

LE DEBRUITAGE DES IMAGES PAR FILTRAGE DANS LE DOMAIN DE LA TODDE

Keywords: Débruitage, Transformée en ondelettes discrète, Diversité enrichie.

ISAR A., ISAR DORINA

Electronique et transmission de l'information

Le filtrage des images perturbées additivement par bruit blanc à l'aide des ondelettes est réalisé en trois pas. Premièrement on calcule une transformée en ondelettes du signal acquis, après on filtre dans le domaine de cette transformée et finalement on calcule la transformée en ondelettes inverse. Pour différentes transformées en ondelettes et pour différents filtres on obtient des méthodes de filtrage différentes. Récemment a été proposée la transformée en ondelettes à diversité enrichie. Le but de cet article est de proposer l'utilisation de cette nouvelle transformée en ondelettes au débruitage des images perturbées additivement et d'apprécier son efficacité, par rapport à l'utilisation de la transformée en ondelettes discrète classique. On considère différents filtres dans le domaine des ondelettes.

1. INTRODUCTION

La Transformée en Ondelettes Discrète à Diversité Enrichie, TODDE, a été récemment proposée, en connexion avec le débruitage des signaux 1D, [1]. Elle est une généralisation de la transformée en ondelettes discrète, TOD, introduite par I. Daubechies, [2] et S. Mallat, [3]. La TOD est une transformée orthogonale très versatile dont les paramètres sont : le type d'ondelette mère utilisée pour générer les filtres nécessaires dans l'implémentation courante et le nombre des niveaux de décompositions (le nombre des itérations de la TOD) utilisé. Cette transformée peut être calculée rapidement (plus vite que la transformée de Fourier discrète). La TOD est utilisée, avec des résultats excellents, pour débruitage. La TODDE réduit la dépendance de la TOD par rapport à l'ondelette mère utilisée. Le sujet de cet article est l'analyse des capacités de débruitage des images des schémas basées sur l'utilisation de la TODDE. Cette analyse s'appuie sur la comparaison des plusieurs méthodes de débruitage, dont le schéma d'implémentation est présentée dans la figure suivante, [4].

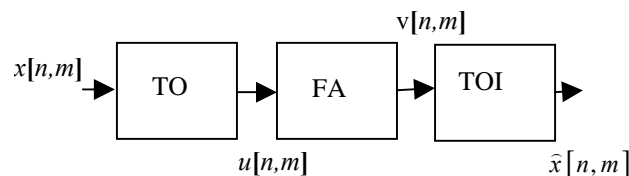


Figure 1. Le schéma de débruitage analysé.

Premièrement on va calculer la transformée en ondelettes, TO, pour le signal d'entrée, $x[n,m]$. Deuxièmement, il faut appliquer le filtre adaptatif (FA) et, à la fin, on revient en calculant la transformée en ondelettes inverse, TOI. Le signal en sortie représente la version débruitée du signal en entrée. C'est David Donoho, [6], qui a introduit cette technique de débruitage (denoising), en connexion avec la TOD. Dans la suite nous considérons deux cas : quand la TO calculée par le premier bloc du schéma de la figure 1 est la TOD est quand celle-ci est la TODDE. En conséquence le troisième bloc calculera soit la transformée en ondelettes discrète inverse, TODI, soit la transformée en ondelettes à diversité enrichie inverse, TODDEL.

Les systèmes de calcul de la TOD et de la TODDE se comporte comme des filtres de blanchissement. Ainsi, ayant un signal aléatoire stationnaire à l'entrée, pour le nombre des niveaux de décomposition tendant vers l'infini, ces systèmes produisent en sortie un signal $u[n,m]$, convergent vers un bruit blanc. La fonction de densité de probabilité du signal de sortie converge vers une gaussienne, quand le nombre de niveaux de décomposition tend vers l'infini et quand le signal d'entrée est un bruit blanc 2D. De plus, ni la TODDE ni la TOD ne polarisent pas le signal $x[n,m]$. La structure de cet article est la suivante. Dans le deuxième paragraphe est rappelée la construction de la TODDE. Dans le troisième paragraphe sont présentés les filtres qui seront utilisés dans le domaine de la TO. Il s'agit de filtres de Wiener, FW, [5], de filtres non linéaires de type *hard-thresholding*, FHT et *soft-thresholding*, FST, [6] et du filtre *bishrink*, FB, [7]. Le but du quatrième paragraphe est de simuler le fonctionnement du système de la figure 1, dans les configurations suivantes :

TO \rightarrow TOD, TODDE,

FA \rightarrow FW, FHT, FST, FB.

