UNIVERSITE MONTPELLIER II
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

Habilitation à Diriger des Recherches

Discipline : *Informatique*

Ecole Doctorale : *Information, Structures, Systèmes*

présentée et soutenue publiquement
par

Marc CHAUMONT

TITRE :

Schémas de tatouage d'images, schémas de tatouage conjoint à la compression, et schémas de dissimulation de données

Soutenue le ... devant la commission d'examen

POSSIBLE COMPOSITION DU JURY

M.	Marc	ANTONINI	Dr. CNRS
M.	Atilla	BASKURT	Pr. INSA Lyon
M.	Jean-Pierre	GUEDON	Pr. Polytech Nantes
M.	Claude	LABIT	Dr. INRIA
M.	Alain	JEAN-MARIE	Dr. INRIA
M.	William	PUECH	Pr. IUT Béziers

Aux têtards et à la maman des têtards.

Remerciements

Table des matières

Table des figures

Curriculum Vitae

Nom :	CHAUMONT
Prénom :	Marc
Grade :	Maître de conférences
Etablissement :	Université de Nîmes
Section CNU :	27
Date de naissance :	08/11/1976
Nationalité :	Française
Situation familiale :	Marié, 3 enfants
Adresse électronique :	marc.chaumont@lirmm.fr
Adresse web :	www.lirmm.fr/∼chaumont

Unité d'appartenance :
LIRMM, UMR 5506, équipe ICAR (responsable William Puech). Le Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM) est une Unité Mixte de Recherche de l'Université Montpellier II (UMII) et du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).

Activité de recherche :
Mots Clefs : Tatouage, Stéganographie, Sécurité, Compression, Segmentation, Suivi dans les vidéos.

Titres Universitaires et parcours

- Depuis septembre 2005 : Maître de conférences à l'université de Nîmes.
- Septembre 2004 - juillet 2005 : $\frac{1}{2}$-ATER, à l'université de Pau et des Pays de l'Adour, IUT de Bayonne.
- Septembre 2003 - juillet 2004 : $\frac{1}{2}$-ATER à l'université de Rennes1.
- Novembre 2003 : Doctorat de l'université de Rennes1 mention informatique avec la mention très honorable, « Représentation en objets vidéo pour un codage progressif et concurrentiel des séquences d'images ». Encadrement : S. PATEUX et H. NICOLAS (équipe TEMICS/IRISA). Soutenance le 13 novembre 2003 à l'IRISA. Jury : M. Claude LABIT (président), directeur de recherches à l'IRISA, M. Michel BARLAUD (rapporteur), professeur des universités à l'université de Nice, M. Jean-Marc CHASSERY (rapporteur), directeur de recherches au LIS, M. Atilla BASKURT (examinateur), professeur des universités à l'université de Lyon, MM. Cécile DUFOUR (examinatrice), ingénieur de recherche Philips Digital Systems Laboratories Paris, M. Henri NICOLAS (directeur de travaux), chargé de recherches à l'IRISA, M. Stéphane PATEUX (co-directeur de travaux), chargé de recherches à l'IRISA.

– Juillet 2000 : DEA, Diplôme d'étude approfondie de l'IFSIC, Université de Rennes 1, option informatique.
– Juillet 1999 : Diplôme d'ingénieur de l'INSA de Rennes, option informatique.

Brève biographie

Diplômé de l'INSA de Rennes (Institut National des Sciences Appliquées) en 1999 avec l'option informatique, j'ai ensuite effectué mon service militaire à Saint-Cyr Coëtquidan en tant qu'enseignant scientifique du contingent. Durant la même période, j'ai obtenu un diplôme de DEA à l'IFSIC (Institut de Formation Supérieure en Informatique et Communication) de Rennes dans la filière réseaux. Le 13 novembre 2003, j'ai obtenu le diplôme de docteur de l'université de Rennes 1, mention informatique. La thèse portait sur la segmentation et la compression (dynamique et scalable) des objets vidéo dans le cadre de la compression vidéo. Durant l'année 2003-2004 j'ai occupé un poste de 1/2 ATER (Attaché Temporaire de l'Enseignement et de la Recherche) à l'IFSIC tout en poursuivant mon activité de recherche dans l'équipe TEMICS (TraitemEnt, Modélisation d'Images & CommunicationS) à l'IRISA (Institut de Recherche en Informatique et Systèmes Aléatoires) de Rennes. Durant l'année 2004-2005 j'ai occupé un poste de 1/2 ATER à l'IUT de Bayonne. Ma recherche a porté sur le suivi de visages par modèle 3D au sein de l'équipe TITS (Traitement d'Image, Traitement de Signal) dirigée par Franck Luthon au LIUPPA (Laboratoire Informatique Université Pau et Pays de l'Adour). En septembre 2005 j'ai été nommé enseignant-chercheur à l'université de Nîmes et j'ai intégré le LIRMM (Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microelectronique de Montpellier). Mes domaines de recherche portent sur le tatouage de données (images, vidéo, modèle 3D), la stéganographie, la compression vidéo, et dans une moindre mesure la segmentation et le suivi dans les vidéos.

Recherche

Résumé des travaux de recherche (période 2005-2011)

J'ai principalement travaillé sur le tatouage d'images, le tatouage conjoint à la compression, et la dissimulation de données cachées non robuste. Ces recherches ont été menées dans le cadre des travaux de doctorat des étudiants que j'ai encadrés, de collaborations au sein de mon équipe, ou de recherches personnelles. Nous avons proposé une nouvelle approche pour l'insertion informée de l'algorithme DPTC [Chaumont 10a]. Nous avons étendu l'approche de tatouage P-QIM en intégrant un tatouage basé TCQ [Chaumont et al. 11a]. Nous avons proposé un mécanisme de tatouage au sein d'un codeur de H.264 [Shahid et al. 11a], un schéma de traçage de traîtres (code de Tardos + tatouage) au sein de H.264 [Shahid et al. 10], ainsi qu'un mécanisme de tatouage par TCQ au sein de JPEG2000 [Goudia et al. 11]. Dans le cadre de travaux sur l'insertion de la couleur dans une image en niveaux de gris, nous avons proposé une approche par optimisation de fonctionnelle floue [Chaumont et al. 07c], ainsi qu'une approche rapide par heuristique [Chaumont et al. 07b].

J'ai également travaillé sur des problématiques connexes, non présentées dans mon document d'HDR. Ainsi, nous avons proposé une insertion de données cachées (points 3D) multi-résolution au sein d'une image [Hayat et al. 07], une attaque par coloriage d'image [Chaumont et al. 08b], un algorithme de tatouage réversible [Chaumont et al. 09a], un algorithme de tatouage réversible

sur image cryptée [Puech et al. 08], et un schéma de tatouage robuste aux désynchronisations [Berrezoug et al. 09].

De plus, j'ai participé à des travaux sans lien avec le tatouage : chiffrement sélectif d'un flux H.264 [Shahid et al. 11b], suivi de visage multi-résolution par modèle 3D actif déformable [Chaumont et al. 07a] et suivi de lèvres par snakes et modèle 3D déformable [Beaumesnil et al. 06].

Publications

- Revues :
  - 2 revues internationales (Signal, Image and Video Processing, Springer, et IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology)
  - 1 revue internationale en cours d'évaluation (Annals of telecommunications),
  - 3 revues internationales en cours d'écriture,
- 1 revue nationale en en cours d'écriture,
- 2 chapitres de livre,
- 2 tutoriaux invités dans des conférences internationales,
- 34 articles dans des conférences internationales (dont IEEE ICIP, IEEE ICME, IEEE ICASSP, I&ST SPIE, EUSIPCO,...),
- 12 articles dans des conférences nationales (dont GRETSI, CORESA,...).

La liste des publications est donnée à la fin du CV, et elles sont disponibles à l'adresse suivante : http ://www.lirmm.fr/∼chaumont/Publications.html.

Encadrements

Encadrements de doctorants depuis 2005

- Peter MEUEL (octobre 2006 - décembre 2009) : « Enrichissement et protection de séquences vidéos ». W puech et M. Chaumont. Thèse soutenue en décembre 2009.
- Zafar Javed SHAHID (janv 2008 - nov 2010) : « Protection de vidéos par compression et tatouage scalables ». W. Puech et M. Chaumont. Thèse soutenue en novembre 2010.
- Dalila GOUDIA (sept. 2008 - ...) « Tatouage conjoint à la compression d'images fixes par les ondelettes ». W. Puech, M. Chaumont, M. Hadj Said Naima (co-tutelle avec le Laboratoire Signal IMage PArole (SIMPA), Algérie). Soutenance prévue en décembre 2011.
- Sarra KOUIDER (oct. 2010 - ...) « Codes correcteurs et sécurité en stéganographie ». W. Puech, M. Chaumont (Financement Ministère Enseignement/Recherche Algérien).

Encadrements de stagiaires de Master 2 Recherche en Informatique à l'université Montpellier II

2009-2010 :

- Hugo ALATRISTA SALAS : « La stéganographie moderne : L'art de communication secrète ». Poursuite en thèse à Montpellier.
- Maha GHARBI ARAB : « Comparaison à haut débit du tatouage 'on-off keying' avec le(s) schéma(s) de tatouage Dirty Paper Trellis Codes et/ou Scalar Costa Scheme ». Elle est retournée en Tunisie.

– Sarra KOUIDER : « Extraction de caractéristiques pour l'analyse biométrique 3D d'un visage ». Poursuite en thèse encadré par W.Puech et moi-même.

2008-2009 :

– Omar BERREZOUG : « Tatouage robuste aux attaques de désynchronisations ». Une publication à MajecSTIC. Il est retourné en Algérie.
– Vinh Truong Hoang : « Attaque de système de tatouage ». Il est retourné au Vietnam.

2007-2008 :

– Nicolas TOURNIER : « Protection de vidéos par compression et tatouage hiérarchiques ». Une publication à CORESA. Poursuite en thèse dans l'équipe ICAR.
– Eric ELIAS : « Etes-vous un hacker dans l'âme ? Attaque d'un système de tatouage BOWS2 ». Il a abandonné les études pour des raisons familiales.

2006-2007 :

– Faraz Ahmed ZAIDI : « Protection de la couleur d'une image par insertion de données cachées ». Poursuite en thèse à Bordeaux.
– Minh VU DUC : « Sécurisation des visages dans les séquences d'images par cryptage sélectif ». Il est retourné au Vietnam.

2005-2006 :

– Peter MEUEL : « Tatouage vidéo avec utilisation du codeur H.264 ». Poursuite en thèse encadré par W.Puech et moi-même.
– Khizar HAYAT : « Insertion de données multi-résolution dans des images elles mêmes multi-résolues ». Ces travaux ont donné lieu à deux publications (CORESA 2006 et SPIE2007). Poursuite en thèse dans l'équipe ICAR.

Rayonnement et animation scientifique

Relecture de 97 articles entre 2005 et avril 2011 (conférences ou revues)

– Re-lecteur de la conférence ICIP (IEEE International Conference on Image Processing) depuis 2007,
– Re-lecteur et TPC Member de la conférence EUSIPCO (The European Signal Processing Conference) depuis 2007,
– Re-lecteur de la conférence et membre du comité de programme CORESA (COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels) depuis 2007,
– Re-lecteur pour IWDW'2007 (International Workshop on Digital Watermarking),
– Re-lecteur pour la revue Hindawi - International Journal of Digital Multimedia Broadcasting 2008,
– Re-lecteur pour la revue Journal of Electronic Imaging (SPIE - The International Society for Optical Engineering) 2009,
– Re-lecteur pour la revue Computerized Medical Imaging and Graphics 2009,
– Re-lecteur pour la revue Elsevier Pattern Recognition Letters 2009,
– Re-lecteur pour Singaporean-French IPAL Symposium 2009,
– Re-lecteur et membre du comité scientifique de programme de IPTA (International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications) depuis 2010,

- Re-lecteur pour la revue IEEE Signal Processing Letters - 2009, 2010,
- Re-lecteur pour la revue Elsevier Journal of Visual Communication and Image Representation 2009, 2010,
- Re-lecteur pour la revue IET Information Security Journal 2010,
- Re-lecteur pour la revue IEEE Transaction on Image Forensics and Security 2010,
- Re-lecteur pour la revue IS&T Journal of Imaging Science and Technology 2010,
- Re-lecteur pour la revue Elsevier Journal of Systems and Software 2010,
- Re-lecteur pour la revue Elsevier Signal Processing Image Communication 2010,
- Re-lecteur pour la conférence ICCCT (International Conference on Computer and Communication Technology) 2011.

Président de session de conférences

- Président de la session orale OS5 « Video Coding », jeudi 8 juillet, 14h-16h **IPTA'2010**, International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications, July 7-10, Paris, France, http ://ipta10.ibisc.univ-evry.fr/doku.php?id=technical_program.
- Président de la session orale « Compresssion vidéo », mercredi 27 octobre 2010, 15h20-16h10, **CORESA'2010**, COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels, Lyon, France, 26-27 Octobre, 2010, http ://liris.cnrs.fr/coresa10/index.php?page=programme.

Commissions de spécialistes

- Membre du Pool d'expert de Montpellier depuis sa création en 2008,
- Membre de Commission de spécialistes de la section 27 de (l'Université de Provence (CMI, 39 rue Joliot-Curie 13453 Marseille) en 2007,
- Membre de Commission de spécialistes du département science de l'Université de Nîmes en 2007.

Responsabilités diverses

- Membre de la commission de recherche de l'université de Nîmes depuis le 14 janvier 2011,
- Membre du Comité d'organisation du CORESA 2007 (Compression et REprésentation des Signaux Audiovisuels) qui a eu lieu à Montpellier, le 8 et 9 novembre 2007.

Expertises

- Expertise de 2 dossiers ANR en 2007 et 2008,
- Expertise liée à la compression pour la société Meeting One en 2006.

Tutoriaux à audience nationale et exposés de vulgarisation

- Tutoriel invité au groupe de travail sécurité en octobre 2010 LIRMM sur le tatouage dans les vidéos,
- Tutoriel invité pour la réunion du GDR-ISIS Paris en 2009 sur le tatouage robuste aux désynchronisations,
- Présentation pour les portes ouvertes à l'université de Nîmes depuis 2008,

– Exposé (1h30) sur le tatouage, la stéganographie et la science du forensics pour la fête de la science en 2009.

Collaborations académique et industrielle

– Participation à 50% au projet TSAR (Transfert Sécurisé d'images d'Art haute Résolution) retenu par l'ANR dans le cadre du programme ARA SSIA (Sécurité,Systèmes Embarqués et Intelligence Ambiante) 2005-2008. Ce projet réunissant l'IRCCyN (Nantes), le LIS (Grenoble), l'IETR (Rennes), le C2RMF (Louvre, Paris) et le LIRMM (Montpellier),
– Projet ANR Vooddo avec la société Vodnet (spécialiste de la diffusion de vidéo en peer-to-peer) et l'équipe APR du LIRMM 2007-2010,
– Collaboration et montage d'une ANR avec la société Meeting One (spécialiste dans des services de visioconférence) en 2006 et 2007,
– Collaboration et Montage d'une ANR avec la société Sigma Méditerranée (spécialiste dans la mise en place de systèmes de vidéo numérique à distance) en 2006 et 2007,
– Collaboration avec une association artistique (projet start-up 2L-Pendha EMBRUN) (projet de suivi de visage pour une plate-forme d'interface homme-machine dans un objectif artistique) en 2006, 2007,
– Collaboration avec la société Setinnov pour 6 mois à partir de septembre 2010 (élaboration d'une compression multi-flux pour le streaming synchronisé de flux à différentes résolution ou bien pour des flux pour la restitution en 3D) 2009-2010,
– Collaboration avec la société Floware sur de la compression sans perte et la transmission à la volée de tout type de fichier, septembre 2010 - juillet 2011.

Prime

– Bénéficiaire de la Prime d'Excellence Scientifique (PES) depuis le 1 octobre 2010.

Enseignement

Responsabilités

– Responsable de 6 unités d'enseignement : (Traitement du signal M1-Montpellier, Graphe L3MI, Réseaux-Compression L3MI, Module Projet L3MI, Structure de données en Java L2MI, Traitement Numérique en Maple L1),
– Co-responsable de la licence Math-Informatique de l'université de Nîmes depuis 2009
– Président de jury des L3 Math Info et membre des jurys L1 et L2 Math Info.

Matière enseignées

Depuis septembre 1999, je donne des cours, des TDs, et des TPs à différents niveaux et sur différentes matières, et avec différents langages (C, C++, Java, Ada, Visual Basic). J'ai également encadré ou co-encadré 43 étudiants (40 sujets différents) pour des projets IUT, L3, M1 sur de nombreux domaines (Intelligence artificielle, Réseau, Jeux, Modélisation, Contraintes, Images, ...). Le tableau donné ci-dessous résume les disciplines dans lesquelles j'ai enseigné. Certains supports de cours sont à l'addresse http ://www.lirmm.fr/∼chaumont/Lecture.html et à l'adresse http ://www.lirmm.fr/∼chaumont/download/cours/.

Publications

Le classement des conférences et journaux de l'ERA 2010 (Excellence in Research for Australia) fournit une note de A, B, ou C pour de nombreux journaux et conférences. Le site Web donnant accès à ce classement est le suivant : http ://www.arc.gov.au/era/era_journal_list.htm.

La démarche de l'ERA va être arrêtée, car le classement est souvent utilisé de manière inadaptée [1]. Globalement une conférence classée A ou B est un signe de qualité. Notons que l'ensemble des conférences liées au domaine de l'image (compression vidéo et tatouage d'image) est classé B. Notons que certains journaux et conférences sont absents du classement de l'ERA.

Voici quelques journaux et conférences (dans lesquels j'ai publié) qui sont classées par l'ERA :

- Transactions on Circuits and Systems for Video Technology classé B,
- ICIP classée B,
- ICME classée B,
- EUSIPCO classée B,
- SPIE classée B,
- IWDW classée C,
- PCS classée C.

Revues

- Shahid (Z.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – Considering the Reconstruction Loop for Data Hiding of Intra- and Inter-frames of H.264/AVC. *Signal, Image and Video Processing*, pp. 1–19, Avril 2011, 19 pages.
- Shahid (Z.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – Fast Protection of H.264/AVC by Selective Encryption of CAVLC and CABAC for I & P frames. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 9, Mars 2011, 17 pages. 5-Year Impact Factor = 3.187 (JCR : Journal Citation Reports de Thomson Reuters 2009).

En cours de soumission :

- Goudia (D.), Chaumont (M.), Puech (W.) et Hadj Said (N.). – Joint Trellis Coded Quantization Watermarking for JPEG2000 images. *soumis dans Annals of telecommunications, Sélectionné par le Coresa 2010 pour publication d'une version étendue dans une revue internationale*, 23 pages.
- Shahid (Z.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – Spread Spectrum-Based Watermarking for Tardos Code-Based Fingerprinting for H.264/AVC video. 2011, 20 pages.
- Chaumont (M.) et Puech (W.). – An Efficient Layer Scanning Algorithm Ordering the Colors of a Palette : Protection of Color Images, 11 pages.
- Chaumont (M.). – Revisiting the Dirty Paper Trellis Watermarking Scheme, 9 pages.
- Chaumont (M.) et Puech (W.). – Schéma de tatouage Hyper-Cube. revue traitement du signal, 14 pages.

1. Article du 30 mai 2011, http ://www.theaustralian.com.au/higher-education/end-of-an-era-journal-rankings-dropped/story-e6frgcjx-1226065864847, "There is clear and consistent evidence that the rankings were being deployed inappropriately within some quarters of the sector, in ways that could produce harmful outcomes, and based on a poor understanding of the actual role of the rankings". Sénateur Kim Carr (Ministre de l'Innovation, l'Industrie, la Science et la Recheche).

Chapitre de livre

- Shahid (Z.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – Scalable Video Coding. *Effective Video Coding for Multimedia Applications*, édité par Sudhakar Radhakrishnan, pp. 3–20. – InTech, 2011, 18 pages.
- Chaumont (M.) et Puech (W.). – Protecting the color information by hiding it. *Recent Advances in Signal Processing*, édité par Ashraf A Zaher, pp. 101–122. – InTech, 2009, 22 pages.

Tutoriaux dans des conférences internationales

- Chaumont (M.). – *Invited Paper - Tutorial :* Ensuring Security of H.264 Videos by Using Watermarking. – *Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications, Part of SPIE Defense, Security, and Sensing, DSS'2011, SPIE'2011*, vol. 8063, Orlando, Florida, USA, Avril 2011, 10 pages.
- Chaumont (M.). – *Invited Paper - Tutorial :* H.264 Video Watermarking : Applications, Principles, Deadlocks, and Future. – *International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications, IPTA'2010*, Paris, France, Juillet 2010, Abstract.

Congrès internationaux avec actes

- Goudia (D.), Chaumont (M.), Puech (W.) et Hadj Said (N.). – A Joint Trellis Coded Quantization (TCQ) Data Hiding Scheme in the JPEG2000 Part 2 Coding Framework. – *The 19th European Signal Processing Conference, EUSIPCO'2011*, Barcelona, Spain, Septembre 2011, 5 pages.
- Chaumont (M.) et Goudia (D.). – TCQ Practical Evaluation in the Hyper-Cube Watermarking Framework. – *IEEE International Conference on Multimedia and Expo, ICME'2011*, Barcelona, Spain, Juillet 2011, 6 pages, Taux d'acceptation = 30%.
- Chaumont (M.), Goudia (D.) et Puech (W.). – Hyper-Cube Watermarking Scheme. – *Visual Information Processing and Communication II, Part of IS&T/SPIE 23th Annual Symposium on Electronic Imaging, VIPC'2011, SPIE'2011*, vol. 7882, pp. 10–18, San Francisco, California, USA, Janvier 2011, 9 pages.
- Goudia (D.), Chaumont (M.), Puech (W.) et Hadj Said (N.). – A joint JPEG2000 Compression and Watermarking System Using a TCQ-Based Quantization Scheme. – *Visual Information Processing and Communication II, Part of IS& T/SPIE 23th Annual Symposium on Electronic Imaging, SPIE'2011*, vol. 7882, San Francisco, California, USA, Janvier 2011, 8 pages.
- Shahid (Z.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – Spread Spectrum-Based Watermarking for Tardos Code-Based Fingerprinting of H.264/AVC Video. – *IEEE International Conference on Image Processing, ICIP'2010*, Hong-Kong, China, Septembre 2010, 4 pages, Taux d'acceptation = 47%.
- Shahid (Z.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – Over The Real-Time Selective Encryption of AVS Video Coding Standard. – *The 18th European Signal Processing Conference, EUSIPCO'2010*, Aalborg, Denmark, Août 2010, 5 pages.
- Shahid (Z.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – Selective Encryption of C2DVLC of AVS Video Coding Standard for I & P Frames. – *IEEE International Conference on Multimedia & Expo, ICME'2010*, Singapore, Juillet 2010, 6 pages.

– Chaumont (M.). – A Novel Embedding Technique For Dirty Paper Trellis Watermarking. – *Visual Information Processing and Communication, Part of IS&T/SPIE 22th Annual Symposium on Electronic Imaging, VIPC'2010, SPIE'2010*, vol. 7543, San Jose, California, USA, Janvier 2010, 9 pages.
– Shahid (Z.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – Selective and Scalable Encryption of Enhancement Layers for Dyadic Scalable H.264/AVC by Scrambling of Scan Patterns . – *IEEE International Conference on Image Processing, ICIP'2009*, Cairo, Egypt, Novembre 2009, 4 pages.
– Chaumont (M.). – Psychovisual Rotation-based DPTC Watermarking Scheme. – *17th European Signal Processing Conference, EUSIPCO'2009*, Glasgow, Scotland, Août. 2009, 5 pages.
– Shahid (Z.), Meuel (P.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – Considering the Reconstruction Loop for Watermarking of Intra and Inter Frames of H.264/AVC. – *The 17th European Signal Processing Conference, EUSIPCO'2009*, Glasgow, Scotland, Août 2009, 5 pages.
– Shahid (Z.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – Fast Protection of H.264/AVC by Selective Encryption of CABAC For I & P Frames. – *The 17th European Signal Processing Conference, EUSIPCO'2009*, Glasgow, Scotland, Août 2009, 5 pages.
– Chaumont (M.). – Fast Embedding Technique for Dirty Paper Trellis Watermarking. – Ho (Anthony T.S.), Shi (Yun Q.), Kim (H.J.) et Barni (Mauro) (édité par), *8th International Workshop on Digital Watermarking, IWDW'2009*, vol. 5703 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 110–120, University of Surrey, Guildford, United Kingdom, Aug. 2009. Springer, 11 pages.
– Shahid (Z.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – Fast Protection of H.264/AVC by Selective Encryption of CABAC. – *IEEE International Conference on Multimedia and Expo, ICME'2009*, New York City, Juin 2009, 4 pages, Taux d'acceptation présentation orale = 23%.
– Shahid (Z.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – Fast Protection of H.264/AVC by Selective Encryption. – *Singaporean-French IPAL Symposium, SinFra'2009*, Fusionopolis, Singapore, Février 2009, 11 pages.
– Chaumont (M.) et Puech (W.). – A High Capacity Reversible Watermarking Scheme. – *IS&T/SPIE 21th Annual Symposium on Electronic Imaging, Visual Communications and Image Processing, VCIP'2009, SPIE'2009*, vol. 7257, San Jose, California, USA, Janvier 2009, 9 pages.
– Shahid (Z.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – An Adaptive Scan of High Frequency Subbands of Dyadic Intra Frame in MPEG4-AVC/H.264 Scalable Video Coding. – *Visual Communications and Image Processing, Part of IS&T/SPIE 21th Annual Symposium on Electronic Imaging, SPIE'2009*, vol. 7257, San Jose, California, USA, Janvier 2009, 9 pages.
– Chaumont (M.) et Puech (W.). – A 8-Bits-Grey-Level Image Embedding its 512 Color Palette. – *16th European Signal Processing Conference, EUSIPCO'2008*, Lausanne, Switzerland, Août 2008, 5 pages.
– Chaumont (M.) et Puech (W.). – Attack By Colorization of a Grey-Level Image Hiding its Color Palette. – *IEEE International Conference on Multimedia & Expo, ICME'2008*, Hannover, Germany, Juin 2008, 4 pages, Taux d'acceptation = 50%.
– Puech (W.), Chaumont (M.) et Strauss (O.). – A Reversible Data Hiding Method for Encrypted Image. – *Security, Forensics, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents X, Part of IS&T/SPIE 20th Annual Symposium on Electronic Imaging, SPIE'2008*,

vol. 6819, Janvier 2008, 9 pages.

– Chaumont (M.) et Puech (W.). – A Grey-Level Image Embedding its Color Palette. – *IEEE International Conference on Image Processing, ICIP'2007*, vol. I, pp. 389–392, San Antonio, Texas, USA, Septembre 2007, 4 pages.

– Meuel (P.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – Data Hiding in H.264 Video For Lossless Reconstruction of Region. – *The 15th European Signal Processing Conference, EUSIPCO'2005*, Poznan, Poland, Septembre 2007, 5 pages.

– Chaumont (M.) et Puech (W.). – Fast Protection of the Color of High Dimension Digital Painting Images. – *Eighth International Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services, WIAMIS'2007*, pp. 60–63, Santorini, Greece, Juin 2007, 4 pages.

– Chaumont (M.) et Puech (W.). – A Fast and Efficient Method to Protect Color Images. – *Visual Communications and Image Processing, Part of IS&T/SPIE 19th Annual Symposium on Electronic Imaging, VCIP'2007, SPIE'2007*, vol. 6508, San Jose, California, USA, Janvier 2007, 9 pages.

– Chaumont (M.) et Puech (W.). – 3D face model tracking based on a multiresolution active search. – *Visual Communications and Image Processing, Part of IS&T/SPIE 19th Annual Symposium on Electronic Imaging, VCIP'2007, SPIE'2007*, vol. 6508, San Jose, California, USA, Janvier 2007, 8 pages.

– Hayat (K.), Puech (W.), Gesquière (G.) et Chaumont (M.). – Wavelet-based data-hiding of DEM in the context of real-time 3D visualization. – *Visualization and Data Analysis, Part of the IS&T/SPIE Symposium on Electronic Imaging, SPIE'2007*, San Jose, California, Janvier 2007, 10 pages.

– Chaumont (M.) et Puech (W.). – A DCT-Based Data-Hiding Method to Embed the Color Information in a JPEG Grey Level Image. – *The European Signal Processing Conference, EUSIPCO'2006*, Pise, Italie, Septembre 2006, 5 pages.

– Rodrigues (J.M.), Puech (W.), Meuel (P), Bajard (J.-C.) et Chaumont (M.). – Face Protection with Fast Selective Encryption in a Video Sequence. – *IEE conference on Crime and Security (Imaging for Crime Detection and Prevention), ICDP'2006*, Juin 2006, 6 pages.

– Chaumont (M.) et Puech (W.). – A Color Image in a Grey-Level Image. – *IS&T Third European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision, CGIV'2006*, pp. 226–231, Leeds, UK, Juin 2006, 7 pages.

– Beaumesnil (B.), Chaumont (M.) et Luthon (F.). – Liptracking and MPEG4 Animation with Feedback Control. – *IEEE International Conference on Acoustics Speech Signal Processing, ICASSP'2006*, Toulouse, France, Mai 2006, 4 pages.

– Chaumont (M.) et Beaumesnil (B.). – Robust and real-time 3d-face model extraction. – *IEEE International Conference on Image Processing, ICIP'2005*, pp. 461–464, Genova, Italie, Septembre 2005, 4 pages.

– Chaumont (M.), Pateux (S.) et Nicolas (H.). – Object-Based Video Coding Using a Dynamic Coding Approach. – *IEEE International Conference on Image Processing, ICIP'2004*, pp. 1105–1108, Singapore, Octobre 2004, 4 pages.

– Chaumont (M.), Cammas (N.) et Pateux (S.). – Fully Scalable Object Based Video Coder Based on Analysis-Synthesis Scheme. – *IEEE International Conference on Image Processing, ICIP'2003*, Barcelona, Spain, Septembre 2003, 4 pages.

– Chaumont (M.), Pateux (S.) et Nicolas (H.). – Efficient Lossy Contour Coding Using Spatio-Temporal Consistency. – *IEEE Picture Coding Symposium, PCS'2003*, pp. 289–294, Saint-Malo, France, Avril 2003, 6 pages.

– Chaumont (M.), Pateux (S.) et Nicolas (H.). – Segmentation of Non-Rigid Video Objects Using Long Term Temporal Consistency. – *IEEE International Conference on Image Processing, ICIP'2002*, Rochester, USA, Septembre 2002, 4 pages.

Congrès nationaux

– Goudia (D.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – Un Schéma conjoint de dissimulation de données (Data Hiding) dans JPEG2000 basé sur la quantification codée par treillis (TCQ). – *23ème édition du colloque GRETSI sur le traitement du signal et des images*, Bordeaux, Septembre 2011, 4 pages.
– Goudia (D.), Chaumont (M.), Puech (W.) et Said (N. Hadj). – Tatouage et compression conjoint dans JPEG2000 avec un algorithme de quantification codée par treillis (TCQ), "top 5 paper" ; article sélectionné pour publication d'une version étendue dans une revue internationale, http ://liris.cnrs.fr/coresa10/. – *COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels, CORESA'2010*, Lyon, France, Août 2010, 6 pages.
– Berrezoug (O.) et Chaumont (M.). – Tatouage robuste aux attaques de désynchronisations. – *MAnifestation des JEunes Chercheurs en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (conférence organisée par des doctorants pour des chercheurs débutants : Master 2, doctorants, post-docs, ATER...), MajecSTIC'2009*, Avignon, France, Novembre 2009, 8 pages.
– Chaumont (M.). – Une nouvelle technique pour le tatouage par Dirty Paper Trellis Code (DPTC). – *22ème Colloque GRETSI sur le traitement du signal et des images, GRETSI'2009*, Dijon, France, Septembre 2009, 4 pages.
– N. Tournier, M. Chaumont (W. Puech). – Tatouage informé hiérarchique d'un message hiérarchisé (en vue de la protection vidéo). – *COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels, CORESA'2009*, Toulouse, France, Mars 2009, 6 pages.
– Meuel (P.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – Insertion de données cachées pour une reconstruction sans perte de Régions d'Intérêts dans des vidéos H.264. – *COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels, CORESA'2007*, Montpellier, France, Novembre 2007, 6 pages.
– Chaumont (M.) et Puech (W.). – Insertion d'une palette couleur dans une image en niveaux de gris. – *21ème Colloque GRETSI sur le traitement du signal et des images, GRETSI'2007*, Troyes, France, Septembre 2007, 4 pages.
– Chaumont (M.) et Puech (W.). – Une image couleur cachée dans une image en niveaux de gris. – *COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels, CORESA'2006*, Rennes, France, Novembre 2006, 7 pages.
– Hayat (K.), Puech (W.), Gesquière (G.) et Chaumont (M.). – Visualisation 3D temps-réel à distance de MNT par insertion de données cachées basée ondelettes. – *COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels, CORESA'2006*, Rennes, France, Janvier 2006, 7 pages.
– Chaumont (M.). – Extraction d'un modèle 3d de visage en temps-réel et de manière robuste. – *20ème Colloque GRETSI sur le traitement du signal et des images, GRETSI'2005*, pp. 675–678, Louvain-la-Neuve, France, Septembre 2005, 4 pages.
– Beaumesnil (B.), Luthon (F.) et Chaumont (M.). – Extraction temps-réel de contours labiaux par segmentation vidéo robuste en vue d'animation 3d. – *20ème Colloque GRETSI sur le traitement du signal et des images, GRETSI'2005*, pp. 489–492, Louvain-la-Neuve, France,

Septembre 2005, 4 pages.
– Chaumont (M.), Pateux (S.) et Nicolas (H.). – Codage efficace de contour avec perte utilisant la consistance spatio-temporelle. – *Traitement du signal et des images, GRETSI'2003*, Paris, France, Septembre 2003, 4 pages.

Thèse

– Chaumont (M.). – *Représentation en objets vidéo pour un codage progressif et concurrentiel des séquences d'images*. – PhD. Thesis, Université de Rennes 1, France, Novembre 2003. Supervisé par H. Nicolas et S. Pateux.

TABLE 1 – Résumé des enseignements dispensés

Établissement	Année	Matière	Contenu	Niveau	Nombre d'heure
Université de Nîmes	2005-2011	Algorithmique des graphes	Structures et algorithmes programmation en Java	Bac+3	120h CM, 128h TD 50h TP
Université de Nîmes	2005-2011	Calcul numérique	Algorithmique en Maple	Bac+1	86h CM, 64h TD 40h TP
Université de Nîmes	2005-2011	Traitement du signal	Échantillonage, quantification convolution	Bac+3	42h CM
Université de Nîmes	2005-2011	Compression de données	Codage statistique et par dictionnaire (programmation en C)	Bac+3	48h CM, 92h TP
Université de Nîmes	2009-2011	Réseaux	Couches OSI (programmation socket en Java)	Bac+3	14.5h CM, 9.5h TD 18h TP
Université de Nîmes	2005-2011	Projet informatique	33 étudiants	Bac+3	121h TP
Université de Nîmes	2007-2011	Structures de données	Tri, pile, file, liste, ensemble arbre, table de hash	Bac+2	48h CM, 72h TD, 40h TP
Université de Nîmes	2005-2007	Algorithmique	Tri, pile, file, ensemble,grammaire	Bac+2	51h TD
Université de Nîmes	2007-2011	Méthodologie	Exposés scientifiques	Bac+2	9h CM
Université de Nîmes	2007-2008 2009-2010	Tutorat	Encadrement d'un tuteur étudiant	Bac+2	15h CM
Université de Montpellier 2	2007-2011	FMIN34 « Images compression et insertion de données cachées » - Tatouage M2R Info	Tatouage de données	Bac+5	24h CM
Université de Montpellier 2	2007-2011	UMSI 386 « Traitement du signal, réseau, théorie de l'information » - Codes détecteurs et correcteurs d'erreurs - M2 EEA	Codes correcteurs	Bac+5	24h CM, 10.5h TD
Université de Montpellier 2	2007-2011	FMIN 211 « Transmission des données et Traitement du signal » - Signal - M1 Info	Introduction au signal	Bac+4	12h CM, 12h TD, 12h TP
Université de Montpellier 2	2010-2011 2006-2007	Encadrement stage M1 EEA	2 étudiants	Bac+4	
Université de Montpellier 2	2005-2010	(co-)encadrement stages M2R	11 étudiants	Bac+5	27h eqTD
Université de Montpellier 2	2009-2010	Encadrement stage TER	4 étudiants	Bac+4	11h eqTD
Université de Montpellier 2	2006-2007	Encadrement stage L3Pro	1 étudiant	Bac+3	
Université de Montpellier 2	2006-2007	Encadrement stage ENS	1 étudiant	Bac+2	
UFR Sciences Pau $\frac{1}{2}$ ATER	2004-2005	Traitement et analyse d'images	Initiation aux traitement d'images et à la compression	Bac+5	3h cours 3h TD,5h TP
IUT Bayonne $\frac{1}{2}$ ATER	2004-2005	Algorithmique et programmation	Initiation à l'algorithmique en Java	Bac+1	24h TD 25,5h TP
IUT Bayonne $\frac{1}{2}$ ATER	2004-2005	Algorithmique et programmation	Initiation à l'algorithmique en ADA	Bac+2	27h TD
Université de Rennes 1 (IFSIC) $\frac{1}{2}$ ATER	2003-2004	Système d'information et génie logiciel	Modélisation d'un logiciel de gestion d'intervention des pompiers	Bac+4	20h TD 48h TP
Université de Rennes 1 (IFSIC) $\frac{1}{2}$ ATER	2003-2004	Réseaux	Initiation aux couches Liaison, Réseau et Transport	Bac+5	12h TD 8h TP
Université de Rennes 1 (IFSIC) $\frac{1}{2}$ ATER	2003-2004	Compression vidéo	Initiation aux codages d'image et de vidéo	Bac+5	18h TP
Université de Rennes 1 (IFSIC) $\frac{1}{2}$ ATER	2003-2004	Traitement et analyse d'images	Initiation aux images numérique	Bac+4	8h TD 8h TP
INSA de Rennes (Moniteur)	2000-2003	Algorithmique et programmation	Initiation à l'algorithmique en Java	Bac+2	63h cours-TD 192h TP
Saint-Cyr Coëtquidan (Scientifique du contingent)	1999-2000	Algorithmique et programmation	C, C++, Pascal, Visual-Basic, Merise, bureautique	Bac+1 Bac+2	150h de TD/TP

Introduction

Le tatouage numérique moderne est apparu au début des années 90 [Tanaka et al. 90]. Durant une dizaine d'années, il y a eu un fort engouement pour cette jeune discipline de la part des communautés travaillant sur le signal, les télécommunications, la théorie de l'information, et les images. En plus de l'intérêt scientifique, de nombreux industriels ont vu dans cette nouvelle discipline une solution venant en soutien de la cryptographie pour sécuriser les médias comme l'image, le son, la vidéo... Ces industriels ont encouragé la recherche dans le domaine. Cette période est donc foisonnante de propositions. Avec le recul on peut considérer que c'est une période où la communauté a acquis une grande expérience de « manipulation des données » en vue du tatouage.

Malgré cette euphorie, il manquait cruellement d'une formalisation du processus de tatouage. La majorité des propositions avaient pour objectif de faire du tatouage robuste tout en préservant la qualité perceptuelle du média. La formalisation du tatouage robuste est donc apparue à la fin des années 90 avec la redécouverte d'un papier de Max Costa [Costa 83] sur la transmission fiable d'un message sur un canal subissant deux sources de dégradation (l'une connue de l'émetteur, l'autre inconnue de l'émetteur). Pour la communauté du tatouage, le travail de Max Costa était particulièrement émulant, car il permettait d'envisager des mécanismes de tatouage bien plus performants que ce qui avait été proposé auparavant [Cox et al. 97]. D'autre part, le travail de Max Costa donnait des bornes théoriques, mais ne donnait pas d'approche pratique. Il y avait donc la place pour de nouvelles approches de tatouage : les schémas informés, appelés également schémas à information de bord ou bien encore schémas avec information adjacente.

On a donc vu apparaitre deux grandes familles de schémas de tatouage informés à partir du début des années 2000. Ces deux familles ont évidement donné lieu à un grand nombre de publications visant à améliorer incrémentalement les propositions initiales. À partir de 2005, la sécurité de ces schémas a également été étudiée [Cayre et al. 05, Bas et al. 08, PérezFreire et al. 07]. Une question qui restait pour moi en suspend était de comprendre quelles étaient les performances pratiques respectives de ces schémas. Quelles performances en termes de robustesse pouvions-nous attendre de tels schémas ? Jusqu'à quel payload [2] pouvions-nous aller pour une dégradation raisonnable ? Quel algorithme était le plus performant ? Comment comparer de manière équitable et avec quel critère ? Quels étaient les paramètres qu'il fallait figer pour pouvoir obtenir une comparaison ? Bref, toutes ces questions plutôt d'ordre pratique permettent de répondre à la question posée au début des années 90 : est-ce que le tatouage numérique apporte un niveau de robustesse et de sécurité suffisant pour être envisagé en appoint de la cryptographie pour sécuriser les applications ? Que la réponse soit positive ou négative ne remet pas en question l'intérêt de faire du tatouage. En effet, le tatouage peut être utilisé pour des applications qui ne sont pas liées à la sécurité. La premiere partie du manuscrit traite de ces questions à travers des évaluations expérimentales. Deux

2. payload : quantité de bits insérée.

propositions incrémentales sont également présentées et nous ont permis d'apporter une pierre supplémentaire à l'édifice.

Le modèle retenu par la communauté du tatouage considère un signal source auquel est ajouté un signal de tatouage. Bien souvent, on prend comme signal source une image au format « raw », ou bien pour une vidéo, une séquence d'images « raw ». Tout traitement survenant après la phase de tatouage est donc considéré comme une attaque sur le système de tatouage. La plupart du temps, les images sont échangées au format gif, bmp, png ou jpg,... et les vidéos aux formats MPEG1, MPEG2, MPEG4, H.264, VC-1, WMV, RealVideo... Tous ces formats compriment et dégradent les données. Pour un système de tatouage, la dégradation due à la compression représente une attaque au système de tatouage survenant avant même que le média tatoué soit distribué. Or, la logique du tatouage informé voudrait que toutes les dégradations qui surviennent avant la distribution du média soient prises en compte lors de la phase de tatouage. La phase de compression et en particulier la phase de quantification devrait donc être considérée. On peut donc très justement se demander si une collaboration entre le mécanisme de tatouage et le mécanisme de compression pourrait améliorer les performances en termes de robustesse. Le tatouage joint à la compression est un aspect qui peut sembler logique, mais qui n'a pas été énormément traité dans la littérature. Il existe beaucoup de solutions qui sont mal intégrées dans le mécanisme de compression. Bien souvent, le module de tatouage et le module de quantification sont deux modules différents qui « luttent l'un contre l'autre ». Lorsque le mécanisme est bien intégré, on peut espérer que les performances restent bonnes, à la fois en terme de compression, mais aussi en terme de robustesse du système de tatouage. La deuxième partie du manuscrit traite de cet aspect « joint » à travers la présentation 1- d'une approche de tatouage conjointement à la quantification au sein de jpeg2000, et 2- d'une approche de tatouage intégrée dans le mécanisme d'optimisation débit distorsion au sein du codeur H.264.

