puis de la combinaison

filtre d'atténuation – filtre de Wiener.

1. Ouvrir l'image originale puis appliquer sur ses coefficients R,G,B la transformation RGB -> YCbCr.
2. Appliquer l'atténuation aux coefficients Y, Cb et Cr soit :
 - $Y' \leftarrow Y/C$, $Cb' \leftarrow Cb/C$, $Cr' \leftarrow Cr/C$.
3. Appliquer la correction d'atténuation sur les coefficients Y', Cb' et Cr' en les multipliant chacun par les facteurs d'optimisation ou de reconstruction β_y , β_{cb} , β_{cr} . Ces facteurs sont fournis par l'algorithme développé au chapitre 3 paragraphe 3.4.4.2.
4. Ecrire l'image atténuée.
5. Calculer les paramètres statistiques (E, EQM, RSB) de l'image atténuée.
6. Appliquer le filtre de Wiener sur l'image atténuée.
7. Calculer les paramètres statistiques de l'image filtrée.
8. Comparer les paramètres statistiques (E, EQM, RSB) des images atténuée et filtrée.

5.6.2.2.2- Résultats et analyse.

Nous présentons les résultats sous forme d'une part d'images et d'autre part de tableaux récapitulatifs de 4 paramètres statistiques E, EQM, RSB et de la somme des rapports signal sur bruit Σ RSB.

a- Analyse des images.

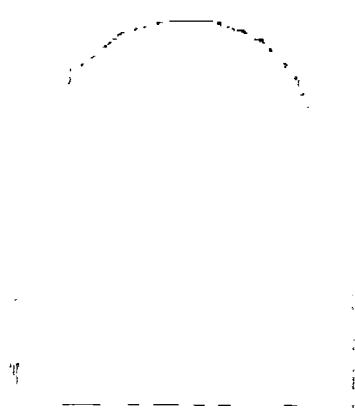
Les **Figures 5.23b, c, d** et **5.24b, c, d** illustrent les images obtenues dans cette étude.

→ **Test1 - JPEG ATQ.**

Figure 5.23a : JPEG ATQ.



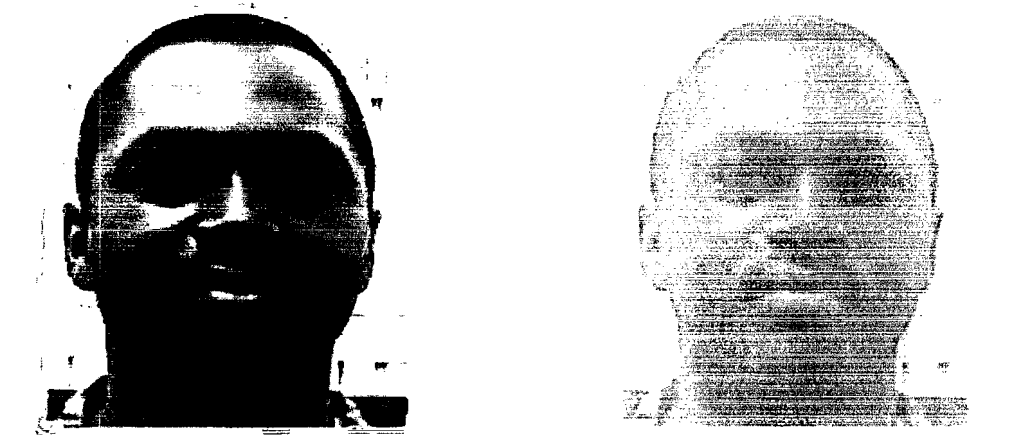
Figure 5.23b : Test1-atténuée.



Le filtre d'atténuation supprime le bruit de transformation sur les deux images (voir **Figures 5.23b** et **5.24b**). En plus ce filtre fait mieux ressortir certains détails (les yeux sur la **Figure 5.23b**).

Le filtre de Wiener appliqué séparément à l'image JPEG ATQ supprime ce bruit de l'image (voir **Figure 5.23c** et **5.24c**).

Figure 5.23c : Test1 filtrée par Wiener. **Figure 5.23d** : Test1 Atténuation + Wiener.



L'association des deux filtres donnent un résultat satisfaisant comme la réduction du fort contraste produit par le filtre d'atténuation (voir **Figures 5.23d** et **5.24d**). Toutefois le coefficient du filtre d'atténuation (voir chapitre 3 paragraphe 3.4.4.2) doit être le plus petit possible ($c = 2$) pour éviter l'apparition des effets de blocs sur l'image filtrée.

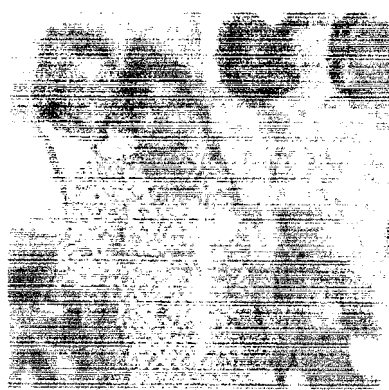
→ Test2 - JPEG ATQ

Figure 5.24a : JPEG ATQ.



Figure 5.24b : Test2 atténuée

Figure 5.24c : Test2 filtrée par Wiener. **Figure 5.24d** : Test2 Atténuation + Wiener.



b- Analyse des paramètres statistiques.

Dans toutes les deux d'images étudiées, on note que le filtre de Wiener améliore la qualité de l'image JPEG (voir colonne 4 des **Tableaux 5.9a** et **5.9b**). Lorsqu'il est utilisé pour filtrer l'image JPEG atténuée qui présente une faible valeur de RSB (voir colonne 3 des **Tableaux 5.9a** et **5.9b**), le filtre de Wiener contribue à améliorer grandement cette image. Les RSB augmentent de **8.3 à 23.2%** par rapport au filtre de Wiener seul.

Tableau 5.9a : Paramètres statistiques des images restaurées et issues de Test1.

Par. Statist.	JPEG ATQ	Atténuation	Filtre de Wiener	Association
R	6.97	5.87	6.98	5.87
Entropie	G	6.95	7.01	5.87
	B	7.00	7.03	5.90
EQM	R	1029	248	130
	G	197	246	241
	B	230	246	190
RSB	R	14.42	20.49	21.93
	G	21.52	20.60	22.54
	B	20.90	20.57	22.32
Σ RSB	55.34	61.66	66.79	

Tableau 5.9b : Paramètres statistiques des images restaurées et issues de Test2.

Par. Statist.	JPEG ATQ	Atténuation	Filtre de Wiener	Association
R	6.95	6.65	7.48	6.17
Entropie	G	7.48	6.93	5.64
	B	7.54	7.54	6.22
EQM	R	384	237	123
	G	328	201	214
	B	488	252	205
RSB	R	12.44	17.71	21.07
	G	16.39	15.13	21.62
	B	16.79	19.60	21.92
Σ RSB	45.62	52.44	64.61	

5.6.2.2.3- Conclusion.

Les deux méthodes de restauration appliquées à l'image JPEG ATQ précédente donnent un bon résultat lorsqu'elles sont associées pour la correction des

dégradations comme le bruit de transformation et le bruit lié au contexte d'acquisition d'image comme les effets d'une mauvaise mise au point de l'objectif de l'appareil photographique. L'association des deux **améliore le RSB de 8 à 23%**.

Nous les avons retenues comme méthode d'amélioration d'une image compressée et décompressée par JPEG ATQ transmise dans le cadre de l'enseignement à distance.

5.6.3- Application de la compression JPEG STQ.

5.6.3.1- Rehaussement d'images photographiques couleurs.

5.6.3.1.1- Expérience.

La même expérience que celle du paragraphe 5.6.2 est menée mais en utilisant le schéma de compression JPEG sans tables de quantification (JPEG STQ).

5.6.3.1.2- Résultats et analyse.

Les résultats obtenus sont constitués de deux parties : les images fournies par les 4 techniques de rehaussement et les paramètres statistiques correspondants.

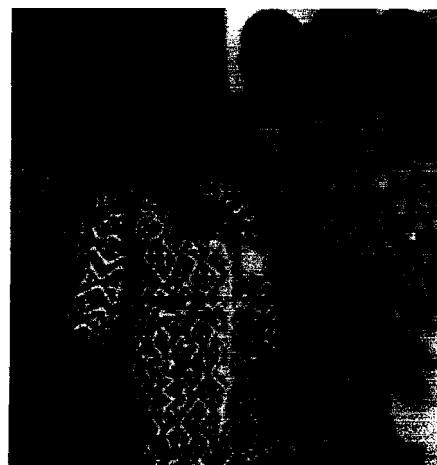
a- Analyse des images.

Sur les deux images JPEG obtenues, on note une présence très réduite du bruit de transformation : voir **Figures 5.25a** (un grain vert au cou côté gauche) et **Figure 5.26a** (quelques grains verts).

Figure 5.25a : Test1 JPEG STQ.



Figure 5.26a : Test2 JPEG STQ



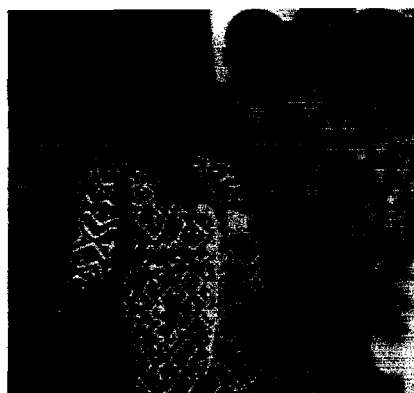
Le rehaussement de l'image JPEG par les 4 techniques donne des résultats satisfaisants :

a1.Le recadrage de la dynamique fournit une image avec un bruit de transformation très réduit (**Figures 5.25b et 5.26b**).

Figure 5.25b : Test1 recadrée



Figure 5.26b : Test2-recadrée.



a2.L'égalisation d'histogramme donne un bon résultat sur l'une des deux images traitées (**Figure 5.25c**). Elle n'améliore pas l'image Test2 (**Figure 5.26c**).

Figure 5.25c :. Test1 égalisée.



Figure 5.26c :. Test2 égalisée.



a3.Le rehaussement par LPM (pour $p = 1.05$) fournit également un résultat satisfaisant sans la présence du bruit de transformation et avec un contraste amélioré

Figure 5.25d : Test1 par LPM ($p=1.05$)



Figure 5.26d : Test2 par LPM ($p=1.05$)

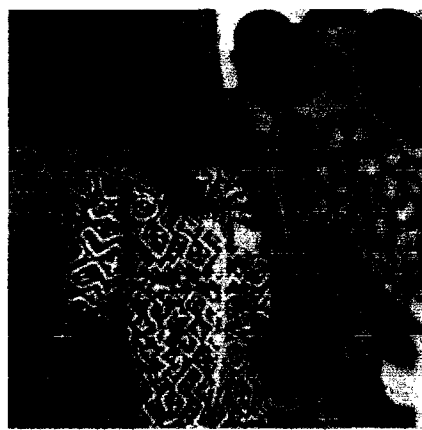


a4.La correction par mesure de distance ne supprime pas le bruit de transformation présent sur l'image JPEG (**Figures 5.25e et 5.26e**).

Figure 5.25e : Test1 corrigée.



Figure 5.26e : Test2 corrigée.



b- Analyse des paramètres statistiques.

Les **Tableaux 5.10a** et **5.10b** regroupent les 3 paramètres statistiques examinés dans cette étude.

On note que les RSB de l'image corrigée sont très grands témoignant de la très bonne qualité de l'image. Il en est de même de l'image recadrée (colonnes 3 et 6 des **Tableaux 5.10a** et **b**).

La loi de puissance modifiée fournit des images bien rehaussées avec des RSB petits et des EQM élevées selon les images (voir colonne 5 des 2 tableaux).

Dans le cas où l'égalisation donne de bon résultats, l'image est bien rehaussée et les RSB assez bons (colonne 4 du **Tableau 5.10a**).

Tableau 5.10a : Paramètres statistiques des images rehaussées par JPEG STQ et issues de Test1.

Par.Statist.	JPEG STQ	Recadrage	Egalisation	Loi de puis. M	Correction
R	6.96	7.00	6.34	5.47	6.41
Entropie G	6.95	6.97	6.57	5.43	6.83
B	7.00	7.03	6.53	5.52	6.89
R	975	0.59	647	1311	4.00
EQM G	191	0.01	649	925	1.00
B	236	0.18	649	835	1.00
R	14.68	46.89	17.20	14.08	38.64
RSB G	21.64	63.06	17.09	15.67	44.52
B	20.80	51.90	17.16	16.14	44.58

Tableau 5.10b : Paramètres statistiques des images rehaussées par JPEG STQ et issues de Test2.

Par.Statist.	JPEG STQ	Recadrage	Egalisation	Loi de puissanceM	Correction
R	7.03	7.03	3.91	7.10	7.03
Entropie G	7.40	7.42	5.41	6.98	7.39
B	7.52	7.57	5.82	6.55	7.52
R	326	9.14	5324	6176	4.00
EQM G	175	9.32	6243	1642	1.00
B	434	16.37	6249	1546	1.00
R	13.19	28.98	-12.74	5.67	32.48
RSB G	19.14	32.07	-4.84	8.15	41.64
B	17.34	31.72	0.42	13.72	43.77

5.6.3.1.3- Conclusion.

Le schéma de compression JPEG STQ présente le même comportement que celui de JPEG ATQ lorsqu'il s'agit de rehausser une image JPEG décompressée.