Les simulations sont faites pour la même image, Lenna, pour différentes puissances de bruit perturbateur. Les résultats sont réunis dans un tableau. Le dernier paragraphe est dédié aux conclusions.

2. LE PRINCIPE DE LA TODDE

Le principe de calcul de la transformée en ondelettes discrète à diversité enrichie, TODDE, d'une image, est présenté dans la figure suivante. C'est une transformée redondante, qui réalise la correspondance entre la matrice d'entrée, $\mathbf{x}_i [k,l]$ et la matrice tridimensionnelle **TODDE**[[k,l], m]. Chaque colonne de la matrice représente l'image de la transformée en ondelettes discrète, TOD_r , de la matrice d'entrée, calculée en utilisant une ondelette mère différente (indexée par r). On utilisera les neuf ondelettes mères à support compact qui ont les supports les plus courts et un nombre de moments nuls de deux à dix (ondelettes de Ingrid Daubechies, [2]).

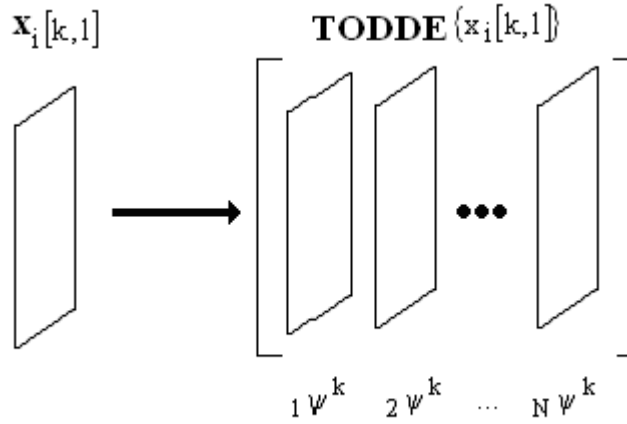


Figure 2. Le principe de calcul de la TODDE d'une image.

Cette transformation peut être inversée. En effet, en inversant chaque colonne, à l'aide de la transformée en ondelettes inverse, $TODI_r$, correspondante, on obtient une nouvelle matrice et en calculant la moyenne arithmétique des colonnes de celle-ci, l'image initiale, $x_i[k, l]$, est reconstruite.

3. LE FILTRAGE DANS LE DOMAINE DE LA TO

Dans la suite sont présentés les filtres qui seront utilisés dans le domaine de la TO. Il s'agit de filtres de Wiener, FW, [5], de filtres non-linéaires de type *hard-thresholding*, FHT et *soft-thresholding*, FST, [6] et du filtre *bishrink*, FB, [7]. La réponse impulsionnelle du filtre de Wiener d'ordre zéro, FW0, est, [5] :

$$\hat{h}_{n,p}[x, y] = \frac{\hat{\sigma}^2[n, p]}{\hat{\sigma}^2[n, p] + \sigma_b^2} \delta[x, y] \quad (1)$$

La variance du bruit peut être estimée en utilisant la relation :

$$\sigma_b^2 = \frac{\text{median}\left(\left|x_r(n, p)\right|\right)}{0.6745} \quad (n, p) \in D_1^3 \quad (2)$$

La variance de l'image utile peut être estimée en utilisant les relations suivantes :

$$\hat{m}_{s_r}[n,p] = \frac{1}{(2P+1)^2} \sum_{(k,l) \in F_{n,p}} x_r[k,l] \quad (3)$$

$$\hat{\sigma}_{x_r}^2[n,p] = \frac{1}{(2P+1)^2} \sum_{(k,l) \in F_{n,p}} \left(x_r[k,l] - \hat{m}_{s_r}[n,p] \right)^2 \quad (4)$$

$$\hat{\sigma}^2[n,p] = \max \left(0, \hat{\sigma}_{x_r}^2[n,p] - \sigma_b^2 \right) \quad (5)$$

dans une fenêtre glissante, $F_{n,p}$, de taille 3×3 , centrée sur le pixel dont la variance est estimée.