Bien souvent le tatouage est envisagé pour des applications liées à la sécurité. Cela dit, le tatouage peut également être utilisé dans le but d'augmenter les fonctionnalités d'une application. Dans ce cas, la robustesse n'est pas forcément requise et on parle alors plutôt de dissimulation de données (data-hiding). On trouve dans la littérature de nombreuses applications originales de dissimulation de données : l'insertion dans une vidéo de paramètres d'animation d'un clone ('enrichment'), l'insertion d'une image sous résolue dans l'image pour la récupération d'erreurs de transmission ('error concealment'), l'insertion d'information dans une vidéo pour contrôler un robot visualisant la vidéo ('device control'), l'insertion d'un paramètre de contrôle au sein d'une vidéo H.264 pour optimiser la performance en compression ('compression improvment'), l'insertion d'annotations servant à la surveillance/analyse du contenu d'une diffusion radio ('broadcast monitoring'), ... Dans le même esprit, nous avons proposé une application de dissimulation de la couleur dans une image en niveaux de gris. À ma connaissance, le premier travail relatif à la dissimulation de la couleur date de 2002 [Campisi et al. 02] et consiste à substituer certaines sous-bandes ondelettes de la luminance par des sous-bandes de chrominances. L'objectif était d'améliorer les performances de compression d'images couleur. De nombreuses autres approches très similaires dans l'esprit sont encore aujourd'hui publiées. Notre proposition est totalement différente des approches utilisant des substitutions de coefficients ondelettes. Elle repose sur de la quantification couleur et de la dissimulation avec des images utilisant une palette couleur. La troisième partie de ce manuscrit traite de cette contribution de la dissimulation de la couleur dans une image en niveau de gris à travers : 1- une approche par modélisation/optimisation du problème, et 2- une approche plus heuristique avec dissimulation d'une palette de 512 couleurs.

Première partie

Le tatouage d'images fixes

Chapitre 1

Le tatouage robuste d'images

Le tatouage robuste n'a été formalisé que très récemment. Il a fallu la redécouverte des travaux de Max Costa [Costa 83] dans les années 1998-1999 [Cox et al. 99] pour que l'on considère le tatouage comme un problème de communication fiable sur un canal bruité et que l'on montre théoriquement que les performances des systèmes de tatouage pouvaient très nettement être améliorés. Dans ce chapitre, nous ne reviendrons pas sur les systèmes de tatouage développés lors des dix premières années de la discipline. Nous nous intéressons aux propositions de tatouage informé apparues depuis les années 2000. Les systèmes développés dans la décennie 2000-2010 reprennent évidemment les enseignements de la période 1990-1998. Pour ne pas alourdir le chapitre, nous n'inclurons pas d'explication sur la technique d'étalement de spectre dont l'utilisation en tatouage est apparue en 1997 [Cox et al. 97]. Les principes présents dans l'étalement de spectre sont réutilisés dans les algorithmes informés de Broken Arrows [Furon et al. 08] que nous présentons en Section 1.4 et de RB-DPTC (Rotation-Based Dirty Paper Trellis Code) présenté dans le chapitre 2.

Dans ce chapitre nous rappelons brièvement en section 1.1 en quoi consiste le tatouage robuste. Nous présentons ensuite en section 1.2 quelques exemples d'applications réalistes qui utilisent intelligemment le tatouage numérique. Nous donnons en section 1.3 trois caractéristiques communes aux systèmes de tatouage informés modernes : l'espace d'insertion, le codage informé et l'insertion informée. Nous donnons ensuite en section 1.4 une illustration de ces caractéristiques à travers la description de l'algorithme de Broken Arrows [Furon et al. 08]. Nous en profitons également pour aborder un autre point important pour un système de tatouage moderne : la prise en compte de l'impact psychovisuel.

1.1 Schéma général de tatouage informé

Le tatouage robuste a été formalisé comme la communication d'un message sur un canal **non fiable**. On entend par **non fiable** le fait que le canal (par exemple un canal hertzien) peut subir des perturbations (par exemple du bruit électromagnétique). Lors d'une communication sur un canal non fiable, le message transmis (par exemple une suite de bits) n'est pas forcément identique au message reçu. L'objectif du tatouage robuste est donc de transmettre un message entre un émetteur (algorithme d'insertion) et un récepteur (algorithme d'extraction et/ou de détection) de manière fiable, c'est-à-dire en étant insensible aux perturbations du canal. On retrouve donc ici un problème similaire à celui de la théorie de l'information et de la communication dans lequel on a recourt à

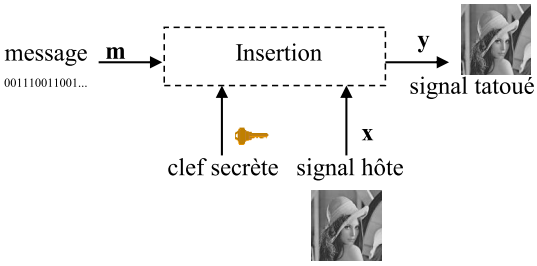


FIGURE 1.1 – Schéma général de l'insertion.

l'utilisation de codes correcteurs et détecteurs d'erreurs. Le schéma général du tatouage robuste **informé** pour une image est donné figure 1.1. Un message binaire **m** est « transporté » par un signal hôte **x** (c'est-à-dire une représentation de l'image) qui est transformé en un signal tatoué **y**. L'image tatouée peut alors être amenée à subir des dégradations non malveillantes ou malveillantes ; on dira que l'image tatouée est « attaquée ». La détection et/ou extraction du message peut alors être effectuée sur l'image tatouée attaquée. Dans de nombreuses applications, la détection/extraction est effectuée sans l'utilisation de l'image originale. On parle d'extraction aveugle. Nous nous limiterons à ce cas, sachant que l'extraction avec utilisation de l'image originale ne change pas la partie insertion et n'introduit quasiment pas de changement lors de l'extraction. La figure 1.2 illustre la phase d'extraction aveugle lorsqu'un signal tatoué **y** est attaqué par un signal **n** inconnu lors de l'extraction. Le message **m'** est alors extrait à partir du signal reçu **z**.

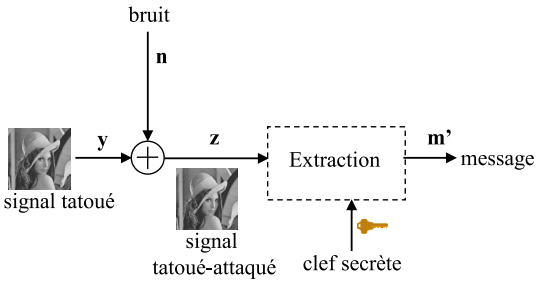


FIGURE 1.2 – Schéma général d'extraction aveugle.

1.2 Quelques applications utilisant le tatouage numérique

Avant de rentrer plus en détail dans les différents schémas d'insertion, il est intéressant de donner un aperçu des quelques applications envisagées ou réalistes qui peuvent bénéficier du tatouage numérique. Le tableau 1.1 résume l'ensemble des problématiques sur lesquelles le tatouage peut apporter une solution ou une partie de solution. On peut regrouper ces problématiques en deux ensembles : l'un lié à la sécurité et nécessitant pratiquement toujours des schémas très robustes et très sûrs, l'autre lié à l'enrichissement et ne nécessitant pas nécessairement autant de robustesse ni de sûreté.

Il est évident que les applications liées à la sécurité sont celles qui ont le plus drainé d'« affaires ». Comme nous l'indiquions dans l'introduction, de nombreux industriels ont vu dans le tatouage une solution pour la protection des droits d'auteurs venant en soutien de la cryptographie

TABLE 1.1 – Classification des applications de tatouage.

Relatif à la sécurité	Relatif à l'amélioration de médias
Protection du droit d'auteur	Analyse/surveillance d'un flux numérique
Traçage de traîtres	Contrôle de périphérique
Authentification	Enrichissement (fonctionalités et/ou métadatas) avec compatibilité ascendante
Contrôle de copie	Amélioration des performances de compression
	Correction d'erreurs après transmission

pour sécuriser les médias comme l'image, le son, la vidéo. Ces industriels ont encouragé financièrement la recherche dans le domaine. Ce sont également les applications ayant les plus fortes contraintes d'invisibilité, de robustesse, de « payload » [1], de temps réel, de sûreté.

Pour la problématique de **protection du droit d'auteur** (copyright), le tatouage permet d'insérer dans le média une information permettant de retrouver l'auteur du média tatoué. On utilise principalement des approches 0-bit comme celle de Broken Arrows [Furon et al. 08] (voir la description en section 1.4). Pour la problématique du **traçage de traîtres** [Furon 09], étant donnée la dimension des codes anti-collusions, les applications sont principalement envisageables pour du tatouage vidéo [Shahid et al. , Chaumont 10b]. Le chapitre 6 aborde le traçage de traître à travers la proposition d'un système de tatouage intégré à H.264 et utilisant le code anti-collusion de Tardos. L'objectif est d'intégrer au sein d'une vidéo l'identifiant de l'acheteur lors d'une vente. Pour être robuste aux attaques par collusion [2] il faut utiliser une approche jointe de tatouage numérique et de code anti-collusion comme celle de [Xie et al. 08] ou [Shahid et al.]. Les approches d'**authentification** utilisent majoritairement des approches fragiles ou semi-fragiles et ne sont donc pas robustes. Bien souvent le résultat d'une fonction de hash, calculé sur un ensemble de coefficients représentatifs de l'image, est inséré de manière non robuste. Lors de l'extraction, si les coefficients représentatifs ont été modifiés, alors la signature qui était embarquée et la signature calculée sont différentes. Dans ce cas, l'image est considérée comme non authentique. Enfin, la problématique du **contrôle de copie** s'apparente de manière plus générale au contrôle de périphérique. La solution retenue par l'industrie du divertissement pour la lutte contre le piratage de DVDs illustre très bien cette problématique [Doërr 05]. Pour empêcher la copie pirate de DVDs, les constructeurs d'enregistreurs DVDs devaient intégrer un système de détection de présence de tatouage. L'enregistreur DVDs n'autorisait pas l'enregistrement s'il y avait la présence d'un signal de tatouage interdisant la copie. La sécurisation des lecteurs et des enregistreurs passait également par le chiffrement des DVDs [3]. Cela dit, on se rend compte en pratique que pour des applications aussi grand public, il est très difficile de mettre en place une solution viable. Il faut que la solution soit sûre à la fois aux niveaux logiciel et matériel, il faut prendre en compte la pression des utilisateurs en terme de compatibilité et de facilité d'utilisation, il faut réussir à imposer une norme

1. payload : quantité de bits insérée.

2. Une attaque par collusion met en jeu plusieurs pirates (des traîtres selon la terminologie) qui vont créer une nouvelle vidéo, en mélangeant les différentes versions de la même vidéo, ceci dans l'espoir de faire disparaitre l'identifiant contenu dans chaque version.

3. Toute la chaîne de sécurité a rapidement été cassée et en particulier suite aux travaux de Johansen *et al.* qui ont trouvé les clefs du système de chiffrement du DVD en passant par une approche de rétro-ingénierie d'un lecteur DVDs [Patrizio 99].

qui soit respectée par les différents fournisseurs de technologie, enfin, il faut réussir à ce que les différentes législations empêchent la vente de solution détournant la norme de sécurisation.

Il y a également beaucoup d'applications qui ne sont pas directement liées à la sécurité, mais plutôt à l'enrichissement et dont certaines sont listées dans le tableau 1.1. Certaines sont détaillées dans le livre de Cox *et al.* [Cox et al. 07a], d'autres sont plus marginales et sont à chercher dans la littérature comme l'amélioration de performance de compression [Campisi et al. 02], Thiesse et al. 10] ou la correction d'erreurs de transmission sur un canal non fiable [Adsumilli et al. 05]. Ces applications ne nécessitent pas forcément d'avoir de la robustesse. On parlera d'ailleurs pour certaines applications d'insertion de données cachées (data-hiding) plutôt que de tatouage. Nous reviendrons dans la partie III du manuscrit sur les applications d'enrichissement à travers la description d'une application de dissimulation de la couleur dans une image en niveaux de gris.

1.3 L'espace d'insertion, le codage informé et l'insertion informée

Comme nous l'avons vu dans la section 1.1 et sur la figure 1.1 un message binaire **m** est embarqué dans un signal hôte **x** pour obtenir un signal tatoué **y**. Le signal **x** est ce que l'on appelle *l'espace d'insertion*. C'est un vecteur qui représente l'image et qui est obtenu en utilisant tout ou une partie des pixels. Le choix de l'espace d'insertion c'est-à-dire des pixels à utiliser, des transformations à appliquer et des coefficients à retenir permet de définir le vecteur **x**. Parmi les schémas informés, les trois principaux représentants utilisent soit une partie des coefficients ondelette (BA : Broken Arrows [Furon et al. 08]) soit une partie des coefficients DCT (DPTC : Dirty Paper Trellis Code [Miller et al. 04], P-QIM : Perceptual-QIM [Li et al. 07]). L'algorithme de BA applique une décomposition ondelette en trois niveaux et utilise pour le tatouage toutes les sous-bandes sauf la sous-bande basse résolution. L'algorithme DPTC applique une transformée DCT 8×8 et utilise pour le tatouage les 12 premiers coefficients DCT de chaque bloc. Ces espaces d'insertion sont choisis de telle sorte qu'ils permettent d'obtenir des coefficients suffisamment stables (robustes). Ce sont en effet des coefficients de moyenne fréquence et/ou des coefficients qui lorsqu'ils sont modifiés n'ont pas un très fort impact psychovisuel. Une fois que le signal **x** est généré on a alors bien souvent un mécanisme de tatouage qui devient indépendant du type de média et donc qui est identique pour de l'image, du son, de la vidéo. Ce mécanisme peut se décomposer en deux étapes successives : l'étape de **codage informé** et l'étape d'**insertion informée**. La figure 1.3 reprend ces deux étapes du mécanisme d'insertion en reprenant les notations utilisées dans ce manuscrit.

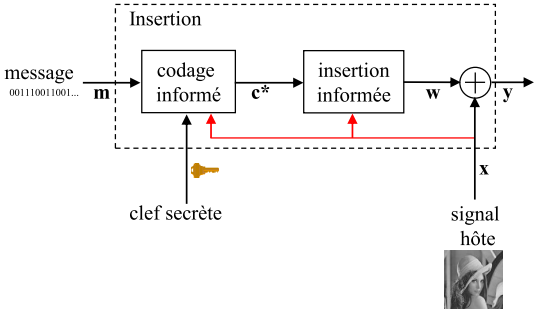


FIGURE 1.3 – Schéma détaillé de l'insertion informée.

La première étape (le **codage informé**), consiste à **coder** le message. Ce processus de codage n'est pas exactement le même que pour un codage de type code correcteur. En effet, dans le cadre

du codage informé, l'application de codage dispose pour chaque message binaire d'une multitude de mots de code $\mathbf{c}^i$ représentant le message (alors que pour les codes correcteurs nous avons une fonction qui associe un unique mot de code à un message). L'étape de **codage informé** prend en entrée le vecteur binaire **m**, le vecteur de coefficients réels **x** et retourne en sortie le mot de code $\mathbf{c}^*$ qui est un vecteur de coefficients réels de même dimension que **x**. Notons d'ores et déjà que le mot de code $\mathbf{c}^*$ est très proche de **x**, c'est-à-dire corrélé au vecteur **x**. Que cela soit pour Broken Arrows, pour P-QIM ou pour DPTC ce principe est le même. La section 1.4 décrit cette étape pour le cas de l'algorithme BA.

La deuxième étape est l'**insertion informée**. D'un point de vue géométrique, cela consiste à déplacer le vecteur **x** vers le mot de code $\mathbf{c}^*$. Autour du mot de code $\mathbf{c}^*$, existe une région (appelé région de Voronoï) dont la signification est similaire à la région de décodage lorsque l'on utilise des codes détecteurs et correcteurs d'erreurs. Cette région correspond à l'ensemble des vecteurs (c'est-à-dire les mots) qui seront reconnus lors de l'extraction comme étant associés au vecteur mot de code $\mathbf{c}^*$. En fonction de la mesure de corrélation utilisée lors de la détection, on va soit déplacer le vecteur vers un hyper-cône dont l'axe central est le mot de code $\mathbf{c}^*$ (cas de l'algorithme BA), soit déplacer le vecteur **x** vers la région de Voronoï délimité par des hyper-plans (cas de l'algorithme DPTC), soit déplacer vers l'hyper-sphère centrée en $\mathbf{c}^*$ (cas de l'algorithme P-QIM). La section 1.4 décrit cette étape pour le cas de l'algorithme BA.

Pour donner une illustration un peu plus précise du choix de l'espace d'insertion, de la phase de codage informé et de la phase d'insertion informée, nous allons détailler l'algorithme de Broken Arrows. Cet algorithme est un peu particulier puisqu'il n'y a pas à proprement parler d'information transmise entre l'émetteur (algorithme d'insertion) et le récepteur (algorithme de détection). En effet, l'émetteur insère un signal qui est connu du détecteur. On parle donc de schéma de tatouage 0-bits dans le sens ou aucun bit n'est transmis. Bien qu'aucun bit ne soit transmis, on retrouve les notions d'espace d'insertion, de codage informé et d'insertion informée. Notons que le schéma BA aborde également le problème de la dégradation psychovisuelle, la notion de robustesse, et la notion de sécurité. Nous aborderons ces aspects à travers l'explication du schéma de BA. Il faut bien comprendre que tous ces aspects sont essentiels à la mise au point d'un système de tatouage mature. On peut d'ailleurs dire que l'algorithme de BA (et ses quelques améliorations [Xie et al. 10a, Xie et al. 10b]) représente l'un des rare outils mature arrivant environ 20 ans après la naissance de la discipline.

Notons que nous détaillerons un peu plus les deux principaux algorithmes multi-bits informés dans les deux chapitres suivants. Le chapitre 2 reprend les principes de l'algorithme DPTC et propose principalement une autre approche pour l'insertion informée. Le chapitre 3 reprend les principes de l'algorithme P-QIM et propose de l'étendre à une approche basée TCQ.

1.4 Broken Arrows

Le schéma de tatouage de BA (Broken Arrows [Furon et al. 08]) est donné Figure 1.4 pour la partie insertion. Le schéma est illustré avec une image en niveaux de gris 512×512 sur 8 bits. Dans un premier temps, l'image subit une transformation en ondelettes 9/7 de Daubechies en 3 niveaux. L'ensemble des coefficients ondelettes exceptés ceux de la sous-bande basse fréquence est alors stocké dans le vecteur hôte **x**. On a donc un espace d'insertion (le vecteur **x**) qui est dans un domaine spatio-fréquenciel et qui ne prend pas en compte les très basses résolutions.

Le vecteur hôte **x** est alors « comparé » à N_{sec} vecteurs secrets noté $\mathbf{c}^i, i \in [1, N_{sec}]$. Ces

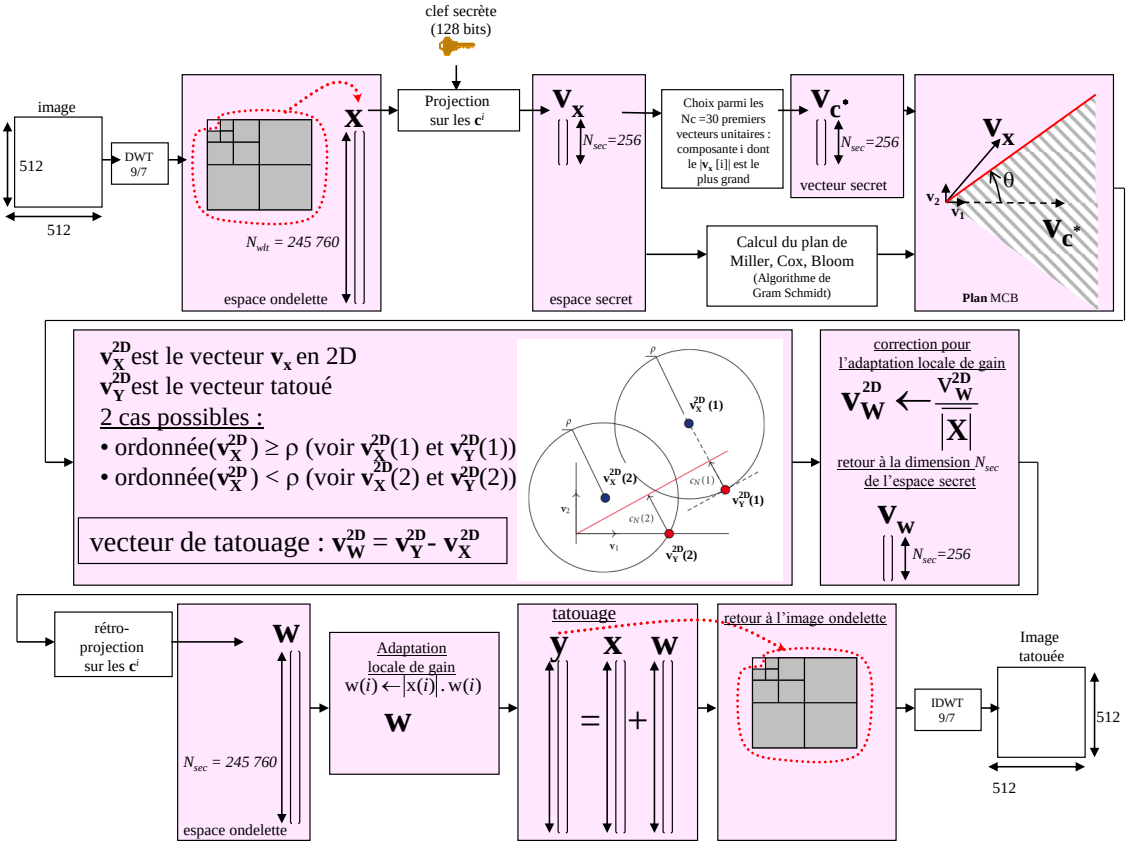


FIGURE 1.4 – Schéma général de tatouage par Broken Arrows [Furon et al. 08] pour une image en niveaux de gris 512x512.

vecteurs secrets sont obtenus : par l'utilisation d'un générateur pseudo-aléatoire qui tire des valeurs dans $\{+1, -1\}$, puis par normalisation à 1 des vecteurs. Les N_{sec} vecteurs secrets $\mathbf{c}^i, i \in [1, N_{sec}]$ sont quasi-orthogonaux. Notons que ces vecteurs secrets sont générés en initialisant le générateur avec une clef secrète. Cette même clef secrète sera nécessaire lors de la phase de détection pour détecter la présence de la marque. L'ensemble $\mathcal{C}$ composé des N_{sec} vecteurs secrets correspond au livre du code (codebook) contenant l'ensemble des mots de code disponibles. Cet ensemble $\mathcal{C}$ est donc également disponible du côté récepteur si celui-ci dispose de la clef secrète. En effet, le récepteur re-génère le livre du code ; c'est-à-dire re-génère les vecteurs secrets.

De la même façon que pour le tatouage multi-bit informé (voir Section 1.3), on retrouve une phase de type codage informé. Nous avons en entrée le vecteur hôte $\mathbf{x}$ et l'ensemble des mots de code de $\mathcal{C}$. Il faut donc déterminer le mot de code $\mathbf{c}^* \in \mathcal{C}$ « le plus proche » de $\mathbf{x}$. On détermine cette proximité en calculant le produit scalaire entre $\mathbf{x}$ et un sous-ensemble N_c de l'ensemble des vecteurs de $\mathcal{C}$ [4] et l'on détermine le vecteur $\mathbf{c}^*$ le plus corrélé :

$$\begin{aligned} \mathbf{c}^* &= sign(\mathbf{x}.\mathbf{c}').\mathbf{c}' \\ \mathbf{c}' &= \arg_{\mathbf{c}^i} \max_{i \in \{1,\ldots,N_c\}} \left|\mathbf{x}.\mathbf{c}^i\right| \end{aligned} \tag{1.1}$$

4. Dans l'algorithme original, on détermine la proximité à seulement $N_c = 30$ premiers vecteurs de $\mathcal{C}$.

Au lieu de passer à la phase suivante qui consiste à faire l'insertion informée en prenant $\mathbf{x}$ et $\mathbf{c}^*$ en entrée et retournant le vecteur tatoué $\mathbf{y}$, BA ajoute une étape qui permet de sécuriser le schéma. Cette étape consiste à déterminer un nouvel espace pour l'insertion : l'espace secret. L'espace secret est obtenu en projetant le vecteur $\mathbf{x}$ (par produit scalaire) sur l'ensemble des mots de code de $\mathcal{C}$. On obtient alors un vecteur secret $\mathbf{v_x} \in \mathbb{R}^{N_{sec}}$. L'insertion informée dans ce nouvel espace nécessite de raisonner sur cet espace secret. Il faut en effet choisir un mot de code qui soit « le plus proche » de $\mathbf{v_x}$. Comme on l'a vu à l'équation 1.1, dans l'espace d'insertion $\mathbf{x}$ c'est le vecteur $\mathbf{c}^*$ le plus corrélé en valeur absolue (parmi les N_c premiers vecteurs) qui est choisi.

Dans le même esprit, dans l'espace d'insertion secret $\mathbf{v_x}$, on choisi le vecteur **unitaire** « le plus proche » de $\mathbf{v_x}$ parmi les N_c premiers vecteurs unitaires. Ce vecteur unitaire « le plus proche » de $\mathbf{v_x}$ est un vecteur dont toutes les composantes sont nulles, exceptée la composante i telle que $|\mathbf{v_x}[i]|$ est maximum, qui est positionnée à $+/-1$. Notons que le fait de passer par l'espace secret permet d'avoir un étalement du signal de tatouage lors du retour dans l'espace ondelette $\mathbf{x}$. De la même façon que pour une approche par étalement de spectre, la puissance du signal de tatouage est alors répartie sur de nombreux coefficients. Notons $\mathbf{v_{c^*}}$ unitaire le vecteur le plus corrélé à $\mathbf{v_x}$.

Une fois que le vecteur $\mathbf{v_x}$ et le vecteur $\mathbf{v_{c^*}}$ ont été déterminés, on passe à la phase d'insertion informée. Cette phase consiste à déplacer le vecteur $\mathbf{v_x}$ vers la région de Voronoï de $\mathbf{v_{c^*}}$ (voir Figure 1.4). La norme du vecteur de déplacement $\mathbf{v_w}$ (ce vecteur de déplacement est le vecteur de tatouage dans l'espace secret) est réglable en fonction du PSNR (calculé entre l'image hôte et l'image tatouée) désiré à la fin de l'insertion via la formule (voir hypothèses et justifications dans [Furon et al. 08] ; équation 25 pour le cas de l'insertion proportionnelle) :

$$||\mathbf{v_w}|| = \frac{\overline{|\mathbf{x}|}}{\sqrt{\overline{\mathbf{x}^2}}} 255 \sqrt{W.H} 10^{-PSNR/20} \tag{1.2}$$

avec $||\mathbf{v_w}||$ la norme du vecteur de tatouage dans l'espace secret, $\overline{|\mathbf{x}|}$ la moyenne des valeurs absolues des coefficients de $\mathbf{x}$ et $\sqrt{\overline{\mathbf{x}^2}}$ la racine carrée de la moyenne des carrés des coefficients de $\mathbf{x}$, W la largeur de l'image, et H la hauteur de l'image.

De plus, la région de Voronoi de $\mathbf{v_{c^*}}$ est un hyper-cône d'angle θ. Les hypothèses fournies dans [Furon et al. 08] permettent de relier le paramètre θ à la probabilité de faux positif par la formule :

$$P_{fp} \leq N_c \frac{S_{N_{sec}-2}(\theta)}{S_{N_{sec}-2}(\pi/2)} \tag{1.3}$$

avec $S_{N_{sec}-2}(\theta)$ l'angle solide associé à θ en dimension $N_{sec}-2$ [Miller et al. 99]. Lors de la compétition BOWS2, le paramètre θ était fixé à 1.2154 ce qui correspond à une probabilité inférieure ou égale à $P_{fp} = 3.10^{-7}$ pour $N_c = 30$ cones. Lors de l'insertion informée, si le PSNR final (environs 43 dB) et la probabilité de faux positif (environs 10^{-6}) sont fixés, on se retrouve avec un vecteur $\mathbf{v_x}$ qu'il faut déplacer de la norme maximum donnée à l'équation 1.2 pour aller pénétrer à l'intérieur d'un cône centré en $\mathbf{v_{c^*}}$ et d'angle fixé. Le problème se résume alors à décider de l'endroit où l'on doit déplacer le vecteur $\mathbf{v_x}$ à l'intérieur du cône avec la contrainte d'avoir le maximum de robustesse. Le problème est résolu de manière géométrique en 2D dans le plan formé par les vecteurs $\mathbf{v_x}$ et $\mathbf{v_{c^*}}$ (dans le chapitre 2 nous revenons sur la construction de ce plan 2D) et consiste à plonger dans le cône orthogonalement à la surface du cône. Si l'axe du cône est atteint alors le déplacement se fait co-linéairement à l'axe. Il est intéressant de noter que Furon et Bas montrent que le critère de robustesse lors de l'insertion [Furon et al. 08] est celui de

la pire attaque. L'approche est donc plus générale que l'approche décrite dans [Cox et al. 07b] qui consiste à projeter sur une hyper-hyperbole.

Une fois que le vecteur de déplacement $\mathbf{c_w}$ est calculé dans l'espace secret, celui-ci est divisé par la moyenne des valeurs absolues de $\mathbf{x}$. Cette opération est effectuée, car l'insertion dans l'espace ondelette est effectuée proportionnellement aux amplitudes des coefficients de $\mathbf{x}$ de la manière suivante :

$$\mathbf{y}[i] = \mathbf{x}[i] + |\mathbf{x}[i]|.\mathbf{w}[i], \tag{1.4}$$

avec $\mathbf{w}$ le vecteur $\mathbf{c_w}$ redimensionné puis rétroprojeté dans l'espace ondelette. Ce qu'il est surtout intéressant de noter dans l'équation 1.4, c'est le fait que chaque coefficient ondelette est modifié proportionnellement à son amplitude. De cette manière, le signal de tatouage $\mathbf{w}$ est très bien intégré au signal $\mathbf{x}$ et l'impact psychovisuel bien mieux pris en compte qu'en effectuant une simple addition de $\mathbf{x}$ et de $\mathbf{w}$.

Pour résumer cette présentation succincte de l'algorithme de Broken Arrows, on rappellera les mots clefs importants de cet algorithme informé : espace d'insertion dans le domaine des ondelettes, génération pseudo-aléatoire des mots de code pour le codage informé, utilisation d'un espace secret, insertion informée robuste avec un raisonnement dans le plan 2D, insertion proportionnelle (psychovisuelle).

Dans les deux chapitres suivants nous allons aborder les deux principaux algorithmes multi-bits informés. Ces deux algorithmes reprennent les concepts d'espace d'insertion bien choisi, de codage informé et d'insertion informée. Nous proposons à travers ces deux chapitres de décrire une amélioration des algorithmes de base, mais également de déterminer quelle est l'approche la plus robuste, et/ou la plus sûre pour une dégradation fixée et un payload fixé. Pour pouvoir faire ces comparaisons, il a fallu mettre en place une plate-forme de test. Il est à noter que ces comparaisons n'étaient pas encore bien établies dans la littérature.

Chapitre 2

Une approche DPTC basée rotation : RB-DPTC

Résumé

Le schéma de tatouage par codes à papier sale par treillis (Dirty Paper Trellis Code : DPTC [Miller et al. 04]), publié en 2004, est un des schémas à forte capacité parmi les plus performants. Il possède cependant deux inconvénients majeurs : sa faiblesse en terme de sécurité et sa complexité en coût de calcul. Nous proposons de traiter ces deux problèmes par l'utilisation d'un espace d'insertion plus sûr et par l'utilisation d'une technique d'insertion plus rapide. L'espace d'insertion est construit par projections des coefficients ondelettes sur des porteuses secrètes. Cela renforce la sécurité, et cela permet d'obtenir de bonnes propriétés psycho-visuelles. L'insertion, quant à elle, repose sur une rotation dichotomique dans le plan de Cox, Miller et Bloom. Cette insertion donne de meilleures performances par rapport aux approches d'insertion de faible complexité. Quatre attaques différentes sont utilisées pour l'évaluation et les résultats obtenus montrent un bon comportement du schéma en terme de robustesse et de complexité opératoire.

2.1 Introduction

Les schémas informés (également appelés schémas à information adjacente) sont apparus en 1998 lorsque le travail de Costa [Costa 83] a été redécouvert. On distingue deux grandes catégories de systèmes de tatouage informés multi-bits : les schémas basés codes à lattice, également appelés codes en réseau, et plus couramment appelés schéma basés quantification (DC-QIM [Chen et al. 01], SCS [Eggers et al. 03]...) et les schémas basés treillis (DPTC [Miller et al. 04]).

L'algorithme original basé DPTC est connu pour sa bonne robustesse et sa haute capacité d'insertion, mais possède deux grosses faiblesses : l'étape d'insertion informée utilise une approche Monte-Carlo très complexe en coût de calcul et le schéma montre quelques faiblesses de sécurité vis-à-vis d'attaques par collusion [Bas et al. 08]. Dans ce papier nous proposons un schéma DPTC au moins aussi sûr et moins complexe.

Lin *et al.* [Lin et al. 05] proposent de remplacer l'approche Monte-Carlo par une technique non-optimale mais de faible complexité. Nous proposons une solution encore plus efficace. Nous utilisons le domaine ondelettes qui ne produit pas les « effets de bloc » du domaine DCT (domaine utilisé dans l'approche DPTC initiale). Pour renforcer la sécurité et rendre encore plus difficile

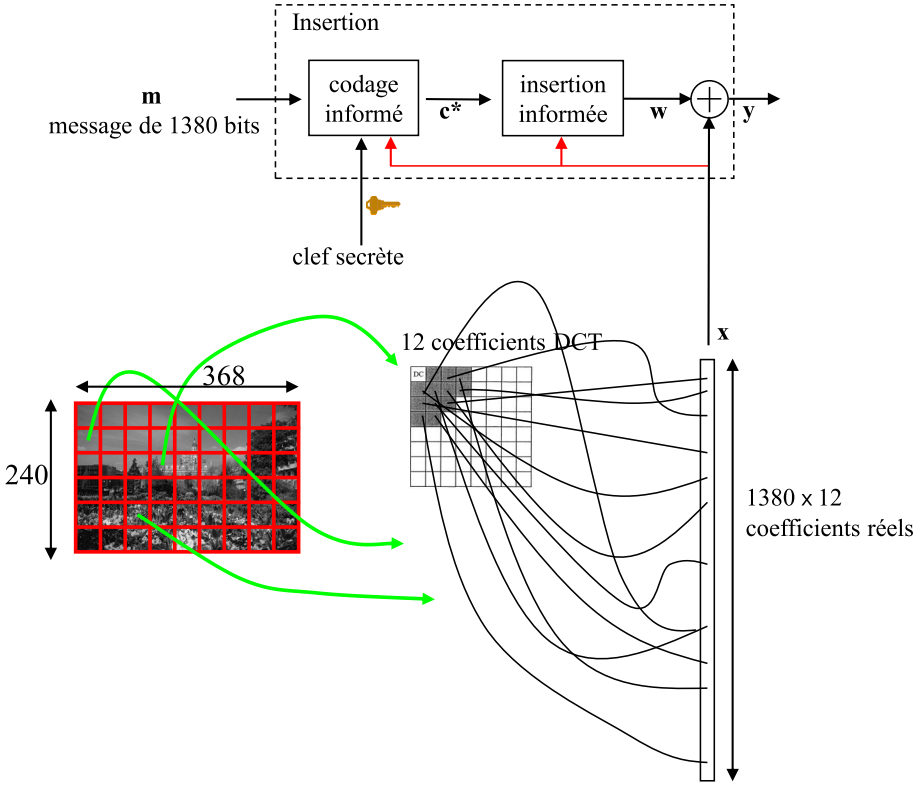


FIGURE 2.1 – Dirty Paper Trellis Codes appliqués sur une image 240×368

l'attaque présentée dans [Bas et al. 08], nous réalisons l'insertion du signal de tatouage dans un espace secret. Finalement, puisque notre technique est rapide et que l'espace d'insertion est adapté, nous augmentons la taille du treillis (plus exactement nous augmentons la taille du *livre du code* [1]) ce qui nous permet d'augmenter la robustesse [Wang et al. 06] et de réduire la distorsion.

Dans la section 2.2, nous rappelons le principe du DPTC original [Miller et al. 04]. Dans la section 2.3 nous présentons l'espace d'insertion et l'algorithme d'insertion. Enfin, dans la section 2.4 nous comparons le DPTC original [Miller et al. 04], l'approche de Lin *et al.* [Lin et al. 05], notre approche basée rotation (Rotation Based Dirty Paper Trellis Code : RB-DPTC) et une version psychovisuelle (PR-RB-DPTC).

2.2 Le schéma DPTC original

Le schéma DPTC original [Miller et al. 04] appliqué sur une image $N = 240 \times 368$ est illustré sur la figure 2.1.

La première étape du schéma consiste à transformer l'image en une représentation spatio-fréquentielle (par transformée DCT) pour obtenir le *signal hôte* **x**. Dans le schéma original, on applique à l'image une transformée DCT 8×8, puis les douze premiers coefficients ACs de chaque bloc DCT sont extraits et ordonnés pseudo-aléatoirement dans un vecteur **x** de taille $12 \times N/64 = 3 \times N/16$.

1. livre du code : *codebook* en anglais.

La deuxième étape du schéma DPTC est le *codage informé*. Le message binaire **m** à insérer est codé en un mot de code $\mathbf{c}^*$ en prenant en compte le *signal hôte* **x**. Pour réaliser ce codage, un treillis non déterministe et l'algorithme de Viterbi sont utilisés (cette partie est détaillée dans [Miller et al. 04] et dans [Chaumont 10a]).

La dernière étape du schéma DPTC est l'*insertion informée*. Cette étape consiste à modifier le *signal hôte* **x** pour le « déplacer » dans la région de Voronoï du mot de code $\mathbf{c}^*$. Les auteurs de [Miller et al. 04] utilisent une approche Monte-Carlo (avec un critère de robustesse prédéfini) pour effectuer le « déplacement » du *signal hôte* **x** dans la région de Voronoï du mot de code $\mathbf{c}^*$. L'approche est itérative et consiste à attaquer (i.e. dégrader) le *signal tatoué* **y** puis contre-attaquer en regénérant un nouveau *signal tatoué* **y**. Cette technique nécessite un grand nombre d'appels à l'algorithme de Viterbi. Même avec les optimisations proposées dans [Miller et al. 04], la complexité en temps de calcul est élevée et c'est actuellement une forte limitation, que cela soit pour son évaluation intensive ou bien pour son utilisation au sein d'un système logiciel ou matériel [2].

2.3 Notre schéma RB-DPTC

Dans cette section, nous présentons notre nouvel espace d'insertion et notre nouvelle approche pour l'insertion.

2.3.1 L'espace d'insertion

Le travail récent de Bas et Doërr [Bas et al. 08] sur la sécurité de l'approche DPTC [Miller et al. 04] montre que dans le cadre de Kerckhoffs [Kerckhoffs 83], c'est-à-dire lorsque les algorithmes d'insertion et d'extraction sont publics et donc à la disposition d'attaquants, le *livre du code* $\mathcal{C}$ peut-être retrouvé [3] en observant un grand nombre d'images tatouées (tatouées avec l'utilisation de la même clef secrète). Ce résultat est obtenu sur une version simplifiée de l'algorithme DPTC [4], mais montre néanmoins l'existence d'une certaine faiblesse de sécurité dans l'algorithme. L'espace privé que nous utiliserons dans notre schéma permet de cacher la structure du treillis et devrait rendre plus difficile une attaque à la sécurité du type de celle proposée par Bas et Doërr [Bas et al. 08]. En outre, il est certainement très difficile d'estimer les projections secrètes de la même manière que dans [Bas et al. 09] car le nombre de mots-de-code est trop grand (pour un treillis composé de 128 états, de 128 arcs par état, et d'un payload [5] de 1024 bits, cela fait plus de 10^{387} mots-de-code).

La figure 2.2 illustre l'espace d'insertion de notre proposition Rotation-Based Dirty Trellis Codes (RB-DPTC). Notre nouvel espace d'insertion est obtenu tout d'abord par une transformation ondelettes de l'image, puis par une projection du *signal hôte* **x** de dimension N_{wlt} (**x** est la concaténation des coefficients des sous-bandes, exceptés les coefficients de la sous-bande LL) sur N_{sec} porteuses (notées $\mathbf{u}_i$ avec $i \in [1, N_{sec}]$). La projection est juste un produit scalaire. Remarquons également que la complexité de la projection peut facilement être réduite en une complexité

2. Sur un PC à 3Ghz, en fonction du seuil de robustesse, l'insertion peut prendre de 30 min à 90 min sur une image 256×256.

3. Plus exactement, ce sont les coefficients attachés aux arcs du treillis qui peuvent être assez bien estimés.

4. il n'y a pas de ré-ordonnancement pseudo-aléatoire des coefficients DCTs.

5. payload : quantité de bits insérée.

linéaire avec une approche de Space Division Multiplexing [Chaumont 09a]. Le vecteur obtenu $\mathbf{v_x}$ de dimension N_{sec} peut alors être utilisé pour le *codage informé* et *l'insertion informée*.

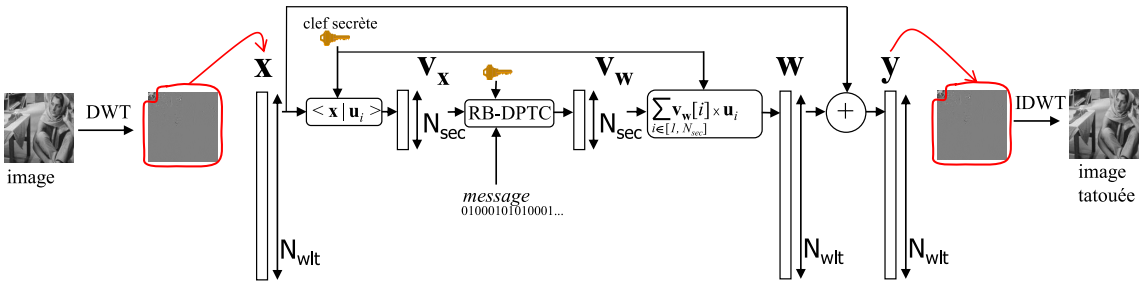


FIGURE 2.2 – L'espace d'insertion pour notre schéma Rotation Based Dirty Paper Trellis Code (RB-DPTC).

Cet espace d'insertion est au moins aussi sûr que l'original car il permet de disperser le signal de tatouage sur tout le domaine fréquentiel (il n'y a donc pas de super robustesse [Craver et al. 07]). De plus, la projection sur les N_{sec} porteuses donne à l'espace d'insertion un aspect Gaussien connu pour ses bonnes capacités de canal [Costa 83]. Finalement, le domaine ondelettes a de bonnes propriétés psycho-visuelles et génère des effets moins gênants (ou du moins, moins tranchés) que les effets de bloc du schéma DPTC original [Miller et al. 04].

2.3.2 L'étape d'insertion informée

Le codage informé que nous utilisons est le même que celui du DPTC original, mais il est réalisé à partir du vecteur hôte $\mathbf{v_x}$ (c'est-à-dire à partir de l'espace secret). Le codage-informé permet d'obtenir le mot de code $\mathbf{c}^*$. Pour accélérer l'insertion et conserver un bon compromis robustesse-distorsion, nous proposons une solution non optimale, mais meilleure que l'approche de Lin *et al.* [Lin et al. 05].

Rappelons qu'au décodage, le mot de code le plus corrélé $\tilde{\mathbf{c}^*}$ est obtenu en exécutant l'algorithme de Viterbi sur le treillis « complet ». Ce mot de code $\tilde{\mathbf{c}^*}$ appartient au *livre du code* $\mathcal{C}$ et maximise la corrélation avec le vecteur tatoué-attaqué $\tilde{\mathbf{v_y}}$:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{c}^*} &= \arg_{\mathbf{c}^i} \max_{\forall \mathbf{c}^i \in \mathcal{C}} (\tilde{\mathbf{v_y}}.\mathbf{c}^i) \\ &= \arg_{\mathbf{c}^i} \max_{\forall \mathbf{c}^i \in \mathcal{C}} (||\tilde{\mathbf{v_y}}||.||\mathbf{c}^i||.cos\theta_i),\end{aligned}$$

avec θ_i l'angle entre $\tilde{\mathbf{v_y}}$ et $\mathbf{c}^i$. Sachant que tous les mots de code possèdent la même norme, l'algorithme de Viterbi extrait donc le mot de code $\mathbf{c}^i \in \mathcal{C}$ formant le plus petit angle $|\theta_i|$ avec $\tilde{\mathbf{v_y}}$. En supposant que le bruit d'attaque est un bruit blanc gaussien, l'attaque n'a aucune influence sur la corrélation et l'on retrouve, lors de l'extraction, le mot de code $\mathbf{c}^*$ utilisé lors de l'insertion.