Les résultats présentés ci-dessus montrent qu'on peut se passer des tables de quantification et garder une excellente qualité d'image. Bien que le schéma JPEG STQ soit aussi performante en terme de qualité d'image, il présente en plus l'avantage de ne pas transmettre les tables de quantification au décodeur.

Nous pensons que cette méthode de compression peut s'appliquer valablement à la transmission des données dans le cadre de l'enseignement à distance, avec un gain en bande passante.

5.6.3.2- Restauration d'images photographiques couleurs.

5.6.3.2.1- Expérience.

Après avoir compressé et décompressé l'image par JPEG STQ, l'image obtenue est d'une part filtrée par le filtre de Wiener et d'autre part filtrée par atténuation. Puis les deux méthodes sont combinées et les paramètres statistiques sont calculés.

Les coefficients du filtre d'atténuation sont : $C = 2$ (ou $1/C = 0.5$) ;
 $\beta_y = \beta_{cb} = \beta_{cr} = 0.8$.

Les algorithmes utilisés sont les mêmes que ceux décrits aux paragraphes 5.6.2.

5.6.3.2.2- Résultats et analyse.

Nous présentons les résultats sous forme d'une part d'images et d'autre part de tableaux récapitulatifs de 4 paramètres statistiques E, EQM, RSB et de la somme des rapports signal sur bruit Σ RSB.

a- Analyse des images.

Les Figures 5.27a, b, c, d et 5.28a, b, c, d illustrent les images obtenues dans cette étude.

→ Test1 - JPEG STQ

Figure 5.27a : Test1 JPEG STQ.



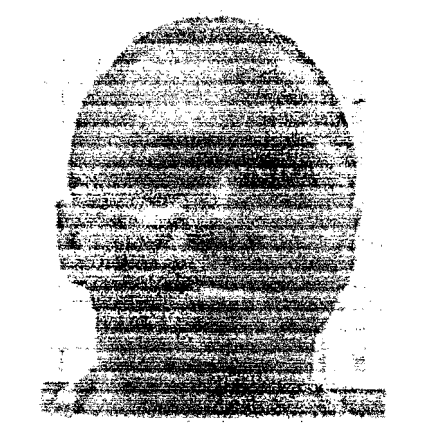
Figure 5.27b : Test1 atténuée



a1. Le filtre d'atténuation supprime le bruit de transformation sur les deux images (voir Figures 5.27b et 5.28b). Ce bruit existe en grande quantité sur l'image de la Figure 5.28a (grains verts) et en faible quantité sur la Figure 5.27a (un seul grain vert en bas côté gauche). En plus ce filtre fait mieux ressortir certains détails (les yeux sur la Figure 5.27b).

a2. Le filtre de Wiener appliqué séparément à l'image JPEG ATQ supprime ce bruit de l'image (voir Figure 5.27c et 5.28c).

Figure 5.27c : Test1 filtrée par Wiener. **Figure 5.27d** : Test1 Atténuation + Wiener.



L'association des deux filtres donnent un résultat satisfaisant comme la réduction du fort contraste produit par le filtre d'atténuation (voir **Figures 5.27d** et **5.28d**). Toutefois le coefficient du filtre d'atténuation (voir chapitre 3 paragraphe 3.4.4.2) doit être le plus petit possible pour éviter l'apparition des effets de blocs sur l'image filtrée.

→ **Test2 - JPEG STQ**

Figure 5.28a : JPEG STQ.



Figure 5.28b : Test2 atténuée

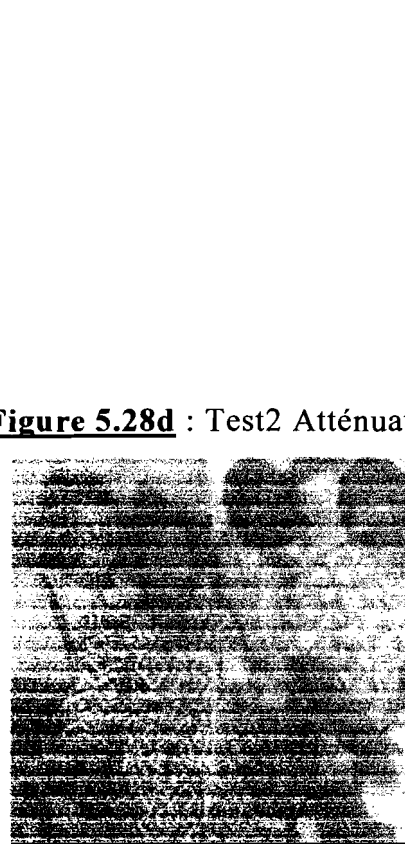


Figure 5.28c : Test2 filtrée par Wiener. **Figure 5.28d** : Test2 Atténuation + Wiener.



b- Analyse des paramètres statistiques.

Dans les deux cas d'images étudiées, le filtre de Wiener améliore la qualité de l'image JPEG (voir colonne 4 des **Tableaux 5.11a** et **5.11b**). Lorsqu'il est utilisé pour filtrer l'image JPEG atténuée qui présente une faible valeur de RSB (voir colonne 3 des **Tableaux 5.11a** et **5.11b**), le filtre de Wiener contribue à l'améliorer comme le montre l'accroissement des RSB de 7.84% pour Test1 16.78% pour Test2.

Tableau 5.11a : Paramètres statistiques de l'image Test1 compressée par JPEG STQ puis filtrées par les 3 filtres.

Par. Statist.	JPEG STQ	Atténuation	Filtre de Wiener	Association
R	6.96	5.91	6.99	5.93
Entropie G	6.95	5.91	7.06	5.92
B	7.00	5.91	7.07	5.93
R	975	7286	236	129
EQM G	191	2982	231	240
B	236	3713	231	191
R	14.68	7.76	20.65	21.94
RSB G	21.64	8.34	20.52	22.55
B	20.80	9.47	20.78	22.32
Σ RSB	57.12	25.57	61.95	66.81

Tableau 5.11b : Paramètres statistiques de l'image Test2 compressée par JPEG STQ puis filtrée par les 3 filtres.

Par. Statist.	JPEG ATQ	Atténuation	Filtre de Wiener	Association
R	7.03	5.74	7.42	6.17
Entropie G	7.40	6.18	7.02	5.73
B	7.52	6.27	7.60	6.26
R	326	11691	168	126
EQM G	175	1606	208	221
B	434	2311	250	213
R	13.19	4.89	19.18	20.91
RSB G	19.14	9.20	15.07	21.47
B	17.34	11.16	20.69	21.78
Σ RSB	50.67	25.25	54.94	64.16

5.6.3.2.3- Conclusion.

Le schéma de codage JPEG STQ que nous avons considéré comme une alternative donne des résultats satisfaisants en ce qui concerne la qualité d'image fournie. Les RSB sont améliorés de 8 à 17%.

5.6.4- Etude comparative des compressions JPEG ATQ et STQ.

5.6.4.1- Rehaussement d'image.

Par rapport aux 4 méthodes de rehaussement d'images, les deux schémas de compression donnent des résultats satisfaisants dans le cas du recadrage de

la dynamique, du rehaussement par la loi de puissance modifiée et la correction par la mesure de la distance entre les pixels reconstruits et la moyenne des pixels de l'image d'entrée. La méthode d'égalisation d'histogramme est imprévisible. Elle dépend des images en ce qu'elle donne de bons résultats pour certaines et de mauvais résultats pour d'autres.

5.6.4.2- Restauration d'image.

L'utilisation du filtre de Wiener simplifié et développé par Betelu [12], donne une image dont le contraste est proche de l'original. Sur toutes les images traitées nous avons constaté qu'il ne supprime pas le bruit de transformation RGB -> YCbCr. Il lui fait changer seulement de couleur en passant du vert au bleu.

La méthode de correction de dégradation élaboré en nous basant sur les équations de transformation d'espaces de couleurs RGB -> YCbCr est une méthode assez robuste. Elle supprime non seulement le bruit de transformation, mais aussi améliore l'image en ce qu'elle supprime certains bruits (bruit de système d'acquisition comme l'effet du mauvais éclairage) et révèle du coup certains détails cachés de l'image originale. Toutefois sa faiblesse est le fort contraste qu'elle provoque sur l'image corrigée.

Les deux limitations qui caractérisent ces filtres sont surmontées en partie par leur combinaison pour le traitement d'images décompressées.

5.6.4.3- Conclusion.

Les schémas de compression JPEG ATQ et STQ ont pratiquement le même comportement face aux méthodes de rehaussement et de restauration d'images dégradées que nous avons expérimentées. Ils peuvent donc être utilisés indifféremment pour la compression et la décompression des images photographiques couleurs. Ainsi, en terme de performance en qualité d'images décompressées il n'y a pas de différence.

Cependant pour des exigences d'économie de bande passante, le schéma JPEG STQ peut être utilisé efficacement. Il faudra, pour obtenir une image identique à celle donnée par JPEG ATQ, mesurer les entropies correspondantes selon la méthode exposée au chapitre 4.

Ces deux filtres peuvent donc faire partie des méthodes de restauration utilisées dans le cadre du téléenseignement envisagé en milieu hostile.

5.7- COMPRESSION ET DECOMPRESSION D'IMAGES PHOTOGRAPHIQUES COULEURS DANS UN CONTEXTE DE BRUITS GENERALISES : ASSOCIATION DES METHODES DE RESTAURATION ET DE REHAUSSEMENT.

5.7.1- Expérience.

5.7.1.1- Description de l'expérience.

Nous essayons dans ce paragraphe de corriger trois types de bruit en nous servant des filtres de restauration étudiés précédemment et une méthode de rehaussement : la loi de puissance modifiée (LPM). Il s'agit du filtre de Wiener et du filtre de correction d'atténuation. Après avoir appliqué la compression JPEG ATQ nous traitons séparément l'image reconstruite par chacun des filtres suivants :

- filtre d'atténuation,
- filtre de Wiener,
- filtres d'atténuation et de Wiener,
- filtre de Wiener et rehaussement par LPM,
- filtre d'atténuation et rehaussement par LPM,
- filtres d'atténuation et de Wiener et rehaussement par LPM.

Nous prenons en compte les bruits suivants :

- bruit de la transformation RGB -> YCbCr (BT),
- bruit causé par un éclairage insuffisant de l'objet lors de la prise de vue,
- bruit blanc gaussien (BBG) produit par un générateur de bruit [90];
- bruit de grain de film (BGF) ou « salt & pepper » [90] ;
- bruit multiplicatif (BM) ou speckle [90].

Après reconstruction, les paramètres statistiques sont calculés afin d'apprécier la qualité de l'image.

Caractéristiques du filtre d'atténuation :

- coefficient d'atténuation : $\text{var} = C = 2$ ou $1/\text{var} = 1/C = 0.5$.
- coefficients de reconstruction : $\beta_y = \beta_{cb} = \beta_{cr} = 0.8$.

Caractéristiques du bruit de transformation RGB -> YCbCr :

- moyenne : $\text{moyR} = 2.14$, $\text{moyG} = 0.70$, $\text{moyB} = 1.26$.
- écart type : $\text{ectR} = 0.96$, $\text{ectG} = 0.46$, $\text{ectB} = 0.46$.

Caractéristiques des bruits additifs :

- bruit blanc gaussien : moyenne = 0 ; variance = 0.05 ;

- bruit de grain de film : densité du bruit = 0.05 ;
- bruit multiplicatif (speckle) : variance = 0.05 ;

L'étude porte sur une image qui se caractérise par une forte présence du bruit de transformation après compression JPEG. Les bruits additifs sont supposés perturber l'image avant son envoi dans le compresseur JPEG.

5.7.1.2- Algorithmes utilisés.

a- Algorithme de correction des bruits par le filtre de Wiener.

1. Ajouter du bruit (BBG, BGF ou BM) à l'image originale pour obtenir l'image bruitée.
2. Compresser puis décompresser l'image bruitée par JPEG.
3. Calculer les paramètres E, EQM et RSB des images bruitées et JPEG.
4. Appliquer le filtre de Wiener sur l'image JPEG.
5. Calculer les paramètres statistiques (E, EQM et RSB) de l'image filtrée.
6. Appliquer le rehaussement par LPM sur l'image filtrée.
7. Calculer les paramètres statistiques (E, EQM et RSB) de l'image rehaussée.
8. Comparer les résultats donnés par les étapes 3, 5, 7. ●

b- Algorithme du filtrage par atténuation et de sa combinaison avec le filtre de Wiener.

1. Ajouter du bruit (BBG, BGF ou BM) à l'image originale.
2. Ouvrir l'image bruitée puis appliquer sur ses coefficients R, G, B la transformation RGB -> YCbCr.
3. Effectuer l'atténuation des coefficients Y, Cb et Cr, soit :

$$Y' \leftarrow Y/C, Cb' \leftarrow Cb/C, Cr' \leftarrow Cr/C$$

4. Appliquer la compression JPEG.
5. Décompresser puis récupérer les coefficients reconstruits Y_R', Cb_R', Cr_R' .
6. Effectuer la correction d'atténuation sur Y_R', Cb_R', Cr_R' pour obtenir les coefficients corrigés Y_C, Cb_C, Cr_C de la manière suivante :

$$Y_C \leftarrow Y_R' \cdot \beta_y, Cb_C \leftarrow Cb_R' \cdot \beta_{cb}, Cr_C \leftarrow Cr_R' \cdot \beta_{cr}.$$

Les coefficients de reconstruction $\beta_y, \beta_{cb}, \beta_{cr}$ sont calculés par l'algorithme développé au chapitre 3 paragraphe 3.4.4.2.