Le filtre de Wiener d'ordre deux, FW2, utilise le modèle suivant de la fonction d'auto corrélation de la TOD d'une image réelle, [5] :

$${}_{(n,p)}\Gamma_s[k,l] = \begin{cases} r_{0,0} \rho^{|k|+|l|}, & (k,l) \in F_{n,p} \\ 0, & |k| > nP \quad \text{ou} \quad |l| > pP \end{cases} \quad (6)$$

Ce modèle, pour $\rho < 1$, montre que l'influence du *pixel* central sur les autres *pixels* de la fenêtre diminue lorsque la distance entre ces *pixels* augmente. La vitesse de décroissance dépend de la valeur du ρ . La valeur $r_{0,0}$ est donnée par

$\hat{\sigma}^2[n,p]$. La réponse impulsionnelle du FW2 est la solution du système d'équations suivant :

$$\begin{bmatrix} h(1,1) \\ h(1,0) \\ h(0,1) \\ h(0,0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{00} + \sigma_b^2 & r_{00}\rho & r_{00}\rho & r_{00}\rho^2 \\ r_{00}\rho & r_{00} + \sigma_b^2 & r_{00}\rho & r_{00}\rho \\ r_{00}\rho & r_{00}\rho & r_{00} + \sigma_b^2 & r_{00}\rho \\ r_{00}\rho^2 & r_{00}\rho & r_{00}\rho & r_{00} + \sigma_b^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} r_{00}\rho^2 \\ r_{00}\rho \\ r_{00}\rho \\ r_{00} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Le filtre non-linéaire de type *soft-thresholding*, FST, est décrit par la relation entrée-sortie suivante :

$$\text{soft}(g, \tau) = \text{sgn}(g) (|g| - \tau)_+ \quad (8)$$

où, a été utilisée la notation :

$$(g)_+ = \begin{cases} g & \text{pour } g > 0 \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad (9)$$

Si le seuil τ est choisi en accord avec la valeur de la variance de l'image de bruit alors ce filtre est adaptatif, [6]. Une constante de proportionnalité prend différentes valeurs correspondant à différentes fonctions de coût. Dans le cas de la minimisation de l'erreur Min-Max d'approximation, cette constante vaut $\sqrt{2 \ln N}$ où N représente le nombre des *pixels* de l'image. Une autre valeur, spécifique pour le critère de minimisation de la puissance de bruit à la sortie, est 3 (tenant compte de la règle de 3σ pour la ddp Gaussienne).

Le critère de choix de la constante de proportionnalité utilisé pour les simulations présentées dans le paragraphe suivant est la maximisation du rapport signal à bruit de sommet de sortie. Ainsi, la valeur de cette constante a été retenue pour que le rapport signal à bruit de sommet associé à chaque TOD soit maximal.

La relation entrée-sortie pour le filtre *hard-thresholding* est :

$$\text{hard}(g, \tau) = (|g| - \tau)_+ \quad (10)$$

La valeur du seuil du filtre *hard-thresholding*, τ , a été choisie dans les simulations qui suivent tel que le rapport signal à bruit de sommet associé à chaque TOD sera maximal.