Pour insérer le message m lors du codage, il suffit donc de réduire l'angle entre le *vecteur hôte* $\mathbf{v_x}$ et le mot de code $\mathbf{c}^*$, jusqu'à obtenir le plus petit angle (parmi tous les autres angles possibles $\widehat{(\mathbf{v_x}, \mathbf{c}^i)}$).

Pour réduire l'angle entre $\mathbf{v_x}$ et $\mathbf{c}^*$, nous exprimons d'abord les deux vecteurs dans le plan de Miller, Cox et Bloom (*abrév.* plan MCB) [Cox et al. 07b]. La figure 2.3 illustre ce plan. Le plan MCB est défini par une base ortho-normalisée $(\mathbf{v_1}, \mathbf{v_2})$ telle que le $\mathbf{v_x}$ et $\mathbf{c}^*$ appartiennent à ce

plan (algorithme de Gram-Schmidt) :

$$\mathbf{v_1} = \frac{\mathbf{c}^*}{||\mathbf{c}^*||}, \qquad \mathbf{v_2} = \frac{\mathbf{v_x} - (\mathbf{v_x}.\mathbf{v_1})\mathbf{v_1}}{||\mathbf{v_x} - (\mathbf{v_x}.\mathbf{v_1})\mathbf{v_1}||}$$

Dans le plan MCB, les coordonnées 2D du *vecteur hôte* $\mathbf{v_x}$ sont :

$$\begin{aligned} \mathbf{v_x^{2D}}[1] &= \mathbf{v_x}.\mathbf{v_1}, \\ \mathbf{v_x^{2D}}[2] &= \mathbf{v_x}.\mathbf{v_2}, \end{aligned}$$

et les coordonnées 2D du mot de code $\mathbf{c}^*$ sont :

$$\begin{aligned} \mathbf{c^*_{2D}}[1] &= ||\mathbf{c}^*||, \\ \mathbf{c^*_{2D}}[2] &= 0. \end{aligned}$$

Une rotation du *vecteur hôte* $\mathbf{v_x^{2D}}$ d'un angle θ dans le plan MCB est telle que :

$$\begin{aligned} \mathbf{v_y^{2D}}[1] &= cos\theta.\mathbf{v_x^{2D}}[1] - sin\theta.\mathbf{v_x^{2D}}[2], \\ \mathbf{v_y^{2D}}[2] &= sin\theta.\mathbf{v_x^{2D}}[1] + cos\theta.\mathbf{v_x^{2D}}[2]. \end{aligned}$$

Si nous réduisons la valeur absolue de l'angle entre le *vecteur hôte* $\mathbf{v_x}$ et le mot de code $\mathbf{c}^*$ dans le plan MCB, cela augmente la corrélation $\mathbf{v_x}.\mathbf{c}^*$. Avec une approche dichotomique sur l'angle de rotation, on peut rapidement trouver une frontière de Voronoï. L'algorithme consiste à itérer une dizaine de fois les instructions suivantes :

1. tourner $\mathbf{v_x}$ et obtenir $\mathbf{v_y}$ dans le plan MCB,
2. exécuter l'algorithme de Viterbi sur le treillis « complet » et tester si $\mathbf{v_y}$ appartient ou non à la région de Voronoï de $\mathbf{c}^*$ i.e. vérifier si le vecteur décodé est égal ou non à $\mathbf{c}^*$,
3. modifier l'angle de rotation en fonction du résultat d'appartenance à la région de Voronoï region et retourner en 1.

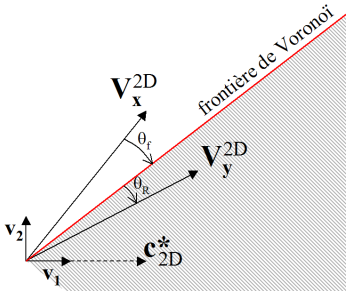


FIGURE 2.3 – Insertion basée rotation dans le plan de Miller, Cox et Bloom

Une fois que l'angle frontière θ_f dans le MCB est trouvé, on améliore la robustesse d'insertion en pénétrant à l'intérieur de la région de Voronoï avec un angle θ_R. Notre insertion informée est donc une rotation du *vecteur hôte* $\mathbf{v_x}$ d'un angle orienté égal à $\max(\theta_f + \theta_R, (\widehat{\mathbf{v_x}, \mathbf{c}^*}))$. La figure 2.3 illustre $\mathbf{v_x}$, $\mathbf{v_y}$, θ_f et θ_R dans le plan MCB. Notons qu'un des critères de sécurité proposé dans [Xie et al. 10b] pour contrecarrer l'attaque par analyse en composante principale de [Bas et al. 09], et tenter d'améliorer l'algorithme de Broken Arrows consiste à imposer $||\mathbf{v_y}|| = ||\mathbf{v_x}||$. C'est exactement ce que nous faisons en effectuant une rotation de $\mathbf{v_x}$; la norme de $\mathbf{v_y}$ est égale à la norme de $\mathbf{v_x}$.

2.3.3 Une extension psychovisuelle

Afin que l'impact du tatouage soit psychovisuellement invisible, il est classique de « mettre en forme » le signal de tatouage à travers l'utilisation d'un masquage psychovisuel. Grosso modo, la puissance du signal de tatouage doit être réduite dans les régions uniformes et doit être augmentée dans les régions texturées ou les régions de contours. L'extension psychovisuelle que nous présentons brièvement ici est traitée plus en détails dans [Chaumont 09b]. L'algorithme est appelé Psychovisual Rudimentary mask RB-DPTC (PR-RB-DPTC). Notons que dans l'algorithme PR-RB-DPTC nous avons également ajouté une phase de codage du message par un code détecteur/correcteur d'erreurs de rendement $1/2$ [Chaumont 09b]. La figure 2.4 donne le schéma général d'insertion avec l'utilisation d'un masque psychovisuel. On voit donc se greffer trois grandes étapes par rapport au schéma de la figure 2.2 :

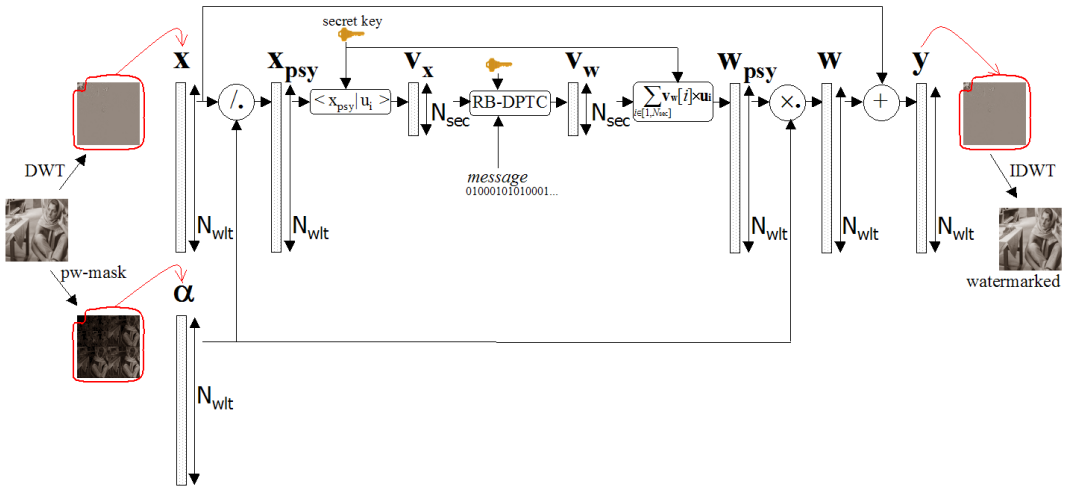


FIGURE 2.4 – Embedding scheme with a psychovisual mask

1. la construction d'un espace psychovisuel $\mathbf{x_{psy}}$. Dans cet espace, les coefficients sont psychovisuellement équivalents. Les coefficients sont donc tous traités de la même façon. Cet espace psychovisuel est tel que :$\forall i \in [1, N_{wlt}], \mathbf{x_{psy}}[i] = \mathbf{x}[i]/\alpha[i]$, avec α le masque psychovisuel ;
2. la mise en forme du signal de tatouage grâce au masque α : $\forall i \in [1, N_{wlt}], \mathbf{w}[i] = \mathbf{w_{psy}}[i] \times \alpha[i]$. Cette mise en forme réduit l'impact psychovisuel du tatouage dans les régions où celui-ci aurait été visible. Par exemple, la valeur de α sera faible dans les régions où l'intensité lumineuse est uniforme, afin de réduire la puissance de $\mathbf{w}$ dans ces régions ;
3. l'insertion du signal de tatouage « mis en forme ». Cette insertion est telle que : $\forall i \in [1, N_{wlt}], \mathbf{y}[i] = \mathbf{w}[i] + \mathbf{x}[i]$.

Lors du décodage, le décodeur doit recalculer le masque psychovisuel. C'est une particularité de l'approche que nous proposons. Dans l'algorithme BA ou DPTC, l'impact psychovisuel est pris en compte lors de l'insertion et il n'y a pas de calcul de masque lors de l'extraction. Cela dit, les approches utilisées dans BA et DPTC sont difficilement réappliquables pour l'approche RB-DPTC car les hypothèses ne sont pas adaptées ou bien parce que la complexité calculatoire est élevée. L'approche de [Le Guelvouit 09] pourrait, être envisagée et consiste à effectuer la mise en forme

du signal de tatouage lors de la phase de rétroprojection sur les porteuses. Notons que l'approche que nous proposons permet d'utiliser n'importe quel masque psychovisuel de la littérature.

Le calcul du masque psychovisuel lors de l'extraction est une phase délicate, car le masque recalculé doit être le même que celui utilisé lors de l'insertion. Si le masque recalculé diffère trop du masque calculé lors de l'insertion, l'extraction du message inséré risque d'être erronée. Ainsi, le masque doit en plus d'être un masque psychovisuel, posséder des propriétés de robustesse aux différentes attaques d'un système de tatouage. Notons qu'à ma connaissance aucune recherche n'a pour le moment traité des masques psychovisuels robustes.

Ainsi, le décodeur extrait le vecteur ondelette à partir de l'image tatouée attaquée, divise chaque composante i par $\alpha[i]$ (α est recalculé au décodeur), projette le vecteur résultant sur les porteuses secrètes puis récupère le mot de code le plus proche (et donc le message) à partir du livre du code $\mathcal{C}$.

2.4 Evaluations expérimentales

Les expérimentations ont été réalisées sur les 100 premières images de la base de données de BOWS-2 [6] avec des images redimensionnées en 256×256 [7]. Ces images sont des photos d'amateurs en niveaux de gris codées sur 8 bits.

Quatre algorithmes sont évalués : l'algorithme **DPTC original** dans le domaine DCT, l'algorithme inspiré de **Lin** *et al.* **basé cône** dans le domaine ondelette, notre algorithme basé rotation **RB-DPTC**, et la version **PR-RB-DPTC** ajoutant un masque psychovisuel et un code correcteur.

La structure du treillis possède 128 états avec 128 arcs par états pour Lin *et al.* basé cône, RB-DPTC et PR-RB-DPTC, et 64 états avec 64 arcs par états pour DPTC original. Les étiquettes des arcs de sortie sont tirées d'une distribution Gaussienne. Il y a 12 coefficients par arc pour Lin *et al.* basé cône, DPTC, RB-DPTC et 10 coefficients par arc pour PR-RB-DPTC. Le payload est le même que dans l'article DPTC [Miller et al. 04], c'est-à-dire 1 bit pour 64 pixels. Le nombre de bits insérés est donc de 1024 pour une image 256×256.

Pour l'algorithme inspiré de Lin *et al.* basé cône, et les algorithmes RB-DPTC et PR-RB-DPTC, nous utilisons le même espace d'insertion. La transformée ondelettes est une $9/7$ Daubechies avec $l = 3$ niveaux de décomposition. Exceptée la sous-bande LL, toutes les autres sous-bandes sont utilisées pour former le *signal hôte* $\mathbf{x}$. Avec des images 256×256, la taille de l'espace ondelettes est de $N_{wlt} = 64\ 512$ coefficients. Sachant que la capacité est de $1/64$ *bits par pixel* et que le nombre de coefficients de sortie pour un arc est $N_{arc} = 12$ coefficients pour Lin *et al.* et RB-DPTC, la taille de l'espace privé est donc de $N_{sec} = 1024 \times 12 = 12\ 288$ coefficients. Pour PR-RB-DPTC la taille de l'espace privé est de $N_{sec} = 1024 \times 10 = 20\ 480$ coefficients. Les porteuses $\mathbf{u}_i$ sont construites à partir de séquences pseudo-aléatoires bipolaires normalisées.

Quatre attaques à la robustesse ont été expérimentées : l'attaque par ajout de bruit Gaussien, l'attaque par filtrage, l'attaque valumétrique de changement d'échelle et l'attaque par compression JPEG. Ces quatre attaques sont décrites en détails dans [Miller et al. 04]. Le Taux d'Erreur Binaire (Bit Error Rate : BER) est calculé à partir du message extrait et il est égal au nombre de bits erronés divisé par le nombre total de bits insérés. Le BER est calculé pour chaque attaque.

Quatre algorithmes sont en compétition pour un PSNR d'insertion proche de 42.6 dB : le **DPTC original** (dans l'espace DCT) avec un PSNR moyen d'insertion = 42.6 dB, l'algorithme de

6. la base de données de BOWS2 est téléchargeable à l'adresse http ://bows2.gipsa-lab.inpg.fr/.
7. le sous-échantillonnage d'images a été réalisé avec le programme xnview et utilisant l'interpolation de Lanczos.

Lin *et al.* **basé cône** (dans l'espace ondelette secret) avec la robustesse positionnée à un bruit de puissance $n^2 = 1$ (ce qui correspond à $R_t = 1$ dans l'article [Lin et al. 05]) et un PSNR moyen d'insertion = 34.2 dB (remarquons qu'il est impossible d'augmenter le PSNR de Lin *et al.*, leur technique est très sous-optimale lorsque l'on expérimente avec des images réelles), l'algorithme **basé rotation** RB-DPTC (dans l'espace ondelette secret) avec un angle de pénétration de $\theta_R = 0.1$ radian et un PSNR moyen d'insertion = 42.4 dB, et enfin l'algorithme PR-RB-DPTC (dans l'espace ondelette secret) avec un angle de pénétration de $\theta_R = 0.09$ radian et un PSNR moyen d'insertion = 41.75 dB.

Les figures 2.5, 2.6 2.7, 2.8 nous donnent les résultats de BER pour les quatre attaques. D'emblée, nous écartons les résultats de l'approche de Lin *et al.* puisqu'il est impossible d'avoir un PSNR moyen supérieur à 34.2 dB. L'algorithme de Lin *et al.* ne peut donc pas être utilisé comme substitut rapide à l'algorithme DPTC original, puisqu'il n'est pas capable d'atteindre un PSNR raisonnable de 42 dB. La comparaison est donc uniquement réalisée entre l'algorithme DPTC original, notre algorithme basé rotation ainsi que sa version psychovisuelle.

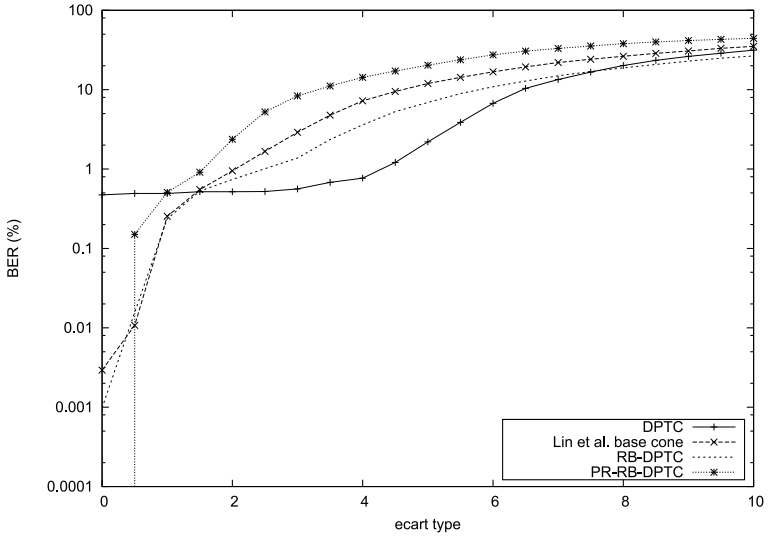


FIGURE 2.5 – BER pour une attaque par ajout de bruit gaussien.

On peut constater que l'algorithme DPTC possède un taux d'erreur de 0.5% bits erronées même lorsqu'il n'y a pas d'attaque. Ce taux pourrait être réduit en augmentant le nombre d'itérations lors de la phase d'insertion informée par Monte-Carlo, ainsi qu'en affinant la granularité d'incrément de la puissance d'attaque dans l'algorithme de Monte-Carlo. La durée d'expérimentation est déjà de l'ordre de deux semaines d'exécution sur un PC à 3GHz et augmenter le nombre d'itérations ainsi que la granularité de la puissance d'attaque entrainerait un très fort accroissement de cette durée. Le DPTC originale n'est clairement pas adapté à une insertion au payload de 1 bit pour 64 pixels.

L'algorithme basé rotation RB-DPTC a des taux d'erreur de 0.001 % lorsqu'il n'y a pas d'insertion, ce qui est bien meilleur que pour le DPTC original. On constate également que l'ajout d'un code correcteur en plus d'un masque psychovisuel (PR-RB-DPTC) permet d'obtenir un taux d'erreur nul lorsqu'il n'y a pas d'attaque. De manière générale, on constate que le taux d'erreur atteint les 10% pour des puissances d'attaque moyennes. C'est un constat que l'on peut avoir pour

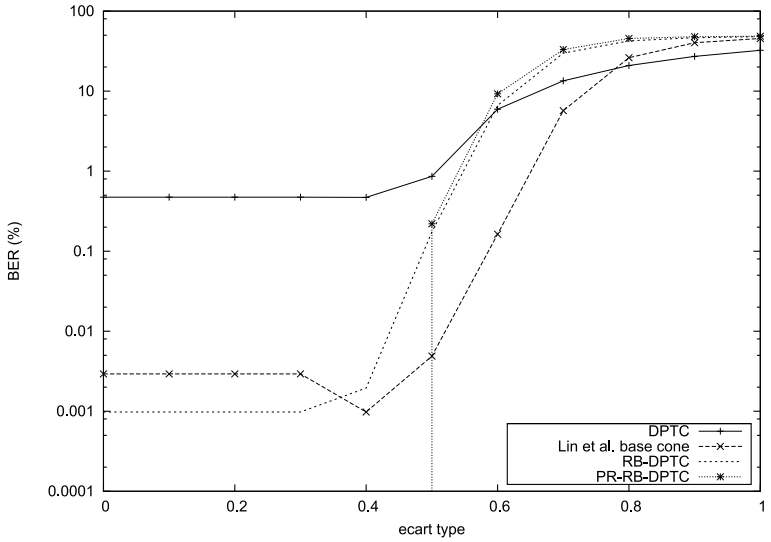


FIGURE 2.6 – BER pour une attaque par filtrage gaussien.

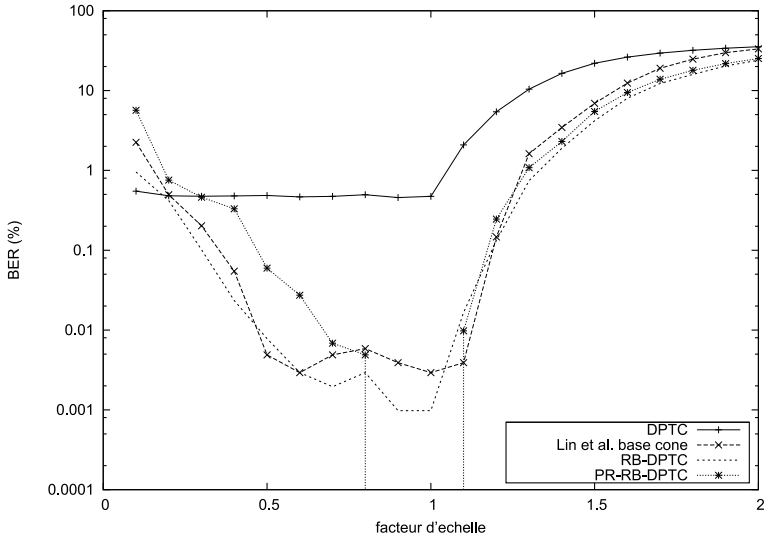


FIGURE 2.7 – BER pour une attaque valumétrique de changement d'échelle.

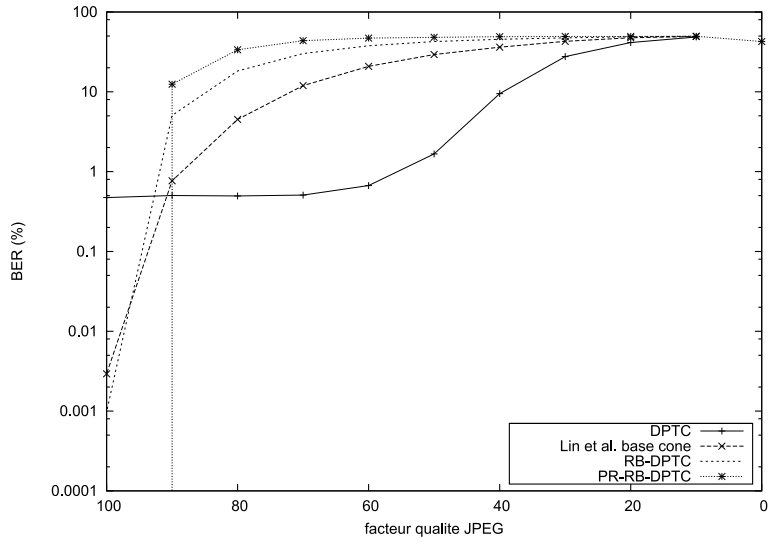


FIGURE 2.8 – BER pour une attaque par compression JPEG.

toutes les approches qui effectuent un tatouage à un payload aussi élevé. Si l'on regarde de plus près les courbes, pour l'attaque valumétrique de changement d'échelle et l'attaque de filtrage, le BER varie de la même façon que pour l'algorithme DPTC tout en étant bien plus petit à faible puissance d'attaque. Pour l'attaque par filtrage, les approches RB-DPTC et PR-RB-DPTC ont un BER qui atteint les 10% bien plus rapidement que l'approche DPTC, bien que le BER soit initialement plus faible lorsque l'attaque est de faible puissance. Enfin, on constate que les approches RB-DPTC et PR-RB-DPTC sont sensibles à l'attaque JPEG puisque le seuil d'erreur de 10% est franchi pour un facteur de qualité supérieur à 80. Cette sensibilité s'explique par l'insertion dans des ondelettes de hautes fréquences.

Pour résumer, les approches RB-DPTC ou PR-RB-DPTC sont intéressantes lorsque l'on désire effectuer des insertions à fort payload avec une approche basée treillis. Les approches permettent de réduire la complexité (une insertion ne prend que quelques secondes sur un PC à 3GHz) de l'algorithme DPTC original et ont de très bonnes performances en robustesse. De plus, nos approches garantissent une bonne sécurité via l'utilisation d'un espace d'insertion sûr [Furon et al. 08].

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons un nouvel algorithme de codes à papier sale par treillis (Dirty Paper Trellis Code : DPTC). Par rapport à l'algorithme original, nous utilisons le domaine ondelette au lieu du domaine DCT. La sécurité est au moins aussi bonne que dans l'algorithme DPTC original grâce à l'ajout d'un espace d'insertion secret. Cet espace secret est obtenu en projetant les coefficients ondelettes sur des porteuses orthogonales. Cette projection garantit également (pendant la rétro-projection) une dispersion du signal de tatouage sur tous les coefficients ondelettes. Nous présentons également une nouvelle approche d'insertion basée rotation. L'objectif est de déplacer le *vecteur hôte* dans la région de Voronoï du mot de code représentant le message. Le déplacement consiste à faire faire une rotation au *vecteur hôte* par rapport à l'axe défini par

le mot de code. L'angle de rotation utilisé pour déterminer la frontière de Voronoï est obtenu de manière dichotomique. Le *vecteur hôte* est ensuite « tourné » de sorte qu'il y ait une pénétration dans la région de Voronoï d'un angle prédéfini. Les résultats sont meilleurs que l'approche rapide de Lin *et al.*. et sont bons en comparaison de l'approche originale [Miller et al. 04]. De plus, notre approche est de bien plus faible complexité calculatoire que l'approche originale [Miller et al. 04].

Nous avons également proposé une version psychovisuelle de l'algorithme RB-DPTC en utilisant un masque psychovisuel et un code correcteur d'erreur. L'article [Chaumont 09b] détaille cet aspect et montre que pour un SSIM de 98% [Wang et al. 04], les résultats en robustesse sont meilleurs que pour l'approche RB-DPTC.

De nombreuses améliorations sont envisageables. Une des premières améliorations à apporter consiste à améliorer la robustesse du schéma face à JPEG. L'utilisation d'un espace d'insertion basé DCT pourrait améliorer la robustesse. La sensibilité de l'espace secret à l'attaque de Westfeld [Bas et al. 09] a été traitée par l'utilisation d'un masquage local [Xie et al. 10a]. Cette approche pourrait être ajoutée pour augmenter le niveau de sécurité. Le schéma doit alors être réglé sur des payload plus faibles, car cet ajout réduit la dimension de l'espace secret. L'approche de [Le Guelvouit 09] pour mettre en forme psychovisuellement le signal de tatouage lors de la rétroprojection sur les porteuses est prometteuse et permettrait peut être de gagner en robustesse. Lors de la phase d'extraction du message, cela permettrait également d'éviter d'avoir à recalculer le masque puis à utiliser ce masque, détérioré par les attaques, pour pouvoir extraire le message. La rotation telle que nous l'avons définie pourrait être guidée par une valeur de dégradation comme le SSIM [Wang et al. 04]. Une analyse plus poussée de la sécurité pourrait être envisagée. Enfin, le code DPTC peut encore largement être amélioré comme cela a déjà été proposé dans [Wang et al. 06, Wang et al. 07].

Chapitre 3

Une approche QIM Perceptuel (Multi-Hyper-Cube)

Résumé

En 2007, Li et Cox [Li et al. 07] démontraient que leur schéma appelé Perceptual-QIM (P-QIM) était l'une des solutions les plus abouties lorsque l'on souhaite faire du tatouage d'image multi-bits à partir d'une approche basée quantification. Dans ce chapitre nous poursuivons l'étude par le biais de deux algorithmes : l'approche Hyper-Cube et l'approche Multi-Hyper-Cube. Dans un premier temps, nous exposons le schéma Hyper-Cube et son positionnement par rapport à P-QIM. Nous améliorons ensuite l'approche Hyper-Cube en y intégrant un module TCQ (Quantification codée par treillis). Les résultats obtenus sont bons quel que soit le type d'attaque et permettent de conclure que le schéma de tatouage Multi-Hyper-Cube est actuellement l'une des techniques les plus abouties pour effectuer un tatouage robuste, à haute capacité et prenant en compte les aspects psychovisuels.

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la famille basée quantification (DC-QIM [Chen et al. 01], SCS [Eggers et al. 03], P-QIM [Li et al. 07], ...). Les schémas basés quantification sont connus pour leur faible complexité calculatoire et leurs bonnes capacités d'insertion, mais aussi pour une grande sensibilité aux attaques valumétriques de changement d'échelle. Cette grande sensibilité a cependant été réduite par l'ajout du principe RDM [PérezGonzález et al. 04].

L'un des schémas de tatouage d'images basé quantification les plus efficaces est actuellement le tatouage P-QIM (Perceptual-QIM) [Li et al. 07]. Cette affirmation repose sur la comparaison d'algorithmes non robustes aux désynchronisations dont le payload [1] est très élevé (1 bit inséré dans 64 pixels).

L'algorithme P-QIM utilise un tatouage par scalaire QIM [Chen et al. 01] avec un codage du message par répétition. Le principe RDM est intégré au schéma et permet de le rendre plus robuste aux attaques valumétriques de changement d'échelle. L'originalité du schéma réside dans l'utilisation du modèle psycho-visuel modifié de Watson [Watson 93] pour assurer l'invariance aux

1. payload : quantité de bits insérée.

attaques valumétriques de changement d'échelle, mais également pour prendre en compte l'impact psychovisuel.

Dans ce chapitre, nous proposons de poursuivre le travail autour de l'algorithme P-QIM en améliorant l'aspect psychovisuel. Nous proposons également d'intégrer un code correcteur et ainsi obtenir une cascade de décodage lors de l'extraction du message inséré. Ces améliorations sont regroupées au sein de l'algorithme Hyper-Cube qui est présenté en section 3.2. Nous proposons ensuite dans la section 3.3 de faire le pont entre l'approche basée treillis DPTC, et les approches basées quantification, en substituant le module QIM par un module basé TCQ (Quantification codée par treillis).

3.2 L'algorithme Hyper-Cube

Que cela soit pour l'algorithme P-QIM [Li et al. 07] ou pour l'algorithme Hyper-Cube [Chaumont et al. 11b], le schéma général est sensiblement le même. L'image est découpée en blocs 8×8, et pour chaque bloc on insère un ou plusieurs bits. Le schéma de tatouage, à l'insertion, est résumé pour un bloc 8×8 sur la figure 3.1. La DCT d'un bloc $\mathbf{X}$ est calculée, puis les n premiers coefficients ACs issus du parcours en zig-zag sont rangés dans un vecteur que nous appelons signal hôte et que nous notons $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$. Les n coefficients de $\mathbf{x}$ sont tatoués par scalaire QIM. On insère donc les n bits du vecteur $m \in \{0,1\}^n$ dans les n bits du vecteur $\mathbf{x}$. Le vecteur m est composé de bits du $message$ préalablement encodé par un code correcteur (voir section 3.2.2). Chaque coefficient $\mathbf{x}[i], i \in \{1,\dots,n\}$ embarque un bit $\mathbf{m}[i], i \in \{1,\dots,n\}$ et l'on obtient le signal tatoué $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^n$ en quantifiant chaque dimension :

$$\forall i \in \{1,\dots,n\}, \mathbf{y}[i] = Q_{\mathbf{m}[i]}(\mathbf{x}[i], \Delta_i), \tag{3.1}$$

avec Δ_i le pas de quantification associé au $i^{ème}$ coefficient et Q une fonction de quantification. Le pas de quantification est obtenu à partir des *slacks* de Watson qui ont été calculées sur un bloc précédemment tatoué (voir section 3.2.1) .

Pour un coefficient $\mathbf{x}[i]$, et un pas de quantification Δ_i, les quantificateurs Q_0 et Q_1 sont :

$$\begin{aligned} Q_0(\mathbf{x}[i], \Delta_i) &= 2\Delta_i \times round\left(\frac{\mathbf{x}[i]}{2\Delta_i}\right), \\ Q_1(\mathbf{x}[i], \Delta_i) &= 2\Delta_i \times round\left(\frac{\mathbf{x}[i] - \Delta_i}{2\Delta_i}\right) + \Delta_i. \end{aligned} \tag{3.2}$$

Il est à noter que l'approche P-QIM [Li et al. 07] ajoute une séquence de *dithering* dans l'équation 3.1. Le *dithering* consiste à bruiter chaque échantillon $\mathbf{x}[i]$ par une valeur, connue à l'insertion et à l'extraction, appartenant à $[-\Delta_i, +\Delta_i]$ et générée de manière pseudo-aléatoire. Dans l'approche Hyper-Cube [Chaumont et al. 11b] la sécurité du $message$ est assurée grâce au brassage (entrelaçage) pseudo-aléatoire du résultat du codage du $message$ (voir section 3.2.2 et la figure 3.1). Nous n'avons pas non plus intégré le principe d'*insertion informée* (voir chapitre 1), présent dans SCS [Eggers et al. 03] et DM-QIM [Chen et al. 01], qui consiste à *déplacer* le signal $\mathbf{x}$ vers le point de quantification sans toutefois atteindre ce point. En effet, pour le niveau de puissance des attaques que nous considérons, le principe d'*insertion informée* n'améliorerait que très faiblement la robustesse.

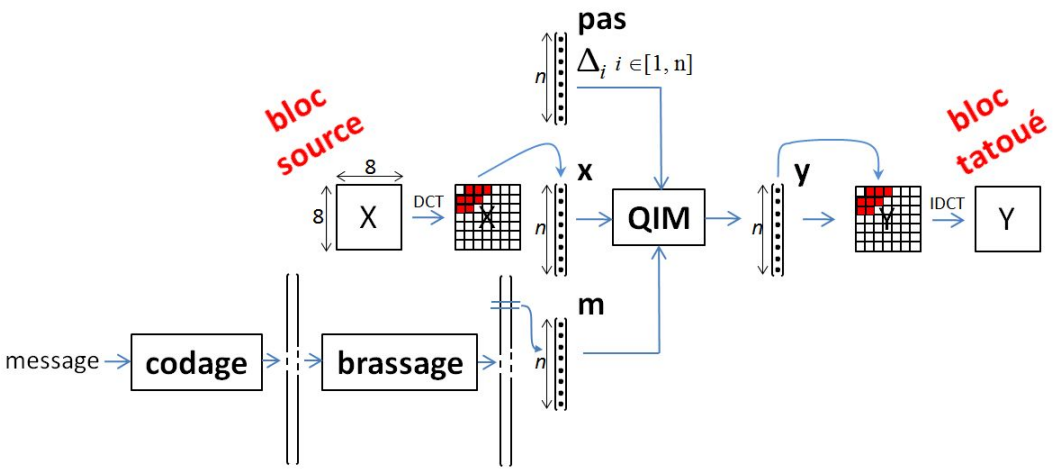


FIGURE 3.1 – Schéma général de P-QIM pour un bloc de 8×8 pixels.

3.2.1 Slack de Watson modifiée

Les *slacks* de Watson sont calculées pour chaque coefficient de chaque bloc DCT. La valeur d'une *slack* est un scalaire positif qui estime le niveau de distorsion que peut subir un coefficient sans être perceptible par le système visuel humain (plus exactement, pour un niveau de distorsion il doit y avoir un maximum de 50% d'expérimentateurs détectant la distorsion). Une faible valeur de *slack* signifie que le coefficient DCT considéré ne peut être que faiblement modifié, inversement, une grande valeur de *slack* signifie que le coefficient DCT peut être fortement modifié.

Pour un bloc DCT 8×8 donné, la *slack* de Watson **modifiée** associée au coefficient DCT $x \in \mathbb{R}$ de position $i \in \{0, \ldots, 63\}$ est [Li et al. 07] :

$$s(x, i) = max(t_L^M[i], |x|^{0.7} t_L^M[i]^{0.3}), \tag{3.3}$$

avec t_L^M le masquage de luminosité :

$$t_L^M[i] = t[i] \left(\frac{C[0]}{C_0} \right)^{0.649} \left(\frac{C_0}{128} \right), \tag{3.4}$$

avec $C[0]$ le coefficient DC du bloc DCT, C_0 la moyenne de tous les coefficients DCs de l'image, et $t[i]$ la valeur de sensibilité associée à la position i [Watson 93].

Par rapport à la *slack* de Watson [Watson 93], la fonction *slack* de Watson **modifiée** varie linéairement en échelle avec la variation en échelle du coefficient :

$$\forall x \in \mathbb{R}, i \in [0, 63], \forall \nu \in \mathbb{R}, s(\nu.x, i) = \nu.s(x, i). \tag{3.5}$$

Le pas de quantification Δ_i utilisé par les quantificateurs Q_0 et Q_1 pour effectuer le tatouage (voir équation 3.1) est :

$$\Delta_i = G_{HC} \times s(x, i),$$

avec $G_{HC} \in \mathbb{R}$ une constante permettant de régler la force d'insertion du schéma de tatouage. Une attaque valumétrique multipliant l'amplitude des pixels d'un scalaire $\nu \in \mathbb{R}_+$ entrainera une

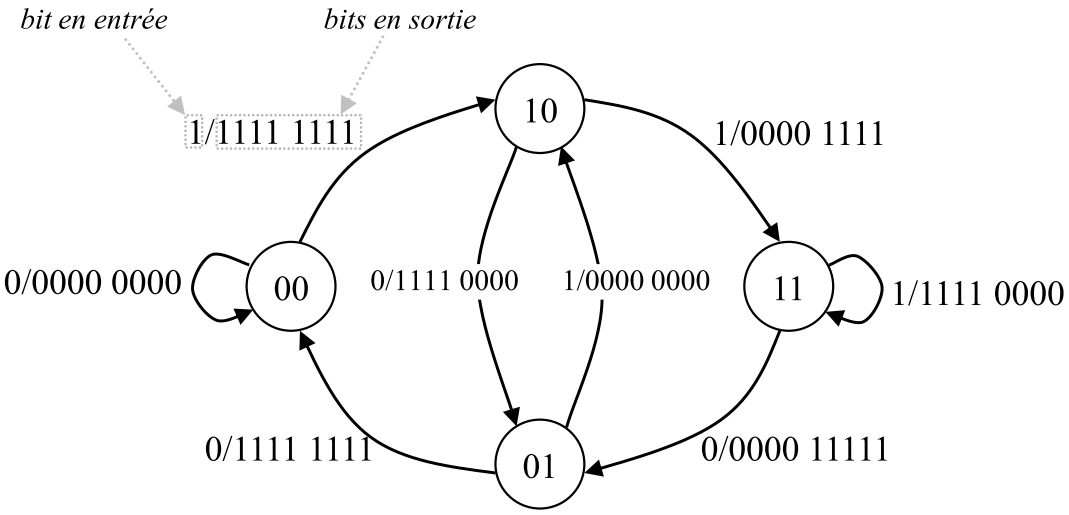


FIGURE 3.2 – Machine à état du codeur convolutif 1/8-taux 2-mémoires.

modification du pas de quantification d'un même facteur ν. Ainsi, le schéma de tatouage devient théoriquement invariant à l'attaque valumétrique et prend en compte l'aspect psychovisuel. Dans le schéma P-QIM [Li et al. 07], la *slack* $s(x, i)$ est calculée sur le bloc gauche précédemment tatoué. Dans l'approche Hyper-Cube [Chaumont et al. 11b], nous calculons cette valeur à partir du bloc gauche ou du bloc supérieur (voir section 3.2.3).

3.2.2 Codage / décodage du message

À l'insertion, le $message$ binaire est encodé par un code convolutif (dans l'algorithme P-QIM le $message$ est implicitement encodé par une répétition des bits). Le taux du code convolutif est $1/n$ et le codeur est représenté par la « boite » codage sur la figure 3.1. Le mot de code résultant du codage est alors mélangé (« boite » brassage sur la figure 3.1) [2]. Le vecteur binaire obtenu est alors découpé en petits vecteurs de taille n. Chaque vecteur de taille n est embarqué dans un bloc DCT 8×8. Sur la figure 3.1, et pour la simplicité de l'explication, tous les petits vecteurs sont notés $\mathbf{m}$. Pour un bloc DCT, le signal de tatouage $\mathbf{y}$ est obtenu en quantifiant chaque composante du signal $\mathbf{x}$ avec les quantificateurs $\{Q_{\mathbf{m}[i]}\}, i \in \{1, \ldots, n\}$ comme indiqué à l'équation 3.1.

L'utilisation de codes efficaces permet d'améliorer les performances du schéma de tatouage. Dans l'algorithme Hyper-Cube, nous insérons 1 bit dans $n = 8$ coefficients ACs. Nous utilisons un code convolutif $1/8$-taux 2-mémoires. Le code $1/8$-taux 2-mémoires est dérivé à partir d'un code convolutif $1/2$-taux 2-mémoires en répétant quatre fois chaque bit de sortie. Le schéma de la machine à état du code $1/8$-taux 2-mémoires est présenté à la figure 3.2.

À l'extraction, deux décodeurs sont mis en cascade pour décoder le message. Le premier décodeur est alimenté avec les vecteurs $\mathbf{z}$ extraits de chaque bloc DCT tatoué-attaqué. Pour chaque bloc, il y a calcul de $2n$ distances euclidiennes : les distances $\mathbf{d_0}[i] = (\mathbf{z}[i] - Q_0(\mathbf{z}[i], \Delta_i))^2, i \in \{1, \ldots, n\}$ calculées entre les coefficients $\mathbf{z}[i]$ et les mots correspondant à un bit 0 inséré, et les distances $\mathbf{d_1}[i] = (\mathbf{z}[i] - Q_1(\mathbf{z}[i], \Delta_i))^2, i \in \{1, \ldots, n\}$ calculées entre les coefficients $\mathbf{z}[i]$ et les mots correspondant à un bit 1 inséré. Le second décodeur est un décodeur convolutif. Il prend les

2. Le mélange permet de distribuer pseudo-aléatoirement les bits sur toute l'image.

distances $\mathbf{d_0}$ et $\mathbf{d_1}$ calculées pour tous les blocs DCT, dé-entrelace les distances, puis les ajoute soigneusement afin d'étiqueter les arcs du treillis du code convolutif. Ensuite le décodeur calcule le chemin du treillis ayant la distance la plus faible. Pour cela nous utilisons l'algorithme de Viterbi [Viterbi 95].

3.2.3 Calcul des slacks sur un voisinage

La méthode proposée dans P-QIM utilise pour le tatouage du bloc courant les *slacks* du bloc précédemment tatoué (le bloc à gauche du bloc courant s'il y en a un et le bloc du dessus sinon). Ainsi, il n'y a aucune dérive entre les valeurs des *slacks* à l'insertion et les valeurs des *slacks* à l'extraction. En contrepartie, pour certaines images un effet de « trainée de blocs » peut apparaitre aux endroits de fort contour. Les figures 3.3.a et 3.3.b représentent l'image 1 de la base BOWS-2 tatouée avec la technique P-QIM (seuls les 9 coefficients ACs d'un bloc sont utilisés et la distance SSIM [3] [Wang et al. 04] de tatouage est fixée à 98%). On remarque la présence d'effets de blocs dans la zone de ciel à côté de l'église. Dans cette zone de l'image, les *slacks* utilisées pour la zone de ciel sont des *slacks* calculées sur la zone de l'église. Il en résulte une mauvaise quantification psychovisuelle et donc un aspect psychovisuel désagréable.

Pour supprimer ce défaut, il faut utiliser pour chaque bloc une *slack* plus appropriée tout en évitant une trop grande dérive entre la *slack* utilisée à l'insertion et celle utilisée à l'extraction. Pour ce faire, nous déterminons pour chaque bloc, le bloc voisin le plus proche au sens de la distance L2. Le calcul est effectué dans le domaine spatial en comparant chaque bloc voisin déjà tatoué avec le bloc courant dont on a supprimé les coefficients DCT utilisés pour le tatouage. Nous limitons le voisinage de recherche pour réduire la probabilité de dérive entre les valeurs des *slacks* à l'insertion et à l'extraction.

Après différentes expérimentations, il apparait qu'un bon compromis consiste à ne considérer que 2 blocs : le bloc au dessus du bloc courant, noté bloc **B**, et le bloc à gauche du bloc courant, noté bloc **D**. Pour déterminer lequel du bloc **B** ou **D** sera utilisé pour calculer la *slack* qui servira au bloc courant, noté bloc **X** :

1. nous filtrons **X** pour obtenir $\mathbf{X}^{filtré}$. Le filtrage de **X** consiste à appliquer la DCT, mettre à zéro les n premiers coefficients ACs du parcours en zig-zag, et appliquer l'IDCT ;
2. nous calculons la distance Euclidienne entre $\mathbf{B}$ et $\mathbf{X}^{filtré}$, et également celle entre $\mathbf{D}$ et $\mathbf{X}^{filtré}$,
3. et nous retournons le bloc (**B** ou **D**) de plus petite distance.