7. Calculer les coefficients corrigés R_C, G_C, B_C correspondants.
8. Ecrire l'image atténuée.

9. Calculer les paramètres statistiques E, EQM, RSB de l'image atténuée.
10. Appliquer le rehaussement par LPM sur l'image atténuée.
11. Calculer les paramètres statistiques E, EQM, RSB de l'image rehaussée.
12. Appliquer le filtre de Wiener à l'image atténuée.
13. Calculer les paramètres statistiques E, EQM, RSB de l'image atténuée et filtrée.
14. Appliquer le rehaussement par LPM sur l'image atténuée et filtrée.
15. Calculer les paramètres statistiques E, EQM, RSB de l'image atténuée, filtrée et rehaussée.
16. Comparer les résultats donnés par les étapes 9, 11, 13 et 15.

5.7.2- Résultats et analyse.

5.7.2.1- Introduction.

Nous présentons les résultats d'une part sous forme d'images : originale, bruitée, compressée et restaurée, et d'autre part sous forme de tableaux comparatifs de 4 paramètres statistiques E, EQM, RSB et la somme des RSB.

5.7.2.2- Prise en compte du bruit blanc gaussien (BBG).

5.7.2.2.1- Analyse des images.

La prise en compte du bruit blanc gaussien est illustrée par les **Figures 5.29a, b, c, d, e, f, g, h, i et j.**

Figure 5.29a : Test1 original



Figure 5.29b : Test1 bruitée par BBG



Figure 5.29c : Test1 image JPEG



Figure 5.29d : Test1-JPEG-LPM (p = 1.09)

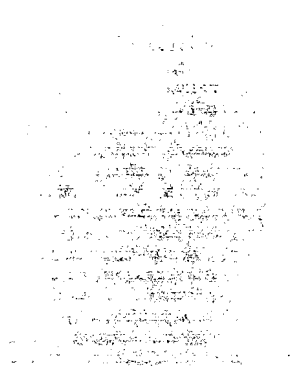


L'image JPEG (**Figure 5.29c**) présente plusieurs grains bleus, verts et rouges qui sont réduits en partie par le rehaussement par LPM ($p = 1.09$ à cause de l'importance du bruit) améliorant ainsi la qualité de l'image. En effet, la méthode LPM supprime le fond tacheté de l'image JPEG et rehausse cette dernière (**Figure 5.29d**).

Figure 5.29e : Test1-JPEG-Atténuée



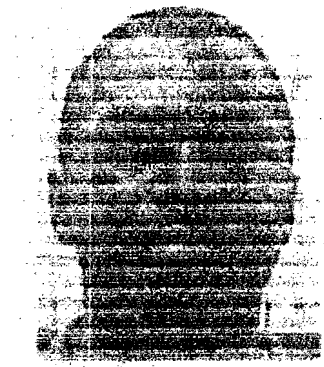
Figure 5.29f : Test1-JPEG-Atténuée +LPM



Le filtre d'atténuation appliqué sur l'image JPEG supprime le bruit blanc gaussien. Il n'y a plus de grains verts, bleus et rouges. Toutefois, le contraste s'intensifie et l'on peut percevoir un fond tacheté causé par la suppression du bruit blanc gaussien (voir **Figure 5.29e**).

L'application du rehaussement par LPM ($p = 1.09$) sur l'image atténuée fait disparaître le fond tacheté et clarifie davantage l'image. Cette opération améliore considérablement l'image atténuée (voir **Figure 5.29f**).

Figure 5.29g : Atténuée + Wiener **Figure 5.29h** : Atténuée+Wiener + LPM ($p=1.09$)



Par contre la combinaison filtre d'atténuation et filtre de Wiener ne fait que réduire le contraste sans supprimer le fond tacheté (voir **Figure 5.29g**). Quant à la combinaison filtre d'atténuation – filtre de Wiener – rehaussement par LPM ($p = 1.09$), le résultat n'est pas satisfaisant puisque cette action conjuguée des trois méthodes supprime de nombreux détails de l'image JPEG, la laissant difficilement identifiable (voir **Figure 5.29h**).

Figure 5.29i : JPEG ATQ + Wiener



Figure 5.29j : Wiener + LPM (1.09)



L'action du filtre de Wiener sur l'image JPEG ne supprime pas le bruit (grains verts, bleus et rouges) qui existait sur cette image (**Figure 5.29i**). De même le rehaussement par LPM ($p = 1.09$) de l'image JPEG filtrée par Wiener ne supprime pas ce bruit (**Figure 5.29j**), bien qu'il en améliore le contraste.

5.7.2.2.2- Analyse des paramètres statistiques.

Le **Tableau 5.12** récapitule les valeurs des 4 paramètres statistiques : E, EQM, RSB et Σ RSB.

L'examen de ce tableau montre que pour avoir une image JPEG qui ne présente plus de bruit blanc gaussien, il faut l'action robuste du filtre d'atténuation suivie du rehaussement par loi de puissance modifiée avec $p = 1.09$.

Cette combinaison d'action réduit fortement les RSB (voir colonne 7 du **Tableau 5.12**), mais supprime ce bruit et améliore considérablement le contraste de l'image (comparer **Figures 5.29b et 29f**).

Bien que le filtre de Wiener fournisse une image filtrée à grande valeur de RSB (voir **colonnes 10 et 11**), il ne supprime pas le bruit blanc gaussien (**Figures 5.29i et 5.29j**).

Il est intéressant de noter que le rehaussement par loi de puissance modifiée ($p = 1.09$) améliore non seulement le contraste de l'image JPEG (**Figures 5.29c et 5.29d**), mais aussi en améliore la qualité (voir colonnes 4 et 5 du **Tableau 5.12**). Cette observation est aussi valable pour l'image JPEG filtrée par Wiener.

Tableau 5.12 : Paramètres statistiques des différents traitements pour le BBG.

PS	Orig.	Bruitée	JPEG	JPEGLPM	JPEGAtt	Att+LPM	Att+W	At+W+LPM	Wiener	W+LPM
R	2.33	1.94	7.76	5.14	6.37	4.95	6.39	0.84	7.79	5.16
Ent G	2.65	2.88	7.79	5.13	6.37	0.81	6.38	4.98	7.76	5.17
B	2.62	2.88	7.81	5.13	6.41	3.33	6.42	3.36	7.81	5.16
R	-	5345	2512	2936	6837	5806	4689	19645	2757	3146
EQMG	-	3427	1487	2344	3607	19883	6929	5857	1807	2576
B	-	3502	1581	2330	3898	13307	4145	13561	1831	2584
R	-	7.24	9.81	10.77	7.79	8.67	6.02	5.15	9.30	10.41
RSB G	-	8.76	12.02	11.72	7.18	5.12	7.71	8.60	11.20	11.31
B	-	8.80	11.79	11.89	8.96	6.36	8.67	6.26	11.11	11.41
Σ RSB	-	24.80	33.62	34.38	23.93	20.15	22.40	20.01	31.61	33.13

Signification des sigles.

PS : Paramètres statistiques.

Orig. : Image d'origine ou d'entrée.

Bruitée : Image d'entrée bruitée.

JPEG : Image compressée et décompressée par JPEG.

JPEGLPM : Image décompressée par JPEG puis rehaussée par loi de puissance modifiée.

JPEGAtt: Image atténuée puis décompressée par JPEG

Att+LPM: Image atténuée, décompressée par JPEG puis rehaussée par LPM.

Att+W: Image atténuée, décompressée par JPEG puis filtrée par Wiener.

At+W+LPM: Image atténuée, décompressée par JPEG, filtrée par Wiener puis rehaussée par LPM.

Wiener: Image compressée et décompressée par JPEG, puis filtrée par Wiener.

Wiener+LPM : Image compressée et décompressée par JPEG, filtrée par Wiener puis rehaussée par LPM.

Ent : Entropie.

EQM : Erreur quadratique moyenne.

RSB : Rapport signal sur bruit.

Σ RSB : Somme des rapports signal sur bruit.

R : Canal Rouge (Red en Anglais); G : Vert (Green en Anglais) ; B : Bleu (Blue en Anglais).

Ent R : Entropie dans le Canal Rouge.

Ent G : Entropie dans le Canal Vert.

Ent B : Entropie dans le Canal Bleu.

5.7.2.2- Prise en compte des trois bruits additifs (3BA) :BBG + BGF + BM.

5.7.2.2.1- Analyse des images.

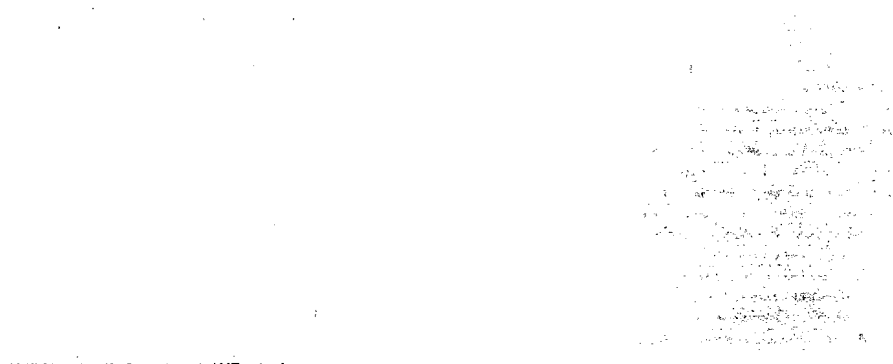
La prise en compte des 3 bruits additifs (3BA) à savoir le bruit blanc gaussien, le bruit de grain de film et le bruit multiplicatif, est illustrée par les **Figures 5.30a, b, c, d, e, f, g, h, et i.**

Fig. 5.30a :Bruitée par 3BA**Fig. 5.30b** :Image JPEG **Fig 5.30c** :JPEG+LPM($p= 1.09$)



Bien que la compression JPEG ait réduit le bruit, l'image JPEG (**Figure 5.30b**) présente un fond tacheté moins dense que celui de l'image bruitée de la **Figure 5.30a**. On note sur l'image JPEG la présence de grains verts, bleus et rouges. Le rehaussement par LPM ($p = 1.09$) réduit considérablement ce fond tacheté et améliore le contraste de l'image. La qualité visuelle est ainsi améliorée (**Figure 5.30c**).

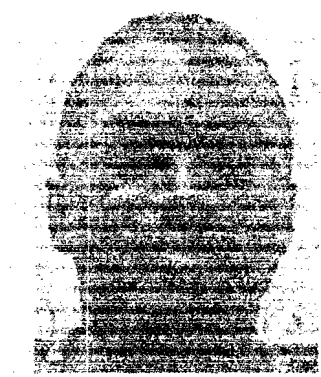
Figure 5.30d : Test1 JPEG Atténuée **Figure 5.30e** : Test1 Atténuée +LPM (p=1.09)



Le filtre d'atténuation appliqué sur l'image JPEG supprime le bruit. Toutefois, le contraste s'intensifie et l'on peut percevoir un fond tacheté causé par la suppression de ce bruit (voir **Figure 5.30d**).

Le rehaussement par LPM (p = 1.09) de l'image atténuée réduit le fond tacheté et clarifie davantage l'image. Cette opération améliore considérablement l'image (voir **Figure 5.30e**).

Figure 5.30f : Atténuée + Wiener **Figure 5.30g** : Atténuée+Wiener + LPM(p=1.09)



La combinaison filtre d'atténuation et filtre de Wiener ne fait que réduire le contraste sans supprimer le fond tacheté (voir **Figure 5.30f**).

Quant à la combinaison filtre d'atténuation + filtre de Wiener + rehaussement par LPM (p = 1.09), le résultat n'est pas satisfaisant puisque ces actions conjuguées suppriment de nombreux détails de l'image JPEG (voir **Figure 5.30g**).

Figure 5.30h : JPEG+Wiener

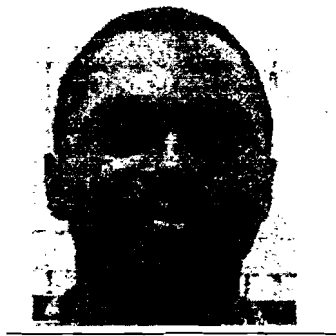


Figure 5.30i : Wiener+LPM(1.09)



L'action du filtre de Wiener sur l'image JPEG ne supprime pas tout le fond tacheté qui existait sur cette image (**Figure 5.30h**). De même le rehaussement par LPM ($p = 1.09$) de l'image JPEG filtrée par Wiener ne supprime pas ce fond (**Figure 5.30i**), bien qu'il en améliore le contraste.

5.7.2.3.2- Analyse des paramètres statistiques.

Le **Tableau 5.13** récapitule les valeurs des 4 paramètres statistiques : entropie Ent, erreur quadratique moyenne EQM, rapport signal sur bruit RSB et la somme des rapports signaux sur bruit Σ RSB.

On peut noter que seule la combinaison du filtre d'atténuation et du rehaussement par loi de puissance modifiée avec $p = 1.09$ permet une réduction considérable du bruit. Cette action robuste fait perdre à l'image JPEG beaucoup d'information. On notera les faibles valeurs des RSB (voir colonne 7 du **Tableau 5.13**). Toutefois, le bruit est supprimé et le contraste amélioré (comparer **Figures 5.30a et 30e**).

Bien que le filtre de Wiener fournisse une image filtrée à grande valeur de RSB (voir **colonnes 10 et 11**), il ne supprime pas le bruit (**Figures 5.30h et 5.30i**).

On peut noter également que le rehaussement par loi de puissance modifiée ($p' = 1.09$) améliore non seulement le contraste de l'image JPEG (**Figures 5.30b et 5.30c**), mais aussi sa qualité (voir **colonnes 4 et 5 du Tableau 5.13** pour l'augmentation des RSB). Il en est de même pour l'image JPEG filtrée par Wiener (voir **colonnes 10 et 11** du même tableau).