Il y a une certaine corrélation entre un coefficient de la TOD située à une échelle donnée et le même coefficient situé dans la même position géométrique à l'échelle suivante (appelé "parent" du coefficient considéré). En [7] est prise en compte seulement la dépendance entre un coefficient (appartenant à une certaine sous-image de détails) et son "parent". Ce type de dépendance est représenté sur la figure 3. En utilisant les coefficients "parent" et "enfant", il est possible d'estimer le coefficient "enfant" à l'aide d'un filtre MAP. Soit 1x_r le coefficient de détail

considéré et 2x_r son "parent" (le coefficient de détail situé dans la même position mais calculé à l'itération suivante). En analysant la figure 3 on constate qu'en fait à un coefficient de type "parent" correspondra une zone de quatre coefficients "enfants". C'est la raison pour laquelle chaque image contenant des coefficients "parents" sera sur-échantillonnée pour avoir le même nombre d'éléments que l'image contenant les coefficients "enfants" correspondants. Les paramètres statistiques des coefficients "enfants" (moyenne, variance) seront alors déterminés en utilisant les coefficients "parents" de même position spatiale et les coefficients "enfants" voisins, situés dans une fenêtre rectangulaire, centrée sur le coefficient "enfant" courant.

On peut écrire :

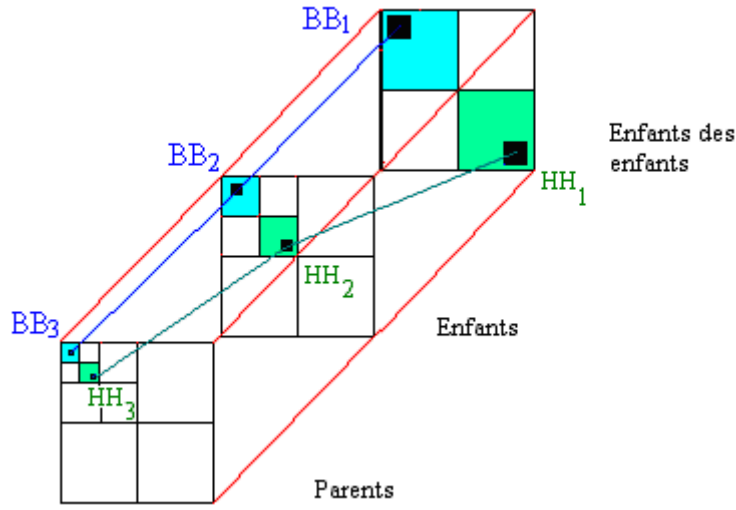


Figure 3. La dépendance à travers les échelles des coefficients de la TOD. Par exemple les coefficients “parents” des coefficients de la sous-image HH_2 se trouvent dans la sous-image HH_3 .

$${}^1x_r = {}^1s_r + {}^1b_r \quad (11)$$

et :

$${}^2x_r = {}^2s_r + {}^2b_r \quad (12)$$

C'est à dire :

$$\mathbf{x}_r = \mathbf{s}_r + \mathbf{b}_r \quad (13)$$

en utilisant les notations :

$$\mathbf{x}_r = \left({}^1x_r, {}^2x_r \right); \quad \mathbf{s}_r = \left({}^1s_r, {}^2s_r \right); \quad \mathbf{b}_r = \left({}^1b_r, {}^2b_r \right) \quad (14)$$

L'estimateur MAP de \mathbf{s}_r à partir de l'observation \mathbf{x}_r (perturbée par bruit) est donné par :

$$\hat{\mathbf{s}}_r(\mathbf{x}_r) = \arg \max_{\mathbf{s}_r} \{ \ln (p_{br}(\mathbf{x}_r - \mathbf{s}_r) p_{sr}(\mathbf{s}_r)) \} \quad (15)$$

En faisant l'hypothèse que l'image \mathbf{b}_r est modélisée par bruit blanc Gaussien de moyenne nulle, alors :

$$p_{b_r}(\mathbf{b}_r) = \frac{1}{2\pi\sigma_b^2} e^{-\frac{{}^1b_r^2 + {}^2b_r^2}{2\sigma_b^2}} \quad (16)$$