La figure 3.4 illustre la position de **B** et **D** par rapport à $\mathbf{X}^{filtré}$.

L'algorithme Hyper-Cube permet donc de mieux choisir le bloc sur lequel les *slacks* sont calculées. Nous pouvons observer à la figure 3.3(c) qu'avec ce mécanisme de choix du « meilleur bloc », l'effet de « trainée de blocs » est totalement supprimé. Remarquons que la distance SSIM n'est pas totalement adaptée pour mesurer la dégradation liée à ces systèmes de tatouage (i.e. P-QIM, Hyper-Cube et Multi-Hyper-Cube) puisque pour les figures 3.3(a) et 3.3(c), la distance psychovisuelle SSIM est la même (98%) et pourtant il ne fait pas de doute que l'image 3.3(c) est plus agréable visuellement. La distance de Watson pourrait être utilisée, mais le reproche majeur

3. Le SSIM est l'un des modèles de mesure de distorsion les plus corrélés au Système de Vision Humain. Les valeurs de SSIM sont comprises dans l'intervalle [0,1]. Plus la dégradation est grande et plus la valeur de SSIM est faible. Une valeur de SSIM de 1 signifie que l'image n'est pas dégradée. Pour calculer la valeur de SSIM nous utilisons l'implémentation C++ de Mehdi Rabah disponible à l'adresse http ://mehdi.rabah.free.fr/SSIM/.

(a) Image 1 tatouée par P-QIM.

(b) Grossissement d'une partie de (a).

(c) Image 1 tatouée par Hyper-Cube.

(d) Grossissement d'une partie de (c).

FIGURE 3.3 – Image 1 de la base de donnée BOWS-2 tatouée à SSIM=98% et payload=1/64 ; (a) avec P-QIM ; (c) avec Hyper-Cube SSIM=98%.

que nous lui faisons est sa trop forte spécificité à mesurer des dégradations liées à la quantification JPEG. Notons que la distance de Watson, de la même façon que la distance SSIM, calcule une erreur moyenne qui ne prend pas assez en compte les fortes erreurs locales comme par exemple les « trainées de blocs ».

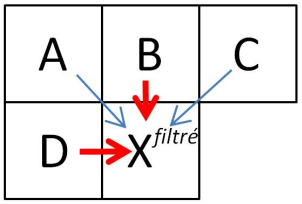


FIGURE 3.4 – Position des blocs **B** et **D** par rapport à $\mathbf{X}^{filtré}$.

3.3 Utilisation de la TCQ : l'algorithme Multi-Hyper-Cube

Dans [Chaumont et al. 11a], nous proposons d'utiliser un module TCQ (Quantification codée par treillis) en remplacement du module QIM (voir figure 3.1), pour améliorer les performances de l'approche Hyper-Cube. Cela permet de faire le pont entre l'approche basée treillis (DPTC) et les approches basées quantification (P-QIM [Li et al. 07]). Le Guelvouit [Le Guelvouit 09] a également proposé une approche basée TCQ, mais celle-ci n'est pas robuste aux attaques valumétriques. Abrardo *et al.* [Abrardo et al. 06] ont proposé une approche utilisant la TCQ qui est robuste aux attaques valumétriques, mais l'approche n'a pas été évaluée sur des images (mais sur des signaux gaussiens), et les aspects psychovisuels n'ont pas été pris en compte.

La TCQ (Quantification codée par treillis) est une technique de quantification utilisant un ensemble de quantificateurs organisés au sein d'une machine à états et agissant de la même manière qu'un codeur convolutif. La machine à états représente les transitions possibles étant donnée une séquence de coefficients en entrée. La machine à états peut être représentée dans son évolution temporelle par un treillis. Habituellement, un treillis est construit en plaçant tous les états en colonne. Chaque transition est représentée par un arc reliant l'état à l'instant t et l'état à l'instant $t+1$. À chaque arc est associé un quantificateur. Dans le cas du tatouage par TCQ, un coefficient $\mathbf{x}[i] \in \mathbb{R}$ et un bit à insérer $\mathbf{m}[i] \in \{0,1\}$ en entrée provoquent une transition vers un nouvel état et génèrent en sortie la quantification du coefficient $\mathbf{x}[i]$ qui n'est rien d'autre que le coefficient tatoué $\mathbf{y}[i]$. La figure 3.5 illustre le cas d'un treillis à 4 états.

De manière plus formelle, la fonction de transition f du treillis est telle que :

$$\begin{array}{rcl} \mathcal{S} \times \{0,1\} & \longrightarrow & \mathcal{S} \\ f : (s, \mathbf{m}[i]) & \longmapsto & s', \end{array}$$

avec $\mathcal{S} = \{0, 1, ..., S-1\}$ l'ensemble des états du treillis, $s \in \mathcal{S}$ l'origine de l'arc de transition, $s' \in \mathcal{S}$ l'extrémité de l'arc de transition, et $\mathbf{m}[i], i \in \{1, \ldots, n\}$, le $i^{ème}$ bit de $\mathbf{m}$.

Chaque arc est étiqueté par un quantificateur :

$$\begin{array}{rcl} \mathcal{S} \times \{0,1\} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} & \longrightarrow & \mathbb{R} \\ Q : (s, \mathbf{m}[i], \mathbf{x}[i], \Delta_i) & \longmapsto & \mathbf{y}[i], \end{array}$$

avec Δ_i le pas de quantification. Pour simplifier, nous notons les quantificateurs $Q_{\mathbf{m}[i]}(s, \mathbf{x}[i], \Delta_i)$. Sur la figure 3.5, chaque arc est étiqueté par un unique quantificateur.

Les quantificateurs $Q_{\mathbf{m}[i]}(s, \mathbf{x}[i], \Delta_i)$ sont définis pour un état $s \in \mathcal{S}$, pour un coefficient $\mathbf{x}[i]$,

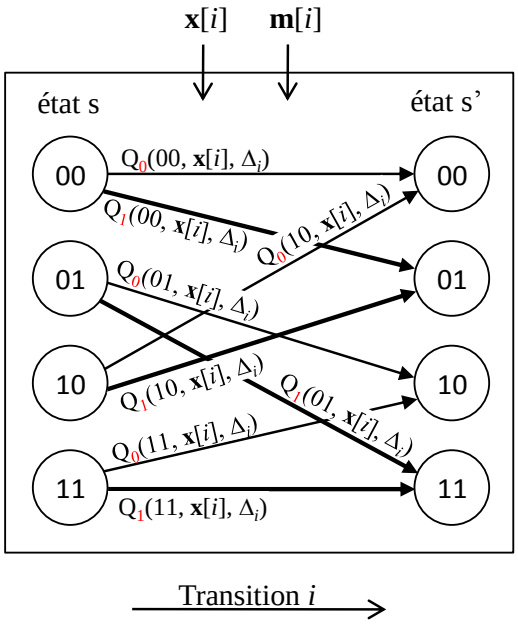


FIGURE 3.5 – La $i^{ème}$ transition dans un treillis à 4 états.

pour un pas de quantification Δ_i, et pour un bit $\mathbf{m}[i]$ valant 0 ou 1 par :

$$\begin{aligned} Q_0(\mathbf{x}[i], s, \Delta_i) &= 2\Delta_i \times round\left(\frac{\mathbf{x}[i] - \delta}{2\Delta_i}\right) + \delta, \\ Q_1(\mathbf{x}[i], s, \Delta_i) &= 2\Delta_i \times round\left(\frac{\mathbf{x}[i] - \Delta_i - \delta}{2\Delta_i}\right) + \Delta_i + \delta, \\ avec\ \delta &= \frac{\Delta_i \times s}{S}. \end{aligned} \tag{3.6}$$

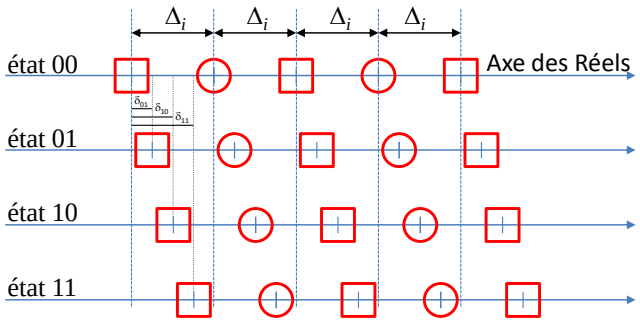


FIGURE 3.6 – Illustration d'un réseau (*lattice*) pour un treillis à quatre états. Les cercles rouges représentent les mots de code obtenus à l'aide des quantificateurs Q_0 (équation 3.6) et les carrés rouges représentent les mots de code obtenus à l'aide des quantificateurs Q_1 (équation 3.6).

La figure 3.6 montre la partition de l'axe des réels dans le cas d'un treillis à quatre états.

Les cercles rouges représentent les mots de code associés aux bits d'entrée de valeur 0 et les carrés rouges représentent les mots de code associés aux bits d'entrée de valeur 1. Pour un état donné $s \in \mathcal{S}$, la distance minimale entre les mots de code pour une transition 0 et les mots de code pour une transition 1 est égale à Δ_i. Nous pouvons également remarquer que les mots de code sont légèrement translatés entre états. Cette translation provient du terme δ de l'équation 3.6. Cette translation rend l'approche TCQ intéressante, car en fonction du chemin emprunté pour traverser le treillis, la quantification n'est pas la même. Parmi toutes les transitions possibles, on a alors plus de chance de trouver un mot de code très proche du coefficient hôte que lorsque nous n'avions qu'un seul quantificateur (cas du QIM). Pour une robustesse fixée, la distorsion obtenue en utilisant une approche par TCQ est alors inférieure à celle d'une approche par QIM. Le terme de translation est donc important pour que le système soit fonctionnel.

L'insertion dans un bloc DCT d'un petit vecteur $\mathbf{m}$ est obtenue en élaguant pour chaque transition i les arcs ne correspondant pas au bit $\mathbf{m}[i]$ puis en déterminant le chemin minimisant l'erreur $\sum_{i=1}^{i=n}(\mathbf{y}[i]-\mathbf{x}[i])^2$. Le chemin minimisant l'erreur est obtenu est utilisant l'algorithme de Viterbi [Viterbi 95]. Pour le décodage, le treillis n'est pas élagué et l'algorithme de Viterbi est utilisé pour retourner l'estimation du vecteur binaire $\mathbf{m}$. L'ensemble des petits vecteurs binaires $\mathbf{m}$ est concaténé, puis désentrelacé, et enfin transmis au deuxième décodeur qui retourne le $message$.

3.4 Résultats

Les expérimentations ont été réalisées sur les 100 premières images de la base de données de BOWS-2 [4] avec des images redimensionnées en 256×256 [5].

Quatre attaques à la robustesse ont été expérimentées : l'attaque par ajout de bruit Gaussien, l'attaque par filtrage, l'attaque valumétrique de changement d'échelle, et l'attaque par compression JPEG. Le BER est calculé pour chaque attaque. Nous avons fixé la dégradation à une valeur SSIM de 98% [Wang et al. 04].

Les deux grandes familles de tatouage robuste multi-bits sont les codes en réseau (*lattice*) également connus sous le nom de codes basés quantification, et les codes à papiers sales (*Dirty Paper Trellis Codes*). Afin d'analyser la performance de notre approche, nommée **Multi-Hyper-Cube**, nous la mettons en compétition avec des algorithmes représentatifs des deux grandes familles. L'approche par code à papiers sales [Miller et al. 04] est représentée par le **PR-RB-DPTC** [Chaumont 09b]. Cet algorithme possède une faible complexité calculatoire ce qui nous permet de mener les expérimentations en un temps inférieur à une heure (voir chapitre 2 pour la présentation de PR-RB-DPTC). L'approche basée quantification est représentée par l'**Hyper-Cube** [Chaumont et al. 11b]. L'algorithme Hyper-Cube est une adaptation de l'algorithme P-QIM et fait partie des algorithmes les plus performants. Enfin, nous avons également intégré dans les tests l'approche par **Turbo-TCQ** [Le Guelvouit 09] qui fait le lien entre les deux familles (codes à papiers sales et codes en réseau) et utilise le principe turbo provenant des codes correcteurs.

Notons que ces quatre algorithmes sont testés sur des images réelles, et non sur des signaux gaussiens. En outre, ils ont une complexité faible qui est de l'ordre de $\mathcal{O}(taille)$ avec $taille$ la taille de l'image. Le temps de calcul est de l'ordre de quelques secondes pour une image CIF 360×288 sur un ordinateur portable à faible coût (CPU Intel Core 2, P8600, 2.4 GHz).

Les résultats de l'attaque valumétrique par changement d'échelle sont donnés à la figure 3.7.

4. La base de données de BOWS-2 est téléchargeable à l'adresse http ://bows2.gipsa-lab.inpg.fr/.

5. Le sous-échantillonnage d'images a été réalisé avec le programme xnview et utilisant l'interpolation de Lanczos.

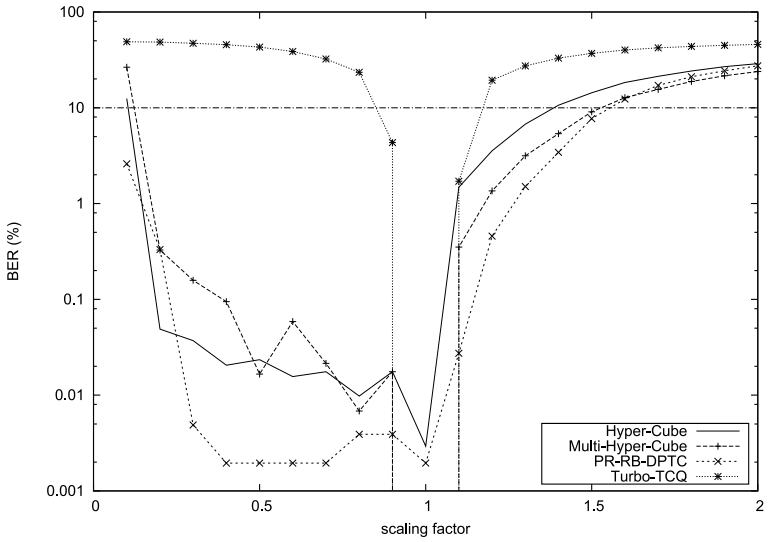


FIGURE 3.7 – BER pour une attaque valumétrique de changement d'échelle.

Pour toutes les autres attaques, la Turbo-TCQ surpasse les autres approches, mais pour l'attaque valumétrique, la Turbo-TCQ n'est pas du tout robuste. Le Guelvouit avait observé ce phénomène dans [Le Guelvouit 09] et c'est un comportement classique des approches basées quantification. Afin de supprimer cette sensibilité, nous pouvons par exemple utiliser le principe RDM (Rational Dither Modulation). Le principe RDM est intégré dans les approches Hyper-Cube et Multi-Hyper-Cube, et nous observons effectivement un meilleur comportement face à l'attaque valumétrique. Pour une modification valumétrique d'un facteur de 0.9, il y a en moyenne 0,018 bit erroné sur 100 bits transmis pour l'approche Multi-Hyper-Cube tandis qu'il y a 4,33 bits erronés sur 100 bits transmis pour l'approche Turbo-TCQ. Notons que les courbes de l'Hyper-Cube et du Multi-Hyper-Cube sont très proches avec un léger avantage pour le Multi-Hyper-Cube qui possède un BER nul quand il n'y a pas d'attaque. Enfin, notons que le PR-RB-DPTC [Chaumont 09b] possède la meilleure performance face à l'attaque valumétrique, en particulier pour une attaque valumétrique d'un facteur inférieur à 1. Ce très bon comportement était observé dans [Miller et al. 04].

Les résultats de l'attaque par compression JPEG sont donnés à la figure 3.8. Habituellement, les courbes de l'Hyper-Cube (et Multi-Hyper-Cube) et de PR-RB-DPTC sont souvent très proches, excepté pour l'attaque par compression JPEG où le PR-RB-DPTC n'est pas assez robuste. L'algorithme original DPTC [Miller et al. 04] est plus robuste, mais sa complexité calculatoire le rend peu pratique pour un payload de 1 bit inséré dans 64 pixels. En outre, les autres propositions d'améliorations comme celle de [Lin et al. 05] ne sont pas efficaces dans la pratique (voir [Chaumont 10a]). Cela montre que dans la pratique, la technique Hyper-Cube (et Multi-Hyper-Cube) est plus intéressante que l'approche PR-RB-DPTC lorsque le payload est élevé.

Les résultats sont donnés à la figure 3.9 pour l'attaque par ajout de bruit gaussien, et à la figure 3.10 pour l'attaque par filtrage. L'approche par Turbo-TCQ a de très bonnes performances, les autres approches ont des performances moindres. L'approche Multi-Hyper-Cube est intéressante à faible puissance d'attaque puisque le BER est nul.

Pour résumer, les deux approches qui possèdent de bonnes performances quelles que soient les attaques sont l'Hyper-Cube et le Multi-Hyper-Cube. Le Multi-Hyper-Cube améliore significativement l'approche Hyper-Cube quand il y a une attaque de puissance très faible. En effet,

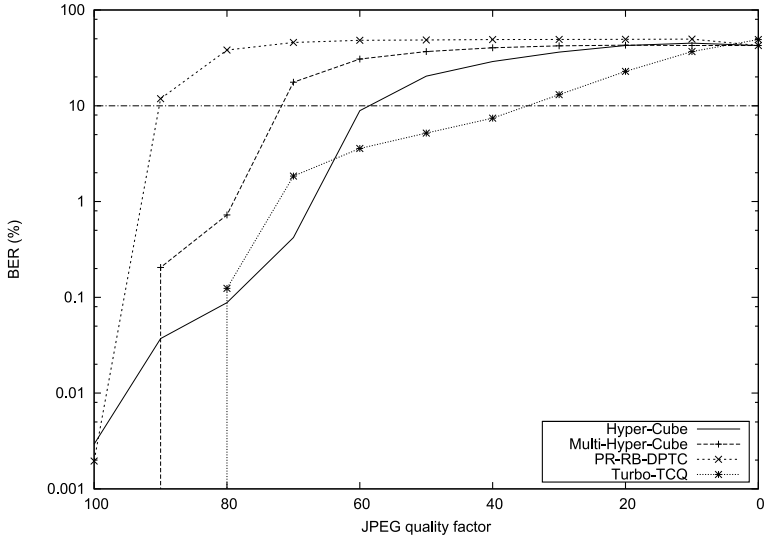


FIGURE 3.8 – BER pour une attaque par compression JPEG.

pour l'ensemble des 100 images, tous les bits ont été récupérés pour des attaques de faible puissance. Nous ne pouvons cependant pas conclure que l'algorithme Multi-Hyper-Cube surpasse l'algorithme Hyper-Cube. En effet, lorsque les puissances d'attaque sont plus fortes, le BER du Multi-Hyper-Cube n'est pas toujours inférieur au BER de l'Hyper-Cube. L'utilisation d'un module TCQ permet d'ajouter plus de quantificateurs, mais en contrepartie, cela ajoute sans doute plus d'instabilité de décodage lorsqu'il y a une attaque de puissance moyenne.

Le Multi-Hyper-Cube a des comportements qui sont similaires à ceux d'un code correcteur. Lorsque la puissance d'attaque est trop forte, la probabilité d'erreur est rapidement supérieure à 0,1 bit erroné sur 100 bits transmis. Cette croissance rapide du BER est encore plus visible avec l'approche par Turbo-TCQ pour les attaques de filtrage et valumétriques. Le BER augmente soudainement à des valeurs supérieures à 1 bit erroné sur 100 bits transmis. C'est un comportement classique avec des approches utilisant des codes correcteurs quasi-optimaux. En conclusion, l'approche par Multi-Hyper-Cube donne un BER nul pour des attaques de faible puissance, mais n'est pas meilleur que l'Hyper-Cube pour les attaques de puissance moyenne.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'algorithme basé quantification appelé Hyper-Cube. Nous avons également évalué le remplacement du module de tatouage QIM par un module TCQ. La TCQ permet d'augmenter le nombre de quantificateurs. Cet ajout permet d'améliorer sensiblement la robustesse. Ce nouvel algorithme, appelé Multi-Hyper-Cube est comparé à trois algorithmes représentatifs de l'état de l'art dont le payload est de 1 bit pour 64 pixels et qui prennent en compte l'aspect psychovisuel. Les résultats montrent que le schéma résiste correctement aux attaques bruit gaussien, filtrage, compression JPEG, et valumétriques. Ce comportement constant quel que soit l'attaque n'est pas observé pour les autres algorithmes. L'algorithme PR-RB-DPTC est sensible à la compression JPEG, et l'algorithme Turbo-TCQ est sensible à l'attaque valumétrique. Notons finalement que pour les attaques de faible puissance, le BER de l'approche Multi-

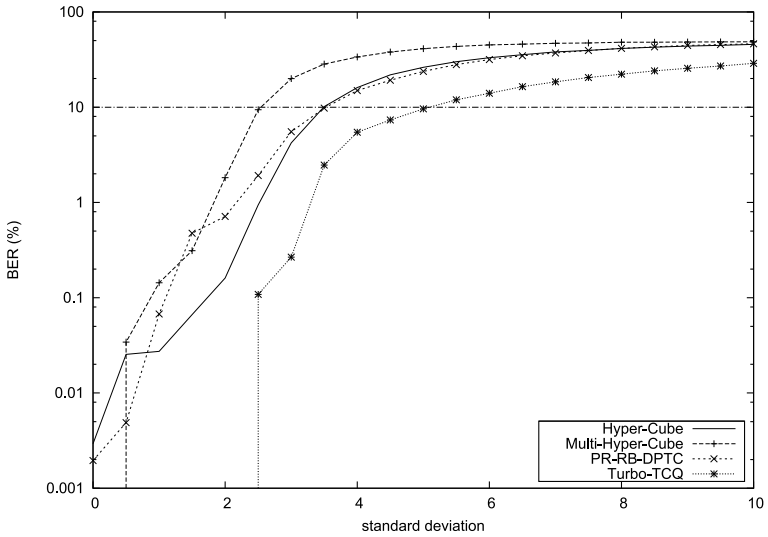


FIGURE 3.9 – BER pour une attaque par ajout de bruit gaussien.

Hyper-Cube est nul.

De nombreuses améliorations peuvent encore être apportées au schéma Multi-Hyper-Cube. Les coefficients DCT utilisés pour le tatouage ont été choisis empiriquement. Il faudrait déterminer l'ensemble de coefficients permettant d'obtenir la plus grande robustesse. Cette étude devrait être menée conjointement avec la conception du code correcteur. Le choix d'un code correcteur à faible densité de parité de contrôle (LDPC) ou un turbo-code permettrait probablement d'atteindre des performances s'approchant de celles de l'algorithme Turbo-TCQ. Une gestion habile des deux codeurs / décodeurs pourrait également augmenter les performances globales. Nous pensons également que l'intégration d'un QIM vectoriel [Bardyn et al. 09], l'ajout d'étalement, et/ou l'utilisation d'une *insertion informée* pourrait améliorer l'approche. On peut aussi envisager de rendre le schéma robuste à des attaques supplémentaires. Les auteurs de [Zhu et al. 08] proposent par exemple de cumuler robustesse au changement d'échelle et robustesse au changement constant de luminosité. La robustesse globale est ainsi améliorée. Enfin, les *slacks* de Watson ne sont pas totalement satisfaisantes car leur robustesse aux attaques n'est pas toujours assurée. Il y a donc un défi à relever concernant la définition de modèles psychovisuels robustes ou peu sensibles aux attaques.

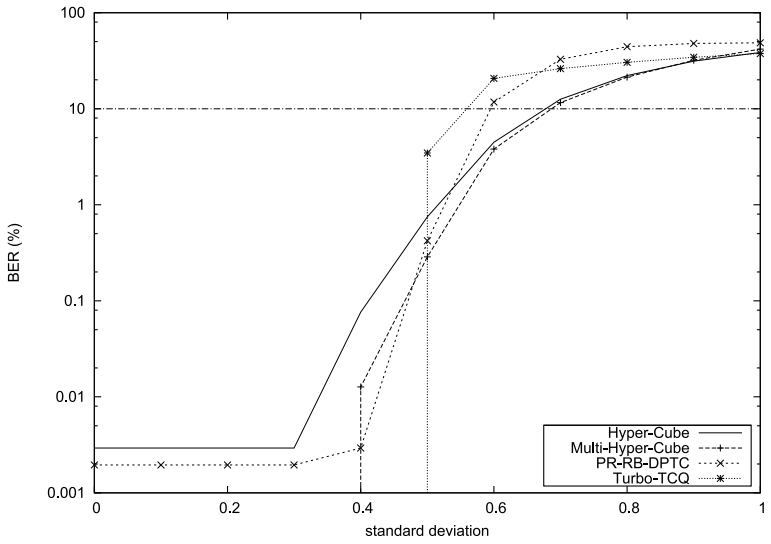


FIGURE 3.10 – BER pour une attaque par filtrage gaussien.

Deuxième partie

Le tatouage conjointement à la compression

Chapitre 4

Le tatouage conjoint à la compression

Résumé

Ce chapitre traite du tatouage conjoint à la compression et rappelle brièvement quelques notions liées à la compression images JPEG2000 et la compression vidéos H.264. Comme nous l'avons déjà plusieurs fois évoqué, la plupart des images, des vidéos, etc, sont stockées et échangées sous une forme compressée et le plus souvent la compression se fait avec perte. Si le tatouage est effectué avant l'étape de compression, alors le signal de tatouage subit une première dégradation (attaque) alors que le média (image, son, vidéo...) n'a pas encore été distribué. Il apparait donc naturel de faire conjointement la compression et le tatouage. Dans les deux chapitres suivants, nous présenterons une approche de tatouage conjointe à une compression JPEG2000, et une approche de tatouage conjointement à une compression H.264. Ce chapitre rappelle les grandes étapes de la compression JPEG2000 et H.264 et donne les grandes classes d'approche de tatouage pour ces deux formats.

4.1 Brève présentation de JPEG2000

JPEG2000 [JPE00] est un standard de compression développé par le Joint Photographic Experts Group qui prend en charge la compression avec perte ou sans perte des images en niveaux de gris ou en couleur. Initialement, ce standard de compression devait remplacer le standard JPEG [JPE91] mais la complexité calculatoire des codeurs JPEG2000 et la réticence de l'industrie à adopter un nouveau standard ont fait qu'il a tardé à être adopté. Son essor récent vient principalement de l'industrie du cinéma numérique haute définition.

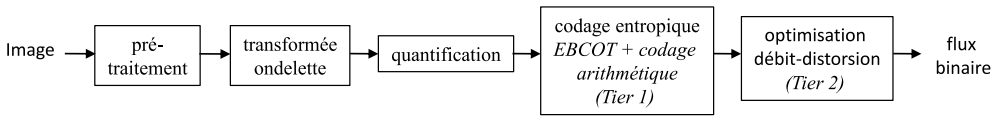


FIGURE 4.1 – Schéma reprenant les principales étapes d'un codeur JPEG2000.

Les principales étapes du codage JPEG2000 avec pertes sont données sur la figure 4.1. JPEG-2000 laisse la possibilité de changer l'espace couleur de l'image et d'adapter les données d'entrée (étape de pré-traitement). La première grande étape consiste à appliquer une transformée ondelette avec ou sans perte. Lorsque l'on utilise JPEG2000 dans sa version avec pertes, on a tendance à

utiliser la transformée en ondelette 9/7 de Daubechies [Daubechies et al. 98]. Notons que la norme JPEG2000 laisse alors la possibilité de découper l'image en zones rectangulaires (les tuiles) qui seront traitées séparément. Cette option est intéressante dans le cas d'images de grandes dimensions qui nécessitent beaucoup de ressources mémoire et processeur. La deuxième grande étape consiste à quantifier les valeurs des coefficients ondelette. Le standard propose d'utiliser un quantificateur scalaire uniforme à zone morte. Dans la partie 2 du standard (partie extension) [JPE04] il est possible d'utiliser une Quantification Codée par Treillis (Treillis Coded Quantization : TCQ). Nous reviendrons au chapitre 5 sur la TCQ puisque c'est cette technique de quantification que nous utiliserons pour réaliser le tatouage conjointement à la compression. La troisième partie consiste à effectuer le codage entropique en appliquant le codage par plans de bits EBCOT (Embedded Block Coding with Optimal Truncation) [Taubman 00] suivi d'un codage arithmétique. La dernière étape consiste à regrouper les données en paquet en utilisant une politique d'optimisation débit-distorsion. La construction des paquets permet de hiérarchiser l'information en résolution, en débit ou en qualité. Cette dernière étape est appelée la phase d'allocation de débit et certaines informations (passes de codage) sont supprimées pour augmenter le taux de compression. Cette étape introduit une dégradation supplémentaire des données, en plus des dégradations survenant lors de l'étape de quantification. Cette dégradation est à prendre en compte lors de la conception d'un schéma de tatouage joint. Une fois que les paquets sont obtenus, on les assemble pour former le flux JPEG2000.

4.2 Tatouage dans JPEG2000

Pour faciliter la classification des différentes approches de tatouage, on peut les différentier en fonction du lieu où le tatouage est effectué lors de la compression : avant la compression, pendant ou après la quantification, et lors du codage entropique.

Avant la compression, nous retrouvons les approches images comme l'étalement de spectre [Cox et al. 97], le tatouage par DPTC [Miller et al. 04], le tatouage PQIM [Li et al. 07] (voir la partie I du manuscrit). Ces approches peuvent d'ailleurs être appliquées après l'étape de transformation ondelette de JPEG2000. On peut par exemple citer l'approche Ouled Zaid *et al.* qui consiste à effectuer un tatouage des coefficients ondelette en utilisant une approche de type QIM [OuledZaid et al. 09].

La plupart des algorithmes de tatouage réalisés pendant ou après la phase de quantification utilisent une approche par quantification [Meerwald 01, Li et al. 03] de type QIM. Meerwald effectue l'insertion par QIM avec *dithering*, après la phase de quantification et de région d'intérêt. Un même bit est inséré par *code-block*. Li et Zahang [Li et al. 03] insèrent également après l'étape de quantification. Pour faire survivre le signal de tatouage à l'étape d'allocation de débit, le pas de quantification est déterminé à partir du débit cible fixé par l'utilisateur.

On peut également réaliser une insertion de données cachées pendant ou après le codage entropique. Dans ce cas, l'insertion n'est pas robuste. Chen *et al.* [Chen et al. 10] ont proposé de réaliser l'opération de dissimulation de données directement au niveau du flux binaire JPEG2000, après la phase d'allocation de débit, en simulant une nouvelle phase d'allocation de débit. Le nouveau débit binaire doit être plus petit que le débit cible. Cette nouvelle phase induit une réorganisation des couches de qualité de manière à libérer de l'espace. Cet espace est ensuite utilisé pour dissimuler des données. Su *et al.* [Su et al. 03] insèrent l'information cachée dans le flux binaire JPEG2000 en exploitant l'option *lazy mode* de JPEG2000. L'opération de dissimulation de données est égale-

ment effectuée après la phase d'allocation de débit en modifiant les bits se trouvant au niveau des passes de codage de raffinement. Le principal inconvénient de cette méthode est qu'elle ne peut s'effectuer que sous le mode *lazy*. De plus, il est nécessaire que le débit cible soit supérieur à 2 bpp afin de permettre l'activation de ce mode.

4.3 Brève présentation de H.264

H.264 ou MPEG-4 Part 10 [H2603] est le codeur de l'état-de-l'art pour le codage vidéo [1]. La première version du standard a été approuvée en 2003. La norme provient de deux organisations : l'ITU-T et l'ISO/IEC. Le codage H.264 permet d'obtenir jusqu'à 50% de gain en débit par rapport à un codage MPEG2 ou MPEG4-Part 2 simple profile [Richardson 10]. Nous ne rentrerons pas dans les détails des différents profils de H.264 ni dans les améliorations qui ont été proposées par rapport à MPEG2 et MPEG4 Part 2. Ce qu'il faut retenir c'est que depuis la normalisation de MPEG1 en 1988, le mécanisme de codage repose sur la décomposition de l'image en blocs, puis par l'application de prédictions (spatiales ou temporelles), pour finir par la quantification et le codage des coefficients. On parle d'ailleurs de codeur basé blocs. Pour simplifier l'explication, nous donnons ici un schéma extrêmement simplifié reprenant les étapes importantes du codage vidéo sur la Figure 4.2.

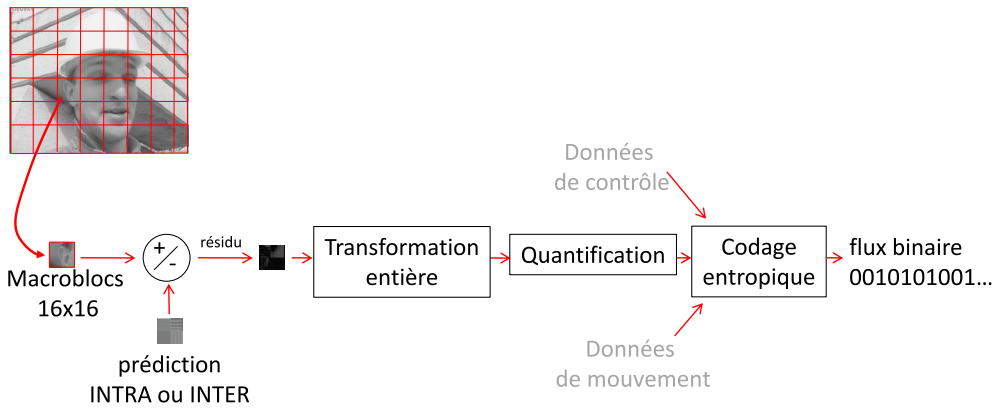


FIGURE 4.2 – Schéma reprenant les grandes étapes d'un codeur basé bloc.

L'image courante à coder est divisée en macroblocs de taille 16×16. Chaque macrobloc est composé d'un nombre variable de blocs qui vont être prédits temporellement ou spatialement selon que la « frame » est une « frame » Intra ou une « frame » Inter. La figure 4.3 donne l'exemple de différentes prédictions Intra dans le cas où les blocs sont de taille 4×4. Le bloc de taille 4×4 est prédit en utilisant l'une des méthodes de prédiction et l'on calcule alors la différence du bloc courant par le bloc de prédiction. On obtient donc un bloc composé de résidus et celui-ci va alors subir une transformation fréquentielle (la transformation entière). Le bloc obtenu est alors quantifié puis les coefficients sont codés entropiquement par le codeur CAVLC ou CABAC.

1. Les groupes d'experts de l'ITU-T (Video Coding Experts Group : VCEG) et de l'ISO/IEC (Moving Picture Experts Group : MPEG) ont lancé un appel à proposition en janvier 2010 pour définir le futur standard de compression. Certaines des propositions ont permis, dans certains cas, de réduire le débit par deux par rapport à H.264 High Profile à même qualité visuelle. L'ITU-T et l'ISO/IEC ont donc lancé la standardisation du nouveau codeur « High Efficiency Video Coding : HEVC ». La norme de ce nouveau standard est prévue pour juillet 2012. Il est fort probable que certaines

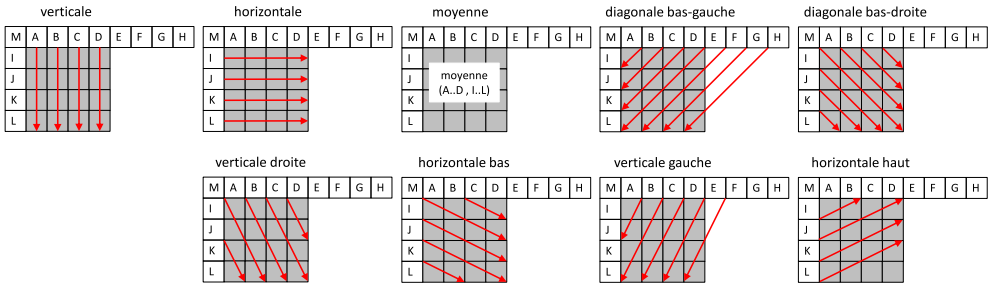


FIGURE 4.3 – Les prédictions utilisées pour un bloc 4×4 dans H.264/AVC.

Dans le cas d'une prédiction temporelle un bloc résidu est également calculé. Le processus de transformation, quantification, et codage est alors sensiblement le même. Lorsqu'il y a prédiction temporelle (cas des « frames » Inter) la prédiction consiste à déterminer dans une « frame » déjà codée (précédente ou suivante temporellement) le bloc le plus proche en distance absolue ou L2. La position de ce bloc le plus proche est alors représentée par un vecteur de déplacement qui est relatif au bloc courant que l'on souhaite prédire. Ce vecteur déplacement (vecteur de mouvement) devra lui aussi être codé.

Le diagramme 4.4 donne le diagramme complet d'un codeur et d'un décodeur H.264. Un pixel $\mathbf{f}(i,j)$ provenant d'un bloc est prédit par un pixel précédemment codé-décodé (provenant d'un bloc déjà codé-décodé). On obtient donc un coefficient de résidu $\mathbf{e}(i,j)$. Le coefficient de résidu est alors transformé via la transformation entière. On obtient le coefficient $\mathbf{g}(u,v)$. Le coefficient $\mathbf{g}(u,v)$ est alors quantifié, puis codé par le codeur entropique et enfin décodé (boucle de décodage). On peut constater que le codeur a besoin de décoder le pixel pour que celui-ci puisse servir de prédicteur pour des pixels non encore codés. Pour ce que nous avons besoin de faire par la suite, il n'est pas utile de rentrer plus dans la description du codec H.264. Nous allons maintenant donner quelques références sur le tatouage au sein d'une vidéo H.264.

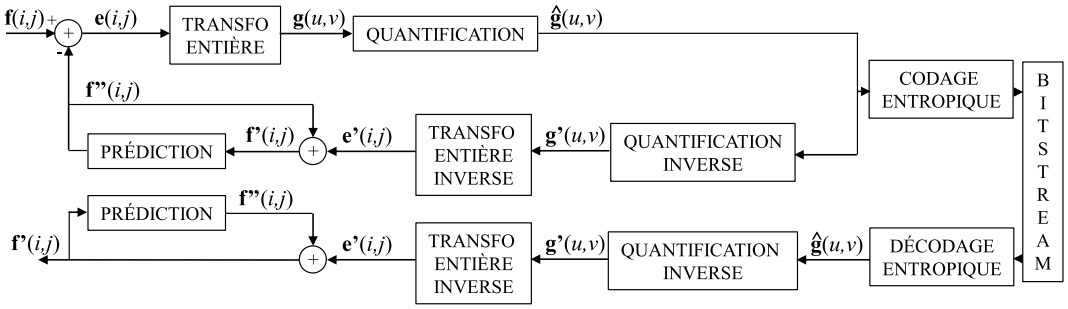


FIGURE 4.4 – Diagramme détaillé des étapes d'un codeur H.264.

4.4 Tatouage dans un flux vidéo

Pour faciliter la classification des différentes approches, on peut les différentier en fonction du lieu où le tatouage est effectué lors de la compression de la vidéo : avant la compression, avant la

propositions testées sur le logiciel KTA [KTA] soient reprises dans ce nouveau standard.

quantification, après la quantification et lors du codage entropique.

Avant la compression nous retrouvons les approches images comme l'étalement de spectre [Cox et al. 97], le tatouage par DPTC [Miller et al. 04], le tatouage PQIM [Li et al. 07] (voir la partie I du manuscrit). Il existe également des approches qui prennent en compte la dimension temporelle comme le tatouage dans l'histogramme de luminances moyenne des « frames » [Haitsma et al. 01, Chen et al. 09] ou bien le tatouage sur un volume fréquentiel comme par exemple sur une DFT 3D [Deguillaume et al. 99].

Avant la phase de quantification il est possible de modifier les coefficients DCT de luminances en prenant soin d'avoir un paramètre de puissance d'insertion calculé en fonction du paramètre de quantification choisi par l'utilisateur pour effectuer la compression. On peut citer par exemple la très intelligente proposition de Golikeri *et al.* [Golikeri et al. 07]. Les auteurs de [Golikeri et al. 07] proposent d'insèrer 1 bit par macro-bloc, d'utiliser un masque psycho-visuel et d'utiliser une approche mixant étalement et quantification (la technique de tatouage est le ST-SCS). Cette approche est d'ailleurs l'une des approches intégrées à un flux vidéo (H.264) parmi les plus robustes. On peut également insérer le signal dans les vecteurs mouvement [Zhang et al. 01]. Enfin, Linnartz et Talstra [Linnartz et al. 98] ont proposé une méthode consistant à modifier la structure de GOP (Group Of Picture) en variant le nombre de « frames » I-P-B au sein d'un GOP. Cette dernière méthode n'est pas robuste à un ré-encodage.

Après la phase de quantification, on peut distinguer deux problèmes différents. Soit l'insertion est effectuée sur un flux en cours de codage, soit l'insertion est effectuée sur un flux déjà encodé. Pour une insertion dans un flux déjà encodé, Noorkami et Mersereau [Noorkami et al. 08] ont proposé une très belle approche : robuste, 0-bits, utilisant un masque psychovisuel, avec une insertion dans les coefficients ACs et une détection pouvant être effectuée sans connaissance des positions des coefficients tatoués. Nous avons également proposé une méthode qui a lieu après la phase de quantification [Shahid et al. 10] et prend en compte l'aspect performance de compression en utilisant l'optimisation débit-distorsion. Nous reviendrons sur le principe de tatouage utilisé dans cette approche dans le chapitre 6. L'insertion peut également être effectuée sur un flux déjà compressé. La difficulté vient du fait que l'on a peu de marge pour faire des modifications. On peut citer par exemple [Hartung et al. 98] et [Gong et al. 08]. Ces techniques sont intéressantes lorsque que l'on souhaite intégrer un signal de tatouage sans avoir à décoder, tatouer, puis ré-encoder la vidéo.

Enfin, il est possible de faire le tatouage durant la phase de codage entropique. Ce genre d'approche est difficile à mettre en place, car il faut rentrer dans la structure très complexe de CABAC ou CAVLC. Mobasseri et Raikar [Mobasseri et al. 07], Zou et Bloom [Zou et al. 09] entre autres ont proposé ce genre d'approche. Le payload est évidemment très faible et ces schémas ne sont pas robustes. En contrepartie, le débit du fichier obtenu n'est pas modifié. Il faut également noter que certaines approches ont tendance à générer une dérive (drift) entre ce qui a été codé et ce qui sera décodé. Cela implique alors une dégradation significative de la qualité du signal vidéo reconstruit.

De ce que nous venons de présenter, que cela soit pour le tatouage dans JPEG2000 ou dans H.264, les mécanismes les plus robustes sont ceux localisés juste avant ou après la phase de quantification. Parmi toutes les solutions proposées, la plupart « luttent » contre le module de quantification et le module d'allocation de débit. Dans les deux chapitres suivants, nous proposons d'effectuer le tatouage conjointement avec le module de quantification. L'objectif de cette collaboration entre la quantification et le tatouage est d'obtenir de meilleures performances en robustesse (pour le module de tatouage) et également en débit-distorsion (pour le module de compression). Le chapitre 5 propose un mécanisme de tatouage au sein de JPEG2000 en effectuant conjointement la

quantification et le tatouage. Le chapitre 6 traite de l'intégration d'un mécanisme de tatouage au sein de H.264 en intégrant l'impact du signal de tatouage dans l'optimisation débit-distorsion.

Chapitre 5

Une approche de tatouage conjointe à la compression JPEG2000

Résumé

Dans ce chapitre nous présentons un schéma conjoint de quantification et de tatouage au sein de JPEG2000. Cette approche a été publiée à EUSIPCO 2011 [Goudia et al. 11] et est également détaillée dans le manuscrit de thèse de Dalila Goudia [Goudia 11]. Les schémas de tatouage au sein de JPEG 2000 (voir chapitre 4) ajoutent tous un module supplémentaire au codeur. Notre schéma, via l'utilisation de la TCQ (quantification codée par treillis), permet simultanément de tatouer et de quantifier. De plus, l'insertion du message réduit faiblement la qualité, le taux de compression varie peu, et le schéma est robuste à la phase de contrôle de taux.