Tableau 5.13 : Paramètres statistiques des différents traitements pour les 3B.

PS	Origin.	Bruitée	JPEG	JPEGLPM	ATQAtt	Att+LPM	Att+ W	At+W+LPM	Wiener	W+LPM
R	2.33	1.97	7.90	5.45	6.49	5.62	6.47	0.82	7.90	5.47
Ent G	2.65	2.91	7.90	5.45	6.48	0.79	6.48	5.64	7.90	5.48
B	2.62	2.92	7.91	5.45	6.48	3.36	6.48	3.39	7.91	5.47
R	-	7926	3340	3153	6922	5753	5179	19560	3513	3421
EQMG	-	5048	2151	2509	4076	19835	6955	5783	2516	2700
B	-	5170	2295	2400	4173	13498	4422	13752	2548	2654
R	-	5.13	7.93	10.45	7.57	8.62	5.34	5.17	7.64	10.04
RSB G	-	6.71	9.82	11.42	6.41	5.13	7.53	8.57	9.11	11.09
B	-	6.73	9.55	11.73	8.47	6.33	8.19	6.23	9.05	11.26
ΣRSB	-	18.57	27.30	33.60	22.45	20.08	21.06	19.97	25.80	32.39

5.7.3- Conclusion.

Nous avons mis en évidence l'action des deux filtres de restauration (le filtre d'atténuation et celui de Wiener) sur une image JPEG ATQ ainsi que celle de leur combinaison. Nous retrouvons des résultats satisfaisants quant à la suppression des bruits considérés (bruit blanc gaussien, bruit de grain de film, bruit multiplicatif, bruit de mauvaise mise au point dont celui dû à une insuffisance d'intensité lors de la prise de vue, bruit de la transformation RGB → YCbCr) par l'association des deux filtres.

En effectuant un rehaussement par LPM sur l'image filtrée, d'une part par le filtre de correction d'atténuation et d'autre part par le filtre de Wiener, le résultat est davantage satisfaisant pour des valeurs de la variable loi de puissance p' tel que $1.07 \leq p' \leq 1.09$.

Bien que le filtre de Wiener ne supprime pas complètement le bruit de transformation (changement de couleur du vert au bleu), il donne une image de contraste très proche de l'image JPEG ATQ.

La méthode de correction du bruit basée sur l'atténuation des coefficients Y, Cb, Cr que nous avons élaborée pour la correction du bruit de la transformation a une action robuste non seulement contre ce dernier mais aussi contre d'autres bruits notamment le bruit blanc gaussien, le bruit de grain de film, le bruit multiplicatif, le bruit de mauvaise mise au point. Nous pensons que c'est une méthode efficace de restauration d'image dégradée à action élargie.

Elle peut être utilisée pour compenser les effets de dégradation des images photographiques couleurs compressées et transmises en milieu dégradant. Renforcée par le rehaussement par loi de puissance modifiée, ce filtre fournit des images de qualité visuelle satisfaisante et sans la présence des bruits pris en compte individuellement.

Le RSB s'améliore de 13.4% pour la combinaison atténuation – Wiener.

5.8- MODIFICATION DU SCHEMA DE COMPRESSION JPEG PAR INTRODUCTION DE LA METHODE D'ATTENUATION : CORRECTION DU BRUIT DE TRANSFORMATION PAR ANTICIPATION ET AMELIORATION DU TAUX DE COMPRESSION.

Il s'agit d'introduire dans le schéma de compression JPEG ATQ ou STQ la méthode de correction par atténuation du bruit de la transformation RGB -> YCbCr. En effet, connaissant après un pré-traitement de l'image à compresser et à transmettre les paramètres de ce filtre, il est possible de n'envoyer au décodeur que le paramètre d'atténuation $\text{var} = C$ et le facteur multiplicatif ou de reconstruction $\beta_y = \beta_{cb} = \beta_{cr}$ des coefficients Y, Cb et Cr. La décompression s'effectuera tout en corrigeant le bruit concerné ainsi que d'autres types de bruits (effet d'un éclairage insuffisant, bruits additifs par exemple).

Il est donc intéressant d'évaluer l'effet de cette correction par anticipation du bruit de transformation sur le taux de compression JPEG des données transmises.

5.8.1- Expérience.

5.8.1.1- Description de l'expérience.

L'expérience consiste à faire une étude comparative des taux de compression dans les deux cas de transmission sans puis avec anticipation de correction du bruit de transformation. Le schéma utilisé est basé sur le modèle de correction par anticipation de la figure 3.6. Les deux images Test1 et Test2 sont concernées. L'atténuation est appliquée sur les coefficients Y, Cb et Cr. La variation du taux de compression est calculée ainsi que les paramètres statistiques.

Le code de compression utilisé est le codage RLE développé au chapitre 1 et implémenté par David Bourgin [15].

5.8.1.2- Algorithme utilisé.

1. Ouvrir l'image originale puis appliquer sur ses coefficients R,G,B la transformation RGB -> YCbCr.

2. Appliquer l'atténuation aux coefficients Y, Cb et Cr soit : $Y' \leftarrow Y/C$, $Cb' \leftarrow Cb/C$, $Cr' \leftarrow Cr/C$.
3. Appliquer la compression JPEG.
4. Ecrire les fichiers des coefficients Y', Cb' et Cr' compressés.
5. Calculer le taux de compression.
6. Comparer les taux de compression dans les deux cas de compression sans et avec atténuation.

5.8.2- Résultats et analyse.

Le Tableau 5.14 renferme les valeurs des taux de compression de deux images Test1 et Test2 compressées par JPEG avec tables de quantification et sans atténuation puis avec atténuation.

Les résultats montrent que le taux de compression augmente lorsque le filtre d'atténuation est introduit directement dans le schéma de codage JPEG ATQ ou STQ. Ce taux varie selon les images utilisées.

Tableau 5.14: Comparaison des taux de compression.

Paramètres statist.		Test1		Test2	
		JPEG ATQ SA	JPEG ATQ AA	JPEG ATQ SA	JPEG ATQ AA
Entropie	Y	6.94	5.81	7.30	5.91
	Cb	2.73	1.87	5.40	3.87
	Cr	2.50	1.58	5.79	4.27
EQM	Y	171	332	187	197
	Cb	88	192	128	264
	Cr	296	245	147	153
RSB	Y	22.18	11.37	18.23	10.00
	Cb	22.72	11.35	22.56	11.58
	Cr	17.51	10.36	18.97	10.79
TC		95.67%	96.97%	92.40%	94.87%
A.R.		1.36%		2.67%	

Signification des sigles :

- JPEG ATQ AA : compression JPEG Avec Tables de Quantification Avec Atténuation.
- JPEG ATQ SA : compression JPEG Avec Tables de Quantification Sans Atténuation.
- T.C. : taux de compression.

- A.R. : accroissement relatif.

5.8.3- Conclusion.

Outre le fait qu'il corrige le bruit de la transformation RGB \rightarrow YCbCr, le filtre de correction par atténuation permet une augmentation du taux de compression des données à transmettre lorsqu'il est introduit dans le schéma de codage JPEG ATQ ou STQ.

Ce résultat est une contribution à la compression des données images transmises sur un canal bruité dans le cadre de l'enseignement à distance.

5.9- CONCLUSION DU CHAPITRE 5.

Nous avons essayé dans ce chapitre d'appuyer par des résultats concrets les différentes méthodes d'amélioration d'images annoncées dans les chapitres 2 et 3. L'application des méthodes de rehaussement et de restauration retenues aux images photographiques couleurs a été effectuée sur un ensemble de 5 images.

Les bruits pris en considération sont :

- le bruit de la transformation RGB \rightarrow YCbCr,
- les autres bruits du système de codage JPEG (comme le bruit des arrondies des coefficients de la transformation en cosinus discrète et le bruit de quantification),
- le bruit du système d'acquisition notamment l'effet d'une insuffisance d'intensité lumineuse (noircissement de certaines régions d'image) dû à une mauvaise mise au point de l'objectif de l'appareil photographique,
- des bruits additifs comme le bruit blanc gaussien, le bruit de grain de film et le bruit multiplicatif et une association de ces derniers.

Les méthodes classiques de rehaussement d'images que nous avons utilisées pour améliorer une image reconstruite et perturbée par le bruit de la transformation RGB \rightarrow YCbCr, donnent les résultats suivants :

- le recadrage de la dynamique améliore légèrement l'image sans supprimer ce bruit,
- l'égalisation d'histogramme donne d'excellents résultats en terme de rehaussement du contraste ; mais pas dans tous les cas d'images étudiées ;
- le rehaussement par loi de puissance appliquée sans être modifiée ne donne aucun résultat satisfaisant avec les images photographiques en couleurs.

Les deux méthodes de rehaussement proposées ont fourni les résultats suivants :

- la correction par mesure de la distance entre les pixels reconstruits et la moyenne des pixels originaux réduit le bruit de la transformation RGB->YCbCr mais ne rehausse pas le contraste de l'image ;
- la loi de puissance modifiée améliore considérablement le contraste de l'image bruitée mais fait passer le bruit de la transformation de la couleur verte à la couleur bleue.

Les méthodes de restauration utilisées dans ce travail sont essentiellement le filtre classique de Wiener et la méthode de correction par atténuation que nous avons élaborée. Le filtre de Wiener, bien qu'il donne une image dont le contraste est très voisin de celui de l'image originale, ne supprime pas le bruit de la transformation RGB->YCbCr mais le fait passer de la couleur verte à la couleur bleue. La méthode de correction par atténuation ou le filtre d'atténuation supprime ce bruit en donnant une image à fort contraste. En associant ces deux méthodes, le contraste est réduit et la qualité de l'image est meilleure.

Les schémas de compression JPEG ATQ et STQ ont un comportement identique face aux différentes méthodes de rehaussement et de restauration utilisées dans notre travail, lorsque le choix de l'entropie est effectué selon les critères établies au chapitre 4. Les résultats obtenus sont pratiquement identiques. La compression JPEG STQ présente en plus l'avantage d'un gain en bande passante du fait que les tables de quantification sont remplacées par les facteurs de qualité lors de la transmission du fichier au décodeur.

Dans un contexte de bruits généralisés, le filtre d'atténuation a une action plus efficace et plus élargie. Renforcé par le rehaussement par loi de puissance modifiée le filtre d'atténuation donne une image débarrassée de trois types de bruits que sont :

- le bruit d'acquisition tel que le « noircissement » causé par une mauvaise mise au point de l'objectif ;
- le bruit de codage notamment le bruit de la transformation RGB->YCbCr ;
- le bruit additif comme le bruit blanc gaussien, le bruit de grain de film, le bruit multiplicatif du genre speckle, ainsi que la combinaison de ces derniers.

Conclusion générale.

La compression des données images photographiques couleurs et leur transmission sur un canal sujet à divers bruits, dans le cadre de l'enseignement à distance, a constitué notre principale préoccupation. La question principale de l'amélioration de ces images après compression et transmission nous a amené à rechercher un ensemble de méthodes de rehaussement et de restauration d'images décompressées et dégradées.

Trois méthodes de rehaussement et une de restauration de la littérature ont été expérimentées sur des images photographiques couleurs prises dans la majorité des cas en Afrique. Il s'agit pour le rehaussement, du recadrage de la dynamique, de l'égalisation d'histogramme et du rehaussement par loi de puissance. Les résultats obtenus sont assez bonnes mais présentent des limites :

- la méthode d'égalisation d'histogramme dépend des images.
- le recadrage de la dynamique de l'image ne supprime pas le bruit de la transformation RGB \rightarrow YCbCr.
- le rehaussement par loi de puissance n'est pas applicable dans sa phase originale aux images photographiques couleurs.

Nous avons proposé deux méthodes de rehaussement d'images photographiques couleurs :

- le rehaussement par la mesure de la distance des pixels reconstruits à la moyenne des pixels originaux. Les résultats sont assez bons et le contraste de l'image originale est conservé. Le bruit de transformation est supprimé;
- le rehaussement par loi de puissance modifiée, qui est adaptée à la catégorie d'images étudiées. Les résultats sont satisfaisants. Le contraste est grandement amélioré.

La méthode de restauration de la littérature utilisée est le filtrage de Wiener. Cette méthode donne d'assez bons résultats. En effet, elle améliore le rapport signal à bruit de l'image à restaurer et fournit un contraste proche de celui de l'image d'entrée. Cependant sa principale limitation est qu'elle ne supprime pas le bruit de la transformation RGB \rightarrow YCbCr.

Nous avons proposé deux méthodes de restauration d'images photographiques couleurs :

- La méthode de correction par atténuation des coefficients Y, Cb, Cr suivie de l'optimisation des facteurs de restauration de ces derniers. Cette méthode a donné de bons résultats sur la totalité des images étudiées. En effet le bruit de transformation est systématiquement supprimé ainsi que d'autres bruits liés au système d'acquisition d'images comme la dé focalisation. En plus, elle permet de révéler certains détails cachés sur l'image originale. Son principal défaut est le fort contraste qu'elle provoque sur l'image corrigée.
- La deuxième méthode est conçue pour réduire le contraste de l'image précédente. Elle consiste en une association de la méthode de correction par atténuation et du filtrage de Wiener. Les résultats sont nettement améliorés car l'erreur quadratique moyenne est réduite et le rapport signal sur bruit s'améliore de l'ordre de 15 à 30% par rapport à l'image JPEG et selon les images testées. Aussi, le contraste est réduit.
- La méthode de correction par atténuation supprime des bruits additifs comme le bruit blanc gaussien, le bruit de grain de film (salt & pepper), et le bruit multiplicatif (speckle).
- L'association méthode de correction par atténuation et loi de puissance modifiée permet, dans un contexte de bruits généralisés (bruit d'acquisition, bruit de codage, bruit additif), de produire une image sans ces bruits.