Dans [7] est proposé le modèle suivant pour la TOD de l'image utile :

$$p_{s_r}(\mathbf{s}_r) = \frac{3}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{\sqrt{3}}{\sigma} \sqrt{({}^1s_r)^2 + ({}^2s_r)^2}} \quad (17)$$

où 1s_r représente l'ensemble des coefficients de la r-ième TOD de l'image utile calculés à la m-ième itération et 2s_r représente l'ensemble des coefficients de la r-ième TOD de l'image utile, calculés à l'itération suivante. La relation entrée-sortie du filtre MAP correspondent, appelé *bishrink*, est, [7] :

$$\hat{{}^1s_r} = \frac{\left(\sqrt{({}^1x_r)^2 + ({}^2x_r)^2} - \frac{\sqrt{3}\sigma_b^2}{\sigma} \right)_+ \cdot {}^1x_r}{\sqrt{({}^1x_r)^2 + ({}^2x_r)^2}} \quad (18)$$

où σ_b peut être estimé en utilisant la relation (2) et σ en utilisant les relations (3), (4) et (5).

4. COMPARAISON DES PERFORMANCES DES DIFFERENTS FILTRES

Afin de mettre en évidence les avantages de l'association de la TODDE avec le filtrage *bishrink*, nous présentons quelques résultats décrits dans le tableau suivant. Différentes solutions pour le filtrage dans le domaine de la TOD sont abordées. Une comparaison entre les résultats obtenus en utilisant le filtre de Wiener d'ordre zéro, le filtre de Wiener d'ordre deux, le filtre *hard-thresholding*, le filtre *soft-thresholding* et le filtre *bishrink* est faite. L'image de référence (Lenna) est perturbée par un bruit blanc additif. Les différents résultats de simulation sont comparés par le rapport signal à bruit de sommet à la sortie, RSBS, (*pick signal to noise ratio*).

$$RSBS = 20 \log_{10} \frac{256}{\sqrt{eqm}} \quad (19)$$

où eqm représente l'erreur quadratique moyenne d'estimation.

Les TODs correspondant aux neuf ondelettes mère de Daubechies ayant un nombre de moments nuls variant de 2 à 10 sont calculés. Après avoir appliqué la méthode de filtrage spécifique à chacune de ces transformées, le calcul des TODIs correspondantes est mené afin de déterminer le RSBS. Le meilleur résultat est spécifié, dans chaque tableau, par des caractères gras. En moyennant arithmétiquement les résultats de chaque TOD, on obtient le résultat de la TODDE. Le rapport signal à bruit de sommet obtenu est également enregistré dans chaque tableau. Ainsi on peut comparer l'effet de l'association de la méthode de filtrage étudiée à la TOD calculée en utilisant une certaine ondelette mère (la meilleure pour l'image considérée parmi les ondelettes mère de Daubechies) avec l'effet de l'association de la méthode de filtrage étudiée et la TODDE. Dans le tableau 4.1 sont présentés les résultats de simulation pour le filtre FW0.

Tableau 4.1. Les rapports signal à bruit de sommet obtenus en utilisant le filtre de Wiener d'ordre 0 dans le domaine des TODs correspondantes aux ondelettes mères à support compact de Daubechies à k moments nuls (correspondant à la sortie k-1) et à la TODDE.

σ_b	Rapports signal à bruit de sommet										
	Entrée	So. 1	So. 2	So. 3	So. 4	So. 5	So. 6	So. 7	So. 8	So. 9	TODDE
10	28.1	32.2	32.4	32.5	32.6	32.6	32.5	32.5	32.5	32.5	32.87
15	24.6	29.1	29.2	29.3	29.3	29.5	29.4	29.4	29.5	29.2	29.61
20	22.1	26.7	26.9	27.2	26.9	26.9	27.1	27.1	27.2	27.3	27.29
25	20.2	25.3	25.2	25.3	25.2	25.1	25.2	25.3	25.3	25.3	25.46
30	18.6	23.6	23.7	23.6	23.8	23.9	23.9	23.9	23.8	23.9	24.01
35	17.3	22.3	22.2	22.6	22.5	22.5	22.5	22.2	22.2	22.4	22.56

On constate que chaque fois l'utilisation de la TODDE conduit aux résultats supérieurs à l'utilisation de la meilleure TOD.