5.1 Introduction

En effectuant simultanément l'étape de tatouage et l'étape de quantification, nous réglons à la fois la robustesse du signal de tatouage vis-à-vis de la quantification et la distorsion additionnelle due à l'insertion du signal de tatouage. L'approche que nous proposons consiste à modifier légèrement l'étape de quantification basée TCQ de JPEG2000 partie 2 [JPE04] pour réaliser l'insertion. En section 5.2 nous présentons la quantification TCQ dans JPEG2000 partie 2, en section 5.3 nous détaillons le schéma, en section 5.4 nous analysons les résultats expérimentaux, puis nous concluons.

5.2 La Quantification Codée par Treillis (TCQ)

La Quantification Codée par Treillis (TCQ) est une technique de quantification rapide proposée par Marcelin et Fisher [Marcellin et al. 90] basée sur l'idée de partitionnement d'ensembles de Ungerboeck [Ungerboeck. 82] pour combiner la modulation et le codage canal. La TCQ consiste à partitionner un dictionnaire de quantification en sous-dictionnaires complémentaires puis à attribuer ces sous-dictionnaires aux transitions d'un treillis. La TCQ de JPEG2000 utilise quatre sous-dictionnaires qui sont notés D_0, D_1, D_2 et D_3. Chaque arc du treillis est donc étiqueté par un de ces sous-dictionnaires.

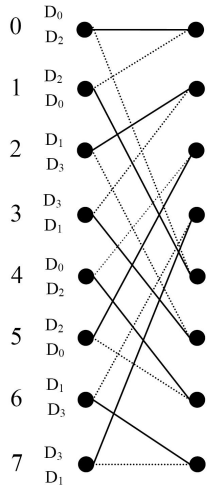


FIGURE 5.1 – La structure du treillis utilisé dans JPEG2000.

À partir d'un état initial, le chemin dans le treillis peut être décrit par une séquence binaire puisqu'il n'y a que deux transitions possibles d'un état à un autre (voir figure 5.1). Afin de quantifier la séquence source **x**, l'algorithme de Viterbi [Viterbi 95] est utilisé pour trouver le chemin de coût minimal à travers le treillis. Le chemin de coût minimal correspond au chemin générant le vecteur quantifié $\hat{\mathbf{x}}$ le plus proche en distance L2 du vecteur source **x**. L'algorithme de Viterbi produit donc une séquence de bits indiquant le chemin optimal, et une séquence d'indices résultant de la quantification.

À la réception, le décodeur reconstruit la source de la manière suivante. La séquence de bits nous informe sur le chemin à suivre dans le treillis ainsi que sur la suite de sous-dictionnaires, et la séquence d'indices permet, connaissant les sous-dictionnaires, d'appliquer la quantification inverse. À chaque transition *i*, le bit de chemin permet de retrouver l'état suivant et donc le sous-dictionnaire de quantification utilisé. L'indice permet de reconstruire l'échantillon source qui sera retourné en sortie du codeur.

Plusieurs techniques de quantification sont proposées dans la partie 2 du standard JPEG2000. Parmi celles-ci, nous pouvons citer l'ECTCQ (Entropy Coded TCQ) [Su et al. 03, JPE00] qui est l'une des variantes de la TCQ. Le treillis employé est un treillis à huit états où chaque état possède deux arcs comme illustré sur la figure 5.1. Les quantificateurs ou sous-dictionnaires associés à chaque état sont combinés pour former les quantificateurs d'union : $A_0 = D_0 \cup D_2, A_1 = D_1 \cup D_3$. Les deux quantificateurs d'union A_0 et A_1 sont illustrés sur la figure 5.2. Les valeurs de reconstruction $\hat{\mathbf{x}}$ sont données pour chaque quantificateur d'union. Les indices $q(A_j), j \in \{0, 1\}$, correspondant à ces valeurs de reconstruction sont également donnés. Chaque état dans le treillis est associé à l'un des deux quantificateurs d'union.

L'algorithme de Viterbi génère une séquence d'indices, et un chemin représenté par une séquence binaire. En pratique, il n'est pas nécessaire de transmettre le chemin puisqu'il est implicitement contenu dans la séquence d'indices. Ainsi, dans JPEG2000, seuls les indices sont transmis et le bit de poids faible de chaque indice correspond au bit de chemin qui est également un indicateur du sous-dictionnaire utilisé (D_0 ou D_2, et D_1 ou D_3). Ce détail pratique se révèle extrêmement important. En effet, lors de la phase de contrôle de taux, certains plans de bits de poids faibles

des indices peuvent être tronqués. Il y a donc destruction de l'information de cheminement. Cela peut avoir un impact catastrophique sur un schéma de tatouage basé TCQ. Nous verrons en section 5.3.3 comment nous contournons simplement ce problème.

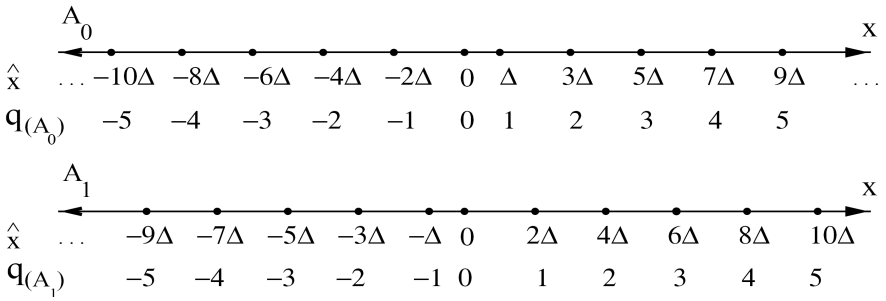


FIGURE 5.2 – Quantificateurs d'union définis dans JPEG2000.

5.3 Le schéma conjoint proposé

Lors de la compression JPEG2000, chaque sous-bande contenant les coefficients d'ondelettes quantifiés est découpée en entités rectangulaires appelées *code-blocks*. Chacun de ces *code-blocks* est alors codé indépendamment des autres au moyen d'un algorithme appelé EBCOT (Embedded Block Coding with Optimal Truncation). Chaque *code-block* est codé plan de bits par plan de bits, en commençant par les bits de poids les plus forts. Tous ces plans de bits sont codés par trois passes de codage successives. Durant la phase de contrôle taux, également appelée allocation de débit, on associe au flux binaire obtenu pour chacune des passes de codage, un point de troncature. L'algorithme de contrôle de taux se charge de trouver, dans le flux binaire correspondant à chaque *code-block*, le point de troncature optimal permettant d'atteindre le débit spécifié dans les paramètres de codage. Les passes de codage sont ensuite regroupées en paquets qui sont ajoutés au flux de données final ou *code-stream*. Nous devons donc prendre en compte cette troncature du flux binaire afin qu'il n'y ait pas de dégradation du message caché.

5.3.1 La méthode de dissimulation de données proposée

Notre stratégie de dissimulation de données s'appuie sur les principes de la QIM (Quantization Index Modulation) [Chen et al. 01] et sur l'utilisation d'un treillis. C'est une technique basée quantification utilisant la quantification TCQ pour insérer des données cachées. Le principe général est le suivant : nous disposons d'une séquence de quantificateurs. Le choix des quantificateurs est déterminé en fonction des données à dissimuler. Les échantillons du signal hôte sont alors quantifiés à l'aide des quantificateurs sélectionnés.

Il y a deux arcs sortant par état. Sur la figure 5.3, pour chaque état, l'arc en gras est étiqueté par D_0 ou D_1 et l'autre arc est étiqueté par D_2 ou D_3. Pour insérer le bit 0 nous utilisons le quantificateur D_0 ou D_1, et pour insérer le bit 1 nous utilisons le quantificateur D_2 ou D_3. Cette sélection revient à choisir les arcs empruntés lors de la traversée du treillis. Ainsi, on supprime les arcs étiquetés par D_2 ou D_3 lorsque l'on insère un 0 et on supprime les arcs étiquetés par D_0 ou D_1 lorsque l'on insère un 1. Nous nous retrouverons donc avec un treillis élagué et les coefficients

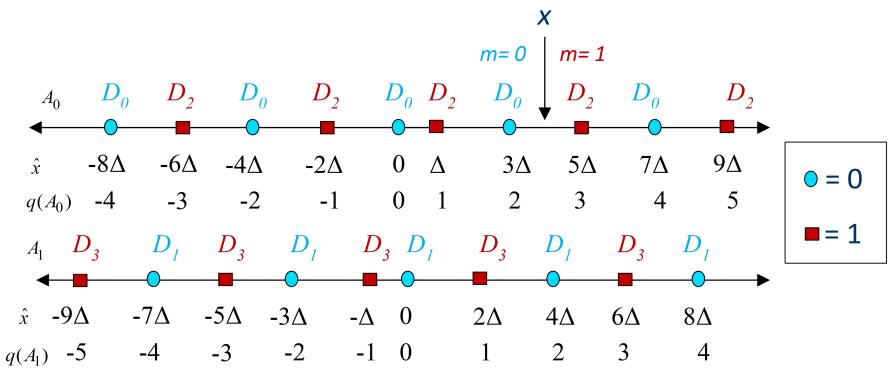


FIGURE 5.3 – Les principes de la QIM appliqués aux quantificateurs d'union de JPEG2000.

d'ondelettes sont quantifiés en lançant l'algorithme de Viterbi sur ce treillis élagué. Le chemin de coût minimal représenté par une séquence binaire est alors équivalent au message caché.

Lorsqu'on l'intègre cette approche dans le schéma de codage de JPEG2000, l'étape de contrôle de taux doit être prise en compte. En effet, la perte partielle du chemin dans le treillis signifie que les données cachées ne seront pas correctement extraites durant la phase de décompression. Sans mesure adéquate, c'est ce qui se produit puisqu'un certain nombre de bits de poids faible des indices de quantification sont supprimés après la phase de contrôle de taux.

Nous proposons donc d'insérer l'information cachée seulement dans les coefficients qui ont le plus de chance de survivre à la phase de contrôle de taux. Ces coefficients sont appelés *coefficients sélectionnés*. En pratique, cela revient à insérer (et donc élaguer le treillis) uniquement au niveau des transitions correspondant à ces *coefficients sélectionnés*. En outre, pour être sûr que le plan de bits LSB restera inchangé après le contôle de taux, celui-ci est déplacé de sa position initiale vers un plan de bits supérieur.

Le message binaire à cacher est noté $\mathbf{m} \in \{0,1\}^{|m|}$. Dans le but de sécuriser le message, nous le mélangeons de manière pseudo-aléatoire. Le tatouage se fait indépendamment au niveau de chaque *code-block*. Pour chaque *code-block*, le treillis est élagué seulement pour les transitions correspondant aux *coefficients d'ondelettes sélectionnés*. L'étape de quantification produit la séquence d'indices de quantification $\tilde{\mathbf{x}}$ donnée par :

$$\tilde{\mathbf{x}}[i] = Q_{D_j}(\mathbf{x}[i]) \tag{5.1}$$

où Q_{D_j} est la fonction de quantification et $D_j, j \in \{0,1,2,3\}$ est le quantificateur utilisé pour quantifier $\mathbf{x}[i]$. Le quantificateur est sélectionné suivant le bit à cacher.

Lors de la décompression JPEG2000, le message caché est extrait durant l'étape de quantification inverse. Plus précisément, l'algorithme examine sur le chemin optimal, les arcs associés aux *coefficients sélectionnés*. Si l'arc est étiqueté par D_0 ou D_1, le bit 0 est extrait, sinon le bit 1 est extrait. Pour chaque *code-block*, les valeurs de reconstruction $\hat{\mathbf{x}}$ sont obtenues de la manière suivante :

$$\hat{\mathbf{x}}[i] = \bar{Q}^{-1}_{D_j}(\tilde{\mathbf{x}}[i]) \tag{5.2}$$

où $\bar{Q}^{-1}$ est la fonction de quantification inverse. Notons qu'il n'est pas nécessaire de générer les valeurs dé-quantifiées pour extraire le message caché.

5.3.2 Le schéma conjoint JPEG2000 et dissimulation de données

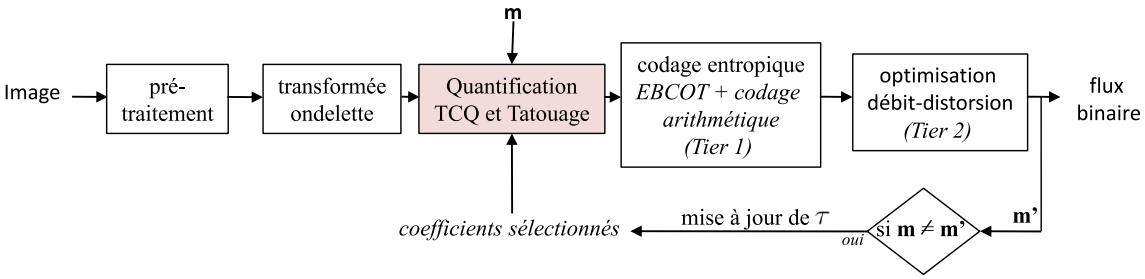


FIGURE 5.4 – Schéma de fonctionnement du système conjoint codage JPEG2000/dissimulation de données.

Le schéma de fonctionnement de notre système de compression JPEG2000/dissimulation de données conjoint est illustré sur la figure. 5.4. L'image subit des opérations de pré-traitements (décalage des données et transformée couleur). Celle-ci est ensuite décomposée à l'aide de la transformée en ondelettes discrète. Les coefficients inclus dans le processus de dissimulation de données sont ceux des sous-bandes de détails HL, LH et HH de tous les niveaux de résolution excepté le premier niveau. Le critère de sélection utilisé dans la sélection des coefficients est détaillé dans la sous-section suivante. Le nombre de *coefficients sélectionnés* permet de déterminer la quantité d'information à cacher. Les données sont cachées durant le processus de quantification. Ensuite vient l'étape de codage entropique, suivie de la phase de contrôle de taux qui arrange les flux de chaque *code-block* sous la forme de couches de qualité afin de former le flux binaire JPEG2000.

Suivant le contenu de l'image et le débit cible, certains coefficients embarquant des bits des données cachées seront tronqués lors de la phase d'optimisation débit-distorsion. Afin que l'extraction soit correcte, une opération de vérification est lancée après l'étape de contrôle de taux afin de tester s'il n'y a pas eu de perte d'information. Ce processus consiste à effectuer les opérations de décodage entropique et d'extraction des données cachées. Si l'information cachée n'a pas été correctement récupérée, l'étape de selection des coefficients d'ondelettes est ré-itérée. Le critère de sélection est modifié pour chaque *code-block* où les données cachées sont érronées, et ce, de manière à exclure les *coefficients sélectionnés* qui ont été touchés par la phase de contrôle de taux. Nous sélectionnons moins de *coefficients sélectionnés* que lors de la précédente itération. Les étapes de quantification TCQ, EBCOT, contrôle de taux et vérification sont répétées à chaque fois que le critère de sélection est modifié, et ce, jusqu'a ce qu'il ait une insertion puis une extraction sans erreurs. Le *payload* est déterminé par le nombre de *coefficients sélectionnés*. Nous aurons donc un *payload* pour chaque débit binaire : les *payloads* obtenus à bas débit seront plus petits que ceux obtenus à haut débit.

Pour réaliser l'extraction des données cachées, le flux binaire est décodé à l'aide du décodeur EBCOT puis le message caché est extrait durant la quantification inverse. Seuls les *coefficients sélectionnés* lors de la quantification embarquent un bit. L'image décodée est obtenue après l'application de la transformée en ondelettes inverse et les opérations de post-traitements.

5.3.3 La sélection des coefficients inclus dans le processus de dissimulation de données

Comme nous l'avons expliqué en section 5.3.1, le bit de poids faible d'un *indice TCQ sélectionné* permet de déduire le quantificateur utilisé et également un bit du message. Un indice TCQ $\tilde{x}$ peut être représenté en représentation binaire de la manière suivante :

$$\tilde{x} = s\tilde{x}_{L-1}\tilde{x}_{L-2}....\tilde{x}_1\tilde{x}_0 \tag{5.3}$$

où s est le signe, $\tilde{x}_{L-1}$ le bit de poids le plus fort (MSB) et $\tilde{x}_0$ est le bit de poids le plus faible (LSB) de $\tilde{x}$. L est le nombre de bits nécéssaires pour représenter tous les indices de quantification dans le *code-block*. Le calcul du seuil de sélection τ pour chaque *code-block* permet de sélectionner une séquence de coefficients significatifs $\mathbf{S}$. En supposant qu'il y a L plans de bits dans le *code-block* courant $\mathbf{C}$, τ est calculée de la manière suivante :

$$\tau = \lfloor \alpha \times L \rfloor \tag{5.4}$$

où α est un paramètre réel compris entre 0 et 1 initialisé avec une valeur prédéfinie pour chaque sous-bande. Le tableau 5.1 donne les valeurs de α pour certains débits cible. La sélection des coefficients inclus dans le processus de dissimulation de données est effectuée de la manière suivante :

$$\text{si } \lceil \log_2(|\tilde{\mathbf{x}}[i]| + 1) \rceil > \tau, \text{alors } \tilde{\mathbf{x}}[i] \in \mathbf{S} \tag{5.5}$$

où $\lceil \log_2(|\tilde{\mathbf{x}}[i]| + 1) \rceil$ est le nombre de bits utilisés pour représenter l'indice $\tilde{x}$ du i^{ieme} coefficient d'ondelette du *code-block* $\mathbf{C}$. Nous sélectionnons les coefficients d'ondelettes qui ont la valeur absolue de leurs indices supérieure à τ. Dans le cas où la phase de contrôle de taux provoque une dégradation du message caché, la valeur de τ est incrémentée pour itérer une nouvelle sélection des coefficients et une nouvelle insertion. Afin d'être sûr que le chemin ne sera pas partiellement perdu

Niveau de résolution	Sous-bande	Débit binaire (bpp)	α
3	1	2.5	0.20
		1.6	0.33
		0.2	0.50
4	2	2.5	0.33
		1.6	0.33
		0.2	0.75

TABLE 5.1 – Valeurs initiales de α pour quelques débits binaires.

après la phase de contrôle de taux, surtout à bas débit, nous proposons de déplacer le plan de bits LSB des indices TCQ des *coefficients sélectionnés* vers la position $L - 2$ (équation 5.3). Le seuil de sélection τ pour chaque *code-block* peut être stocké dans l'entête du fichier JPEG2000. De cette manière, nous sommes capables, durant la décompression JPEG2000, de retrouver les positions des indices TCQ correspondant aux *coefficients sélectionnés*. Nous n'avons donc pas besoin de sauvegarder ces positions dans un fichier et de les transmettre comme information adjacente au décodeur. Notons que le coût additionel est négligeable par rapport au coût de l'image. Pour un débit de 0.2 bpp, un *code-block* de taille 64×64, et $L = 8$, le ratio entre le coût de codage du seuil et le coût de codage moyen du *code-block* est $\frac{3}{0.2 \times 64 \times 64} \approx 0.0037$.

5.4 Résultats expérimentaux

Image test	Débit binaire (bpp)	PSNR (dB) avec JPEG2000	PSNR (dB) avec le schéma conjoint
Bike	2.5	43.23	41.48
	2	39.64	40.26
	1.6	39.33	38.56
	1	38.11	37.03
	0.5	36.51	33.77
	0.2	33.52	33.54
Lena	2.5	47.47	45.17
	2	45.33	43.83
	1.6	43.38	42.63
	1	41.55	40.93
	0.5	40.03	38.10
	0.2	36.56	36.00
Clown	2.5	44.08	41.44
	2	42.78	40.06
	1.6	40.77	38.93
	1	38.71	36.91
	0.5	35.76	35.34
	0.2	31.09	30.36
Peppers	2.5	43.13	41.53
	2	39.69	38.66
	1.6	39.20	37.67
	1	39.03	36.31
	0.5	36.50	27.62
	0.2	29.35	24.44

TABLE 5.2 – PSNR pour différents débits avec ou sans insertion de données cachées.

Nous utilisons la librairie OpenJPEG [Ope] pour implémenter notre schéma. Cette librairie est libre de droit, écrie en langage C, et implémente la norme JPEG2000 partie 1. Nous avons remplacé le module de quantification scalaire uniforme par un module de quantification TCQ compatible avec la partie 2 de la norme. Nous avons testé l'approche sur des images de taille 512 x 512. Le Tableau 5.2 donne les PSNR pour différents débits avec ou sans insertion de données cachées. En général, la dégradation de la qualité induite par l'insertion des données cachées est inférieure à 2 dB pour des débits de 2 bpp et baisse lorsque les débits diminuent. Le *payload* est élevé. Nous pouvons insérer un message caché avec un *payload* supérieur à 12 000 bits et un PSNR supérieur à 40 dB à 2 et 2.5 bpp (figure 5.5). Un nombre plus important de bits peut être caché à haut débit. Environ 13 040 bits sont dissimulés dans l'image Lena avec un PSNR de 41.53 dB à 2.5 bpp. À 0.2 bpp, seulement 2735 bits peuvent être cachés. Le *payload* est également dépendant des caractéristiques de l'image originale. Pour l'image Bike, le *payload* est égal à 10 248 bits pour un débit binaire de 1 bpp, comparé à 11 296 bits dissimulés dans l'image Clown à même débit. Le *payload* de l'image Bike est de 1531 bits à 0.2 bpp, alors qu'il est de 2735 bits pour l'image Lena.

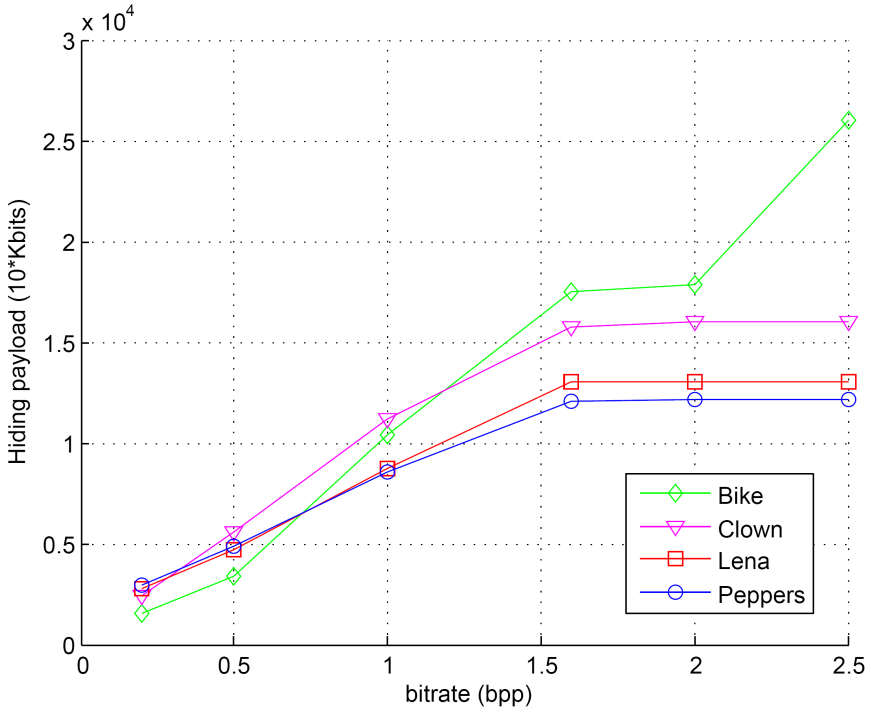


FIGURE 5.5 – Payload en fonction du débit binaire.

La méthode que nous proposons ici n'est pas encore prête pour les comparaisons avec des schémas de tatouage robuste effectués conjointement à la compression. En effet, la robustesse à des attaques pouvant survenir par la suite (en dehors du schéma de compression JPEG2000), n'est pas assurée dans le schéma que nous proposons. Notre schéma s'apparente pour le moment à un schéma d'insertion de données cachées sans robustesse. Ses performances égalent les schémas de ce type comme par exemple l'approche de Chen *et al.* [Chen et al. 10]. Par ailleurs, le schéma est à détection non aveugle (il est nécessaire d'avoir les seuils pour retrouver les *coefficients selectionnés* lors de l'extraction), ce qui est un facteur limitant dans la pratique. Nous étudions actuellement à travers l'étude des codes correcteurs à gestion d'effacement (section IV.C de [Solanki et al. 06]), un moyen d'avoir dans le même temps un schéma robuste et ne nécessitant pas d'information adjacente lors de l'extraction.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un schéma conjoint de compression JPEG2000 et de dissimulation de données basé sur la TCQ. Les données cachées sont dissimulées dans les indices TCQ. La perte des bits du message caché causée par la phase de contrôle de taux est évitée grâce à une sélection des coefficients inclus dans processus de dissimulation de données et grâce au déplacement des plans de bits LSB vers une autre position. Le schéma conjoint proposé présente de bonnes performances en terme de qualité visuelle et de capacité d'insertion. Les applications possibles sont l'augmentation ou l'enrichissement des contenus des images JPEG2000. Les travaux

futurs porteront sur la possible extension de ce schéma à du tatouage robuste à détection aveugle.

Chapitre 6

Une approche avec prise en compte de l'optimisation RD dans H.264

Résumé

Ce chapitre présente une approche de traçage de traîtres (en anglais « traitor tracing », « transactional watermarking », « content serialisation », « users forensics », ou encore « active fingerprinting ») intégrée au codeur vidéo de l'état de l'art H.264/AVC. Cette approche a été publiée à ICIP'2010 dans [Shahid et al. 10] et également développée dans la thèse de Zafar Shahid [Shahid 10]. Ce travail réunit deux concepts importants : le tatouage conjoint à la compression H.264 et l'utilisation d'un code anti-collusion. La partie qui nous intéressera le plus concerne le tatouage. Ce travail met en lumière, à travers de nombreuses expérimentations et une implémentation opérationnelle, la difficulté à maintenir les nombreuses contraintes d'un système de tatouage transactionnel (système de traçage de traîtres) pour une vidéo : la robustesse aux attaques photométriques, la robustesse aux désynchronisations, la robustesse aux collusions, la sécurité, le payload (et donc un code anticollusion de petite taille), l'invisibilité, la complexité.

6.1 Quelques mots sur le traçage de traîtres

L'objectif du traçage de traîtres est de dissuader l'utilisation illégale d'un produit. À la suite d'une transaction entre un vendeur et un/des acheteur(s), le traçage de traîtres permet au vendeur de déterminer le/les acheteur(s) qui redistribue(nt) illégalement le produit. Lors de la vente d'un film, le vendeur intègre un mot de code qui lui permettra d'identifier l'acheteur à partir de la vidéo. Si le vendeur découvre que son film est redistribué illégalement, la technique de traçage de traîtres doit lui permettre d'identifier le/les acheteur(s) qui sont responsables de cette redistribution. L'approche de traçage de traîtres doit fournir un mécanisme d'accusation sûre qui permette au vendeur d'engager des sanctions ou des poursuites judiciaires à l'encontre du/des fraudeur(s) (que l'on appelle les traîtres). Le mécanisme de traçage de traîtres doit donc fournir un mécanisme d'accusation dans lequel aucun innocent ne peut être accusé. En particulier, il doit être impossible pour un traître d'usurper l'identité d'un innocent. Un groupe de traîtres peut construire une nouvelle version de la vidéo par collusion (mélange) de leur version dans l'espoir de faire disparaitre l'identifiant intégré à leur vidéo. Dans ce cas, le mécanisme de traçage de traîtres doit permettre d'identifier au moins un traître.

Dans la littérature, le traçage de traîtres a été initialement étudié par la communauté cryptographique. Un système de code anticollusion doit fournir une construction qui permet de retrouver au moins un traître sans erreur possible. À la différence des codes anti-collusion déterministes, les codes probabilistes permettent de fixer la probabilité d'accuser un innocent quelle que soit la stratégie de collusion [Tardos 03]. On peut donc fixer cette probabilité à une valeur suffisamment faible et créer un code plus sûr.

Un code anti-collusion est défini par les paramètres suivants :

- le nombre d'utilisateurs n,
- le nombre de *colluders* (traîtres) c,
- la probabilité de faux positifs (probabilité d'accuser un innocent) ϵ_1,
- la probabilité de faux négatifs (probabilité de ne pas accuser un traître) ϵ_2,
- la longueur de code m obtenue à partir des paramètres précédents.

Il faut noter que la longueur de code m influence grandement l'utilisabilité dans un schéma joint à une technique de tatouage. En tatouage vidéo, il est difficile d'insérer de manière robuste (robustesse photométrique, robustesse valumétrique, robustesse aux désynchronisations spatiales et temporelles) plus d'une dizaine de bits dans une minute de vidéo. Le standard dans l'industrie du cinéma numérique haute définition est de 35 bits insérés dans 15 minutes de film. Malheureusement, les contraintes des vendeurs impliquent un code de grande dimension. Les vendeurs ont besoin d'avoir un mécanisme résistant à des coalitions de centaines de traîtres ($c > 100$), fournissant des mots de code pour des millions voir des milliards d'utilisateurs ($n > 10^6$), et dont la probabilité d'accusation d'un innocent (faux positifs) ϵ_1 doit être extrêmement faible. La probabilité de non-détection d'un coupable (faux négatifs) ϵ_2 est beaucoup moins critique et l'on peut tolérer une valeur assez grande.

En 2003, Tardos [Tardos 03] a proposé un code probabiliste pour la problématique du traçage de traîtres. La longueur du code était estimée à $m = 100c^2 ln(\frac{n}{\epsilon_1})$ pour n utilisateurs, c *colluders*, et une probabilité d'accuser un innocent ϵ_1. Notons, que la constante 100 dans la longueur m du code a été par la suite réduite dans [Škorić et al. 08b, Škorić et al. 08a, Blayer et al. 08], etc. Les auteurs de [Škorić et al. 08b, Škorić et al. 08a, Blayer et al. 08] entre autre, ont repris les travaux de Tardos [Tardos 03], revu les hypothèses et optimisé les paramètres sans fondamentalement changer ni la construction du code ni l'algorithme d'accusation.

La génération d'un code de Tardos de dimension m est extrêmement simple et s'effectue en deux étapes :

- **Génération de m valeurs de probabilité :** On initialise un générateur pseudoaléatoire avec une clef secrète puis l'on génère m valeurs réelles comprises entre 0 et 1 dont la distribution est $f(p) = \frac{1}{\pi\sqrt{p(1-p)}}$ avec $p \in [0, 1]$. Ces m valeurs sont notées $\{p(i)\}_{1 \leq i \leq m}$ et correspondent à la probabilité d'avoir un 1 pour le i-ème bit d'un mot de code ;
- **Génération du code de Tardos :** Pour n utilisateurs, on génère une matrice $\mathbf{S}$ de taille $m \times n$. Une colonne représente un mot de code associé à un j-ème utilisateur. Les lignes de la matrice sont remplies par des 0 et des 1 de manière à ce que $Prob[\mathbf{S}(i, j) = 1] = p(i)$.

Le processus d'accusation est également extrêmement simple puisqu'il suffit de calculer un score d'accusation A_j entre le mot extrait $\mathbf{z}$ et le mot de code d'un utilisateur j :

$$A_j = \sum_{i=1}^{m} U\left(\mathbf{z}(i), \mathbf{S}(i, j), p(i)\right), \tag{6.1}$$

avec la fonction U définie pour $p \in [0,1]$ par :

$$U(1,1,p) = \sqrt{(1-p)/p}, \quad U(1,0,p) = -\sqrt{p/(1-p)},$$
$$U(0,0,p) = \sqrt{p/(1-p)}, \quad U(0,1,p) = -\sqrt{(1-p)/p}.$$

Le score des traîtres peut être modélisé par une distribution gaussienne centrée en $\mu = \frac{2m}{c\pi}$ alors que le score des innocents peut être modélisé par une gaussienne centrée en 0. Il suffit donc de fixer un seuil au-dessus duquel on considérera que l'on a un traître. Notons que Cérou *et al.* [Cérou et al. 08] ont proposé un seuillage précis qui relie ϵ_1 et ce seuil. Bien que la génération du code de Tardos et l'accusation soient extrêmement simples, le mécanisme d'accusation est complexe en coût de calcul (dans le pire des cas il y a $n \times m$ appels à la fonction U) et complexe en coût de stockage si l'on souhaite stocker la matrice **S** (cela fait $n \times m$ bits). De plus, la longueur du code augmente quadratiquement avec le nombre de *colluders* m, logarithmiquement avec la diminution de ϵ_1 et logarithmiquement avec l'augmentation du nombre d'utilisateurs n. Par exemple, pour $c = 10$, $n = 10^4$, et $\epsilon_1 = 10^{-5}$, on a $m = 100c^2 ln(n/\epsilon_1) \approx 200\ 000$ bits. Cela fait une complexité de calcul de l'accusation, au pire, d'environ 2 milliards d'appels à U et un coût de stockage d'environ 2 Giga-bits si l'on souhaite stocker la matrice **S**. Si c passe à 20, $m \approx 800\ 000$ bits. Cela correspond à une complexité de calcul de l'accusation, au pire, d'environ 8 milliards d'appels à U et un coût de stockage d'environ 8 Giga-bits si l'on souhaite stocker la matrice **S**.

6.2 Le tatouage dans H.264 (insertion d'un mot de code issu du code de Tardos)

Comme nous l'avons déjà évoqué dans le chapitre 4, le tatouage dans H.264 peut intervenir à différents emplacements (avant quantification, après quantification et lors du codage entropique [Chaumont 10b]). Pour assurer la robustesse du signal de tatouage, il faut effectuer l'opération d'insertion du tatouage avant ou après l'opération de quantification. De plus, pour maintenir les bonnes performances en débit et en distortion, il faut avoir un mécanisme joint de tatouage et de compression. Le mécanisme que nous avons retenu est basé sur un tatouage par étalement de spectre (l'hypothèse de *marking assumption* [Tardos 03] nécessaire au bon fonctionnement du mécanisme d'accusation de Tardos est alors respectée). L'approche que nous proposons a pour but d'étudier la faisabilité de l'intégration d'un schéma de traçage au sein d'une vidéo. Si l'on souhaite obtenir des meilleures performances (en terme de robustesse photométrique, mais aussi de sécurité) on peut aisément reprendre le principe de tatouage informé proposé dans Broken Arrows [Furon et al. 08] pour remplacer le module de tatouage par étalement de spectre.

L'approche de tatouage consiste à découper chaque « frame » en régions qui vont chacune embarquer 1 bit. De manière pratique, chaque région sera stockée dans ce que l'on appelle un « slice ». Un « slice » est une partie du flux binaire H.264 (c'est une portion du fichier obtenue après compression) à laquelle on peut accéder très facilement et dont le contenu est décodable indépendamment des autres « slices ». La figure 6.1 montre le découpage d'une « frame » vidéo CIF 352x288 en 10 régions [1], chacune embarquant 1 bit. Notons que le processus de tatouage peut être effectué *offline*. Il suffit en effet pour chaque « slice » composant la vidéo de générer 2 versions différentes : un « slice » contenant le bit 0 et l'autre contenant le bit 1. Lorsqu'une vidéo est distribuée à un acheteur, le vendeur attribue un mot de code de Tardos à l'acheteur

1. Dans nos expérimentation nous avons choisi un code de longueur raisonable [Furon 09] $m = 20.c^2.ln(\frac{n}{\epsilon_1})$.

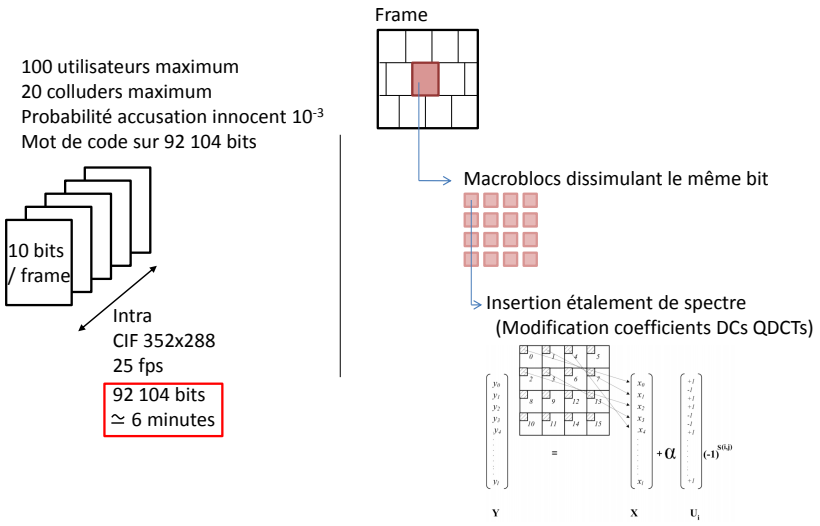


FIGURE 6.1 – Schéma général d'insertion d'un mot de code de Tardos dans H.264.

puis reconstitue la vidéo en utilisant les « slices » qui ont été tatoués avant la transaction et enfin distribue la vidéo à l'acheteur.

Le mécanisme de tatouage est très simple. Une fois que la découpe en « slice » est effectuée, l'insertion d'un bit dans le « slice » s'effectue par étalement de spectre. Le « slice » est composé de plusieurs macroblocs. L'ensemble des macroblocs du « slice » va être modifié de sorte qu'ils contiennent le même bit. Le principe de tatouage est le même pour tous les macroblocs. Les coefficients quantifiés DCs des blocs du macrobloc forment le vecteur hôte $\mathbf{x}$. On applique alors le tatouage par étalement de spectre (voir équation 6.2). On génère une porteuse secrète $\mathbf{u}_i \in \{-1, 1\}^n$ (avec n la dimension du vecteur hôte), on module le i-ème bit du mot de code de Tardos $\mathbf{S}(i, j)$ du j-ème utilisateur pour avoir -1 si $\mathbf{S}(i, j) = 1$ et $+1$ si $\mathbf{S}(i, j) = 0$, puis on étale le bit modulé sur la porteuse (multiplication de la porteuse et du bit modulé) pour obtenir le vecteur de tatouage. Le vecteur de tatouage est alors amplifié ou réduit par multiplication par le facteur de force d'insertion (scalaire α) et enfin ajouté au vecteur hôte $\mathbf{x}$ pour obtenir le vecteur tatoué $\mathbf{y}$:

$$\mathbf{y} = \mathbf{x} + \alpha.\mathbf{u}_i.(-1)^{\mathbf{S}(i,j)} \tag{6.2}$$

Le vecteur $\mathbf{y}$ correspond alors aux nouveaux coefficients DCT quantifiés. Il faut noter qu'une approche qui modifie les coefficients DCs produit des effets de blocs désagréables. Dans [Shahid et al.] nous avons proposé d'améliorer l'approche en ajoutant les coefficients ACs mais également en sélectionnant les coefficients à modifier. La procédure de sélection des coefficients nécessite d'effectuer des seuillages spécifiques à chaque vidéo. L'introduction de seuil variable est problématique puisque ces seuils doivent être ré-estimés correctement lors de l'extraction. On peut raisonnablement penser que l'utilisation d'un masque psychovisuel suffisamment robuste, et l'utilisation d'un code correcteur prenant en compte les effacements, permettrait de régler le problème.

Lors de l'étape d'extraction, pour chaque macrobloc, les coefficients ACs sont ré-extraits pour

former le vecteur tatoué-attaqué $\mathbf{z}$. La corrélation entre la porteuse $\mathbf{u}_i$ et le vecteur $\mathbf{z}$ nous donne le bit inséré (et donc le i-ème bit du mot de code attribué au j-ème utilisateur et noté $\tilde{\mathbf{S}}(i,j)$) :

$$\tilde{\mathbf{S}}(i,j) = \begin{cases} 0, & \text{if } \sum_{k=0}^{n} \mathbf{z}[k].\mathbf{u}_i[k] > 0 \\ 1, & \text{if } \sum_{k=0}^{n} \mathbf{z}[k].\mathbf{u}_i[k] < 0. \end{cases} \tag{6.3}$$

Un point important de l'intégration du tatouage par étalement de spectre dans le codeur H.264 est son intégration au sein de la phase de compression. Lorsqu'un bloc est en cours de traitement, le codeur doit choisir le mode de prédiction du bloc qui va donner le meilleur compromis débit-distorsion. Pour sélectionner le mode de prédiction, il faut :

- appliquer les différentes prédictions du bloc,
- calculer les différents blocs d'erreurs,
- tatouer les blocs d'erreurs,
- calculer pour toutes ces versions du bloc d'erreur le débit et la distorsion,
- enfin, sélectionner la meilleure prédiction en choisissant la prédiction pour laquelle la valeur de la fonction Lagrangienne de débit-distorsion est la plus petite.

Une fois que la prédiction du bloc est choisie, on applique réellement le tatouage. On voit bien qu'en faisant comme ceci, le signal de tatouage est parfaitement intégré dans le flux vidéo. L'impact dû au tatouage est pris en compte à travers l'optimisation débit-distorsion du codeur. Par ailleurs, il n'y a pas de dérive entre ce qui est calculé au codage et ce qui est calculé au décodage. Sur la figure 6.2, nous retrouvons les différentes étapes, décrites dans le chapitre 4, pour un codeur H.264. L'étape de tatouage a également été ajoutée au schéma. Remarquons que la figure n'est cependant pas suffisante pour décrire le mécanisme d'intégration tel que nous venons de l'expliquer.

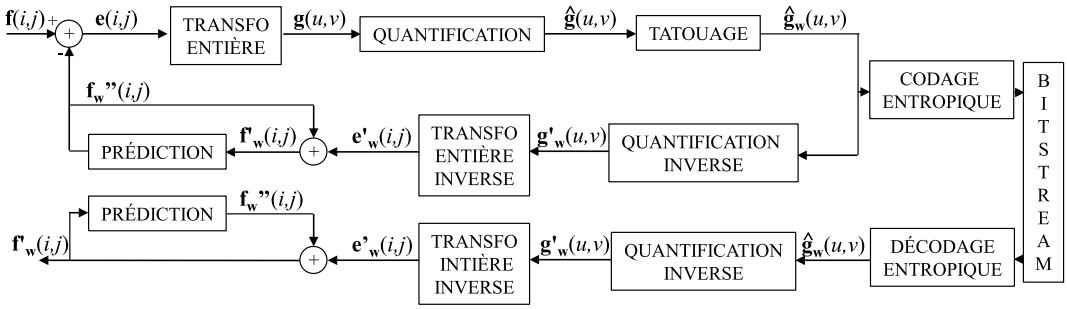


FIGURE 6.2 – Schéma général du système de tatouage intégré à H.264

6.3 Résultats

Dans cette section nous donnons les résultats de l'article [Shahid et al. 10]. Nous avons utilisé l'implémentation de JSVM 10.2 de H.264 avec des vidéos en résolution CIF 352×288. Nous avons choisi le mode intra 4×4 pour le codage Intra, sélectionné le codeur CAVLC, fixé la quantification à QP = 18, et inséré le mot de code de Tardos à la fois dans les luminances et les chrominances. Neuf séquences (*bus, city, foreman, football, soccer, harbour, ice, mobile, crew*) ont été concaténées et répétées pour former la vidéo à tatouer. Les paramètres du code de Tardos sont $n = 100$ utilisateurs, $\epsilon_1 = 10^{-3}$, $c = 20$ *colluders* et une longueur de code $m = 20.c^2.ln(\frac{n}{\epsilon_1}) = 92104$

[Furon 09] [2]. On insère 10 bits par « frame ». Il faut donc 9211 « frames » pour insérer complètement le mot de code de Tardos ce qui fait environ 6 minutes pour une vidéo à 25 images par seconde.

Lorsqu'un vendeur désire tracer la provenance d'une vidéo, il va extraire le mot de code de Tardos inséré dans la vidéo et ensuite lancer son processus d'accusation. Comme nous l'avons expliqué en section 6.1, le vendeur va calculer un score d'accusation A_j pour chaque utilisateur j. Si le score dépasse le seuil d'accusation, l'utilisateur j est alors considéré comme coupable de redistribution illégale de la vidéo. Le score des traîtres peut être modélisé par une distribution gaussienne centrée en $\mu = \frac{2m}{c\pi}$ et de variance m, alors que le score des innocents peut être modélisé par une gaussienne centrée en 0. En première approximation nous avons fixé le seuil d'accusation à $\mu - \sqrt{m} = \frac{2m}{c\pi} - \sqrt{m}$. Un seuillage plus adéquat peut être calculé en utilisant l'approche proposée dans [Cérou et al. 08].