Nous pensons que l'objectif d'amélioration d'images photographiques couleurs compressées et dégradées par le bruit de transformation est atteint bien que des performances plus importantes restent à atteindre en ce qui concerne la réduction du contraste.

L'utilisation de la compression JPEG sans tables de quantification (JPEG STQ) est une alternative au schéma JPEG avec tables de quantification (JPEG ATQ) lorsque les facteurs de qualité sont choisis juste aux valeurs de l'entropie de l'image compressée par le schéma JPEG ATQ. Ainsi, l'entropie qui est une mesure de la quantité de l'information, nous a permis de choisir un schéma de compression sans faire usage des tables de quantification, réalisant ainsi un gain sur la bande passante offerte.

Nous avons réussi à augmenter de 1.3 à 2.6% le taux de compression en introduisant la méthode de correction par atténuation dans le schéma de compression JPEG ATQ. Le but étant de corriger par anticipation le bruit de la transformation RGB -> YCbCr, les autres bruits de codage et l'effet d'une mauvaise illumination de l'objet (le noir) et qui constitue un bruit lié au contexte d'acquisition.

Ainsi nous disposons d'un ensemble de trois méthodes de rehaussement (loi de puissance modifiée, recadrage de la dynamique, mesure de la distance entre pixels reconstruits et la moyenne des originaux) et de deux méthodes de restauration (filtre d'atténuation, association filtres d'atténuation et de Wiener) d'images photographiques couleurs compressées et décompressées par JPEG ATQ ou STQ et perturbées par le bruit de la transformation RGB -> YCbCr, des bruits additifs (bruit blanc gaussien, bruit de grain de film, bruit multiplicatif), ainsi que le bruit dû à une illumination insuffisante lors de la prise de vue.

Nous pensons que, utilisées dans le cadre de l'enseignement à distance, ces méthodes peuvent améliorer de façon considérable une image photographique couleur compressée et décompressée par JPEG.

ANNEXES

ANNEXE A : Traitement du signal.

A.1- La transformée de Fourier discrète.

La transformée de Fourier discrète a pour objectif de calculer autant de données dans le domaine des fréquences qu'il y a d'échantillons du signal dans le domaine temporel. Ce qui permet de conserver la même quantité d'informations. Ainsi, appliquée à un tableau d'image donné à NxM coefficients dans le domaine temporel, la transformée de Fourier discrète fournira NxM coefficients fréquentiels.

Soit le signal échantillonné $x(t)$ nul en dehors de l'intervalle $0, \dots, T-1$ et $X(e^{j\theta})$ sa transformée de Fourier. Ce signal peut être rendu périodique en le reproduisant après translation de $T, 2T, 3T, \dots, nT$ de sorte que pour tout n et pour tout $0 \leq t \leq T-1$ on aura :

$$y(t + nT) = x(t) \quad \text{A.1.1}$$

La transformée de Fourier $Y(e^{j\theta})$ de $y(t)$ est nulle sauf aux fréquences multiples de $\frac{2\pi}{T}$. Comme c'est la transformée de Fourier d'un signal échantillonné, elle est aussi périodique de période 2π si on prend le pas d'échantillonnage égal à un. La connaissance de $Y(e^{j\theta})$ aux fréquences multiples de $\frac{2\pi}{T}$ suffit donc pour caractériser le signal périodisé $y(t)$ et donc le signal original $x(t)$.

La formule donnant $Y(e^{j\theta})$ pour les valeurs de $\theta = \frac{2k\pi}{T}$ est donc :

$$Y\left(e^{j\frac{2k\pi}{T}}\right) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} x(t) e^{-2\pi j \frac{kt}{T}} \quad \text{A.1.2}$$

Ainsi la transformée de Fourier du signal échantillonné $x(t)$ est donné par la relation :

$$X(k) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} x(t) e^{-2\pi j \frac{kt}{T}} \quad \text{A.1.3}$$

C'est le produit d'une matrice par un vecteur qui transforme le vecteur $x(t)$ en un vecteur $X(k)$ de même dimension.

A partir de l'amplitude complexe des harmoniques on peut reconstituer le signal périodique $y(t)$ et donc le signal $x(t)$ pour $0 \leq t \leq T-1$. On a donc la transformée de Fourier inverse suivante :

$$x(t) = \sum_{k=0}^{T-1} X(k) e^{2\pi j \frac{kt}{T}} \quad \text{A.1.4}$$

L'algorithme FFT est une implémentation rapide de cette importante transformation.

A.2- La fonction d'auto corrélation et la densité spectrale.

Considérons un signal $f(x,y)$, réelle, stationnaire et de moyenne nulle. La fonction de corrélation de ce signal est donnée par la relation A.2.1 :

$$r(m,n) = E[f(x,y)f(x+m,y+n)] \quad \text{A.2.1}$$

Cette fonction est symétrique par rapport à l'origine :

$$r(m,n) = r(-m,-n) \quad \text{A.2.2}$$

La transformée de Fourier de cette fonction d'auto corrélation est la densité spectrale

$$R(e^{ju}, e^{jv}) = E\left[|F(e^{ju}, e^{jv})|^2\right] \quad \text{A.2.3}$$

C'est une fonction réelle, positive ou nulle. Cette densité spectrale est la moyenne du module de la transformée de Fourier du signal $f(x,y)$ soit $F(e^{ju}, e^{jv})$.

ANNEXE B : Les transformations en compression d'images.

B.1. La transformation en cosinus discrète (TCD).

B.1.1- Définition

En compression d'images et des sons on utilise la transformée en cosinus qui est un cas particulier de la transformée de Fourier. En effet, on construit à partir d'un signal $x(t)$ de longueur T un signal $y(t)$ de longueur $4T$ symétrique et dont les échantillons d'ordre pair sont nuls et donnés par les formules suivantes pour $k=0, \dots, N-1$:

$$y(2k) = y(-2k) = 0 \quad \text{B.1.1}$$

$$y(2k+1) = y(-2k-1) = x(k) \quad \text{B.1.2}$$

Le calcul de la transformée de Fourier discrète de $y(t)$ se réduit au calcul de T valeurs pour $k=0, \dots, N-1$:

$$X(k) = \frac{2}{T} c(k) \sum_{t=0}^{T-1} x(t) \cos\left(\pi \frac{(2t+1)k}{2N}\right) \quad \text{B.1.3}$$

La transformée inverse est pour $k=0, \dots, N-1$:

$$x(t) = \sum_{k=0}^{T-1} c(k) X(k) \cos\left(\pi \frac{(2t+1)k}{2N}\right) \quad \text{B.1.4}$$

où $\alpha(k) = \frac{1}{\sqrt{2}}$ si $k = 0$ et $\alpha(k) = 1$ si $k \neq 0$.

B.1.2- Image formée par le noyau inverse.

La relation (1.64) du chapitre 1 donne le noyau inverse de la transformation en cosinus discrète pour un tableau image :

$$i(x,y,u,v) = C(u)C(v) \cos\left[\frac{(2x+1)u\pi}{2N}\right] \cos\left[\frac{(2y+1)v\pi}{2N}\right]$$

où $C(u) = 1/N$ pour $u = 0$ et $C(u) = \frac{\sqrt{2}}{N}$ pour $u = 1, 2, \dots, N-1$. Idem pour $C(v)$.

x et y variant de $0, 1, \dots, N-1$.

D'après la relation (1.32), l'image formée par le noyau de la transformation inverse pour $N = 4$, sera :

$$I_{u,v} = C(u)C(v) \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi u}{8}\right)\cos\left(\frac{\pi v}{8}\right) & \cos\left(\frac{\pi u}{8}\right)\cos\left(\frac{3\pi v}{8}\right) & \dots & \cos\left(\frac{\pi u}{8}\right)\cos\left(\frac{7\pi v}{8}\right) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \cos\left(\frac{7\pi u}{8}\right)\cos\left(\frac{\pi v}{8}\right) & \cos\left(\frac{7\pi u}{8}\right)\cos\left(\frac{3\pi v}{8}\right) & \dots & \cos\left(\frac{7\pi u}{8}\right)\cos\left(\frac{7\pi v}{8}\right) \end{bmatrix}$$

x et y variant de $0, 1, 2$ à 3 .

Pour un signal à une dimension ($v = 0$ et $y = 0$), on obtient les fonctions de base $I_{0,0}, I_{1,0}, I_{2,0}, I_{3,0}, I_{4,0}, I_{5,0}, I_{6,0}, I_{7,0}$ de la transformée en cosinus discrète suivantes :

$$I_0 = \frac{1}{64} [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$$

$$I_1 = \frac{\sqrt{2}}{64} [0.98, 0.83, 0.55, 0.19, -0.19, -0.55, -0.83, -0.98]$$

$$I_2 = \frac{\sqrt{2}}{64} [0.92, 0.38, -0.38, -0.92, -0.92, -0.38, 0.38, 0.92]$$

$$I_3 = \frac{\sqrt{2}}{64} [0.83, -0.19, -0.98, -0.55, 0.55, 0.98, 0.19, -0.83]$$

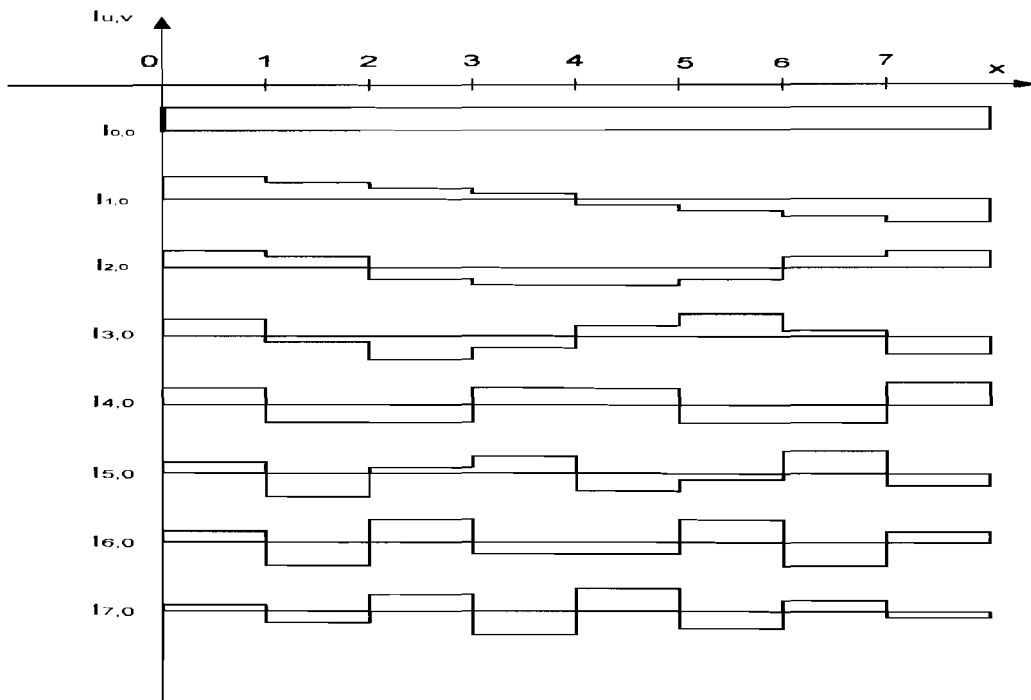
$$I_4 = \frac{\sqrt{2}}{64} [0.70, -0.70, -0.70, 0.70, 0.70, -0.70, -0.70, 0.70]$$

$$I_5 = \frac{\sqrt{2}}{64} [0.55, -0.98, 0.19, 0.83, -0.83, -0.19, 0.98, -0.55]$$

$$I_6 = \frac{\sqrt{2}}{64} [0.38, -0.92, 0.92, -0.38, -0.38, 0.92, -0.92, 0.38]$$

$$I_7 = \frac{\sqrt{2}}{64} [0.19, -0.55, 0.83, -0.98, 0.98, -0.83, 0.55, -0.19]$$

Figure B.1 : Représentation des fonctions de base de la TCD à une dimension pour $N = 8$:



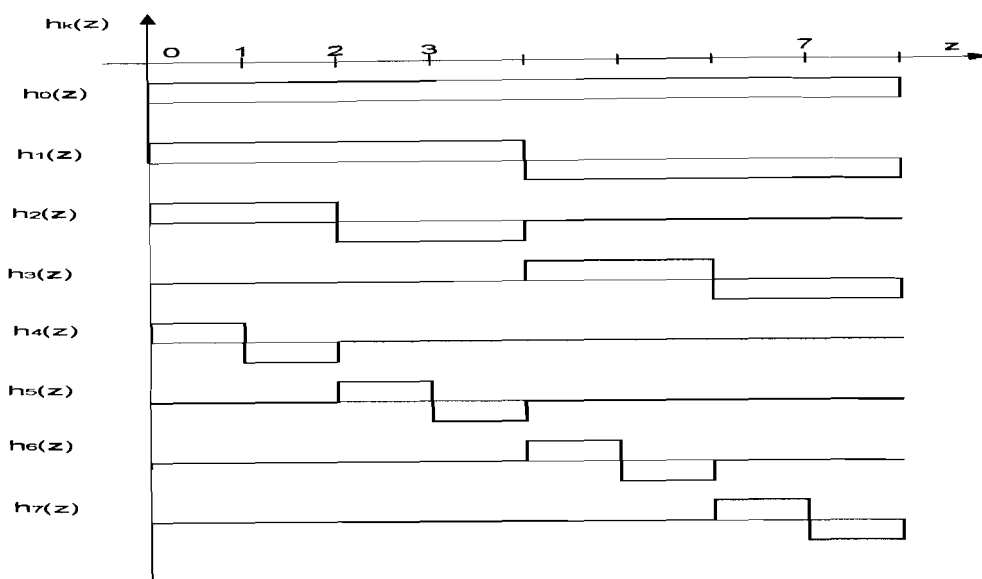
B.2- La transformation de Haar.