Dans le tableau 4.2. sont présentés les résultats de simulation pour le filtre FW2. On a considéré trois cas, pour trois valeurs différentes du paramètre ρ . Le cas correspondant à la plus petite valeur de ce paramètre est le plus proche du filtre FW0. Les résultats obtenus en utilisant le FW2 sont un peu mieux que les résultats obtenus en utilisant le filtre FW0. L'augmentation apportée par l'utilisation de la TODDE est plus évidente dans ce cas-ci. Mais la différence entre les valeurs des rapports signal à bruit de sortie et d'entrée est encore faible. Dans le tableau 4.3. sont présentés les résultats obtenus à l'aide du filtre FST. On constate une amélioration par rapport à l'utilisation des filtres de Wiener. En même temps on constate une concentration des meilleurs ondelettes mères vers le centre de cet ensemble, autour de ceux qui ont 4, 5 ou 6 moments nuls.

Tableau 4.2. Les rapports signal à bruit de sommet obtenus en utilisant le filtre de Wiener d'ordre 2 dans le domaine des TODs correspondantes aux ondelettes mères à support compact de Daubechies à k moments nuls (correspondant à la sortie $k-1$) et à la TODDE.

σ_b	Rapports signal à bruit de sommet ($\rho = 0.7$)										
	Entrée	So. 1	So. 2	So. 3	So. 4	So. 5	So. 6	So. 7	So. 8	So. 9	TODDE
10	28.1	31.6	31.7	31.7	31.8	31.9	31.8	31.7	31.7	31.6	32.41
15	24.6	29.0	29.1	29.2	29.2	29.2	29.1	29.1	29.1	29.1	29.69
20	22.1	27.0	27.1	27.2	27.3	27.3	27.2	27.2	27.2	27.2	27.68
25	20.2	25.5	25.7	25.7	25.7	25.7	25.6	25.5	25.5	25.6	26.04
30	18.6	24.1	24.2	24.3	24.3	24.3	24.4	24.3	24.2	24.2	24.63
35	17.3	23.1	23.2	23.2	23.3	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	23.60
σ_b	Rapports signal à bruit de sommet ($\rho = 0.5$)										
	Entrée	So. 1	So. 2	So. 3	So. 4	So. 5	So. 6	So. 7	So. 8	So. 9	TODDE
10	28.1	32.0	32.2	32.3	32.3	32.3	32.2	32.2	32.2	32.2	32.77
15	24.6	29.1	29.3	29.3	29.4	29.4	29.3	29.3	29.3	29.3	29.75
20	22.1	26.9	27.0	27.2	27.2	27.3	27.2	27.3	27.2	27.2	27.57
25	20.2	25.5	25.5	25.5	25.5	25.7	25.5	25.6	25.4	25.5	25.87
30	18.6	23.9	24.0	24.0	24.0	23.8	23.9	24.1	23.9	24.0	24.29
35	17.3	22.8	22.8	22.7	22.8	22.7	22.7	22.6	22.6	22.7	23.00
σ_b	Rapports signal à bruit de sommet ($\rho = 0.9$)										
	Entrée	So. 1	So. 2	So. 3	So. 4	So. 5	So. 6	So. 7	So. 8	So. 9	TODDE
10	28.1	29.8	29.8	30.1	30.2	30.1	29.9	29.8	29.8	29.6	30.71
15	24.6	27.8	27.9	27.9	28.0	28.0	28.0	27.9	27.7	27.8	28.62
20	22.1	26.2	26.3	26.4	26.4	26.4	26.3	26.3	26.3	26.3	26.99
25	20.2	24.9	25.0	25.1	25.1	25.1	25.0	25.1	25.0	25.0	25.65
30	18.6	23.9	23.9	24.1	24.1	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0	24.58
35	17.3	22.9	22.9	23.1	23.1	23.1	23.0	23.0	23.0	23.0	23.6

Tableau 4.3. Les rapports signal à bruit de sommet obtenus en utilisant le filtre de type soft-thresholding dans le domaine des TODs correspondantes aux ondelettes mères à support compact de Daubechies à k moments nuls (correspondant à la sortie $k-1$) et à la TODDE.