Pour évaluer le schéma, seules les attaques par collusion dans le domaine spatial ont été testées. Il faudrait bien entendu également évaluer la robustesse du schéma (aux attaques photométriques) et également sa sécurité (par exemple face à la collusion Intra). L'objectif premier de ce travail etait d'évaluer à la fois la faisabilité d'un schéma de traçage de traîtres intégré à H.264 mais également de proposer une solution de tatouage conjointement à la compression. En ce sens, les résultats obtenus ici sont prometteurs.

Les attaques par collusion ont toutes été réalisées dans le domaine spatial. Les traîtres disposent tous d'une version différente de la même vidéo et créent une nouvelle vidéo en utilisant une stratégie particulière. Chaque pixel de la nouvelle vidéo est obtenu en utilisant l'une des stratégies suivantes : calcul de la moyenne, calcul du minimum, calcul du maximum, calcul de la valeur médiane, calcul du minmax (moyenne de la valeur maximum et minimum) et calcul du modneg (valeur minimum plus valeur maximum moins valeur médiane). La table 6.1 reprend l'ensemble des attaques en explicitant les formules. f_k correspond à la « frame » du *colluder* k, $\mathcal{T}$ correspond à l'ensemble des *colluders* (traîtres), et K correspond au nombre de *colluders*.

TABLE 6.1 – Liste des différentes stratégies d'attaque de la part des *colluders*.

$f_{min} = \min\{f_k\}_{k\in\mathcal{T}}$	$f_{max} = \max\{f_k\}_{k\in\mathcal{T}}$
$f_{moy} = \sum_{k\in\mathcal{T}} \frac{f_k}{K}$	$f_{med} = median\{f_k\}_{k\in\mathcal{T}}$
$f_{minmax} = \frac{f_{min}+f_{max}}{2}$	$f_{modneg} = f_{min} + f_{max} - f_{med}$

Le PSNR des vidéos tatouées est de 35 dB et pratiquement toutes les stratégies d'attaque mènent à un PSNR proche ou même supérieur à 35 dB pour des collusions de 1 à 20 *colluders*.

2. Il faut remarquer que dans le cadre d'une application à plusieurs millions d'utilisateurs, et une centaine de *colluders*, la probabilité ϵ_1 devrait être inférieure à 10^{-6}. La longueur du code serait alors trop grande pour pouvoir envisager de l'utiliser dans un système de tatouage.

Seule la stratégie modneg fait chuter le PSNR à 15dB. Cette dernière stratégie est donc peu intéressante puisque la qualité de la vidéo pirate est tellement faible qu'elle en devient inutile.

La table 6.2 montre le nombre de *colluders* qui ont été successivement détectés après analyse de la vidéo pirate pour les différentes stratégies de collusion et pour un nombre variable de *colluders*. La stratégie la plus efficace est l'attaque modneg mais c'est aussi une attaque qui n'est pas réaliste. Pour toutes les autres attaques, quelle que soit le nombre de *colluders*, le processus d'accusation retrouve pratiquement tous les traîtres. Sachant que dans une application de traçage de traîtres, le plus important est de déterminer au moins un traître, l'approche fonctionne extrêmement bien.

TABLE 6.2 – Nombre de *colluders* détectés à partir d'une copie pirate issue d'une stratégie de collusion à K *colluders*.

	Nombre de *colluders* détectés pour chaque stratégie d'attaque					
K	moyenne	min	max	median	minmax	modneg
2	2	2	2	2	2	2
5	5	5	5	5	5	5
8	8	8	8	8	8	6
11	11	10	10	10	10	7
14	14	13	13	13	13	9
17	16	15	16	16	16	10
20	18	18	18	19	18	11

6.4 Conclusion

Ce travail a mis en lumière la faisabilité d'un système de traçage de traîtres par tatouage vidéo au sein de H.264. Le code de Tardos a été utilisé pour assurer le traçage de traîtres d'une vidéo pirate obtenue par collusion. Le système de tatouage et le code ont été conçus pour être réalistes dans le cas d'un très petit nombre d'utilisateurs (n = 100). Aucune des stratégies de collusion n'a mis en défaut le processus d'accusation.

Il est évident que l'intégration d'un système de traçage de traîtres dans une vidéo compressée n'est pas encore un problème totalement résolu. Cela dit, la proposition de tatouage de code de Tardos par étalement de spectre au sein de H.264 fonctionne bien et permet de mettre en lumière le travail qu'il reste à faire pour obtenir des systèmes plus matures. On voit bien que la longueur des codes anti-collusion doit être réduite. La robustesse et la sécurité des systèmes de tatouage joints à la compression n'ont pas été encore évaluées à la vue des connaissances nouvelles en sécurité et en tatouage informé [Cayre et al. 05, PérezFreire et al. 06, Chaumont 11]. Enfin, de manière plus générale, les schémas de tatouage vidéo sont rarement robustes aux attaques désynchronisantes.

Troisième partie

La dissimulation de la couleur d'une image ; Une étude curieuse

Chapitre 7

Les deux grandes familles de dissimulation de la couleur

Résumé

Cette partie du manuscrit traite de dissimulation de données et non de tatouage robuste. Nous proposons de dissimuler la couleur d'une image dans sa version en niveaux de gris. L'approche permet de distribuer une version dégradée (la version en niveaux de gris) d'une image tout en laissant la possibilité à un utilisateur autorisé de ré-extraire une version améliorée (la version en couleur). Dans ce chapitre, nous présentons deux approches bien connues de dissimulation de la couleur dans une image en niveaux de gris : l'approche de [Campisi et al. 02] et l'approche de [Queiroz et al. 06] qui ressemble très fortement à celle de Campisi *et al.*. Ces deux approches consistent à substituer certaines sous-bandes ondelette de luminance par des sous-bandes ondelette de chrominance. Dans les chapitres suivants, nous présenterons deux propositions permettant de dissimuler la couleur d'une image dans sa version en niveaux de gris avec une approche utilisant la représentation d'une image par une palette couleur et une image d'*index*. Notons que cette partie du manuscrit reprend en grande partie le chapitre de livre [Chaumont et al. 09b].

7.1 Introduction

Jusqu'à encore deux-trois ans, il existait peu de travaux autour de la dissimulation de la couleur dans une image en niveaux de gris. Le travail de [Campisi et al. 02] est précurseur et permet d'augmenter les performances de compression d'images couleur. De Queiroz et Braun [Queiroz et al. 06] ont proposé quant à eux de dissimuler la couleur pour pouvoir imprimer des documents en « noir et blanc » et egalement récupérer la couleur à partir de l'image « noir et blanc » scannée. Nous avons également proposé de dissimuler la couleur d'une image pour « protéger/sécuriser » la valeur commerciale de l'image [Chaumont et al. 06]. Le scénario envisagé est de donner un libre accès à la version dégradée (l'image en niveaux de gris) et de donner un accès sécurisé à une version améliorée (l'image en couleur). La figure 7.1 donne une utilisation possible de la protection de la couleur où seuls les propriétaires de la clef secrète peuvent reconstruire l'image couleur.

Les approches de [Campisi et al. 02, Queiroz et al. 06] pour dissimuler la couleur dans une image en niveaux de gris, sont basées sur la décomposition en ondelettes et la substitution de sous-

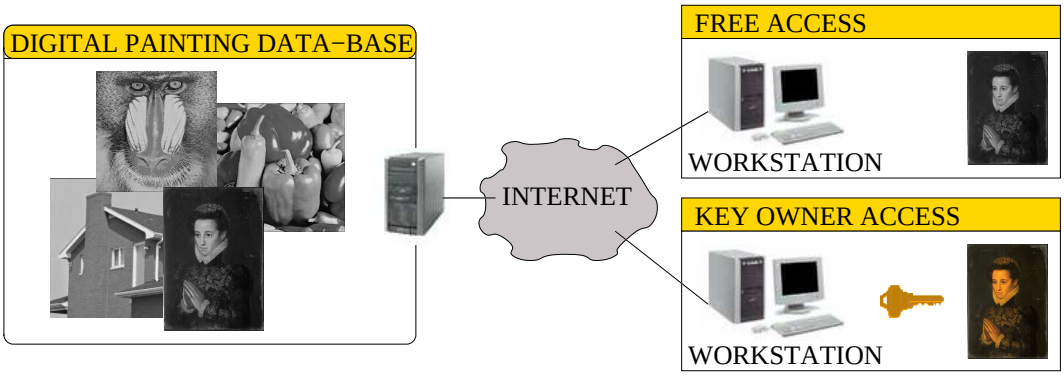


FIGURE 7.1 – Illustration d'une utilisation possible de la protection de la couleur.

bandes. La section 7.2 présente l'approche pour l'impression de [Queiroz et al. 06] et la section 7.3 présente l'approche pour la compression perceptive de [Campisi et al. 02]. Les quelques autres papiers publiés sur le sujet contiennent de très petites améliorations. On peut tout de même citer quelques publications récentes pour prolonger l'étude. De Queiroz [Queiroz 10] étudie l'influence des énergies de chaque sous-bande pour améliorer l'impact de l'insertion, ainsi que l'influence du processus « print & scan ». Les propositions [Ko et al. 08, Horiuchi et al. 10] reprennent des idées déjà introduites dans Campisi *et al.* [Campisi et al. 02] (paquet d'ondelettes, zone d'insertion, *scaling* des plans de chrominances) et comparent experimentalement les différentes approches.

7.2 L'approche de De Queiroz et Braun

La solution proposée par [Queiroz et al. 06] est spécifique au problème d'impression d'images. Quand un document possédant des images en couleur doit être distribué, il est très souvent imprimé sur des imprimantes « noir et blanc ». Les graphiques, certaines images couleur, les schémas, etc. peuvent devenir illisibles. La solution proposée consiste à transformer une image couleur en une image compréhensible en niveaux de gris, même en présence de nombreuses couleurs de même valeur de luminance. Ce qui nous concerne le plus dans la solution de [Queiroz et al. 06] est la relative réversibilité de leur approche. Il est possible de récupérer une approximation visuellement proche de l'image couleur originale à partir de l'image en niveaux de gris.

L'approche proposée par De Queiroz et Braun [Queiroz et al. 06] illustrée figure 7.2 est très simple et consiste à :

1. passer l'image de l'espace couleur RGB à l'espace de couleur Y, Cr, Cb,
2. sous-échantillonner par quatre les deux plans Cr et Cb,
3. déterminer deux plans Cr^+ et Cr^- (resp. Cb^+ et Cb^-) à partir de la version sous-échantillonnée de Cr (resp. Cb). Le plan Cr^+ (resp. Cb^+) est une copie du plan sous-échantillonné Cr (resp. Cb) dont les valeurs négatives sont positionnées à zéro et le plan Cr^- (resp. Cb^-) est une copie du plan sous-échantillonné de Cr (resp. Cb) dont les valeurs positives sont mises à zéro ;
4. décomposer le plan Y en deux niveaux de décomposition ondelette,
5. substituer la sous-bande LH1 par Cb^+, HL1 par Cr^+, HH1 par Cr^- et HH2 par une version de Cb^- sous-échantillonnée par quatre,

6. inverser la transformée ondelette, et obtenir une image en niveaux de gris dissimulant l'information couleur.

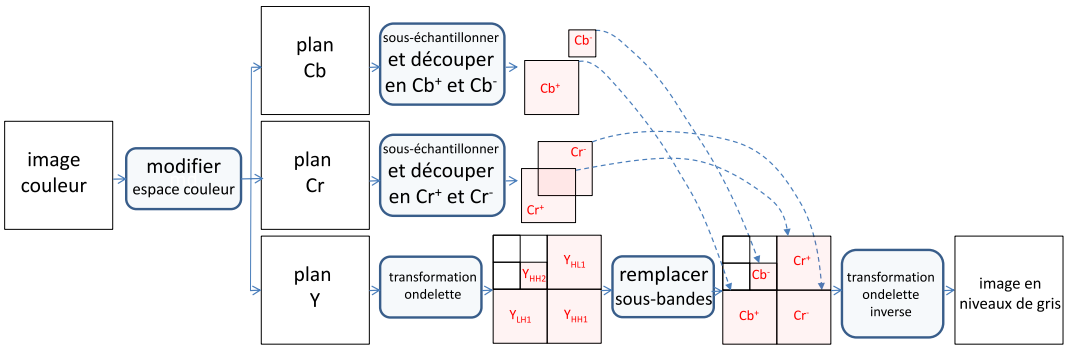


FIGURE 7.2 – Dissimulation de la couleur dans l'approche de De Queiroz et Braun [Queiroz et al. 06].

Pour extraire l'information couleur dissimulée dans l'image en niveaux de gris, c'est-à-dire régénérer les trois plans Y, Cr, Cb il faut :

1. appliquer une transformation ondelette en deux niveaux,
2. extraire Cb^+, Cr^+, Cr^-, et Cb^-,
3. sur-échantillonner Cb^-,
4. recalculer Cr et Cb tel que $Cr = |Cr^+| - |Cr^-|$ et $Cb = |Cb^+| - |Cb^-|$, et sur-échantillonner Cr et Cb afin d'obtenir les plans de chrominance de dimensions égales à la dimension originale,
5. mettre à zéro les sous-bandes HL1, LH1, HH1 and HH2 de l'image ondelette et appliquer une transformation ondelette inverse afin d'obtenir le plan Y.

La Figure 7.3 illustre le principe d'extraction de l'image couleur.

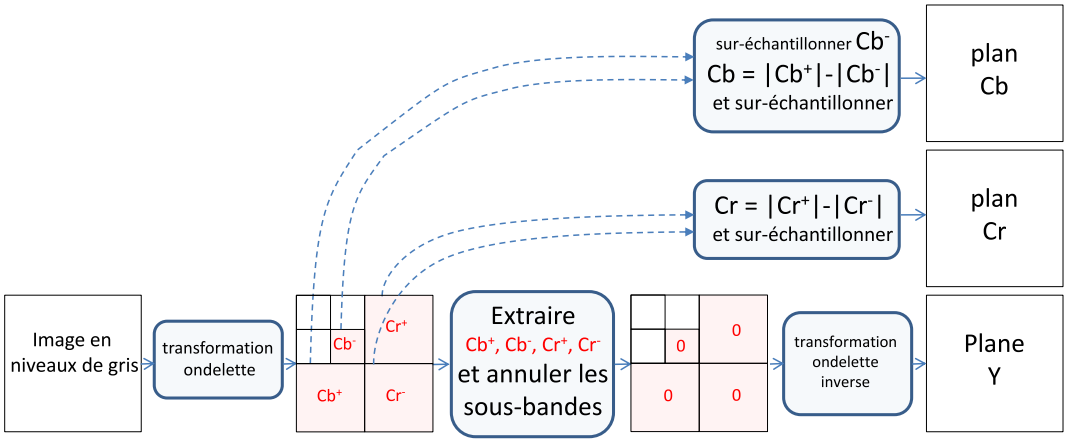
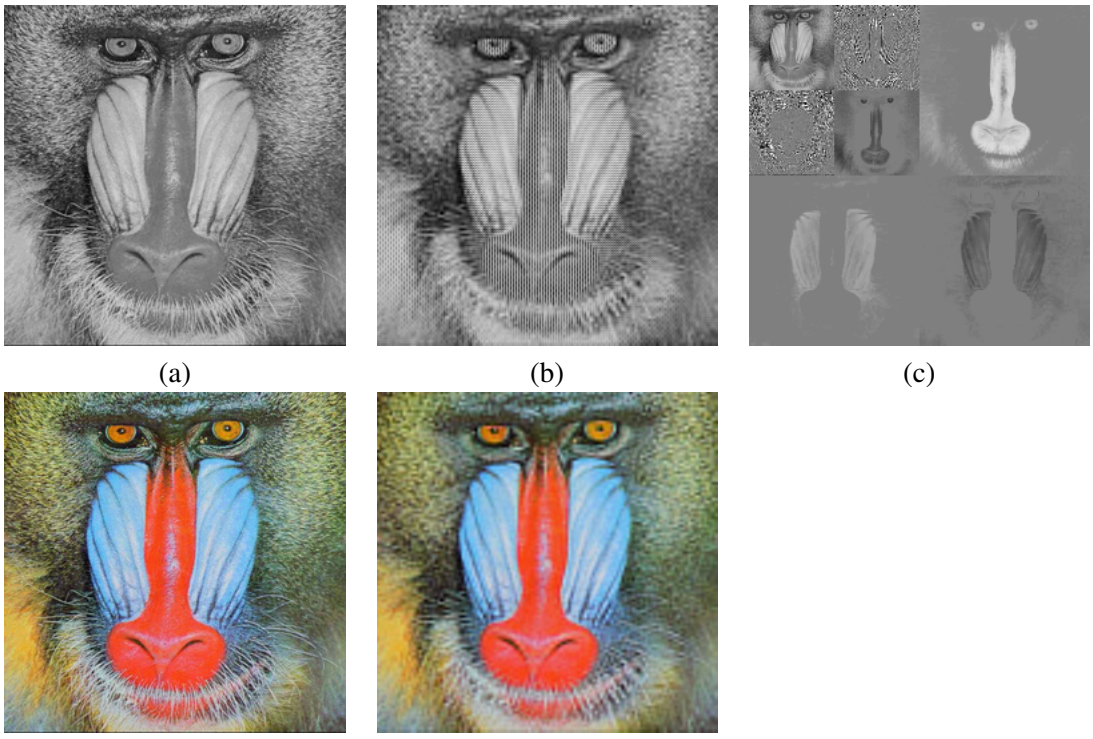


FIGURE 7.3 – Extraction de l'image couleur à partir de l'image en niveaux de gris dans l'approche de De Queiroz et Braun [Queiroz et al. 06].

Cette approche substitutive dans le domaine ondelette est intéressante pour son potentiel de dissimulation de l'information couleur dans une image en niveaux de gris. La figure 7.4 donne

quelques images clefs du processus sur l'image baboon. L'image de luminance, l'image dissimulant l'information de couleur, et la décomposition ondelette de l'image de luminance avec substitution de sous-bandes par des sous-bandes de chrominances sont données aux figures 7.4.a, 7.4.b, et 7.4.c. On remarque que l'image couleur ré-extraite (figure 7.4.e) à partir de l'image en niveaux de gris est de faible qualité visuelle en comparaison de l'image couleur originale (figure 7.4.d). L'image est légèrement floue avec des artefacts de rebond. Ces artefacts proviennent de la détérioration trop forte du plan Y due à la mise à zéro d'un grand nombre de sous-bandes. Dans le tableau 7.1 nous remarquons que les PSNRs couleur calculés entre l'image couleur d'origine et l'image reconstruite sont inférieurs à 31 dB. L'approche de [Queiroz et al. 06] est donc intéressante pour l'impression d'image couleur puisqu'elle « ajoute de la texture » à l'image de luminance, mais elle est moins intéressante pour la dissimulation puisque l'image couleur reconstruite est de qualité médiocre. Nous verrons dans la section suivante que l'approche de Campisi *et al.*. [Campisi et al. 02] donne de meilleurs PSNRs et des images visuellement plus agréables.



(a) (b) (c)

(d) (e)

FIGURE 7.4 – Application de l'approche basée substitution de [Queiroz et al. 06] : a) Luminance de l'image originale, b) Image en niveaux de gris embarquant les plans de chrominance, c) Décomposition en ondelette de l'image en niveaux de gris, d) Image couleur originale, e) Image reconstruite à partir de l'image en niveaux de gris.

TABLE 7.1 – PSNR calculé entre l'image de luminance et l'image en niveaux de gris et PSNR calculé entre l'image couleur originale (espace RGB) et l'image reconstruite (espace RGB) en utilisant l'image en niveaux de gris embarquant la couleur pour l'approche de [Queiroz et al. 06].

Images	PSNR$_{(luminance,\ niveaux\ de\ gris)}$	PSNR$_{(couleur\ originale,reconstruite)}$
baboon	21.03 dB	23.93 dB
barbara	23.93 dB	26.33 dB
airplane	26.47 dB	28.56 dB
peppers	21.24 dB	28.82 dB
lena	21.02 dB	30.31 dB
house	25.18 dB	30.75 dB

7.3 L'approche de Campisi *et al.*

L'approche de Campisi *et al.* [Campisi et al. 02] a pour objectif d'améliorer l'efficacité de compression d'une image couleur. L'image couleur est transformée en une image en niveaux de gris qui intègre les plans de chrominances puis cette image en niveaux de gris est compressée. Le principe de dissimulation de la couleur est très similaire à l'approche de De Queiroz et Braun. La distorsion entre l'image couleur d'origine et celle reconstruite est néanmoins bien plus petite.

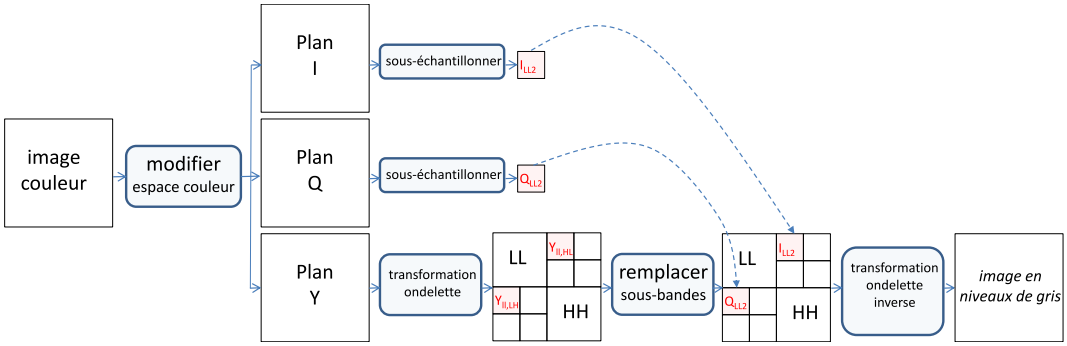


FIGURE 7.5 – Dissimulation de la couleur dans l'approche de Campisi *et al.* [Campisi et al. 02].

.

L'approche, illustrée sur la Figure 7.5, consiste à :

1. exprimer l'image couleur dans l'espace couleur Y, I, Q,
2. sous-échantillonner par seize les deux plans I et Q pour obtenir deux plans notés I_{LL2} et Q_{LL2} ; Ce sous-échantillonnage est réalisé en appliquant une décomposition en ondelette Daubechies 9/7 [Daubechies et al. 98] en 2-niveaux puis en conservant uniquement la sous-bande passe-bas de I et Q,
3. appliquer une décomposition ondelette Daubechies en 1-niveau sur le plan Y et réappliquer une décomposition ondelette en 1-niveau sur la sous-bande HL et LH ; La décomposition de la sous-bande HL (resp. LH) donne quatre sous-bandes et la sous bande passe-bas est notée $Y_{ll,HL}$ (resp. $Y_{ll,LH}$),

4. normaliser les deux plans I_{LL2} et Q_{LL2} avec deux valeurs réelles NI et NQ ; Ces deux valeurs seront transmises comme information adjacente,
5. substituer la sous-bande $Y_{ll,HL}$ (resp. $Y_{ll,LH}$) par I_{LL2} (resp. Q_{LL2}),
6. comprimer l'image en niveaux de gris.

Pour extraire l'information couleur (les plans Y, I, Q) à partir de l'image en niveaux de gris et ensuite reconstruire l'image couleur, il faut :

1. appliquer les transformées ondelette sur l'image en niveaux de gris,
2. extraire I_{LL2} et Q_{LL2} et les multiplier par les valeurs de normalisation NI et NQ,
3. sur-échantillonner I_{LL2} et Q_{LL2} pour obtenir les deux plans I et Q,
4. mettre à zéro l'ensemble des coefficients de $Y_{ll,HL}$ et $Y_{ll,LH}$ et appliquer les transformées ondelette inverses pour obtenir le plan Y ; La Figure 7.6 illustre le principe d'extraction des plans Y, I, Q.

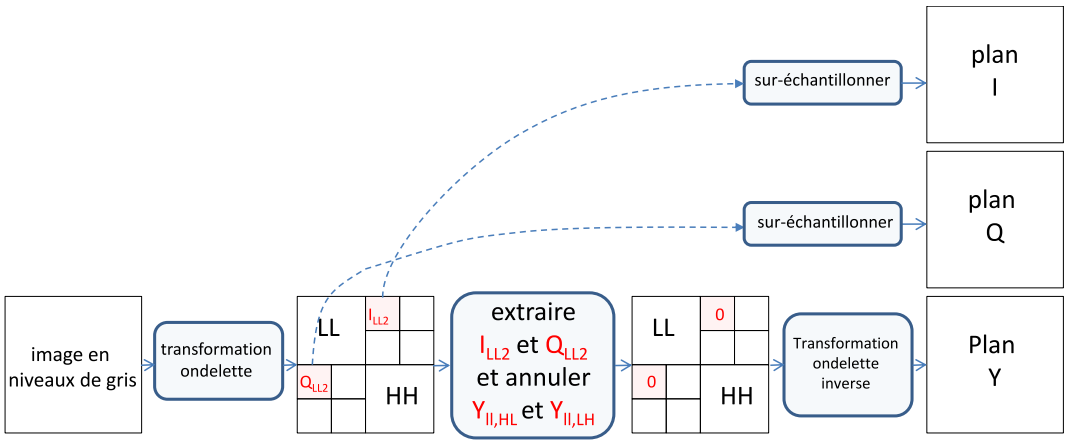
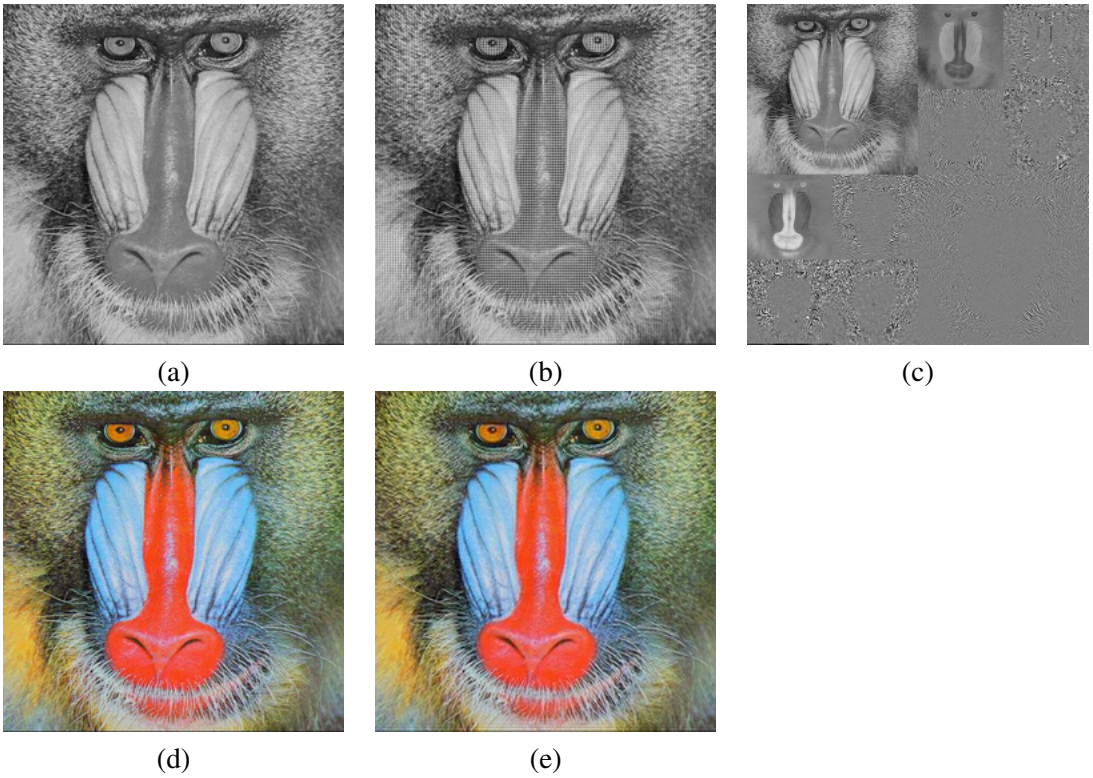


FIGURE 7.6 – Extraction de l'image couleur à partir d'une image en niveaux de gris pour l'approche de Campisi *et al.* [Campisi et al. 02].

La figure 7.7 donne les images clés du processus de dissimulation de la couleur sur l'image baboon. On peut remarquer que l'image couleur reconstruite (Figure 7.7.e) à partir de l'image en niveaux de gris est de bonne qualité. L'approche de Campisi *et al.* fonctionne bien, car elle dégrade peu la composante Y et les plans de chrominances sont de qualité suffisante. En regardant de plus près on peut tout de même observer de très faibles artefacts de rebond. Sur l'ensemble des images testées, les PSNRs calculés entre l'image couleur d'origine et l'image couleur reconstruite sont tous supérieurs à 29 dB (voir Tableau 7.2). L'approche de Campisi *et. al.* permet d'obtenir des résultats objectifs et subjectifs supérieurs à l'approche de [Queiroz et al. 06]. Nous verrons dans la section suivante que l'approche basée palette permet d'obtenir des images reconstruites de meilleure qualité.

7.4 Les approches basées palettes

Afin d'obtenir une image en niveaux de gris embarquant des informations de couleur permettant de régénérer une image en couleur, nous décomposons l'image couleur en une image d'*index*



(a) (b) (c)

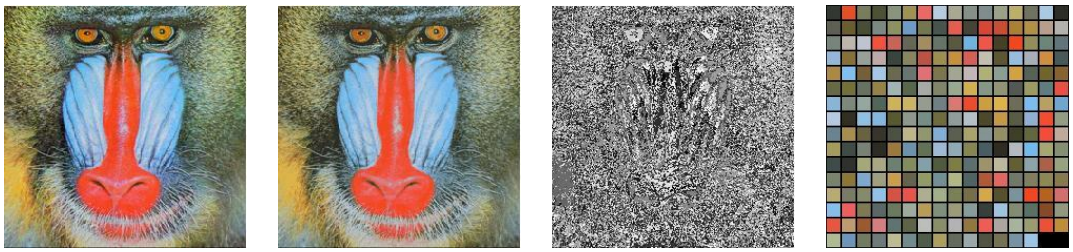
(d) (e)

FIGURE 7.7 – Application de l'approche basée substitution de [Campisi et al. 02] : a) Luminance de l'image originale, b) Image en niveaux de gris embarquant les plans de chrominance, c) Décomposition en ondelette de l'image en niveaux de gris, d) Image couleur originale, e) Image reconstruite à partir de l'image en niveaux de gris.

TABLE 7.2 – PSNR calculé entre l'image de luminance et l'image en niveaux de gris et PSNR calculé entre l'image couleur originale (espace RGB) et l'image reconstruite (espace RGB) en utilisant l'image en niveaux de gris embarquant la couleur pour l'approche de [Campisi et al. 02].

Images	PSNR$_{(luminance,\ niveaux\ de\ gris)}$	PSNR$_{(couleur\ originale,reconstruite)}$
baboon	27.37 dB	29.8 dB
barbara	30.61 dB	31.75 dB
peppers	25.82 dB	32.36 dB
airplane	34.12 dB	32.58 dB
house	30.76 dB	31.76 dB
lena	26.91 dB	36.75 dB

et une palette de couleurs. La figure 7.8 illustre la décomposition de l'image couleur Baboon en une image d'*index* (figure 7.8.c) et une palette de couleurs (figure 7.8.d). L'image d'*index* est une matrice contenant des indices. Chaque indice correspond à une case du tableau de couleurs ; chaque indice pointe donc sur une couleur. Remarquons que la décomposition d'une image couleur correspond à un processus de quantification (voir l'image quantifiée à la figure 7.8.b) avec réduction du nombre de couleurs. Lors du mécanisme de dissimulation, la palette de couleurs est cachée dans l'image d'*index*. La dissimulation de l'information couleur par dissiulation d'une palette fait apparaitre trois contraintes : l'image d'*index* doit être similaire à la luminance de l'image couleur ou tout du moins compréhensible, le processus de dissimulation doit faiblement dégrader l'image d'*index* ou ne pas la dégrader du tout, et la palette de couleurs doit être savamment ordonnée pour, si besoin, faciliter sa compression.



a) Luminance b) Image quantifiée c) Image d'*index* d) Palette

FIGURE 7.8 – Décomposition d'une image couleur en une image d'*index* et une image couleur.

De nombreux travaux de dissimulation de données proposent de cacher dans une image, des données numériques, en utilisant un domaine d'insertion issu de la décomposition d'une image couleur en une image d'*index* et une palette de couleurs. L'insertion de données est alors effectuée : soit dans l'image d'*index* [Fridrich 99], soit dans la palette de couleurs [Wu et al. 03, Tzeng et al. 04]. Parmi les nombreux travaux du domaine, aucun ne propose de cacher la palette de couleurs dans l'image d'*index* c'est-à-dire de protéger les informations couleur.

Nous avons proposé deux solutions à ce problème : l'approche floue [Chaumont et al. 07c] que nous présentons dans le chapitre 8 et l'approche par réorganisation [Chaumont et al. 08a] que nous présentons dans le chapitre 9.

Chapitre 8

Une approche par modélisation floue et optimisation

Résumé

Dans ce chapitre, nous proposons de sécuriser les images couleurs par dissimulation de leur palette de couleurs. L'approche proposée est parue dans [Chaumont et al. 07c]. Le problème est tout d'abord modélisé par une fonctionnelle décrivant la décomposition d'une image couleur en une image d'*index* et une palette de couleurs, puis la fonctionnelle est minimisée. Le modèle proposé permet d'obtenir une décomposition en une image d'*index* semblable à l'image de luminance et une palette de couleurs adaptée pour l'insertion de données cachées. Après la décomposition de l'image couleur, la palette est insérée dans l'image d'*index*. Les images obtenues (images d'*index* marquées et images couleur reconstruites) sont de bonne qualité. Bien que la complexité de l'approche soit élevée, la proposition est élégante et permet aisément d'adapter l'influence de chacune des contraintes.

8.1 Modélisation du problème de décomposition et résolution

Dans cette section nous présentons le modèle énergétique de décomposition d'une image couleur. Nous abordons ensuite dans la section 8.2 la méthode d'insertion de la palette de couleurs dans son image d'*index*. Dans la section 8.3 nous analysons les résultats. Enfin, nous concluons en section 8.4.

Dans [Chaumont et al. 06] l'approche se décompose en deux étapes successives : une quantification et un réordonnancement de la palette de couleurs. La contribution repose sur la définition d'un *algorithme de parcours en couches* dont le but est de parcourir l'espace RGB quantifié pour trouver une palette de couleurs réorganisée. L'approche est extrêmement rapide et permet d'obtenir une image d'*index* fortement contrastée.

Dans l'approche par modélisation floue (*fuzzy*) [Chaumont et al. 07c], l'image d'*index* est meilleure visuellement et nous obtenons un meilleur équilibre qualitatif entre l'image d'*index* et l'image couleur quantifiée. Le problème est également mieux modélisé : la quantification de l'image couleur et l'ordonnancement de palette de couleurs sont réalisés en une seule étape, la contrainte sur la continuité des couleurs de la palette est plus faible et la solution optimale du modèle énergétique est atteinte et non plus approchée.

La décomposition d'une image couleur doit respecter les trois contraintes suivantes :

1. l'image d'*index* doit être semblable à l'image de luminance,
2. l'image couleur quantifiée doit être fidèle à l'image couleur originale,
3. la palette de couleurs doit être composée de couples de couleurs proches.

Mathématiquement cela revient à trouver les $\mathbf{C}(k), k \in \{1, ..., K\}$ couleurs ($\mathbf{C}$ représente la palette de couleurs) et les valeurs d'appartenance $\mathbf{P}_{i,k}, i \in \{1, ..., N\}$ indiquant le degré d'appartenance d'un pixel i à la $k^{ème}$ couleur. Notons que les $\mathbf{P}_{i,k}$ sont des valeurs réelles qui appartiennent à $[0, 1]$ et sont appelées valeurs d'appartenance floue (*fuzzy membership values*) dans les approches de clustering c-mean flou [Dunn 74]. Notons également que l'ensemble des $\mathbf{P}_{i,k}$ donne indirectement l'image d'*index* telle que : $\forall i, Index(i) = \arg_k \max_k \mathbf{P}_{i,k}$.

Ainsi, nous cherchons à minimiser le modèle énergétique E pour obtenir $\forall i, \forall k, \mathbf{P}_{i,k}$ et $\mathbf{C}(k)$:

$$\begin{aligned} E = & \underbrace{\sum_{i=1}^{i=N} \sum_{k=1}^{k=K} \mathbf{P}_{i,k}^{\gamma} dist^2(\mathbf{C}(k), \mathbf{I}(i))}_{premier\ terme} \\ & + \underbrace{\lambda_1 \sum_{i=1}^{i=N} \sum_{k=1}^{k=K} \mathbf{P}_{i,k}^{\gamma} (\mathbf{Y}(i) - k)^2}_{deuxième\ terme} \\ & + \underbrace{\lambda_2 \sum_{k|k\in[1..K]\ et\ k\ est\ impair} dist^2(\mathbf{C}(k), \mathbf{C}(k+1)),}_{troisième\ terme} \end{aligned} \tag{8.1}$$

avec $\mathbf{I}$ l'image couleur, $\mathbf{Y}$ l'image de luminance, $dist$ la fonction distance L2 entre deux couleurs RGB, λ_1 et λ_2 deux scalaires et $\gamma \in]1, \infty[$ le coefficient flou réglant le degré d'équi-répartition [1].

Le premier terme exprime la contrainte de quantification couleur. Le but est de trouver les K couleurs les plus représentatives. Le deuxième terme force l'image d'*index* à être la plus proche possible de l'image de luminance $\mathbf{Y}$. Le dernier terme contraint les couples de couleurs de la palette à être proches.

La minimisation de l'équation 8.1 telle que :

$$\{\mathbf{P}_{i,k}, \mathbf{C}(k)\} = \underset{\{\mathbf{P}_{i,k}, \mathbf{C}(k)\}}{\arg \min} E, \tag{8.2}$$

est obtenue en itérant alternativement le calcul des couleurs $\mathbf{C}(k)$ et le calcul des valeurs d'appartenance $\mathbf{P}_{i,k}$. Les couleurs $\mathbf{C}(k)$ sont donc mises à jour en figeant les valeurs d'appartenance $\mathbf{P}_{i,k}$ et en résolvant le système linéaire suivant :

$\underline{\forall k\ impair}$:

$$\left(\lambda_2 + \sum_{i=1}^{i=N} \mathbf{P}_{i,k}^{\gamma}\right) \times \mathbf{C}(k) - \lambda_2 \times \mathbf{C}(k+1) = \sum_{i=1}^{i=N} \mathbf{P}_{i,k}^{\gamma} \mathbf{I}(i),$$

1. γ est positionné à 2 pour réduire la complexité calculatoire.

$\underline{\forall k \; pair \;:}$

$$-\lambda_2 \times \mathbf{C}(k-1) + \left(\lambda_2 + \sum_{i=1}^{i=N} \mathbf{P}_{i,k}^{\gamma}\right) \times \mathbf{C}(k) = \sum_{i=1}^{i=N} \mathbf{P}_{i,k}^{\gamma} \mathbf{I}(i). \quad (8.3)$$

Les valeurs d'appartenance $\mathbf{P}_{i,k}$ (avec $\gamma = 2$) sont mises à jour en figeant les $\mathbf{C}(k)$:

$$P_{i,k} = \frac{\left(\sum_{l=1}^{l=K} \frac{1}{2\times(dist^2(\mathbf{C}(l),\mathbf{I}(i))+\lambda_1(\mathbf{Y}(i)-l)^2)}\right)^{-1}}{2 \times (dist^2(\mathbf{C}(k), \mathbf{I}(i)) + \lambda_1(\mathbf{Y}(i) - k)^2)}. \quad (8.4)$$

Les détails mathématiques sont donnés en Annexe.

8.2 La méthode d'insertion de données cachées

Nous insérons la palette de couleurs dans les bits de poids faibles (*LSB : Least Significant Bit*) des pixels de l'image d'*index* (l'image est de taille N pixels). La palette de couleurs $\mathbf{C}$, c'est-à-dire le message à insérer, est représentée par un vecteur binaire $\mathbf{m}$ composé de $|\mathbf{m}|$ bits [2]. Le *payload* d'insertion relatif, en $bit/pixel$, est donc $\alpha = |\mathbf{m}|/N$. Par conséquent, le *payload* α dépend uniquement de la taille N de l'image d'*index*.

L'image d'*index* est donc divisée en régions de taille $\lfloor 1/\alpha \rfloor$ pixels. Un Générateur de Nombre Pseudo-Aléatoire (GNPA) choisit aléatoirement, pour chaque région, *un seul pixel* i comme site d'insertion. Cette procédure de partitionnement garantit une répartition homogène du message sur toute l'image d'*index*. Le LSB du pixel i est alors modifié en fonction du bit $\mathbf{m}[j], j \in \{1, ..., |\mathbf{m}|\}$ à insérer [3] :

$$Index_{\mathbf{m}}(i) = Index(i) - Index(i) \; mod \; 2 + \mathbf{m}[j],$$

avec $Index_{\mathbf{m}}(i)$ la valeur du pixel i après insertion.

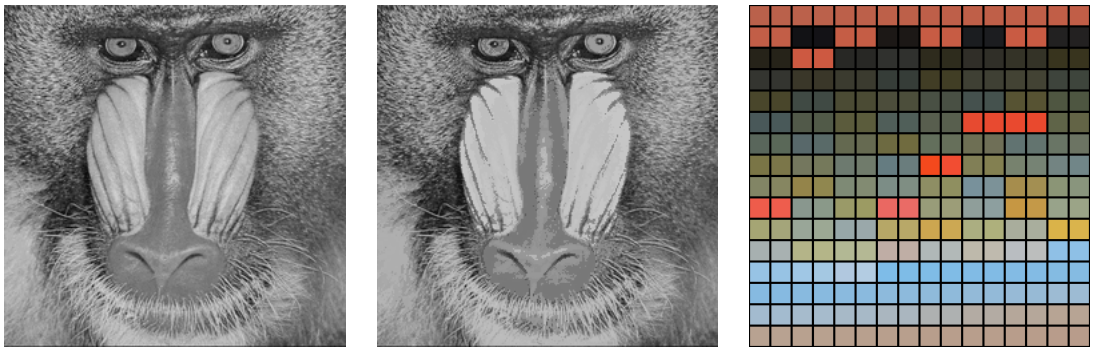
Cette technique d'insertion de la palette de couleurs garantit que chaque pixel marqué est au pire modifié d'un niveau de gris. Ainsi, le pixel couleur reconstruit est toujours proche de sa couleur originale. En effet, le troisième terme de l'équation 8.1 impose que les couples de couleur soient faiblement éloignés.

8.3 Résultats

Nous avons appliqué la méthode sur des images couleur de taille 256×256 pixels. Pour toutes les expériences, $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 0.01 \times N/(K+1)$ et $\gamma = 2$ (voir équation 8.1). Les résultats obtenus montrent que l'approche est efficace quel que soit le type d'image (voir PSNR du tableau 8.1). Les principales étapes de notre approche sont commentées ci-dessous sur l'image *baboon* [4].

Après avoir minimisé l'équation 8.1 sur l'image *baboon* avec $K = 256$ couleurs nous obtenons une image d'*index* (figure 8.1.b) et sa palette de couleurs (figure 8.1.c). L'image de luminance est donnée figure 8.1.a. L'image d'*index* et l'image de luminance sont visuellement similaires et la valeur de PSNR de 27.90 dB confirme ce sentiment. Notons que l'image d'*index* est bien meilleure que celle obtenue dans [Chaumont et al. 06] et représentée figure 8.1.f. (PSNR = 16.32 dB).