Les fonctions de Haar $h_k(z)$ sont données par les relations (1.60) et (1.61) avec k défini par (1.59) du chapitre 1. Pour $N = 8$, on obtient : $z = 0, \frac{1}{8}, \frac{2}{8}, \frac{3}{8}, \frac{4}{8}, \frac{5}{8}, \frac{6}{8}, \frac{7}{8}$; $k = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ et les fonctions de Haar correspondantes $h_0(z), h_1(z), h_2(z), h_3(z)$ du tableau B.1.

Tableau B.1

z	0/8	1/8	2/8	3/8	4/8	5/8	6/8	7/8
$h_0(z)$	$1/2\sqrt{2}$	$1/2\sqrt{2}$	$1/2\sqrt{2}$	$1/2\sqrt{2}$	$1/2\sqrt{2}$	$1/2\sqrt{2}$	$1/2\sqrt{2}$	$1/2\sqrt{2}$
$h_1(z)$	$1/2\sqrt{2}$	$1/2\sqrt{2}$	$1/2\sqrt{2}$	$1/2\sqrt{2}$	$-1/2\sqrt{2}$	$-1/2\sqrt{2}$	$-1/2\sqrt{2}$	$-1/2\sqrt{2}$
$h_2(z)$	1/2	1/2	-1/2	-1/2	0	0	0	0
$h_3(z)$	0	0	0	0	1/2	1/2	-1/2	-1/2
$h_4(z)$	$1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$	0	0	0	0	0	0
$h_5(z)$	0	0	$1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$	0	0	0	0
$h_6(z)$	0	0	0	0	$1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$	0	0
$h_7(z)$	0	0	0	0	0	0	$1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$

Figure B.2: Représentation graphique des fonctions de Haar



ANNEXE C : Tables utilisées en compression JPEG [21]

C.1. Tables de quantification.

Table de quantification des coefficients de luminance	Table de quantification des coefficients des chrominances
16 11 10 16 24 40 51 61	17 18 24 47 99 99 99 99
12 12 14 19 26 58 60 55	18 21 26 66 99 99 99 99
14 13 16 24 40 57 69 56	24 26 56 99 99 99 99 99
14 17 22 29 51 87 80 62	47 66 99 99 99 99 99 99
18 22 37 56 68 109 103 77	99 99 99 99 99 99 99 99
24 35 55 64 81 104 113 92	99 99 99 99 99 99 99 99
49 64 78 87 103 121 120 101	99 99 99 99 99 99 99 99
72 92 95 98 112 100 103 99	99 99 99 99 99 99 99 99

C.2. Amplitudes des catégories de valeurs des différences des coefficients.

Catégories assignées aux valeurs DC		Catégories assignées aux valeurs AC.	
SSSS	DIFF	SSSS	Coefficients AC
0	0	1	-1,1
1	-1,1	2	-3,-2,2,3
2	-3,-2,2,3	3	-7,-4,4,7
3	-7,-4,4,7	4	-15,-8,8,15
4	-15,-8,8,15	5	-31,-16,16,31
5	-31,-16,16,31	6	-63,-32,32,63
6	-63,-32,32,63	7	-127,-64,64,127
7	-127,-64,64,127	8	-255,-128,128,255
8	-255,-128,128,255	9	-511,-256,256,511
9	-511,-256,256,511	10	-1 023,-512,512,1 023
10	-1023,-512,512,1023		
11	-2 047,-1 024,1 024,2 047		

C.3. Tables de Huffman.

C.3.1- Tables de Huffman des coefficients de différences DC pour luminance et chrominances.

Table de Huffman des coefficients de différences DC pour la luminance.			Table de Huffman des coefficients de différences DC pour les chrominances.		
Categorie	Longueur du Code	Mot de Code	Categorie	Longueur du Code	Mot de Code
0	2	00	0	2	00
1	3	010	1	2	01
2	3	011	2	2	10
3	3	100	3	3	110
4	3	101	4	4	1110
5	3	110	5	5	11110
6	4	1110	6	6	111110
7	5	11110	7	7	1111110
8	6	111110	8	8	11111110
9	7	1111110	9	9	111111110
10	8	11111110	10	10	1111111110
11	9	111111110	11	11	11111111110

C.3.2. Table pour les coefficients AC de luminance.

Table pour les coefficients AC de luminance			Table pour les coefficients AC de luminance		
Run/Size	Longueur du Code	Mot de Code	Run/Size	Longueur du Code	Mot de Code
0/0 (EOB)	4	1010	4/1	6	111011
0/1	2	00	4/2	10	111111000
0/2	2	01	4/3	16	111111110010110
0/3	3	100	4/4	16	111111110010111
0/4	4	1011	4/5	16	111111110011000
0/5	5	11010	4/6	16	111111110011001
0/6	7	1111000	4/7	16	111111110011010
0/7	8	11111000	4/8	16	111111110011011
0/8	10	1111110110	4/9	16	111111110011100
0/9	16	111111110000010	4/A	16	111111110011101
0/A	16	111111110000011	5/1	7	1111010
1/1	4	1100	5/2	11	1111110111
1/2	5	11011	5/3	16	111111110011110
1/3	7	1111001	5/4	16	111111110011111
1/4	9	111110110	5/5	16	111111110100000
1/5	11	11111110110	5/6	16	111111110100001
1/6	16	111111110000100	5/7	16	111111110100010
1/7	16	111111110000101	5/8	16	111111110100011
1/8	16	111111110000110	5/9	16	111111110100100
1/9	16	111111110000111	5/A	16	111111110100101
1/A	16	111111110001000	6/1	7	1111011
2/1	5	11100	6/2	12	11111110110
2/2	8	11111001	6/3	16	111111110100110
2/3	10	1111110111	6/4	16	111111110100111
2/4	12	111111110100	6/5	16	111111110101000

2/5	16	111111110001001	6/6	16	111111110101001
2/6	16	111111110001010	6/7	16	111111110101010
2/7	16	111111110001011	6/8	16	111111110101011
2/8	16	111111110001100	6/9	16	111111110101100
2/9	16	111111110001101	6/A	16	111111110101101
2/A	16	111111110001110	7/1	8	11111010
3/1	6	111010	7/2	12	11111110111
3/2	9	111110111	7/3	16	111111110101110
3/3	12	11111110101	7/4	16	111111110101111
3/4	16	111111110001111	7/5	16	111111110110000
3/5	16	111111110010000	7/6	16	111111110110001
3/6	16	111111110010001	7/7	16	111111110110010
3/7	16	111111110010010	7/8	16	111111110110011
3/8	16	111111110010011	7/9	16	111111110110100
3/9	16	111111110010100	7/A	16	111111110110101
3/A	16	111111110010101			

Table pour les coefficients AC de luminance			Table pour les coefficients AC de luminance		
Run/Size	Longueur du Code	Mot de Code	Run/Size	Longueur du Code	Mot de Code
8/1	9	111111000	C/1	10	1111111010
8/2	15	11111111000000	C/2	16	111111111011001
8/3	16	111111110110110	C/3	16	111111111011010
8/4	16	111111110110111	C/4	16	111111111011011
8/5	16	111111110111000	C/5	16	111111111011100
8/6	16	111111110111001	C/6	16	111111111011101
8/7	16	111111110111010	C/7	16	111111111011110
8/8	16	111111110111011	C/8	16	111111111011111
8/9	16	111111110111100	C/9	16	111111111100000
8/A	16	111111110111101	C/A	16	111111111100001
9/1	9	111111001	D/1	11	11111111000
9/2	16	111111110111110	D/2	16	111111111100010
9/3	16	111111110111111	D/3	16	111111111100011
9/4	16	111111111000000	D/4	16	111111111100100
9/5	16	111111111000001	D/5	16	111111111100101
9/6	16	111111111000010	D/6	16	111111111100110
9/7	16	111111111000011	D/7	16	111111111100111
9/8	16	111111111000100	D/8	16	111111111101000
9/9	16	111111111000101	D/9	16	111111111101001
9/A	16	111111111000110	D/A	16	111111111101010
A/1	9	111111010	E/1	16	111111111101011
A/2	16	111111111000111	E/2	16	111111111101100
A/3	16	111111111001000	E/3	16	111111111101101
A/4	16	111111111001001	E/4	16	111111111101110
A/5	16	111111111001010	E/5	16	111111111101111
A/6	16	111111111001011	E/6	16	111111111110000
A/7	16	111111111001100	E/7	16	111111111110001
A/8	16	111111111001101	E/8	16	111111111110010
A/9	16	111111111001110	E/9	16	111111111110011
A/A	16	111111111001111	E/A	16	111111111110100

B/1	10	111111001	F/0 (ZRL)	11	111111001
B/2	16	111111111010000	F/1	16	11111111110101
B/3	16	111111111010001	F/2	16	111111111110110
B/4	16	111111111010010	F/3	16	111111111110111
B/5	16	111111111010011	F/4	16	111111111111000
B/6	16	111111111010100	F/5	16	111111111111001
B/7	16	111111111010101	F/6	16	111111111111010
B/8	16	111111111010110	F/7	16	111111111111011
B/9	16	111111111010111	F/8	16	111111111111100
B/A	16	111111111011000	F/9	16	111111111111101
			F/A	16	111111111111110

C.3.3. Table pour les coefficients AC des chrominances.

Table pour les coefficients AC des chrominances			Table pour les coefficients AC des chrominances		
Run/Size	Longueur du Code	Mot de Code	Run/Size	Longueur du Code	Mot de Code
0/0 (EOB)	2	00	4/1	6	111010
0/1	2	01	4/2	9	111110110
0/2	3	100	4/3	16	111111110010111
0/3	4	1010	4/4	16	111111110011000
0/4	5	11000	4/5	16	111111110011001
0/5	5	11001	4/6	16	111111110011010
0/6	6	111000	4/7	16	111111110011011
0/7	7	1111000	4/8	16	111111110011100
0/8	9	111110100	4/9	16	111111110011101
0/9	10	1111110110	4/A	16	111111110011110
0/A	12	111111110100	5/1	6	111011
1/1	4	1011	5/2	10	1111111001
1/2	6	111001	5/3	16	111111110011111
1/3	8	11110110	5/4	16	111111110100000
1/4	9	111110101	5/5	16	111111110100001
1/5	11	11111110110	5/6	16	111111110100010
1/6	12	111111110101	5/7	16	111111110100011
1/7	16	111111110001000	5/8	16	111111110100100
1/8	16	111111110001001	5/9	16	111111110100101
1/9	16	111111110001010	5/A	16	111111110100110
1/A	16	111111110001011	6/1	7	1111001
2/1	5	11010	6/2	11	1111110111
2/2	8	11110111	6/3	16	111111110100111
2/3	10	1111110111	6/4	16	111111110101000
2/4	12	111111110110	6/5	16	111111110101001
2/5	15	11111111000010	6/6	16	111111110101010
2/6	16	111111110001100	6/7	16	111111110101011
2/7	16	111111110001101	6/8	16	111111110101100
2/8	16	111111110001110	6/9	16	111111110101101
2/9	16	111111110001111	6/A	16	111111110101110
2/A	16	111111110010000	7/1	7	1111010
3/1	5	11011	7/2	11	1111111000

3/2	8	11111000	7/3	16	111111110101111
3/3	10	111111000	7/4	16	111111110110000
3/4	12	11111110111	7/5	16	111111110110001
3/5	16	111111110010001	7/6	16	111111110110010
3/6	16	111111110010010	7/7	16	111111110110011
3/7	16	111111110010011	7/8	16	111111110110100
3/8	16	111111110010100	7/9	16	111111110110101
3/9	16	111111110010101	7/A	16	111111110110110
3/A	16	111111110010110			