σ_b	Rapports signal à bruit de sommet										
	Entrée	So. 1	So. 2	So. 3	So. 4	So. 5	So. 6	So. 7	So. 8	So. 9	TODDE
10	28.1	30.7	30.9	30.9	30.9	30.7	30.6	30.6	30.6	30.7 21	31.7
15	24.6	28.6	28.7	28.8	28.9	28.7	28.6	28.7	28.6	28.6	29.7
20	22.1	26.9	27.1	27.1	27.2	27.1	27.1	27.0	27.0	27.0	28.1
25	20.1	25.7	25.8	25.8	25.9	25.9	25.8	25.8	25.7	25.7	26.8
30	18.6	24.8	24.8	24.9	25.0	25.0	24.9	24.9	24.9	24.8	25.9
35	17.3	23.9	24.1	24.2	24.2	24.2	24.1	24.1	24.0	24.0	25.1

Dans le tableau 4.4. sont présentés les résultats obtenus en utilisant le filtre FHT. On constate que les résultats obtenus en utilisant ce filtre sont supérieurs aux résultats obtenus en utilisant les filtres FHT, FW2 et FW0. L'augmentation due à l'utilisation de la TODDE est encore plus évidente. En ce qui concerne la concentration des meilleures ondelettes mères autour du centre de cet ensemble dans ce cas-ci les résultats sont similaires aux résultats obtenus dans le cas du FST.

Finalement, les résultats obtenus en utilisant le FB sont présentés dans le tableau 4.5.

Tableau 4.4. Les rapports signal à bruit de sommet obtenus en utilisant le filtre de type hard-thresholding dans le domaine des TODs correspondantes aux ondelettes mères à support compact de Daubechies à k moments nuls (correspondant à la sortie $k-1$) et à la TODDE.

σ_b	Rapports signal à bruit de sommet										
	Entrée	So. 1	So. 2	So. 3	So. 4	So. 5	So. 6	So. 7	So. 8	So. 9	TODDE
10	28.1	30.4	30.6	30.6	30.8	30.7	30.6	30.5	30.5	30.5	33.3
15	24.6	28.0	28.2	28.1	28.2	28.2	28.1	28.0	28.0	28.0	30.9
20	22.1	26.3	26.4	26.6	26.5	26.5	26.3	26.2	26.2	26.3	29.1
25	20.2	25.2	25.2	25.3	25.3	25.3	25.2	25.2	25.1	25.2	27.8
30	18.6	24.1	24.2	24.4	24.4	24.5	24.4	24.2	24.2	24.2	26.7
35	17.2	23.4	23.5	23.7	23.6	23.7	23.5	23.5	23.4	23.4	25.8

Tableau 5.3.4.1.1. Les rapports signal à bruit de sommet obtenus en utilisant le filtre de type bishrink dans le domaine des TODs correspondantes aux ondelettes mères à support compact minimal de Daubechies à k moments nuls (correspondant à la sortie $k-1$) et à la TODDE.

σ_b	Rapports signal à bruit de sommet										
	Entrée	So. 1	So. 2	So. 3	So. 4	So. 5	So. 6	So. 7	So. 8	So. 9	TODDE
10	28.1	33.9	34.1	34.1	34.2	34.2	34.2	34.1	34.2	34.2	35.00
15	24.6	31.9	32.1	32.2	32.2	32.2	32.2	32.2	32.2	32.2	33.14
20	22.1	30.5	30.7	30.8	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	30.9	31.84
25	20.1	29.5	29.6	29.7	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	30.72
30	18.6	28.6	28.8	28.9	28.9	28.9	28.9	28.9	28.9	28.9	29.83
35	17.2	27.9	28.0	28.1	28.3	28.2	28.2	28.2	28.2	28.2	29.10

Ce sont les meilleurs résultats. Les différences entre les valeurs du rapport signal à bruit de sommet à la sortie et à l'entrée sont les plus grandes, l'augmentation produite par l'utilisation de la TODDE est la plus évidente et la concentration des meilleures ondelettes mères autour des ondelettes mères à 5 et à 6 moments nuls est la plus grande parmi toutes les simulations réalisées.