2. $|\mathbf{m}|$ = 256 couleurs $\times$ 3 composantes $\times$ 8 bits = 6144 bits.
3. La formule est donnée pour des valeurs d'*index* appartenant à $[0, K-1]$.
4. Notons que les résultats obtenus sur l'image *baboon* donnent la borne inférieure en terme de qualité PSNR.



a) Luminance b) Image d'*index* c) Palette

d) Image couleur e) Reconstruction f) *Index* de [Chaumont et al. 06]

FIGURE 8.1 – Quelques étapes de la sécurisation de la couleur par l'approche par modélisation floue.

Dans la méthode proposée dans [Chaumont et al. 06], la première étape est une quantification vectorielle sur $K = 256$ couleurs. Une telle quantification tend à uniformiser la distribution des valeurs index ; l'histogramme de l'image d'index de [Chaumont et al. 06] est relativement plat (voir « Histogramme image Index avec k-mean » de la figure 8.2). La similarité avec l'histogramme de luminances est donc faible. Dans la méthode que nous proposons ici, l'intervalle de niveaux de gris et la forme de l'histogramme de l'image d'*index* (figure 8.2) sont plus proches de l'histogramme de luminances. On peut également remarquer sur l'histogramme d'*index* que de nombreuses valeurs d'index sont inutilisées ce qui se traduit par la présence de couleurs inutiles dans la palette de couleurs (figure 8.1.c). Notons également sur la palette de couleurs de la figure 8.1.c que les couples de couleurs sont colorimétriquement proches grâce au troisième terme de l'équation 8.1. Il faut enfin préciser que le coût de calcul nécessaire à la minimisation de l'équation 8.1 est très élevé. Dans l'article [Chaumont et al. 07d] nous proposons de réduire ce coût en utilisant une version sous-échantillonnée de l'image. Le temps de calcul est effectivement moindre, mais en contrepartie les PSNRs des images sont plus faibles.

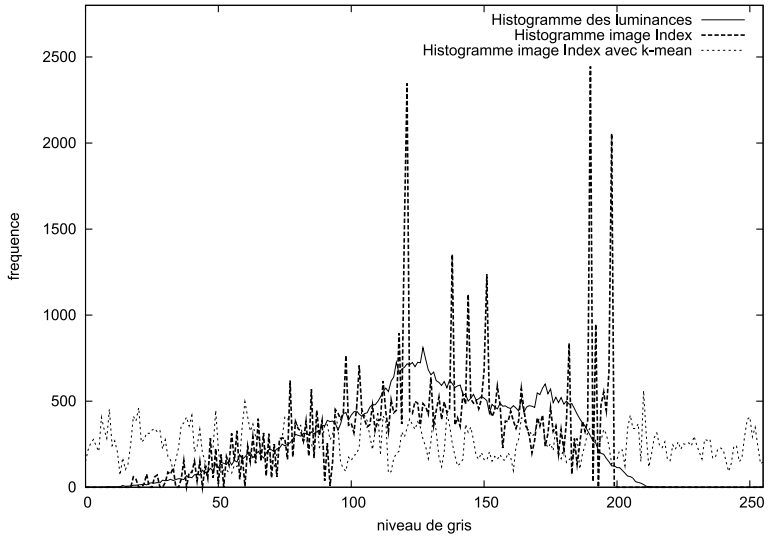


FIGURE 8.2 – Histogrammes.

La longueur du message inséré (la palette de couleurs) est de $|\mathbf{m}| = 6144$ bits ce qui donne un *payload* d'insertion pour une image de 256×256 pixels, de $\alpha = 6144/(256 \times 256) = 0.093$ bit/pixel. L'image d'*index* est alors partitionnée en blocs de 10 pixels. Dans chaque bloc, un bit de la palette de couleurs est inséré à la position choisie par le GNPA comme expliqué dans la section 8.2. La sécurité est obtenue par l'utilisation d'une clé secrète de 128 bits comme graine pour le GNPA.

La figure 8.1.e représente l'image couleur reconstruite à partir de l'image d'*index* marquée. Cette image est visuellement proche de l'image couleur originale même si la valeur de PSNR de 27.90 dB est faible. Notons que la dégradation de l'image couleur quantifiée due à l'insertion de données cachées (dans l'image d'*index*) est faible car au pire une couleur est remplacée par une couleur colorimétriquement proche.

Les PSNRs sont donnés dans le tableau 8.1. Les images couleur reconstruites sont de qualité moyenne (plus de 27 dB), mais visuellement plaisantes. Par rapport à l'approche par substitution

de [Campisi et al. 02] (voir le tableau 9.1 au chapitre suivant), la qualité des images couleur reconstruites est parfois meilleure, parfois moins bonne. Par contre, l'image d'*index* est très proche de l'image de luminance. Nous verrons dans le chapitre suivant qu'en réduisant l'importance de la contrainte liée à la luminance, les images couleurs reconstruites sont de meilleure qualité.

Les PSNRs pour l'image d'*index* marqué sont supérieurs à 29 dB. Dans le cadre d'une application de sécurisation de la couleur par dissimulation dans une image en niveaux de gris, il peut être dommageable pour la sécurité que les images en niveaux de gris (c'est-à-dire les images d'*index* marquées) soient de bonne qualité. En effet, les images peuvent être « re-coloriées » de manière semi-automatique [Chaumont et al. 08b]. La colorisation peut être considérée comme une attaque indirecte dans le sens où il n'y a pas extraction de la palette de couleurs, mais simple estimation d'une palette menant à une image couleur agréable. Le chapitre suivant expose une solution réduisant énormément la qualité PSNR de l'image d'*index* marquée ce qui rend beaucoup plus difficile l'attaque par colorisation.

TABLE 8.1 – PSNR calculé entre l'image de luminance et l'image d'*index* marquée, et PSNR calculé entre l'image couleur originale (espace RGB) et l'image reconstruite (espace RGB) en utilisant l'image d'*index* marquée embarquant sa palette de couleurs.

images	$\text{PSNR}^{luminance}_{(originale,\ index-marquée)}$	$\text{PSNR}^{couleur}_{(originale,\ reconstruite)}$
baboon	29.74 dB	27.90 dB
airplane	35.95 dB	33.66 dB
pepper	35.03 dB	31.68 dB
house	35.40 dB	35.45 dB
barbara	34.86 dB	30.74 dB

8.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous proposons une méthode pour insérer de manière sécurisée dans une image en niveaux de gris ses informations couleur. Cette méthode repose sur la décomposition d'une image couleur en une image d'*index* et une palette de couleurs. L'image d'*index* joue le rôle de l'image de luminance et la palette de couleurs est cachée dans l'image d'*index*. La méthode est composée de deux étapes majeures qui sont : la décomposition de l'image couleur (en une image d'*index* et une palette de couleurs) et l'insertion de données cachées. L'originalité de l'approche est de modéliser le problème avec une fonction énergétique et ensuite de la minimiser. Les résultats obtenus montrent une réelle amélioration en comparaison de [Chaumont et al. 06]. La complexité de l'approche ainsi que sa faille de sécurité face à l'attaque par colorisation sont cependant problématiques. Le chapitre suivant propose une approche qui n'a pas ces inconvénients.

Annexe

Calcul des $\mathbf{P}_{i,k}$

Sachant que les valeurs d'appartenance doivent appartenir à l'intervalle [0, 1] et que $\forall i, \sum_{k=1}^{K} \mathbf{P}_{i,k} = 1$, nous exprimons cette contrainte supplémentaire en ré-écrivant l'équation 8.1 :

$$E_{mod} = E + \lambda \sum_{i=1}^{N} \sum_{k=1}^{K} (1 - \mathbf{P}_{i,k}).$$

En annulant $\frac{\partial E_{mod}}{\partial \mathbf{P}_{i,k}}$ nous pouvons exprimer $\mathbf{P}_{i,k}$:

$$\mathbf{P}_{i,k} = \frac{\lambda}{2 \times (dist^2(\mathbf{C}(k), \mathbf{I}(i)) + \lambda_1 (\mathbf{Y}(i) - k)^2)}. \tag{8.5}$$

Sachant que $\forall i, \sum_{k=1}^{K} \mathbf{P}_{i,k} = 1$, nous déduisons alors λ :

$$\lambda = \frac{1}{\sum_{l=1}^{K} \frac{1}{2 \times (dist^2(\mathbf{C}(l), \mathbf{I}(i)) + \lambda_1 (\mathbf{Y}(i) - l)^2}}.$$

L'équation 8.4 est alors obtenue en substituant λ dans l'équation 8.5.

Calcul des C(k)

En annulant $\frac{\partial E}{\partial \mathbf{C}(k)}$, nous pouvons exprimer $\mathbf{C}(k)$ par un système linéaire donné à l'équation 8.3 ; La matrice $\mathbf{A}$ et le vecteur $\mathbf{B}$ du système linéaire $\mathbf{A}.\mathbf{C} = \mathbf{B}$ sont donnés ci-dessous :

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \lambda_2 + \sum_{i=1}^{i=N} \mathbf{P}_{i,1}^{\gamma} & -\lambda_2 & 0 & ... \\ -\lambda_2 & \lambda_2 + \sum_{i=1}^{i=N} \mathbf{P}_{i,2}^{\gamma} & 0 & ... \\ 0 & 0 & \lambda_2 + \sum_{i=1}^{i=N} \mathbf{P}_{i,3}^{\gamma} & ... \\ 0 & 0 & -\lambda_2 & ... \\ ... & ... & ... & ... \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{i=N} \mathbf{P}_{i,1}^{\gamma} I(i) \\ \sum_{i=1}^{i=N} \mathbf{P}_{i,2}^{\gamma} I(i) \\ ... \\ \sum_{i=1}^{i=N} \mathbf{P}_{i,K-1}^{\gamma} I(i) \\ \sum_{i=1}^{i=N} \mathbf{P}_{i,K}^{\gamma} I(i) \end{pmatrix}.$$

Chapitre 9

Une approche par heuristique étendue au cas 512 couleurs

Résumé

Dans ce chapitre, nous proposons une méthode de dissimulation de la couleur dans une image en niveaux de gris reprennant le principe de réorganisation de palette proposé dans [Chaumont et al. 07b] ainsi qu'une approche de tatouage réversible [Chaumont et al. 09a]. L'approche permet d'obtenir des images couleurs de grande qualité puisque lors de la quantification couleur nous utilisons une palette de 512 couleurs au lieu des 256 couleurs de [Chaumont et al. 07b] et [Chaumont et al. 07c]. La méthode est composée de deux étapes : la décomposition de l'image couleur en image d'*index* et palette de couleurs, et la dissimulation de la palette de couleurs et d'un plan de bits.

9.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons évoqué deux approches permettant de protéger les informations couleur d'une image en dissimulant la palette de couleurs dans l'image d'*index*. Dans [Chaumont et al. 07b] nous trions les couleurs de la palette afin d'obtenir une image d'*index* proche de l'image de luminance. La palette obtenue est telle que les couleurs consécutives sont proches. Dans [Chaumont et al. 07c] l'image d'*index* et la palette sont obtenues grâce à l'optimisation d'une fonction modélisant le problème de la dissimulation de la palette dans une image d'*index*. Dans ces deux approches, la sécurité et la qualité de l'image couleur sont insuffisantes.

Dans ce chapitre nous proposons une solution qui améliore la qualité de l'image couleur et rend plus difficile l'attaque par colorisation [Chaumont et al. 08b]. Les points clés de l'approche sont :

- l'utilisation d'une palette de 512 couleurs ; les valeurs d'*index* appartiennent à $\{0, ..., 511\}$; l'image d'*index* est donc codée sur 9 bits,
- la compression de la palette de couleurs et d'un plan de bits,
- l'utilisation d'un algorithme de tatouage réversible à fort *payload*,
- la dissimulation dans une image en niveaux de gris codée sur 8 bits.

Le schéma général d'insertion et d'extraction est donné à la figure 9.1. Les différentes étapes sont : la décomposition d'une image couleur dans une image d'*index* et une palette de couleurs (section

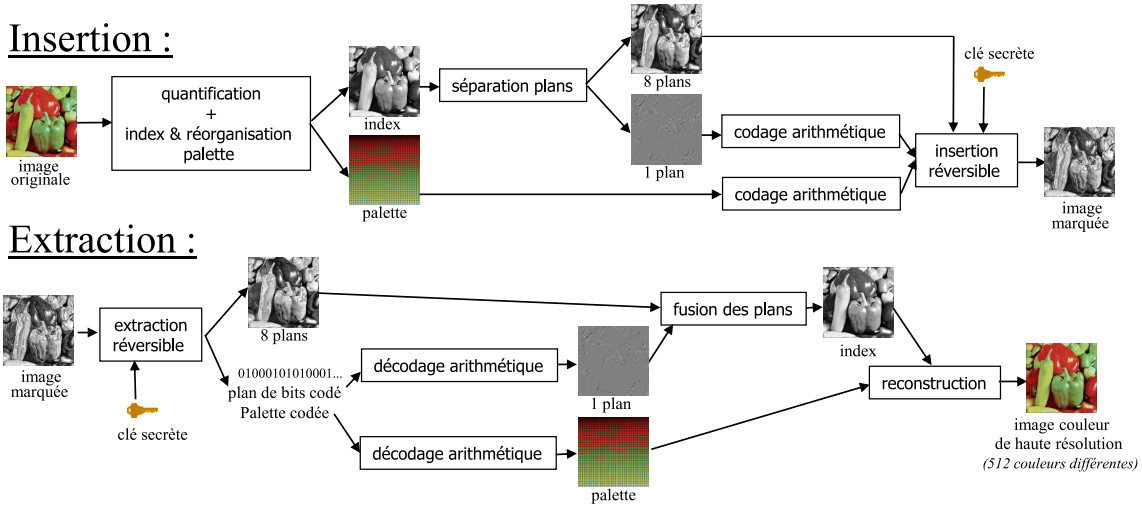


FIGURE 9.1 – Schéma général de l'insertion et de l'extraction pour l'approche de dissimulation par palette de 512 couleurs.

9.2.1 et 9.2.2), le codage de la palette de couleurs et d'un plan de bits (section 9.2.3), et le tatouage de l'image 8 bits construite à partir de l'image d'*index* (section 9.3). Le message à dissimuler dans l'image en niveaux de gris 8 bits est composé de la palette de couleurs et d'un plan de bits. L'image tatouée peut alors être stockée sur un site web public. Le schéma d'extraction est illustré figure 9.1. Ce schéma est l'exact inverse du schéma d'insertion.

9.2 La décomposition de l'image

9.2.1 La quantification couleur

La réduction du nombre de couleurs d'une image couleur est un problème de quantification. La solution optimale pour extraire les K couleurs est obtenue en résolvant :

$$\begin{aligned}\{\mathbf{P}_{i,k}, \mathbf{C}(k)\} \quad = \quad & \arg \min_{\{\mathbf{P}_{i,k}, \mathbf{C}(k)\}} \sum_{i=1}^{N} \sum_{k=1}^{K} \mathbf{P}_{i,k}.dist^2(\mathbf{I}(i), \mathbf{C}(k)), \\ & and\, \forall i, \exists! k', [\mathbf{P}_{i,k'} = 1\, and\, \forall k \neq k', \mathbf{P}_{i,k} = 0]\,,\end{aligned} \tag{9.1}$$

où $\mathbf{I}$ est une image couleur de dimension N pixels, $\mathbf{C}(k)$ est la k-ième couleur parmi les K couleurs recherchées, $dist$ est une fonction de distance dans l'espace couleur (L2 dans l'espace couleur RGB) et $\mathbf{P}_{i,k} \in \{0, 1\}$ est la valeur d'appartenance du pixel i à la couleur k.

Une solution bien connue pour minimiser l'équation (9.1) et ensuite obtenir les K couleurs, est d'utiliser l'algorithme ISODATA des k-moyens [Ball et al. 66]. $\mathbf{P}_{i,k}$ est définie telle que :

$$\forall i, \forall k, \mathbf{P}_{i,k} = \begin{cases} 1 \text{ si } k = \arg\{\min_{k' \in \{1,\ldots,K\}} dist(\mathbf{I}(i), \mathbf{C}(k'))\}, \\ 0 \text{ sinon,} \end{cases}$$

avec $\mathbf{C}(k) = \frac{\sum_{i=1}^{N} \mathbf{P}_{i,k} \times \mathbf{I}(i)}{\sum_{i=1}^{N} \mathbf{P}_{i,k}}$.

Dans notre approche le nombre K est significatif ($K = 512$). Si nous utilisons l'algorithme classique des k-moyens, le nombre de couleurs extrait sera souvent en dessous de K. C'est le problème bien connu de « classes mortes ». De plus, l'algorithme des k-moyens est assez long en temps processeur par rapport aux approches non optimales mais rapides telles que la *quantification couleur par octree* de Gervautz et Purgathofer [Gervautz et al. 90], l'approche par *coupe médiane* de [Heckbert 82] etc. Pour pallier ces deux problèmes (« classes mortes » et complexité calculatoire), nous utilisons l'algorithme de *quantification couleur par octree* comme une initialisation à l'algorithme des k-moyens. Les valeurs de $\mathbf{P}_{i,k}$ sont initialisés à partir du résultat obtenu avec l'algorithme de *quantification couleur par octree*.

9.2.2 L'algorithme de parcours en couches

Une fois que la quantification couleur a été traitée, l'image à K couleurs obtenue peut être représentée par une image d'*index* (valeurs des $\mathbf{P}_{i,k}$) et une palette de couleurs (valeurs $\mathbf{C}(k)$). L'image d'*index* est notée $Index$ et définie par :

$$\forall i \in \{1, ..., N\}, Index(i) = \arg \max_{k \in \{1,...,K\}} \mathbf{P}_{i,k}.$$

Notre but est alors de résoudre deux contraintes ; la première contrainte est d'obtenir une image *d'index* où chaque niveau de gris est proche de la luminance de l'image couleur originale ; la deuxième contrainte consiste à obtenir une palette de couleurs dont les couleurs consécutives sont peu éloignées. Grâce à la quantification couleur, nous possédons déjà une image d'*index* et une palette de couleurs. Notre problème consiste alors à trouver une fonction de permutation qui permutent simultanément les valeurs de l'image d'*index* et les valeurs de la palette de couleurs. La fonction de permutation Φ est trouvée en résolvant l'équation :

$$\Phi = \arg \min_{\Phi} \sum_{i=1}^{N} dist^2(\mathbf{Y}(i), \Phi(Index(i))) + \lambda \sum_{k=1}^{K-1} dist^2(\mathbf{C}(\Phi^{-1}(k)), \mathbf{C}(\Phi^{-1}(k+1))), \quad (9.2)$$

où $\mathbf{Y}$ est la luminance de l'image couleur originale et λ est la valeur du Lagrangien. La fonction de permutation Φ est une fonction bijective dans $\mathbb{N}$ et définie telle que $\Phi : \{1, ..., K\} \rightarrow \{1, ..., K\}$.

Nous approchons l'optimum de l'équation (9.2) en utilisant un algorithme heuristique : *l'algorithme de parcours en couches* [Chaumont et al. 07b]. Le but de cet algorithme est de trouver un ordonnancement pour les K couleurs tel que les couleurs consécutives soient peu éloignées et tel que la luminance des couleurs soient ordonnées des plus sombres aux plus claires. Cet ordonnancement définit pour chaque k-ième couleur une position k' qui nous donne la fonction Φ telle que $\Phi(k) = k'$.

Pour trouver un ordonnancement des K couleurs, l'algorithme parcourt l'espace des couleurs pour construire la suite ordonnée de couleurs. La figure 9.2 illustre le chemin obtenu après un parcours dans le cube RGB. Ce parcours est effectué en « sautant » de couleur en couleur, dans l'espace couleur, en choisissant la couleur la plus proche de la couleur courante. La première couleur de cette suite est choisie comme étant la couleur la plus sombre parmi les K couleurs. Une contrainte supplémentaire à ce parcours consiste à limiter la recherche de couleur aux couleurs peu éloignées en luminance. Cela signifie que le parcours dans l'espace des couleurs est limité à une fenêtre définie sur les informations de luminance. Cet *algorithme de parcours en couches* peut être vu comme une sorte « de parcours 3D en spirale » dans l'espace des couleurs.

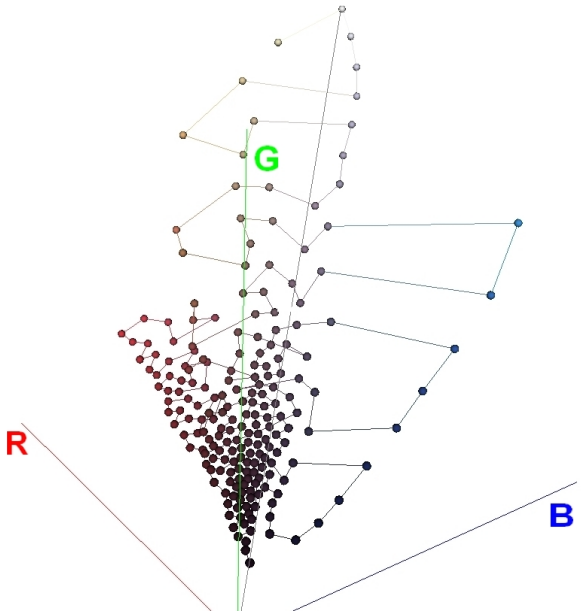


FIGURE 9.2 – Vue du parcours en couches dans le cube RGB.

Cet *algorithme de parcours en couches* possède un paramètre caché qui est la *taille de la couche* utilisée lors du parcours dans l'espace couleur. Notre but étant de minimiser l'équation 9.2, une manière satisfaisante pour régler automatiquement ce paramètre est de tester toutes les valeurs possibles de *taille de couche* et de garder la *taille de couche* minimisant l'équation 9.2. Sachant que les valeurs possibles de *taille de couche* appartiennent à $\{1, ..., K\}$ et qu'il est très rapide de faire un parcours dans l'espace couleur, cette approche donne une solution élégante et rapide pour approximer l'équation 9.2.

Finalement, le paramètre λ de l'équation 9.2 est fixé à $\lambda = \alpha \times N/(3 \times (K-1))$, avec α la valeur permettant de régler le compromis entre une image d'*index* proche de l'image de luminance, ou une palette de couleurs dont les couleurs sont proches deux à deux (voir équation 9.2). Par exemple, lorsque α est fixé à 1 la même importance est donnée aux deux contraintes, lorsque α est fixé à $0,5$ cela signifie une image d'*index* plus proche de l'image de luminance, a contrario lorsque α est fixé à 2 cela implique une palette de couleurs plus continue.

Une fois que l'image d'*index* et la palette de couleurs ont été calculées et réorganisées, on effectue la dissimulation de données. La section suivante explique quel est le message à insérer, comment le mettre en forme et comment fonctionne l'algorithme de tatouage réversible.

9.2.3 Construction du message

Une fois que la décomposition de l'image couleur (en 512 couleurs) et son réarrangement (*algorithme de parcours en couches*) ont été effectués, un des plans de bits de l'image d'*index* est supprimé afin de créer une image de couverture codée sur 8 bits. Le plan de bits supprimé et la palette de couleurs sont ensuite compressés pour être insérés dans l'image de couverture (voir figure 9.1).

La solution retenue pour comprimer la palette de couleurs est de coder l'erreur de prédiction

(codage différentiel + codage arithmétique) de chaque couleur appartenant à la palette de couleurs. Pour comprimer le plan de bits, il est également nécessaire de passer par un codage d'erreur de prédiction afin d'obtenir un taux de compression élevé. Pour cela, le vecteur noté $\mathbf{b}$ représentant le plan de bits est transformé en un vecteur d'erreur de prédiction, noté $\mathbf{e}$, tel que $\mathbf{e} \in \{-1, 0, 1\}^N$ avec N la taille de l'image, puis ce vecteur est codé par un codage entropique. Pour obtenir $\mathbf{e}$, nous procédons en deux étapes.

À la première étape, pour chaque pixel $Index(i)$ (codé sur 9 bits) à la position i, nous calculons la prédiction $Pred_{pixel}(i)$:

$$Pred_{pixel}(i) = \begin{cases} C \; si \; |A - B| < |A - C| \\ B \; sinon, \end{cases} \tag{9.3}$$

avec A, B et C les pixels voisins du pixel courant $Index(i)$ tel que :

ligne précédente	A	B
ligne suivante	C	$Index(i)$

Ce type de prédiction est utilisé dans l'approche « Differential Pulse Code Modulation » (DPCM). Cette technique prend essentiellement en compte les contours d'objets afin d'avoir une prédiction plus efficace qu'une simple moyenne locale. La prédiction est suffisamment efficace pour notre approche. Notons que les prédictions au bord de l'image sont calculées avec les valeurs disponibles.

La deuxième étape consiste à trouver pour chaque position i la meilleure prédiction du bit $\mathbf{b}(i)$ (provenant d'un des plans de l'image $Index$). Que cela soit du côté du codeur ou du côté du décodeur, pour cette position i, les informations des autres plans de bit sont connues. On a donc deux prédictions possibles sachant les autres plans : ou bien prédire un 0 ou bien un 1. Sachant que l'on a la valeur de $Pred_{pixel}(i)$, on doit décider quelle est l'hypothèse la plus probable entre avoir le bit $\mathbf{b}(i)$ à 0 (dans ce cas, la valeur du pixel est notée $Index_0(i) \in \{0, ..., 511\}$) ou avoir le bit $\mathbf{b}(i)$ à 1 (dans ce cas, la valeur du pixel est notée $Index_1(i) \in \{0, ..., 511\}$). L'hypothèse la plus probable (qui sera utilisée comme valeur de prédiction) est choisie en fonction du maximum entre les deux probabilités $prob(Pred_{pixel}(i)|Index_0(i))$ et $prob(Pred_{pixel}(i)|Index_1(i))$. Il s'agit d'un classique test à deux hypothèses et en supposant que les distributions de probabilité sont gaussiennes le meilleur choix est le suivant :

$$Pred_{bit}(i) = \begin{cases} 0 \; si \; (Pred_{pixel}(i) - Index_0(i))^2 < (Pred_{pixel}(i) - Index_1(i))^2 \\ 1 \; sinon. \end{cases} \tag{9.4}$$

Pour finir, le vecteur d'erreur de prédiction $\mathbf{e}$ est calculé (les valeurs d'erreur sont soit -1, 0 ou 1) :

$$\mathbf{e}(i) = \mathbf{b}(i) - Pred_{bit}(i). \tag{9.5}$$

Le vecteur d'erreur de prédiction $\mathbf{e}$ peut maintenant être codé et en raison du bon comportement de la prédiction, l'entropie est plus faible et le coût de codage petit.

9.3 Schéma de tatouage réversible

L'algorithme utilisé pour le tatouage réversible est l'un des plus efficaces en terme de quantité de bits insérés. Une brève description est donnée ci-dessous. L'algorithme est détaillé dans [Chaumont et al. 09a] et est une version améliorée de la proposition de Coltuc [Coltuc 07]. L'algorithme repose sur le calcul de congruences. Les propriétés de congruences permettent de définir **trois états possibles** pour un pixel :

– l'état *embarquant*, qui correspond à un pixel embarquant un coefficient entier appartenant à $\{1, ..., n\}$ (section 9.3.1),
– l'état *à-corriger*, qui correspond à un pixel qui a été modifié, mais n'embarque pas d'informations ; ce pixel sera corrigé au cours du processus de réversion (section 9.3.2),
– l'état *original*, qui correspond à un pixel original, c'est-à-dire inchangé (section 9.3.3).

Soit une valeur constante entière n supérieure ou égale à 3. Définissons une transformation T qui prend deux entiers x_1 et x_2 en entrée et renvoie un entier :

$$\begin{aligned} T &: \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} \\ & T(x_1, x_2) = (n+1).x_1 - n.x_2. \end{aligned} \tag{9.6}$$

Dans la suite de ce chapitre, nous allons nommer « codage » le processus d'insertion d'un message dans une image et « décodage » le processus d'extraction du message et de reconstruction de l'image initiale. Nous allons maintenant définir les trois états possibles pour un pixel et les algorithmes de « codage » et « décodage ».

9.3.1 L'état *embarquant*

Un pixel i dans l'état *embarquant* est un pixel tel que :

$$0 \leq T(\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(i+1)) \ \ et \ \ T(\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(i+1)) + n \leq L, \tag{9.7}$$

avec $\mathbf{X}$ l'image d'*index* dont on a supprimé un plan de bits. Dans notre cas $\mathbf{X}$ (de la taille N pixels) est codée sur 8 bits, les niveaux de gris appartiennent à $\{0, ..., L\}$; donc L est égale à 255. Tous les pixels dans l'état *embarquant* :

1. sont transformés par la fonction T telle que $\mathbf{X}_T(i) = T(\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(i+1))$, avec $\mathbf{X}_T(i)$ le pixel résultant de la transformation,
2. **doivent** embarquer **un** coefficient $w \neq 0$ **appartenant à** $\{\mathbf{1}, ..., n\}$ tel que $\mathbf{X}_w(i) = \mathbf{X}_T(i) + w$ avec $\mathbf{X}_w(i)$ le pixel résultant de l'insertion.

Notons qu'après l'insertion du coefficient $w \neq 0$ appartenant à $\{1, ...n\}$, il est impossible de retrouver $\mathbf{X}(i)$ avec la seule connaissance de $\mathbf{X}(i+1)$ et de n. En effet $\mathbf{X}_w(i) = (n+1).\mathbf{X}(i) - n.\mathbf{X}(i+1) + w$ avec $w \neq 0$, donc $\mathbf{X}(i) = \frac{\mathbf{X}_w(i) - n.\mathbf{X}(i+1) - w}{n+1}$. Il faut donc connaitre w pour pouvoir calculer $\mathbf{X}(i)$. On a en particulier la propriété suivante :

$$(\mathbf{X}_w(i) + n.\mathbf{X}(i+1)) \ mod \ (n+1) \neq 0. \tag{9.8}$$

La **propriété de congruence** de l'équation 9.8 permet la détection d'un pixel *embarquant* durant le « décodage ». Notons que durant le processus de « décodage », le pixel $\mathbf{X}_w(i+1)$ doit avoir été préalablement rétabli à sa valeur initiale $\mathbf{X}(i+1)$ afin de pouvoir calculer la congruence. Cela implique que l'ordre de parcours de l'image, utilisés lors du « décodage », soit l'opposé de l'ordre utilisé lors du « codage ».

9.3.2 L'état *à-corriger*

Un pixel i dans l'état *à-corriger* est un pixel tel que la négation de l'équation 9.7 est vrai c'est-à-dire tel que :

$$T(\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(i+1)) < 0 \ \ ou \ \ T(\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(i+1)) + n > L. \tag{9.9}$$

Tous les pixels qui sont dans cet état *à-corriger* sont ensuite modifiés de telle sorte que :

$$\begin{aligned} &c = (\mathbf{X}(i) + n.\mathbf{X}(i+1))\ mod\ (n+1); \\ &si\ (\mathbf{X}(i) - c) < 0\ \ alors\ \ c = -(n+1-c); \\ &\mathbf{X}_w(i) = \mathbf{X}(i) - c. \end{aligned} \tag{9.10}$$

Les coefficients c appartiennent à $\{-n, ..., n\}$ et sont insérés (dans les pixels *embarquant*) afin de permettre la réversibilité des pixels *à-corriger* durant le « décodage ». Nous appelons les coefficients c les **mots-de-correction**. Après la modification exprimée par l'équation 9.10, le pixel $\mathbf{X}_w(i)$ vérifie la propriété :

$$(\mathbf{X}_w(i) + n.\mathbf{X}(i+1))\ mod\ (n+1) = 0. \tag{9.11}$$

La **propriété de congruence** de l'équation 9.11 permet la détection d'un pixel *à-corriger* durant le « décodage ». Notons que durant le processus de « décodage », le pixel $\mathbf{X}_w(i+1)$ doit avoir été préalablement rétabli à sa valeur initiale $\mathbf{X}(i+1)$ afin de pouvoir calculer la congruence.

9.3.3 L'état original

Étant donné un ordre de parcours de l'image lors du « codage », un pixel dans l'état *original* (c'est-à-dire un pixel non modifié) doit toujours être présent juste avant un pixel dans l'état *à-corriger*. Pour un parcours de l'image allant de haut en bas et de gauche à droite, si un pixel à la position i est détecté dans l'état *à-corriger* (voir équation 9.9), alors le pixel à la position $i-1$ est automatiquement désigné comme étant dans l'état *original* et ce pixel n'est pas modifié. Afin d'assurer cette contrainte forte (les pixels dans l'état *original* et dans l'état *à-corriger* vont par paires), lors du parcours de l'image, quand un pixel à la position i est détecté comme *à-corriger*, une recherche en avant est réalisée afin de trouver la prochaine position dans l'état *embarquant*. Notons cette position $next$. Les états *original* et *à-corriger* sont alors alternés entre la position i (ou $i-1$) et la position $next-1$.

Cette contrainte de groupement (construction de paires (*original* - *à-corriger*)) supprime les dépendances problématiques qui rendraient le « décodage » impossible. En effet, lors du « décodage », l'ordre de parcours de l'image est l'exact inverse de l'ordre utilisé lors du « codage ». Un pixel *à-corriger* à la position i ne peut donc pas être restauré immédiatement si son *mot-de-correction* associé n'a pas encore été extrait (voir équation 9.10). Néanmoins, puisque le pixel à la position $i-1$ est un pixel dans l'état *original*, le pixel à la position $i-2$ peut être traité immédiatement et le processus de « décodage » peut continuer (le pixel à la position i sera corrigé plus tard).

9.3.4 Les algorithmes de « codage » et de « décodage »

Le processus de « codage » est composé de deux étapes successives :

1. classer chaque pixel dans l'un des trois états suivants : *embarquant*, *à-corriger*, *original*,
2. insérer dans les pixels *embarquant*, le signal de tatouage composé des *mots-de-correction* et du message.

Lors du processus de « décodage », l'ordre de parcours est inversé. Le processus de « décodage » est également composé de deux étapes successives :

1. Extraire le signal de tatouage à partir des pixels *embarquant*, et dans le même temps, restaurer tous les pixels dans l'état *embarquant*, et localiser tous les pixels *à-corriger*,
2. À partir du signal de tatouage extrait, récupérer les *mots-de-correction* et le message, et corriger les pixels *à-corriger*.

Remarquons que la sécurité de l'insertion peut être assurée en rendant secret l'ordre de parcours. La clé secrète de l'utilisateur peut être utilisée comme graine d'initialisation d'un générateur de nombres pseudo-aléatoires. La séquence pseudo-aléatoire obtenue permet de générer un ordre de parcours adapté. Le signal de tatouage peut également être chiffré. Ainsi, aucune information sur le message (palette de couleurs + plan de bits) ne peut être extraite par un attaquant. En outre, l'attaque par colorisation [Chaumont et al. 08b], qui consiste à re-colorier semi-automatiquement l'image en niveaux de gris (une petite intervention humaine est nécessaire) est difficile, car l'image en niveaux de gris embarquant le message est de mauvaise qualité. Notons enfin que la technique de tatouage réversible n'est pas robuste et n'a pas besoin de l'être dans le cadre d'une application de sécurisation de la couleur.

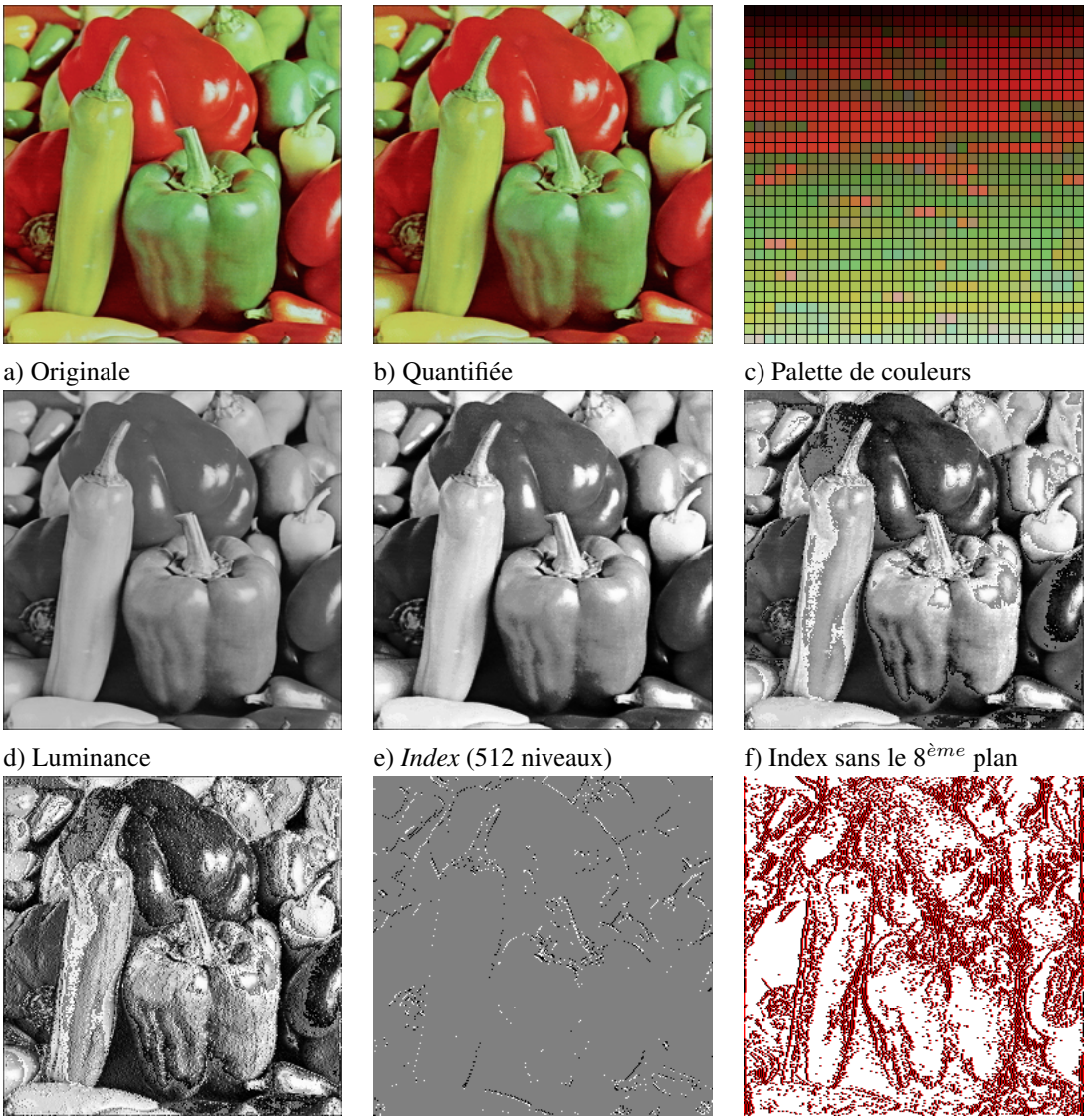
9.4 Résultats

Nous avons appliqué l'« approche 512 couleurs » sur des images couleurs de taille de 256 $\times$ 256 pixels. Pour toutes les expériences, n est fixé à 4 pour le tatouage réversible. Les résultats obtenus montrent que l'approche est efficace quel que soit le type d'images. Les principales étapes de l'approche sont données pour l'image *peppers* sur la figure 9.3.

Après avoir réalisé la décomposition de l'image couleur *peppers* (figure 9.3.a), nous obtenons une image d'*index* dont les valeurs appartiennent à $\{0, ..., 511\}$ (figure 9.3.e), et une palette de couleurs composée de $K = 512$ couleurs (Figure 9.3.c). L'image quantifiée, qui est reconstruite à partir de la connaissance de l'image d'*index* et de la palette de couleurs, est donnée figure 9.3.b. Le PSNR de cette image quantifiée est égal à 38,95 dB. Le meilleur PSNR obtenu avec une approche basée palette est de 36,32 dB avec l'approche par ré-ordonnancement de [Chaumont et al. 07b]. Le **gain** en qualité obtenu avec l'approche à 512 couleurs est de plus de 2 dB pour l'image couleur reconstruite.

L'image de luminance de l'image couleur d'origine est donnée figure 9.3.d. On peut observer la grande similarité visuelle entre l'image de luminance et de l'image d'*index*. L'image d'*index* est plus contrastée, mais conserve son intelligibilité sémantique.

Une fois la décomposition de l'image couleur faite, l'image d'*index* est décomposée en une image 8 bits (Figure 9.3.f) et une image binaire formée d'un seul plan de bits. Pour l'image *peppers* c'est le huitième plan de bits qui est choisi pour former l'image binaire. L'image binaire est ensuite modifiée afin d'obtenir une image d'erreur de prédiction (image ternaire) de faible entropie (voir section 9.2.3). Cette image d'erreur de prédiction est illustrée à la figure 9.3.h. Sur la figure, les pixels gris correspondent à la valeur 0, les pixels noirs correspondent à la valeur -1, et les pixels blancs correspondent à la valeur 1. L'image d'erreur de prédiction et la palette de couleurs sont ensuite encodés avec un codeur arithmétique [Said 03]. Le signal de tatouage inséré est alors composé de la concaténation des deux flux binaires résultant du codage entropique. La figure 9.3.i représente une carte donnant la localisation des sites d'insertion (pixels blancs) avec l'approche de tatouage réversible de [Chaumont et al. 09a]. La figure 9.3.g donne l'image finale 8 bits intégrant la palette de couleurs (de 512 couleurs) et le huitième plan de bits de l'image d'*index*.



a) Originale b) Quantifiée c) Palette de couleurs

d) Luminance e) *Index* (512 niveaux) f) Index sans le $8^{ème}$ plan

g) Image marquée h) $8^{ème}$ plan i) Sites d'insertion

FIGURE 9.3 – Étapes de l'approche 512 couleurs.

La qualité de l'image tatouée (voir figure 9.3.g) est mauvaise, mais comme nous l'avons précédemment expliqué c'est une bonne propriété. En effet, l'image tatouée est plus difficile à « attaquer » par une attaque par coloriage [Chaumont et al. 08b]. Au contraire, l'image couleur reconstruite, sachant la clé secrète, donne une image couleur de très bonne qualité (PSNR = 38,95 dB).

L'approche à 512 couleurs est également illustrée pour l'image *barbara* 315 $\times$ 230 sur la figure 9.4. La figure 9.4.a représente l'image originale, la figure 9.4.c correspond à l'image tatouée et la figure 9.4.b est l'image reconstruite (c'est-à-dire quantifiée) avec un PSNR de 38,75 dB. Notons que le contenu sémantique de l'image tatouée est préservé.

Le tableau 9.1 donne sur quelques images les PSNRs obtenus entre l'image couleur d'origine et l'image reconstruite pour différentes approches. Pour toutes les images, l'approche basée palette à 512 couleurs est supérieure de 2dB à la deuxième meilleure approche de [Chaumont et al. 07b].

a) Originale b) Quantifiée c) Tatouée

FIGURE 9.4 – Exemple sur l'image *barbara*.

TABLE 9.1 – Comparaison des PSNRs calculés entre l'image couleur originale et l'image couleur reconstruite pour différentes approches.

Images	Queiroz et Braun	Campisi *et al.*	Flou	Réarrangement	512 couleurs
	[Queiroz et al. 06]	[Campisi et al. 02]	[Chaumont et al. 07c]	[Chaumont et al. 07b]	[Chaumont et al. 08a]
baboon	23.93 dB	29.8 dB	27.90 dB	33.31 dB	35.86 dB
peppers	28.82 dB	32.36 dB	31.68 dB	36.32 dB	38.95 dB
lena	30.31 dB	36.75 dB	37.87 dB	38.63 dB	40.93 dB
house	30.75 dB	31.76 dB	35.45 dB	39.27 dB	41.67 dB
airplane	28.56 dB	32.58 dB	33.66 dB	39.90 dB	42.96 dB

9.5 Conclusion

Dans cette partie du manuscrit, nous avons évoqué différentes solutions afin de protéger les informations de couleur d'une image. Nous avons rappelé deux techniques utilisables pour la protection de la couleur [Queiroz et al. 06, Campisi et al. 02]. Ces techniques sont basées sur des substitutions de sous-bandes ondelettes. Nous avons ensuite présenté une approche basée palette :

l'approche floue [Chaumont et al. 07c]. Nous avons enfin présenté une approche à 512 couleurs [Chaumont et al. 08a].