Table pour les coefficients AC des chrominances			Table pour les coefficients AC des chrominances		
Run/Size	Longueur du Code	Mot de Code	Run/Size	Longueur du Code	Mot de Code
8/1	8	11111001	C/1	9	11111010
8/2	16	111111110110111	C/2	16	111111111011011
8/3	16	1111111110111000	C/3	16	1111111111011100
8/4	16	1111111110111001	C/4	16	1111111111011101
8/5	16	1111111110111010	C/5	16	1111111111011110
8/6	16	1111111110111011	C/6	16	1111111111011111
8/7	16	1111111110111100	C/7	16	1111111111100000
8/8	16	1111111110111101	C/8	16	1111111111100001
8/9	16	1111111110111110	C/9	16	1111111111100010
8/A	16	1111111110111111	C/A	16	1111111111100011
9/1	9	111110111	D/1	11	11111111001
9/2	16	1111111111000000	D/2	16	1111111111100100
9/3	16	1111111111000001	D/3	16	1111111111100101
9/4	16	1111111111000010	D/4	16	1111111111100110
9/5	16	1111111111000011	D/5	16	1111111111100111
9/6	16	1111111111000100	D/6	16	1111111111101000
9/7	16	1111111111000101	D/7	16	1111111111101001
9/8	16	1111111111000110	D/8	16	1111111111101010
9/9	16	1111111111000111	D/9	16	1111111111101011
9/A	16	1111111111001000	D/A	16	1111111111101100
A/1	9	111111000	E/1	14	11111111100000
A/2	16	1111111111001001	E/2	16	1111111111101101
A/3	16	1111111111001010	E/3	16	1111111111101110
A/4	16	1111111111001011	E/4	16	1111111111101111
A/5	16	1111111111001100	E/5	16	1111111111110000
A/6	16	1111111111001101	E/6	16	1111111111110001
A/7	16	1111111111001110	E/7	16	1111111111110010
A/8	16	1111111111001111	E/8	16	1111111111110011
A/9	16	1111111111010000	E/9	16	1111111111110100
A/A	16	1111111111010001	E/A	16	1111111111110101
B/1	9	111111001	F/0 (ZRL)	10	1111111010
B/2	16	1111111111010010	F/1	15	111111111000011
B/3	16	1111111111010011	F/2	16	1111111111110110
B/4	16	1111111111010100	F/3	16	1111111111110111
B/5	16	1111111111010101	F/4	16	1111111111111000
B/6	16	1111111111010110	F/5	16	1111111111111001
B/7	16	1111111111010111	F/6	16	1111111111111010
B/8	16	1111111111011000	F/7	16	1111111111111011
B/9	16	1111111111011001	F/8	16	1111111111111100
B/A	16	1111111111011010	F/9	16	1111111111111101
			F/A	16	1111111111111110

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Ahmed N., Nararajan T., Rao K.R.**, (1974), *Discrete cosine transform*, IEEE Trans. Comput., 90 – 93.
- [2] **A.M. van Dijk, Martens J.B., Watson A.B.**, *Quality assessment of coded images using numerical category scaling*, Institute for Perception Research, P.O. Box 513, 5600 MB Eindhoven, The Netherlands. NASA Ames Research center.
- [3] **Andrews H.C., Tescher A.G., Kruger R.P.**, (1972), *Image processing by digital computer*, IEEE Spectrum, 9, 7, July 1972, 20 – 32.
- [4] **Andrews H.C., Hunt B.R.**, (1977), *Digital image restoration*, Prentice – Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [5] **Angot A.**, (1972), *Compléments de mathématiques à l'usage des Ingénieurs de l'électrotechnique et des télécommunications*, Sixième Edition, Masson et Cie.
- [6] **Anthoine E., Roux L.**, (1996), *Codage des couleurs*.
http://www.ensimag.imag.fr/cours/Exposes/Reseaux/Multimedia/1995/subsection_3-3-2-2.html
- [7] **Antonini M., Barlaud M., Mathieu P., Daubechies I.**, (1992), *Image coding using the wavelet transform*, IEEE Transactions on Image Processing, vol.1, pp. 205 – 220, April 1992.
- [8] **Barberis M., Semeria L.**, *Perceptual distortion metrics for JPEG images*, Synopsys Inc., CSL Stanford University.
- [9] **Barnsley M., Hurd L.P.**, (1993), *Fractal image compression*, A.K. Peters, Wellesley, MA.
- [10] **Basso A., Dalgiç I., Fouad A.T., Christian J. van den Branden Lambrecht**, (1996), *Study of MPEG-2 coding performance based on a perceptual quality metric*, Proceedings of Picture Coding Symposium, Melbourne, Australia, March 1996.
- [11] **Berger T.**, (1971), *Rate distortion theory*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice – Hall.
- [12] **Betelu S.I.**, (2000), *Smoother*, Library of Congress, registration number Txu-966-423.
- [13] **Billingsley F.**, (1970), *Applications of digital image processing*, Appl. Opt., 9, 2, February 1970, 289 – 299.
- [14] **Born M., Wolf E.**, (1968), *Principles of optics*, Pergamon Press, New York.
- [15] **Bourgin D.**, (1995), *Introduction aux systèmes de compression sans perte. Description des fichiers sources et des méthodes*, Version 1.5.
- [16] **Buil C.**, (1989), *Astronomie CCD*, Société d'astronomie populaire, France.
- [17] **Caglar H., Liu Y., Akansu A.N.**, (1993), *Optimal PRQMF design for subband image coding*. Journal of Visual Communications and Image Representation, vol.4, n°4, pp. 242 – 253, September 1993.
- [18] **Castagno R., Lancini R., Egger O.**, (1996), *A comparison of different quantization strategies for subband coding of medical images*, Proceedings

Medical Imaging SPIE-96, February 10 – 15 1996, Newport Beach, California USA.

- [19] **CCIR**, (1982), *Encoding parameters of digital television for studios*, CCIR Recommendations, Recommendation 601.
- [20] **CCIR Recommendation 500-3**, (1986), *Method for the subjective assessment of the quality of television pictures*, Recommendations and Reports of the CCIR, XVIth Plenary assembly, Volume XI, Part1.
- [21] **CCITT**, (1992), *Digital compression and coding of continuous – tone still images*. Requirements and Guidelines, ISO/IEC International Standard 10918 – 1, CCITT T.81, September 1992.
- [22] **Chakib Kaddour**, (1999), *Compression des images fixes par fractals basée sur la triangulation de Delaunay et la quantification vectorielle*, Mémoire de fin d'études. Disponible sur : <http://www.iquebec.com/kadchakib/>
- [23] **Chaplais**, *Frames d'ondelettes*.
http://cas.ensmp.fr/~chaplais/wavetour_presentation/frames/Frames_d'ondelettes.html
- [24] **Christopoulos C., Askelöf J., Larsson M.**, (2000), *Efficient methods for encoding Regions of Interest in the upcoming JPEG 2000 still image coding standard*, IEEE Signal Processing Letters, September 2000.
- [25] **CIE**, (1932), *C.I.E. Proceedings 1931*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [26] **Cohen G., Dornstetter J.-L., Godlewski P.**, (1992), *Codes correcteurs d'erreurs, une introduction au codage algébrique*, Masson, 254 p.
- [27] **Cooley J.W., Tukey J.W.**, (1965), *An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series*, Math. Comp. 19, 90, April 1965, 297 – 301.
- [28] **Cuturicu C.**, (1999), *The JPEG compression and the JPG File Format*, University Politechnica in Bucharest (UPB), Department of computer science, 17 p.
- [29] **Daubechies I.**, (1992), *Ten lectures on wavelets*, CBMS series, Philadelphia, Siam.
- [30] **Department of Defense Interface Standard** , (1993), *JPEG image compression for the National Imagery Transmission Format Standard*, MIL-STD-188-198A, December 1993, USA, 72 p.
- [31] **Eckert M.P., Bradley A.P.**, (1998), *Perceptual quality metrics applied to still image compression*, Signal Processing 70, 177 – 200.
- [32] **Egger O., Li W.**, (1995), *Subband coding of images using asymmetrical filter banks*. IEEE Transactions on Image Processing, April 1995.
- [33] **Elmo Y.**, (1998), *JPEG compression – Colour space*.
<http://web.usxchange.net/elmo/jpeg.htm>
- [34] **English R.J.**, (1995), *SPECT Single Photon Emission Tomography: A Primer*. Society of Nuclear Medicine, Reston, VA.
- [35] **Eskiciuglu A.M., Fisher P.S.**, (1995), *Image quality measures and their performance*, IEEE Transactions on Communications, vol. COM-43, n°12, pp. 2959 – 2965.

- [36] **Falconer D.G.**, (1970), *Noise and distorsion in photographic data storage*, IBM J. Res. Devel., September 1970, 521 – 526.
- [37] **Fano R.M.**, (1949), *The transmission of information*, Tech. Report 65, Research laboratory of electronics, MIT, Cambridge, MA.
- [38] **Fleischer P.E.**, (1964), *Sufficient conditions for achieving minimum distorsion in quantizer*, IEEE Int. Convention Rec. 12, 104 – 111.
- [39] **François**,(2000), *Les réseaux informatiques*.
<http://reseaux.info.free.fr/françois/principale.htm>
Dernière mise à jour : 01/09/2000.
- [40] **Frieden B.R.**, (1975), *Image enhancement and restoration*, in Picture Processing and Digital Filtering, T.S. Huang, ed., Springer – Verlag, New York.
- [41] **Gasden M.**, (1965), *Some statistical properties of pulses from photomultipliers*, Appl. Opt., 4, 11, November 1965, 1446 – 1452.
- [42] **Geoffrey M. Davis, Aria Nosratinia**, (1998), *Wavelet – based image coding : An overview*. Applied and computational control, Signals and Circuits, vol.1, n°1, Spring.
- [43] **Girard M.-C., Girard C.**, (1999), *Traitement des données de télédétection*, Dunod, Paris, 529p.
- [44] **Glossaire : Images vectorielles**.
<http://obelix.uqss.quebec.ca/est/Em/em91.htm>
- [45] **Glossaire, Quantification**; Valable sur le site:
<http://www.artemis.jussieu.fr/wwwos2/html/dess/son/dicogen.htm>
- [46] **Glossaire : Bruit**. Valable sur le site:
<http://www.its.blrdoc.gov/fs-1037/dir.018/-2613.htm>
- [47] **Gonzalez R.C., Woods R.E.**, (1992) *Digital image processing*, Reading, MA, Addison – Wesley.
- [48] **Goodman J.W.**, (1968), *Introduction to Fourier optics*, Mc Graw Hill, New York.
- [49] **Gray R.M.**, (1984), *Vector quantization*. IEEE Acoustics, Speech and Signal Processing Magazine, vol.1, pp 4 – 29, April 1984.
- [50] **Grossman A., Morlet J.**, (1984), *Decomposition of hard functions into square integrable wavelets of constant shape*, Siam J. Math. Anal., 15(4), 723 – 736.
- [51] **Guichard J., Nasse D.**, *Traitement des images numériques pour la réduction du débit binaire*.
<http://www.rd.francetelecom.com/fr/conseil/memento2/m2chap4.pdf>
- [52] **Hadamard J.**, (1893), *Résolution d'une question relative aux déterminants*, Bulletin des sciences mathématiques ser.2, 17, PartI, 240 – 246.
- [53] **Hamilton E.**, (1992), *JPEG File Interchange Format, Version 1.02*, September 1, 7p .
- [54] **Hall E.L. et al.**, *A survey of pre processing and feature extraction techniques for radiographic images*, (1971), IEEE Transactions Computers, C-20, 9, September 1971, 1032 – 1044.

- [55] **Harrison C. W.**, (1952), *Statistics of television signal*, Bell System Technology Journal, 31, 764 – 783.
- [56] **Haskell B.G., Limb J.O.**, (1972), *Predictive video encoding using measured subject velocity*, U.S. Patent 3632865, January 1972.
- [57] **Haskell B.G., Puri A., Netravali A.N.**, (1997), *Digital video: Introduction to MPEG-2*, Chapman Hall, New York.
- [58] **Helstrom C.W.**, (1967), *Image restoration by the method of least squares*, J. Opt. Soc. Am., 57, 3, March 1967, 297 – 303.
- [59] **Hidaka T., Ozawa K.**, (1990), *Subjective assessment of redundancy reduced moving images for interactive application: test methodology and report*, Signal Processing Image Commun., 2, 201 – 219.
- [60] **Horner J.L.**, (1969), *Optical spatial filtering with the least-mean-square-error filter*, J. Opt. Soc. Am., 51, 5, May 1969, 553 – 558.
- [61] **Hotelling H.**, (1933), *Analysis of a complex of statistical variables into principle components*, J. Educ. Psychology 24: 417 – 441 and 498 – 520.
- [62] **Huang T.S.**, (1965), *PCM picture transmission*, IEEE spectrum, 2(12),57-63.
- [63] **Huffman D.A.**, (1952), *A method for the construction of minimum redundancies codes*, Proceedings of the IRE, volume 40, n°9, pp 1098 – 1101, September 1952.
- [64] **Hufnagel R.E., Stanley N.R.**, (1964), *Modulation transfer function associated with image transmission through turbulent media*, J. Opt. Soc. Am., 54, 1, January 1964, 52 – 61.
- [65] **ISO/IEC**, (1991), *Digital compression and coding of continuous – tone still images*, Part1, Requirements and Guidelines. ISO/IEC JTC1 Draft International Standard 10918 – 1, Nov. 1991.
- [66] **ISO/IEC JTC1 FDIS 14496-2**, (1998), *Information technology – Generic coding of audio-visual objects*, Nov.19, 1998.
- [67] **ISO/IEC 14496-2**, (1999), *Information technology – Coding of audio – visual objects – Part 2: Visual*, December 1999.
- [68] **ITU-T Recommendation H261**, (1993), *Video Codec for audiovisual services at px64 kbits/s*, March 1993.
- [69] **Jain J.R., Jain A.K.**, (1981), *Displacement measurement and its application in interframe image coding*, IEEE Transactions on Communications, COM-29(12), 1799 – 1808, 1981.
- [70] **Jain A.K.**, (1989), *Fundamentals of digital image processing*, Prentice – Hall Information and System Sciences Series, Thomas Kailath, Series Editor,569 p.
- [71] **Jayant N.S., Noll P.**, (1984), *Digital coding of waveforms*, Prentice – Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [72] **jpeg 2000vm**, (1999), *JPEG-2000 Verification model 4.0* (Tech. description), sc29wg01 N1282, April 1999.
- [73] **Johnson J.B.**, (1928), *Thermal agitation of electricity in conductor*, Phys. Revue, 32, July 1928, 97 – 109.
- [74] **Keriven R.**, (1996), *Multimédia*.