5. CONCLUSIONS

Une synthèse des résultats obtenus est présentée dans le tableau 5.1. Sur chaque colonne, en commençant avec la troisième, sont inscrits les valeurs du RSBS de sortie obtenues en utilisant la TOD calculée à l'aide de la meilleure ondelette mère (dans la sous-colonne de gauche) et en utilisant la TODDE (dans la sous-colonne de droite). Les résultats obtenus à l'aide de la TODDE sont toujours supérieurs aux résultats acquis en utilisant la TOD calculée avec la meilleure ondelette mère de Daubechies. L'idée d'exploiter la diversité des ondelettes mère

de cette famille conduit à l'augmentation des performances de la méthode de débruitage pour tous les filtres utilisés. Le filtre le plus performant est le filtre *bishrink*. Pour ce filtre, l'augmentation du gain associé à l'utilisation de la TODDE est de l'ordre de 1 dB. En comparant les résultats obtenus en utilisant le filtre *bishrink* dans le domaine de la TODDE avec les résultats obtenus en utilisant autres méthodes de débruitage, présentées dans [7], on peut constater que cette méthode de débruitage est parmi les meilleures connues aujourd'hui.

Tableau 5.1. Synthèse des résultats.

σ_b	Entrée	FW0		FW2		FST		FHT		FB	
		MT OD	TODDE	MT OD	TO DD E	MT OD	TODDE	MT OD	TODDE	MT OD	TODDE
10	28.14	D5, 32.6	32.87	D 6 31.9	32. 41	D 4 30.9	31.80	D 5 30.8	33.37	D 6 34.2	35.01
15	24.64	D9 29.5	29.61	D6 29.2	29. 69	D5 28.9	29.77	D 5 28.2	30.91	D 6 32.2	33.14
20	22.11	D 10 27.2	27.29	D 6 27.3	27. 68	D 5 27.2	28.14	D 4 26.6	29.13	D 5 30.9	31.84
25	20.22	D 9 25.3	25.46	D 4 25.7	26. 04	D 6 25.9	26.87	D 5 25.3	27.81	D 5 29.8	30.72
30	18.63	D 6 23.9	24.01	D7 24.4	24. 63	D5 25.0	25.94	D 6 24.5	26.75	D 5 28.9	29.83
35	17.30	D 4 22.5	22.56	23.3	23. 60	D 5 24.2	25.18	D 6 23.7	25.84	D 5 28.3	29.11

Reçu le

Université "Politehnica" de Timișoara

BIBLIOGRAPHIE

1. A. Isar, D. Isar. *A New Discrete Wavelet Transform*, Revue roumaine des sciences techniques, série Électrotechn. et énergétique, Tome **47**, vol. 3, 2002, pp. 411-415.
2. I. Daubechies. *Orthonormal bases of compactly supported wavelets*, Comm.Pure and Appl. Math., **41**, pp.909-996, (1988).
3. S. Mallat. *Multifrequency Channel Decomposition*. IEEE Trans. on ASSP, vol. **37**, No.12, pp. 2091-2110, Octobre (1989).
4. A. Isar, D. Isar. *Filtres non-lineaires et ondelettes*, Revue roumaine des sciences techniques, série Electrotechnique et énergétique, Tome **44**, vol. 2, 1999, pp. 231-238.
5. H. Zhang, A. Nostratinia, R. O. Wells Jr. *Image Denoising via Wavelet-Domain Spatially Adaptive FIR Wiener Filtering*, IEEE ICASP, Istanbul, June 2000, vol. **5**, pp. 2179-2182.
6. D. L. Donoho. *De-Noising via Soft Thresholding*. Technical Report 409, Stanford University, November (1992).
7. L. Sendur, I. W. Selesnick. *Bivariate shrinkage with local variance estimation*. IEEE Signal Processing Letters, **9**(12), December 2002, pp. 438-441.
8. J. B. Buckheit, D. L. Donoho. *WaveLab and Reproducible Research. Wavelets and Statistics* Editeurs Antoniadis et Oppenheim, Springer-Verlag, pp. 55-82 ,1995.