<http://www.enpc.fr/de/dmi/multimedia.html>.

- [75] **Kitajima H.**, (1976), *Energy packing efficiency of the Hadamard transform*. IEEE Transactions Communications (correspondence) COM – 24, 1256 – 1258, November 1976.
- [76] **Kretzmer E.R.**, (1952), *Statistics of television signal*, Bell Systems Tech. Journal, 31(4), 751 – 763.
- [77] **Lacroix D.**, *Compression d'images*,
<http://lab.erasme.org/compress/index.html>
- [78] **Langdon G.G., Rissanen Jr, Rissanen J.**, (1981), *Compression of black – white images with arithmetic coding*, IEEE Trans. Communications, COM-29(6), 858 – 867.
- [79] **Lathi B.P.**, (1998), *Modern digital and analog communications systems*, 3 rd ed., Oxford University Press, New York.
- [80] **Le Gall D., Tabatabai A.**, (1988), *Subband coding of digital images using symmetric short kernel filters and arithmetic coding techniques*, Proc. of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, New York, NY, USA, pp 761 – 765.
- [81] **Lim J.S.**, (1990), *Two dimensional signal and image processing*, Prentice Hall.
- [82] **Lliboutry L.**, (1992), *Sciences géométriques et télédétection*, Masson, Paris, 289p.
- [83] **Lloyd S.P.**, (1982), *Least squares quantization in PCM*, Inst. Mathematical Statistics Meeting, Atlantic City, NJ, September 1957; IEEE Trans. Information Theory, 129 – 136, March 1982.
- [84] **Lohscheller H.**, (1984), *A subjectively adapted image communication system*. IEEE Trans. Commun. COM-32, December 1984, pp. 1316 – 1322.
- [85] **Macchi C., Guilbert J.-F.**, (1983), *Transport et traitement de l'information dans les réseaux et systèmes téléinformatiques*, Bordas et CNET-ENST, 649 p.
- [86] **Mallat S.**, (1989), *A story for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation*, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.11, pp. 674 – 693, July 1989.
- [87] **Marechal A., Croce P., Dietzel K.**, (1958), *Amélioration du contraste des détails des images photographiques par filtrage des fréquences spatiales*, Opta Acta, 5, 256 – 262.
- [88] **Mark Nelson**, (1993), *La compression de données*, Dunod, Paris, 421 p.
- [89] **Marsault X.**, (1995), *Compression et cryptage des données multimédias*, 2è édition revue et augmentée, HERMES, 243 p.
- [90] **MATLAB**, (1998), Images/Images, Image Processing Toolbox, version 2.2 (R 11) 05 Aug. 1998.
- [91] **Max I.**, (1960), *Quantizing for minimum distortion*, IRE Trans. Information Theory, it-6, 7 – 12.
- [92] **M'boliguipa J., Tonyé E.**, (2002), *Correction du bruit de la transformation RGB -> YCbCr par atténuation des coefficients Y, Cb et Cr*, Article soumis à Sciences,

Technologies et Développement, Revue scientifique de l'Université de Douala, enset@camnet.cm, Février 2002.

- [93] **M'boliguipa J., Tonyé E., Nanci Y.R., Melouta M.**, (2002), *Enhancing photographic colour images by the modified law of power*, Article soumis à SPIE Signal & Image Processing, Accepté pour une présentation orale, Août 2002.
- [94] **M'boliguipa J., Tonyé E., Nanci Y.R., Melouta M.**, (2002), *Nouvelle méthode de restauration d'images photographiques couleurs dégradées par le bruit de la transformation RGB->YCbCr*, Article soumis à Annales des Télécommunications, HERMES Sciences Publications, Décembre 2002.
- [95] **Mees C.E.**, (1966), *The theory of photographic process*, MacMillan, New York.
- [96] **Meyer Y.**, (1994), *Les ondelettes, Algorithmes et applications*, 2^{ème} édition, Armand Colin, Paris, 189 p.
- [97] **Mitchell J.L., Pennebaker W.B., Fogg C.E., Le Gall D.J.**, (1997), *MPEG video compression standard*, Chapman Hall, New York.
- [98] **Mounts F.W.**, (1969), *A video encoding system with conditional picture – element replenishment*, Bell Systems Tech. Journal, 48(7), 2545 – 2554.
- [99] **mpeg-1**, (1992), *ISO/IEC 11172 International Standard*.
- [100] **mpeg-2**, (1995), *ISO/IEC 13818 MPEG-2 International Standard*, Video Recommendation ITU-T H.262, Jan.10, 1995.
- [101] **mpeg4**, (1998), *ISO/IEC 14496-2, Coding of audio-visual objects*, November 1998.
- [102] **Mueller P.F., Reynolds G.O.**, (1967), *Image restoration by removal of random media degradations*, J. Opt. Soc. Am., 57, 11, November 1967, 1338 – 1344.
- [103] **Murat Kunt, Granlund G., Kocher M.**, (1993), *Traitements numériques des données*, Presses Polytechnique et Universitaires Romandes, 562 p.
- [104] **Nasrabadi N.M., King R.A.**, (1988), *Image coding using vector quantization : a review*. IEEE Transactions on Communications, pp 957 – 971, August 1988.
- [105] **Nathan R.**, (1968), *Picture enhancement for the Moon, Mars and Man*, in Pictorial Pattern Recognition, G.C. Cheng, Ed. Thompson, Washington D.C., 239 – 245.
- [106] **Noble B.**, (1969), *Applied linear algebra*, Prentice – Hall, N.J..
- [107] *La Norme MIDI*.
<http://www.info.unicam.fr/~xtream/NormeMidi.html>
- [108] **Nussbaumer H.**, (1987), *Téléinformatique I, Circuits de données, Les erreurs et leur traitement, Liaisons de données*; Presses polytechniques romandes, 333p
- [109] **Nussbaumer H.**, (1991), *Téléinformatique III : Session, Présentation, Compression des données, Couche d'application*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1^{ère} édition, 493p.
- [110] **Nygren A.J.**, (1997), *Attenuation Correction*, CDT. Valable sur le site: <http://www.owl.net.rice.edu/~elec539/Projects97/cult/node5.html>
- [111] **Nyquist H.**, (1928), *Thermal agitation of electricity in conductors*, Phys. Revue, 32, July 1928, 110 – 113.

- [112] **Oliver B.M.**, (1952), *Statistics of television signal*, Bell System Technology Journal, 31, 724 – 750.
- [113] **Olivès J.-L.**, (1998), *Optimisation globale d'un système imageur à l'aide de critères de qualité visuelle*, Thèse ENSAE.
- [114] **Paden J.**, (1998), *Introduction to linear algebra*:
<http://www.ittc.ukans.edu/~paden/reference/guides/ECC/algebra/index.html>
 Last updated: September 29, 1998.
- [115] **Paez M.D., Glisson T.H.**, (1972), *Minimum mean squared error quantization in speech PCM and DPCM systems*, IEEE Trans. Communications, 225 – 230, April 1972.
- [116] **Panter P.F., Dite W.**, (1951), *Quantization distortion in pulse count modulation with nonuniform spacing of levels*, Proc. IRE, 39, 44 – 48.
- [117] **Pennebaker W.B., Mitchell J.L.**, (1992), *JPEG: Still image data compression standard*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- [118] **Poli A., Huguet L.**, (1989), *Codes correcteurs, théories et applications*, Masson, 448 p.
- [119] **Poynton C.**, (1995), *A guided tour of colour space*, Proceedings of the SMPTE advanced television and electronic imaging conference, San Francisco, Feb. 1995, 167 – 180.
- [120] **Pratt W.K.**, (1969), *Laser communication systems*, Wiley, New York.
- [121] **Pratt W.K.**, (1978), *Digital image processing*, A Wiley-Interscience Publication, J. Wiley & Sons.
- [122] **Pratt W.K.**, (1991), *Digital image processing*, Second Edition, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., 698 p.
- [123] **Pujolle G.**, (1995), *Les Réseaux*, 1^{ère} édition, Eyrolles.
- [124] **Pujolle G.**, (1997), *Les Réseaux, deuxième édition revue et augmentée*, Eyrolles, 939 p.
- [125] **Rapport MASI**, (1992), *Models fractals*, p88-93.
- [126] **Reusens E., Egger O., Ebrahimi T.**, (1995), *Very low bitrate coding : which way ahead?* In IEEE workshop on nonlinear signal and image processing, pp. 1019 – 1022, Halkidiki, Greece, June 1995, invited paper.
- [127] **Revue Le Haut Parleur**, (1998), *Télévision numérique, Etat de l'art et future proche*, Les Dossiers n°1, pp. 12 – 19.
- [128] **Rocca F.**, (1972), *Television bandwidth compression utilizing frame – to – frame correlation*, Symposium on Picture Bandwidth Compression, Gorgon and Breach, Newark, NJ.
- [129] **Rosenfeld A., Kak A.C.**, (1976), *Digital picture processing*, Academic Press.
- [130] **Sakrison D.J.**, (1979), *Image coding applications of vision model*, in Image Transmission Techniques, W.K. Pratt (Ed.) 21 – 71, New York, Academic Press, 1979.
- [131] **Santa-Cruz D., Ebrahimi T., Askelöf J., Larsson M., Christopoulos C.A.**, (2000), *JPEG2000 still image coding versus other standards*, In Proc. of the

SPIE's 45th annual meeting, Applications of digital image processing XXIII, volume 4115, pages 446 – 454, San Diego, California, Jul. 30-Aug, 4, 2000.
<http://Itswww.epfl.ch/~dsanta>.

- [132] **Selwyn E.W.H.**, (1935), *A theory of graininess*, Phot. J., 73, 571p.
- [133] **Shannon C. E.**, (1948), *A mathematical theory of communication*, Bell Systems Technics J., 27, 379 – 423 (Part I), 1948; 623 – 656 (Part II), 1948.
- [134] **Shapiro J.M.**, (1993), *Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients*. IEEE Transactions on Signal Processing, vol.41, n°12, pp 3445 – 3462, December 1993.
- [135] **Shore J.E.**, (1973), *On the applications of Haar functions*, IEEE Trans. Communications COM – 21, 209 – 216, March 1973.
- [136] **Slepian D.**, (1973), *Key papers in the development of information theory*, IEEE Press, New York.
- [137] **Smunari**, *Vidéo, son et informatique : état de l'art*.
<http://www.hec.unil.ch/smunari/VIDEO/MULTIM.HTM#video>
- [138] **Sondhi M.M.**, (1972), *Image restoration: The removal of spatially invariant degradations*, Proc. IEEE, 60, 7, July 1972, 842 – 853.
- [139] **Symes P.**, (1998), *Compression: Fundamental compression techniques and an overview of the JPEG and MPEG compression systems*, Mc Graw – Hill, New York.
- [140] **Tasto M., Wintz P.A.**, (1971), *Image coding by adaptive block quantization*, IEEE Trans. Commun. Technol., com – 19(6), 957 – 972.
- [141] **Telesun**, *Modification d'histogramme: Détail*.
<http://telesun.insa-lyon.fr/~telesun/Traitement/L06/detail.html>
- [142] **Thomas W.**, Ed., (1973), *SPSE Handbook of photographic science and engineering*, Wiley – Interscience, New York.
- [143] **Tukey J.W.**, (1971), *Exploratory data analysis*, Addison – Wesley, Reading, MA.
- [144] **Umberto Ecco**, (1964), *L'œuvre ouverte*, Editions Seuil.
- [145] **Vetterly M., Kovacevic J.**, (1995), *Wavelets and subband coding*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice – Hall.
- [146] **Wallace G. K.**, (1991), *The JPEG still picture compression standard*, Communications of ACM, vol.34, n°4, pp.30 – 44, April 1991.
- [147] **Walsh J.L.**, (1923), *A closed set of orthogonal functions*, American journals of mathematics 45, 5 – 24.
- [148] **Webster A.A., Jones C.T., Pinson M.H.**, (1993), *An objective video quality assessment system based on human perception*, Proc. Human Vision, Visual Processing and Digital Display IV, J.P. Alleback and B.E. Rogowitz (Eds), SPIE, 1913, 15 – 26.
- [149] **Welch T.**, (1984), *A technique for high performance data compression*, IEEE Trans. Comput., 17(6), 8 – 19.

- [150] **Wintz P.A.**, (1972), *Transform picture coding*, Proceedings IEEE 60(7) 809 – 820.
- [151] **Witten I.H., Neal R. M., Cleary J. G.**, (1987), *Arithmetic coding for data compression*, Communication of ACM 30, 520 – 540.
- [152] **Wyszecki G., Stiles W. S.**, (1982), *Color science: concepts and methods, Quantitative data and formulae*. John Wiley, New York, 950 p.
- [153] **W3C**, (1996), *PNG(Portable Network Graphics) Specification*, Oct. 1996.
<http://www.w3.org/TR/REC-png>
- [154] **Yun Q. Shi, Huifang Sun**, (2000), *Image and video compression for multimedia engineering, Fundamentals, algorithms and standards*, CRC Press, 480 p.
- [155] **Ziv J., Lempel A.**, (1977), *A universal algorithm for sequential data compression*, IEEE Trans. Information Theory, 23(3), 337 – 343.
- [156] **Ziv J., Lempel A.**, (1978), *Compression of individual sequences via variable - rate coding*, IEEE Trans. Information Theory, 24(5), 530 – 536.
- [157] **55 :148**, (1996), *Digital image processing ; Chapter 4, Part IV : Image pre-processing : Image restoration*. Valable sur le site:
<http://www.icaen.uiowa.edu/~dip/LECTURE/PreProcessing4.html>