L'approche à 512 couleurs consiste à cacher une palette de 512 couleurs dans une image 8 bits en niveaux de gris. La méthode est basée sur une décomposition d'une image couleur dans une image d'*index* et une palette de couleurs de 512 couleurs. L'image d'*index* est alors divisée en une image 8 bits et une image binaire. L'image binaire et la palette de couleurs sont ensuite insérées de manière réversible dans l'image 8 bits. L'image tatouée résultante est encore sémantiquement compréhensible.

Les évaluations PSNR montrent que l'approche 512 couleurs améliore la qualité générale de l'image couleur reconstruite par rapport aux autres approches. En outre, la sécurité (confidentialité de la couleur) est renforcée par la réduction de la qualité de l'image en niveaux de gris. Enfin, la complexité calculatoire est faible.

En conclusion, il est possible de protéger la couleur d'une image en fournissant une image en niveaux de gris dégradée, mais sémantiquement compréhensible et dont l'image couleur reconstruite est de bonne qualité. Des améliorations sont sans doute possibles en mélangeant les différentes approches.

Conclusion générale

Le tatouage est une discipline jeune d'une vingtaine d'années. À ses débuts elle a très largement été financée par l'industrie de la musique et du cinéma pour produire des applications de protection des droits d'auteurs. Le tatouage était vu comme un instrument de sécurisation (droits d'auteur, suivi de transaction, authenticité, contrôle de copie). La formulation théorique de la robustesse et de la sécurité n'est pourtant apparue qu'à partir des années 2000. D'autre part, le tatouage (ou dissimulation de donnée) a aussi une dimension qui n'est pas liée à la sécurité et où la robustesse n'est pas toujours nécessaire. Le tatouage est alors généralement utilisé pour enrichir le média en y ajoutant des méta-données.

Durant les cinq dernières années, le tatouage robuste a été bien mieux compris et en particulier à travers deux compétitions de cassage de schéma de tatouage BOWS [Piva et al. 07] et BOWS-2 [Bas et al. fr]. De plus, les définitions liées à la sécurité ont été formalisées et des attaques à la sécurité ont été proposées. Dans cet esprit de compréhension des mécanismes de tatouage robuste et sûr, nous avons proposé une approche de tatouage sûr par treillis ainsi qu'une approche de tatouage par quantification. L'objectif était d'étudier les mécanismes de tatouage informé multibits à forte capacité, et ceci, dans des conditions d'utilisation réalistes (dégradation réaliste de la qualité, faible complexité calculatoire, utilisation d'attaque classique). Notre souhait était de déterminer laquelle de ces deux familles de tatouage était la plus performante en pratique. Les conclusions et les perspectives de ces deux approches sont détaillées en section suivante.

Une des particularités que nous avons développée dans l'équipe ICAR est d'ajouter aux standards de compression (JPEG, JPEG2000, H.264, ...) des mécanismes de sécurisation ou d'enrichissement. Par ailleurs, le nombre de publications concernant le tatouage conjoint à la compression (JPEG2000, H.264, etc) est très inférieur au nombre de publications portant sur du tatouage d'images. Il y avait et qu'il reste encore beaucoup à faire sur le sujet. Grâce à trois encadrements de thèse, nous avons pu développer des mécanismes de dissimulation robuste ou non robuste. L'objectif est principalement de s'intégrer finement à l'étape de codage et bien souvent de manière à obtenir une complexité de calcul faible. Par ailleurs, le tatouage peut prendre en compte la dégradation de l'étape de quantification et cela permet de réaliser un tatouage survivant à cette « attaque ». Les conclusions et les perspectives des mécanismes de tatouage conjoint sont détaillées deux sections plus loin.

Enfin, la dissimulation de données sans recherche de robustesse est exploitée sous de multiples formes (ajout de méta-data, contrôle de périphériques, analyse de flux, amélioration des performances de compression et de transmission, ...). Lors du projet ANR Tsar de sécurisation de la base de données d'images du Louvre, nous sommes partis sur une idée originale qui consistait à dissimuler l'information couleur d'une image au sein d'une représentation en niveaux de gris de cette même image. La dissimulation de la couleur via l'utilisation d'une palette de couleurs apporte une nouvelle façon de procéder. Les propositions et les idées que nous avons développées

(notions d'attaque par coloriage, notion d'approche non robuste, mais dont le message est sécurisé, notion de décomposition en palette de couleur en vue du tatouage) ont apporté un autre regard sur ce domaine. Les conclusions et les perspectives des mécanismes de dissimulation de la couleur sont détaillées dans la dernière section.

Le tatouage robuste

Dans ce manuscrit nous avons abordé trois aspects de la dissimulation de données. Dans la première partie du manuscrit, nous avons traité du tatouage robuste. Nous avons présenté les principes de tatouage informé, ainsi que les deux principales familles : le tatouage basé quantification et le tatouage basé treillis. Dans le chapitre 2, nous avons proposé une approche par rotation pour le tatouage par code à papier sale basé treillis. Dans le chapitre 3, nous avons intégré une approche par TCQ au sein d'un système de tatouage basé quantification. Dans les deux propositions, le système de codage est à fort payload et prend en compte les aspects psychovisuels. La robustesse de ces schémas, lorsque le payload est très élevé (on se place dans des conditions difficiles), est sensiblement la même. Les schémas ne résistent qu'à des attaques de très faible puissance. Le schéma basé quantification est cependant le moins complexe en coût de calcul. Il est évident que le payload sur lequel nous avons expérimenté est trop élevé pour des applications pratiques où la robustesse doit être bien plus élevée. Ces approches peuvent cependant être adaptées pour des payload bien plus faibles et donc permettent d'obtenir des schémas utilisables en pratique. Il faut également noter que ces schémas ne sont pas sûrs en terme de sécurité (au sens de Kerckhoffs [Kerckhoffs 83]), [Bas et al. 08, PérezFreire et al. 07]. De ce point de vue, l'approche par treillis reste plus sûre puisque l'attaque proposée [Bas et al. 08] repose sur une version simplifiée de l'algorithme de tatouage et ne fonctionne pas sur la version non simplifiée. Quoi qu'il en soit, si l'on cherche des solutions robustes et de faibles payloads, les deux schémas sont tout à fait viables.

On peut se demander si les schémas actuels peuvent encore évoluer afin de lever les derniers verrous ou si seules des modifications mineures peuvent être apportées. Pour ce qui est des schémas multi-bits informés, une participation jointe des codes correcteurs comme cela est proposé dans l'approche de [Le Guelvouit 09] permettrait bien évidemment d'aller au plus proche des performances théoriques. La recherche d'espaces psychovisuels robustes, d'espaces adaptés au tatouage ainsi que des mesures psychovisuelles [Autrusseau et al. 11] adaptées au tatouage est également un point d'amélioration essentiel. On s'écarte alors du tatouage à proprement parler pour aller vers une recherche autour du psychovisuel. Du point de vue de nombreux chercheurs de la discipline, une des difficultés majeures et toujours d'actualité du tatouage, concerne le schéma robuste aux attaques désynchronisantes. De nombreuses propositions ont été faites autour des années 2000 [Zheng et al. 07, Chaumont 09c] mais les approches les plus performantes ne sont robustes qu'à des désynchronisations extrêmement simples. Lorsque l'application est clairement identifiée et que les dégradations géométriques sont assez limitées (par exemple dans le cas de l'enregistrement d'un film dans un cinéma via une caméra tenue à la main), il est possible de proposer une solution. Mais actuellement, dans un cas général, il n'existe aucun schéma robuste aux désynchronisations à détection aveugle assurant à la fois une robustesse et une sécurité suffisantes. Les propositions sur le tatouage informé sont apparues autour des années 2000 et ont rarement été prises en compte pour la construction de schémas robustes aux désynchronisations. Les codes correcteurs à gestion d'effacement ont également rarement été utilisée pour ces problèmes. Il y a donc des pistes à creuser autour du tatouage robuste aux désynchronisations avec utilisation

d'approches informées et de codes correcteurs à gestion d'effacements et donc poursuivre dans la ligné des travaux de [Solanki et al. 06] et [Schlauweg et al. 08]. Une autre des évolutions de la discipline consiste à proposer des schémas de tatouage pour le traçage de traître. D'un côté, il est nécessaire de proposer des mécanismes de traçage comme c'est le cas avec les codes de Tardos, et de l'autre, il faut proposer des mécanismes de tatouage dissimulant ces codes tout en respectant les hypothèses de validité d'utilisation de ces codes. C'est ce qu'ont proposé [Xie et al. 08] et [Desoubeaux et al. 11], mais les schémas ne permettent pas encore de gérer une attaque effectuée par un nombre élevé de *colluders*.

Le tatouage conjoint à la compression

Dans la deuxième partie du manuscrit nous avons abordé le tatouage intégré au sein d'un système de compression H.264 ou JPEG2000. Si le tatouage est effectué avant la compression, alors le schéma ne prend pas nécessairement en compte la dégradation due à la compression. Un mécanisme de tatouage intégré à l'étape de compression permet de prendre en compte la phase de dégradation du signal et donc rendre le signal de tatouage robuste à cette étape. De plus, dans un schéma conjoint à la compression, bien souvent la complexité calculatoire est plus faible. De manière générale le tatouage dans des supports différents des images a beaucoup moins été étudié. Dans le chapitre 5 du manuscrit, nous présentons une approche utilisant la TCQ de JPEG2000 partie 2 pour effectuer la quantification et le tatouage simultanément. Pour que le schéma résiste à la phase de contrôle de taux, il faut sélectionner les coefficients et également préserver l'information de cheminement dans le treillis. Le schéma se comporte bien si l'on considère que c'est un simple schéma d'insertion de données cachées ne nécessitant pas de robustesse. Par contre, si l'on souhaite rendre le schéma robuste et également à détection aveugle (c'est-à-dire ne nécessitant pas d'information autre que la clé secrète lors de l'extraction) il est nécessaire de mettre en place des mécanismes de code correcteur gérant les effacements. Quoiqu'il en soit on constate qu'il est difficile d'intégrer un mécanisme de tatouage au sein d'un codeur car les contraintes structurelles du codeur peuvent gêner l'étape de tatouage. On retrouve d'ailleurs ce même genre de constat dans la partie 6 du manuscrit où nous présentons une approche de tatouage intégrée à H.264, prenant en compte l'optimisation débit-distorsion et embarquant un code de Tardos. Le schéma se comporte bien face à des attaques par collusion. Beaucoup d'améliorations sont envisageables notamment en reprenant une insertion similaire à celle proposé dans Broken Arrows [Furon et al. 08]. Il est également nécessaire de trouver des codes de Tardos plus courts ou bien de trouver des mécanismes de traçage de traître nécessitant d'insérer peu de bits. Pour conclure, le schéma possède les avantages des meilleures approches de tatouage conjointe à la compression : ils sont simples, ils sont peu complexes calculatoirement, et ils fournissent une bonne robustesse. Cependant ce schéma possède également les défauts des approches de tatouage conjointe à la compression : les paramètres de quantification sont des informations adjacentes nécessaires lors de l'extraction, il est difficile d'assurer la robustesse aux attaques valumétriques, il est difficile d'étendre le schéma à une approche robuste aux désynchronistations, enfin les schémas sont souvent plus vulnérables aux attaques malicieuses ou aux attaques à la sécurité que les schéma de tatouage dans les images.

Un des futurs de la discipline est l'étude plus intensive de médias autres que l'image comme la vidéo, le son [Cayre et al. 09], les modèles 3D [Wang et al. 11]. De ce point de vue, que cela soit pour l'insertion conjointe à JPEG2000 ou conjointe à H.264, il reste beaucoup à faire. La robustesse est en général mal ou pas évaluée. Le protocole est assez lourd puisque l'attaque d'une image

JPEG2000 ou H.264 nécessite de décoder le flux, d'attaquer le ou les images, puis possiblement ré-encoder (sans insertion) à un débit différent du débit original. La phase d'extraction doit alors décoder le flux puis le ré-encoder au débit initiale et réaliser l'extraction du message. Les attaques sont également plus nombreuses puisque celles-ci peuvent être effectuées dans le domaine spatial, dans le domaine transformé ou au sein du flux JPEG2000 ou H.264. Pour être encore plus général, il faut prendre en compte les attaques de désynchronisation spatiale et également les attaques de désynchronisation temporelle pour H.264. Pour les vidéos, l'étude de la sécurité a été initié par [Doërr 05], mais au vu des nouvelles approches informées et des nouvelles connaissances en sécurité, il reste beaucoup à faire. Si l'on considère les séquences d'images, la proposition de mécanisme robuste aux désynchronisations peut être obtenue en exploitant la dimension temporelle comme dans [Chen et al. 09] et en intégrant les mécanismes de Broken Arrows [Xie et al. 08].

La dissimulation de données

Dans la troisième et dernière partie du manuscrit, nous présentons une approche de dissimulation de la couleur dans une image en niveaux de gris. Cette fois-ci, la robustesse n'est pas du tout recherchée. Après avoir présenté les approches de dissimulation par substitution de sous-bandes ondelettes nous présentons deux approches utilisant la décomposition en palette de couleurs. Dans la partie 7 du manuscrit nous proposons une formulation énergétique du problème de décomposition d'une image couleur en une image d'index et une palette couleur pour le problème de dissimulation. L'optimisation donne de bons résultats, mais la complexité calculatoire de l'approche est relativement élevée. Dans la partie 8 du manuscrit, nous présentons une approche empirique rapide permettant de ré-arranger une palette, préalablement générée par une approche par quantification. La palette que nous manipulons comporte 512 couleurs et nous la dissimulons dans une image en niveaux de gris par le biais d'un schéma de tatouage réversible. L'approche par palette de 512 couleurs donne de très bons résultats en comparaison de l'état de l'art. Le schéma de tatouage réversible ne fonctionne probablement pas sur toutes les images et dans ce cas, il faudrait envisager une insertion non réversible (par LSB par exemple). Certains points peuvent être améliorés comme la phase de quantification couleurs, l'utilisation d'un domaine couleur plus adapté, l'utilisation de palettes annexes.

De manière générale, la dissimulation de données non robuste sert à l'enrichissement de médias. Les mécanismes d'insertion utilisent principalement de l'insertion basée LSB, des approches liées au traitement du signal et de l'image, et du codage de source et de canal. Chaque application est différente et le panel d'applications est vaste (voir tableau 1.1). Les applications qui sont le plus proches du tatouage dans le sens « communication fiable » sont, à mon avis, celles qui cherchent à améliorer les performances de compression [Campisi et al. 02, Thiesse et al. 10] et celles qui utilisent l'information dissimulée comme mécanismes de corrections d'erreurs après transmission [Adsumilli et al. 05]. Pour ce genre d'applications, il y a eu très peu de propositions et c'est un axe prometteur.

Projet de recherche

Depuis mon arrivée au LIRMM fin 2005, j'étudie le tatouage et son intégration aux schémas de compression images et vidéos. De nombreux étudiants de Master, et plusieurs doctorants ont également étudié et étudient encore les standards JPEG2000, H.264/AVC et SVC pour intégrer à ces standards de compression des mécanismes de cryptage et/ou de tatouage. Dans les années à venir, nous poursuivrons l'étude du tatouage, du tatouage conjoint à la compression d'images, de vidéos et de modèles 3D, et de la stéganographie. Mon projet de recherche s'inscrit donc dans la continuité des travaux que je mène depuis 2005. Dans les années à venir, mes recherches porteront plus fortement sur les codes et leurs intégrations et/ou leurs couplages au tatouage et à la stéganographie. Dans le manuscrit j'évoque de nombreuses pistes qui vont dans ce sens. En filigrane, les aspects sécurité seront présents et plus particulièrement en stéganographie et en criminalistique. Ci-dessous, je donne quelques pistes allant dans le sens de mon projet de recherche.

Les problématiques de tatouage robuste aux désynchronisations (par exemple pour le cinéma ou les bases de données d'images) restent non résolues dans le cas général d'un tatouage à détection aveugle. À la vue des récentes avancées en tatouage informé, ainsi qu'en sécurité, les schémas robustes aux désynchronisations, proposés autour de l'année 2000, peuvent être revus et étendus. Nous avons déjà abordé le problème à travers une proposition de tatouage basé sur les points caractéristiques d'une image. Nous étudierons les espaces invariants aux désynchronisations et l'intégration de codes correcteurs d'erreurs à gestion d'effacements, en particulier pour la vidéo.

L'étude des codes correcteurs d'erreurs est également un point qui fait partie de mes préoccupations pour les années à venir. Les codes correcteurs peuvent être utilisés pour la gestion des effacements. Cette propriété peut venir en soutien des systèmes de tatouage comme par exemple dans notre schéma de tatouage conjoint à JPEG2000 (décrit dans la cinquième partie du manuscrit). On peut également envisager de revoir la construction des codes de tatouage avec la vision « codes correcteurs », comme cela a été proposé pour l'algorithme DPTC présenté au deuxième chapitre. Les approches turbo sont également un point d'amélioration des mécanismes de tatouage basé quantifications présentés dans le troisième chapitre du manuscrit. Enfin, les codes correcteurs sont également utilisés en stéganographie qui fait partie d'un de mes axes de recherche.

Nous avons abordé l'étude des codes anti-collusions à travers la proposition d'un schéma de tatouage intégré dans H264 (présenté en chapitre six) où nous avons utilisé le code de Tardos. Beaucoup de propositions autour de codes similaires à celui de Tardos sont actuellement proposés pour la problématique du suivi de transaction (traçage de traître). C'est un domaine qui est actuellement riche en propositions et l'étude de codes anti-collusion qui soient également adaptés à la problématique du tatouage et en particulier du tatouage vidéo reste un axe à creuser.

En 2010 nous avons débuté une nouvelle activité de recherche en stéganographie. Nous avons d'abord défriché le domaine avec l'encadrement d'un stagiaire L3MI (UE module-projet d'un semestre), puis d'un stagiaire de Master 2 recherche. En octobre 2010, la thèse de Sarra Kouider

a débuté et nous travaillons actuellement à la proposition de schémas stéganographiques sûrs à travers l'étude de codes performants et également à travers l'étude de la notion de sécurité. La stagénographie moderne a tout juste dix ans. Le futur est probablement dans l'extension des hypothèses d'utilisation vers des hypothèses plus réalistes que celles qui sont utilisées actuellement. En particulier on devra, du coté stéganalyse, prendre en compte le fait que les capacités d'insertion peuvent varier, les données dissimulées peuvent être clairsemées et peuvent être présentes sur différents supports, les distributions des couvertures ne sont pas nécessairement connues des stéganalystes (« source-cover mismatch »), les images stéganographiées doivent être « capturées » puisqu'elles sont diffusées la plupart du temps sur un réseau. Du côté stéganographie, nous étudierons les codes, mais également la proposition de cartes de détectabilités, l'étude de la stéganographie à gardien actif ou malicieux, ou encore la stéganographie ciblée.

À plus long terme nous pensons relancer des études sur les futurs schémas de compression vidéo (futur standard « High Efficiency Video Coding : HEVC », compression multi-vue, télévision 3D, ...). Depuis ma thèse j'étudie la compression vidéo et j'ai examiné un grand nombre de conférences sur le sujet. En particulier je pense que les transformations par utilisation de la parcimonie (sparsity) sont prometteuses. J'envisage également à long terme d'étudier les problématiques liées à la criminalistique d'images ou de vidéos (« images and videos forensics »). Cette problématique consiste à prouver la falsification d'une image / vidéo (par exemple la suppression d'une personne), la provenance d'une image / vidéo (déterminer l'appareil ayant généré l'image ou la vidéo), ou bien n'importe quelle preuve aidant à la résolution d'un crime.

De manière générale mon projet de recherche est dans la continuité des travaux que j'ai déjà mené en compression et en tatouage. J'élargie également celui-ci à de nouveaux axes comme la stéganographie ou la criminalistique. Pour résumer, Le leigh motif de mon projet de recherche est l'étude des codes.

Bibliography

Abrardo (A.), Barni (M.), Perez-Gonzalez (F.) et Mosquera (C.). – Improving the Performance of RDM Watermarking by Means of Trellis Coded Quantisation. *IET Information Security, IEE Proceedings*, 153(3) :107 –114, Septembre 2006.

Adsumilli (C.B.), Farias (M.C.Q.), Mitra (S.K.) et Carli (M.). – A Robust Error Concealment Technique Using Data Hiding for Image and Video Transmission Over Lossy Channels. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 15(11) :1394 – 1406, Novembre 2005.

Autrusseau (F.), David (S.), Pankajakshan (V.) et Campisi (P.). – A Perceptually Driven Hybrid Additive-Multiplicative Watermarking Technique in the Wavelet Domain. – *Media Watermarking, Security, and Forensics III, Part of IS&T/SPIE 21th Annual Symposium on Electronic Imaging, SPIE'2011*, vol. 7880, San Francisco, California, USA, Février 2011.

Ball (G. H.) et Hall (D. J.). – ISODATA, A novel Method of Data Analysis and Pattern Classification. – *Proceedings of the International Communication Conference*, Philadelphia, Juin 1966.

Bardyn (D.), Dooms (A.), Dams (T.) et Schelkens (P.). – Comparative Study of Wavelet Based Lattice QIM Techniques and Robustness Against AWGN and JPEG Attacks. – Ho (Anthony T.S.), Shi (Yun Q.), Kim (H.J.) et Barni (Mauro) (édité par), *8th International Workshop on Digital Watermarking, IWDW'2009*, vol. 5703 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 39–53, University of Surrey, Guildford, United Kingdom, Août 2009. Springer.

Bas (P.) et Doërr (G.). – Evaluation of an Optimal Watermark Tampering Attack Against Dirty Paper Trellis Schemes. – *10th ACM workshop on Multimedia and Security, MM&Sec'2008*, pp. 227–232, Oxford, United Kingdom, Septembre 2008.

Bas (P.) et Westfeld (A.). – Two Key Estimation Techniques for the Broken-Arrows Watermarking Scheme. – *11th ACM workshop on Multimedia and Security, MM&Sec'2009*, pp. 1–8, Princeton, USA, Septembre 2009.

Bas (P.) et Furon (T.). – BOWS-2 Contest (Break Our Watermarking System), entre le 17 juillet 2007 et le 17 avril 2008. http ://bows2.ec-lille.fr/.

Beaumesnil (B.), Chaumont (M.) et Luthon (F.). – Liptracking and MPEG4 Animation with Feedback Control. – *IEEE International Conference on Acoustics Speech Signal Processing, ICASSP'2006*, Toulouse, France, Mai 2006.

Berrezoug (O.) et Chaumont (M.). – Tatouage robuste aux attaques de désynchronisations. – *MAnifestation des JEunes Chercheurs en Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (conférence organisée par des doctorants pour des chercheurs débutants :*

Master 2, doctorants, post-docs, ATER...), MajecSTIC'2009, Avignon, France, Novembre 2009.

Blayer (O.) et Tassa (T.). – Improved Versions of Tardos Fingerprinting Scheme. *Designs, Codes and Cryptography*, 48 :79–103, Juillet 2008.

Campisi (P.), Kundur (D.), Hatzinakos (D.) et Neri (A.). – Compressive Data Hiding : An Unconventional Approach for Improved Color Image Coding. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2002(2) :152–163, 2002.

Cayre (F.), Fontaine (C.) et Furon (T.). – Watermarking Security : Theory and Practice. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 53(10) :3976–3987, 2005. – special issue "Supplement on Secure Media III".

Cayre (F.), Baras (C.) et Medico (V. Del). – Compromis sécurité / robustesse en resynchronisation pour le tatouage. – *COmpression et REprésentation des Signaux Audiovisuels, CORESA'2009*, Toulouse, France, Mars 2009.

Chaumont (M.). – Fast Embedding Technique for Dirty Paper Trellis Watermarking. – Ho (A. T.S.), Shi (Y. Q.), Kim (H.J.) et Barni (M.) (édité par), *8th International Workshop on Digital Watermarking, IWDW'2009*, vol. 5703 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 110–120, University of Surrey, Guildford, United Kingdom, Août 2009. Springer.

Chaumont (M.). – Psychovisual Rotation-based DPTC Watermarking Scheme. – *17th European Signal Processing Conference, EUSIPCO'2009*, Glasgow, Scotland, Août 2009.

Chaumont (M.). – Tutorial état de l'art sur le "tatouage robustes aux désynchronisation", réunion du gdr-isis sur les nouvelles avancées en tatouage d'images, téléchargeable à l'adresse http ://www.lirmm.fr/∼chaumont/tatouage.html, Mars 2009.

Chaumont (M.). – A Novel Embedding Technique For Dirty Paper Trellis Watermarking. – *Visual Information Processing and Communication, Part of IS&T/SPIE 22th Annual Symposium on Electronic Imaging, VIPC'2010, SPIE'2010*, vol. 7543, San Jose, California, USA, Janvier 2010.

Chaumont (M.). – *Invited Paper - Tutorial :* H.264 Video Watermarking : Applications, Principles, Deadlocks, and Future. – *International Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications, IPTA'2010*, Paris, France, Juillet 2010.

Chaumont (M.). – *Invited Paper - Tutorial :* Ensuring Security of H.264 Videos by Using Watermarking. – *Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications, Part of SPIE Defense, Security, and Sensing, DSS'2011, SPIE'2011*, vol. 8063, Orlando, Florida, USA, Avril 2011.

Chaumont (M.) et Puech (W.). – A Color Image in a Grey-Level Image. – *IS&T Third European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision, CGIV'2006*, pp. 226–231, Leeds, UK, Juin 2006.

Chaumont (M.) et Puech (W.). – 3D Face Model Tracking Based on a Multiresolution Active Search. – *IS&T/SPIE 19th Annual Symposium on Electronic Imaging, Visual Communications and Image Processing, VCIP'2007, SPIE'2007*, vol. 6508, San Jose, California, USA, Janvier 2007.

Chaumont (M.) et Puech (W.). – A Fast and Efficient Method to Protect Color Images. – *IS&T/SPIE 19th Annual Symposium on Electronic Imaging, Visual Communications and*

Image Processing, VCIP'2007, SPIE'2007, vol. 6508, San Jose, California, USA, Janvier 2007.

Chaumont (M.) et Puech (W.). – A Grey-Level Image Embedding its Color Palette. – *IEEE International Conference on Image Processing, ICIP'2007*, vol. I, pp. 389–392, San Antonio, Texas, USA, Septembre 2007.

Chaumont (M.) et Puech (W.). – Fast Protection of the Color of High Dimension Digital Painting Images. – *Eighth International Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services, WIAMIS'2007*, pp. 60–63, Santorini, Greece, Juin 2007.

Chaumont (M.) et Puech (W.). – A 8-Bits-Grey-Level Image Embedding its 512 Color Palette. – *16th European Signal Processing Conference, EUSIPCO'2008*, Lausanne, Switzerland, Août 2008.

Chaumont (M.) et Puech (W.). – Attack By Colorization of a Grey-Level Image Hiding its Color Palette. – *IEEE International Conference on Multimedia & Expo, ICME'2008*, Hannover, Germany, Juin 2008.

Chaumont (M.) et Puech (W.). – A High Capacity Reversible Watermarking Scheme. – *IS&T/SPIE 21th Annual Symposium on Electronic Imaging, Visual Communications and Image Processing, VCIP'2009, SPIE'2009*, vol. 7257, San Jose, California, USA, Janvier 2009.

Chaumont (M.) et Puech (W.). – Protecting the Color Information by Hiding it. *Recent Advances in Signal Processing*, éd. par Zaher (Ashraf A), pp. 101–122. – InTech, 2009.

Chaumont (M.) et Goudia (D.). – TCQ Practical Evaluation in the Hyper-Cube Watermarking Framework. – *IEEE International Conference on Multimedia and Expo, ICME'2011*, Barcelona, Spain, Juillet 2011.

Chaumont (M.), Goudia (D.) et Puech (W.). – Hyper-Cube Watermarking Scheme. – *Visual Information Processing and Communication II, Part of IS&T/SPIE 23th Annual Symposium on Electronic Imaging, VIPC'2011, SPIE'2011*, vol. 7882, pp. 10–18, San Francisco, California, USA, Janvier 2011.

Chen (B.) et Wornell (G.). – Quantization Index Modulation : A Class of Provably Good Methods for Digital Watermarking and Infromation Embedding. *IEEE Transactions on Information Theory*, 47(4) :1423–1443, 2001.

Chen (C.), Ni (J.) et Huang (J.). – Temporal Statistic Based Video Watermarking Scheme Robust against Geometric Attacks and Frame Dropping. – *8th International Workshop on Digital Watermarking, IWDW'2009*, pp. 81–95, Août 2009.

Chen (J.), Chen (T. S.), Lin (C. N.) et Cheng (C. Y.). – A Bitrate Controlled Data Hiding Scheme for JPEG2000. *International Journal of Computers and Applications*, 2(32) :238–241, 2010.

Coltuc (D.). – Improved Capacity Reversible Watermarking. – *IEEE International Conference on Image Processing, ICIP'2007*, San Antonio, Texas, USA, Septembre 2007.

Costa (M.). – Writing on Dirty Paper. *IEEE Transactions on Information Theory*, 29(3) :439–441, 1983.

Cox (I. J.), Kilian (J.), Leighton (T.) et Shamoon (T.). – Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia. *IEEE Transactions on Image Processing*, 6(12) :1673–1687, 1997.

Cox (I. J.), Miller (M. L.) et McKellips (A. L.). – Watermarking as Communications with Side Information. *IEEE Special Issue on Identification and Protection of Multimedia Information*, 87 :1127–1141, Juillet 1999.

Cox (I.), Miller (M.), Bloom (J.), Fridrich (J.) et Kalker (T.). – *Digital Watermarking and Steganography*. – Morgan Kaufmann, Novembre 2007, 2nd édition.

Cox (I.), Miller (M.), Bloom (J.), Fridrich (J.) et Kalker (T.). – *Digital Watermarking and Steganography*, chap. 5, pp. 147–152. – Morgan Kaufmann, Novembre 2007, 2nd édition.

Craver (S.), Atakli (I.) et Yua (J.). – How we broke the BOWS watermark. – *IS&T/SPIE 19th Annual Symposium on Electronic Imaging, Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents IX edited by Edward J. Delp III, Ping Wah Wong, SPIE'2007*, vol. 6505, pp. 1–8, San Jose, California, USA, Janvier 2007.

Cérou (F.), Furon (T.) et Guyader (A.). – Experimental Assessment of the Reliability for Watermarking and Fingerprinting Schemes. *EURASIP Journal on Information Security*, pp. 1–12, 2008.

Daubechies (I.) et Sweldens (W.). – Factoring Wavelet Transforms into Lifting Steps. *Journal of Fourier Analysis Applications*, 4(3) :247–269, 1998.

Deguillaume (F.), Csurka (G.), O'Ruanaidh (J.) et Pun (T.). – Robust 3D DFT Video Watermarking. – *IS&T/SPIE Security and Watermarking of Multimedia Contents, SPIE'1999*, vol. 3657, San Jose, California, USA, Janvier 1999.

Desoubeaux (M.), Guelvouit (G. Le) et Puech (W.). – Probabilistic fingerprinting codes used to detect traitor zero-bit watermark. – *Media Watermarking, Security, and Forensics III, Part of IS&T/SPIE 21th Annual Symposium on Electronic Imaging, SPIE'2011*, vol. 7880, San Francisco Airport, California, USA, Janvier 2011.

Doërr (G.). – *Security Issue and Collusion Attacks in Video Watermarking*. – PhD. Thesis, University of Nice-Sophia Antipolis, France, Juin 2005. Supervisé par J.-L. Dugelay.

Dunn (J. C.). – A Fuzzy Relative of the ISODATA Process and its Use in Detecting Compact Well-Separated Clusters. *Journal of Cybernetics*, 3 :32–57, 1974.

Eggers (J. J.), Bäuml (R.), Tzschoppe (R.) et Girod (B.). – Scalar Costa Scheme for Information Embedding. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 51(4) :1003–1019, 2003.

Fridrich (J.). – A New Steganographic Method for Palette-Based Images. – *Proceedings of the IS&T PICS conference*, Savannah Georgia, Avril 1999.

Furon (T.). – Le traçage de traîtres. – *7ème symposium sur la sécurité des technologies de l'information et des communications, SSTIC'09*, vol. 2009, pp. 283–296, Rennes, France, Juin 2009.

Furon (T.) et Bas (P.). – Broken Arrows. *EURASIP Journal on Information Security*, 2008 :3 :1–3 :13, 2008.

Gervautz (M.) et Purgathofer (W.). – A Simple Method for Color Quantization : Octree Quantization. *Graphics Gems, A.S. Glassner*, pp. 287–293, 1990.

Golikeri (A.), Nasiopoulos (P.) et Wang (Z. J.). – Robust Digital Video Watermarking Scheme for H.264 Advanced Video Coding Standard. *Journal of Electronic Imaging*, 16(4), 2007.

Gong (X.) et Lu (H.-M.). – Towards Fast and Robust Watermarking Scheme for H.264 Video. – *Proceedings of the 2008 Tenth IEEE International Symposium on Multimedia*, ISM '08, pp. 649–653, Washington, DC, USA, 2008. IEEE Computer Society.

Goudia (Dalila). – *Tatouage conjoint à la compression d'images fixes avec Jpeg2000*. – PhD. Thesis, Université de Montpellier, France, 2011. Supervisé par W. Puech et M. Chaumont.

Goudia (D.), Chaumont (M.), Puech (W.) et Said (N. Hadj). – A Joint Trellis Coded Quantization (TCQ) Data Hiding Scheme in the JPEG2000 Part 2 Coding Framework. – *The 19th European Signal Processing Conference, EUSIPCO'2011*, Barcelona, Spain, Septembre 2011.

Draft ITU-T Recommendation and Final Draft International Standard of Joint Video Specification (ITU-T REC. H.264 ISO/IEC 14496-10 AVC). – Rapport de recherche, Joint Video Team (JVT), 2003.

Haitsma (L.) et Kalker (T.). – A Watermarking Scheme for Digital Cinema. – *IEEE International Conference on Image Processing, ICIP'2001*, vol. 1, pp. 587–489, Thessaloniki, Greece, Octobre 2001.

Hartung (F.) et Girod (B.). – Watermarking of Uncompressed and Compressed Video. *Signal Processing*, 66 :283–301, May 1998.

Hayat (K.), Puech (W.), Gesquière (G.) et Chaumont (M.). – Wavelet-based data-hiding of DEM in the context of real-time 3D visualization. – *Visualization and Data Analysis, Part of the IS&T/SPIE Symposium on Electronic Imaging, SPIE'2007*, San Jose, California, Janvier 2007.

Heckbert (P.). – Color Image Quantization for Frame Buffer Display. *Computer Graphics*, 16(3) :297–303, 1982.

Horiuchi (T.), Noharaa (F.) et Tominaga (S.). – Accurate Reversible Color-to-Gray Mapping Algorithm Without Distortion Conditions. *Pattern Recognition Letters*, 31(15), Novembre 2010.

ISO/IEC IS 10918-1 | ITU-T Recommendation T.81. – Rapport de recherche, ISO and ITU-T, 1991.

ISO/IEC JTC1/SC29 WG1 JPEG 2000 Image Coding System Final Committee Draft Version 1.0. – Rapport de recherche, ISO and ITU-T, 2000.

ISO/IEC 15444-2 :2004 Information technology – JPEG 2000 image coding system : Extensions. – Rapport de recherche, ISO and ITU-T, 2004.

Kerckhoffs (A.). – La Cryptographie Militaire. *Journal des Sciences Militaires*, IX, pp. 5-38 Jan. 1883, pp. 161-191, Feb. 1883.

Ko (K.-W.), Kwon (O.-S.), Son (C.-H.) et Ha (Y.-H.). – Color Embedding and Recovery Based on Wavelet Packet Transform. *Journal of Imaging Science and Technology*, 52(1), Février 2008.

KTA (Key Technical Areas) Software, téléchargeable à l'adresse http ://www.tnt.uni-hannover.de/∼vatis/kta/ et à l'adresse http ://iphome.hhi.de/suehring/tml/.

Le Guelvouit (G.). – Tatouage Robuste d'Images par Turbo TCQ. *Traitement du Signal*, 25(6), Avril 2009. – sources téléchargeables à l'adresse http ://www.gleguelv.org/wt/ttcq/.

Li (K.) et Zhang (X.-P.). – Reliable Adaptive Watermarking Scheme Integrated with JPEG2000. – *International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis ISPA'2003*, vol. 1, pp. 117 – 122, Septembre 2003.

Li (Q.) et Cox (I. J.). – Using Perceptual Models to Improve Fidelity and Provide Resistance to Valumetric Scaling for Quantization Index Modulation Watermarking. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2(2) :127–139, 2007.

Lin (L.), Cox (I. J.), Doërr (G.) et Miller (M. L.). – An Efficient Algorithm for Informed Embedding of Dirty Paper Trellis Codes for Watermarking. – *IEEE International Conference on Image Processing, ICIP'2005*, vol. 1, pp. 697–700, Genova, Italy, Septembre 2005.

Linnartz (J. P. M. G.) et Talstra (J. C.). – MPEG PTY-Marks : Cheap Detection of embedded Copyright Data in DVD-Video. – *Proceedings 5th European Symposium on Research in Computer Security, ESORICS'1998*, vol. 1485, pp. 221–240, Louvain la Neuve, Belgium, Septembre 1998.

Marcellin (M. W.) et Fischer (T. R.). – Trellis Coded Quantization of Memoryless and Gauss-Markov Sources. *IEEE Transaction on communication, TC'1990*, 38(1) :82–93, Janvier 1990.

Meerwald (P.). – Quantization Watermarking in the JPEG2000 Coding Pipeline. – *International Conference on Communications and Multimedia Security Issues of the New Century IFIP TC6/TC11*, pp. 69–79, Deventer, The Netherlands, The Netherlands, 2001. Kluwer, B.V.

Miller (M. L.) et Bloom (J. A.). – Computing the Probability of False Watermark Detection. – *Proceedings of the Third International Workshop on Information Hiding, IH'1999*, pp. 146–158, Dresden, Germany, Septembre 1999.

Miller (M. L.), Doërr (G.) et Cox (I. J.). – Applying Informed Coding and Informed Embedding to Design a Robust, High Capacity Watermark. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(6) :792–807, 2004.

Mobasseri (B. G.) et Raikar (Y. N.). – Authentication of H.264 streams by direct watermarking of CAVLC blocks. – *Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents IX, Part of IS&T/SPIE 19th Annual Symposium on Electronic Imaging, SSWMC'2007, SPIE'2007*, vol. 6505, San Jose, California, USA, Février 2007.

Noorkami (M.) et Mersereau (R. M.). – Digital Video Watermarking in P-Frames With Controlled Video Bit-Rate Increase. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security, TIFS'2008*, 3(3) :441–455, Septembre 2008.

OpenJPEG (open-source JPEG 2000 codec), téléchargeable à l'adresse http ://www.openjpeg.org/.

Ouled Zaid (A.), Makhloufi (A.), Bouallegue (A.) et Olivier (C.). – Improved QIM-based Watermarking Integrated to JPEG2000 Coding Scheme. *Signal, Image and Video Processing*, 3 :197–207, 2009.

Patrizio (A.). – Why the dvd hack was a cinch. *Wired*, Novembre 1999.

Pérez-Freire (L.), Comesana (P.), Troncoso-Pastoriza (J. Ramón) et Pérez-González (F.). – Watermarking Security : a Survey. *IEEE Transactions on Data Hiding and Multimedia Security*, 1(4300) :41–72, 2006.

Pérez-Freire (L.) et Pérez-González (F.). – Exploiting Security Holes in Lattice Data Hiding. – *Information Hiding, IH'2007, Lecture Notes in Computer Science*, pp. 159–173. Springer-Verlag, Juin 2007.

Pérez-González (F.), Barni (M.), Abrardo (A.) et Mosquera (C.). – Rational Dither Modulation : A Novel Data-hiding Method Robust to Valuemetric Scaling Attacks. – *IEEE International Workshop on Multimedia Signal Processing, IWMSP'2004*, pp. 139–142, Siena, Italy, Septembre 2004.

Piva (A.) et Barni (M.). – The first BOWS Contest (Break Our Watermarking System). – *IS&T/SPIE 19th Annual Symposium on Electronic Imaging, Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents IX edited by Edward J. Delp III, Ping Wah Wong, SPIE'2007*, vol. 6505, pp. 1–10, San Jose, California, USA, Janvier 2007.

Puech (W.), Chaumont (M.) et Strauss (O.). – A Reversible Data Hiding Method for Encrypted Image. – *Security, Forensics, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents X, Part of IS&T/SPIE 20th Annual Symposium on Electronic Imaging, SPIE'2008*, vol. 6819, San Jose, California, Janvier 2008.

Queiroz (R. De). – Reversible Color-to-Gray Mapping Using Subband Domain Texturization. *Pattern Recognition Letters, 20th SIBGRAPI : Advances in Image Processing and Computer Vision*, 31(4) :269–276, Mars 2010.

Queiroz (R. De) et Braun (K.). – Color to Gray and Back : Color Embedding Into Textured Gray Images. *IEEE Transaction on Image Processing*, 15(6) :1464–1470, 2006.

Richardson (I.). – *The H.264 Advanced Video Compression Standard*. – Wiley, Août 2010, 2nd édition.

Said (A.). – *Arithmetic Coding, In : Lossless Compression Handbook, K. Sayood (Ed.)*, chap. 5, pp. 101–152. – Academic Press, Janvier 2003, 1st édition.

Schlauweg (Mathias), Pröfrock (Dima), Zeibich (Benedikt) et Müller (Erika). – Self-synchronizing robust texel watermarking in gaussian scale-space. – *Proceedings of the 10th ACM workshop on Multimedia and security*, MM&Sec'2008, pp. 53–62, New York, NY, USA, Septembre 2008. ACM.

Shahid (Z.). – *Protection of Scalable Video by Encryption and Watermarking*. – PhD. Thesis, Université de Montellier 2, France, Août 2010. Supervisé par W. Puech et M. Chaumont.

Shahid (Z.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – Spread Spectrum-Based Watermarking for Tardos Code-Based Fingerprinting for H.264/AVC Video. *En cours de soumission*.

Shahid (Z.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – Spread Spectrum-Based Watermarking for Tardos Code-Based Fingerprinting of H.264/AVC Video. – *IEEE International Conference on Image Processing, ICIP'2010*, Hong-Kong, China, Septembre 2010.

Shahid (Z.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – Considering the Reconstruction Loop for Data Hiding of Intra- and Inter-Frames of H.264/AVC. *Signal, Image and Video Processing*, pp. 1–19, Avril 2011.

Shahid (Z.), Chaumont (M.) et Puech (W.). – Fast Protection of H.264/AVC by Selective Encryption of CAVLC and CABAC for I & P Frames. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 9, Mars 2011.

Solanki (K.), Madhow (U), Manjunath (B. S.), Chandrasekaran (S.) et El-khalil (I.). – 'Print and Scan' Resilient Data Hiding in Images. *IEEE Transactions on Information Security and Forensics, TISF'2006*, 1(4), 2006.

Su (P. C.) et Kuo (C. J.). – Steganography in JPEG2000 Compressed Images. *IEEE Transaction on Consumer Electronics*, 49 :824–832, Novembre 2003.

Tanaka (K.), Nakamura (Y.) et Matsui (K.). – Embedding Secret Information Into a Dithered Multi-Level Image. – *Military Communications Conference, 1990. MILCOM '90, Conference Record, A New Era, IEEE*, vol. 1, pp. 216–220, Monterey, CA , USA, Septembre 1990.

Tardos (G.). – Optimal Probabilistic Fingerprint Codes. – *ACM symposium on Theory of computing*, pp. 116–125, New York, NY, USA, 2003.

Taubman (D.). – High performance scalable image compression with EBCOT. – *IEEE Transactions On Image Processing*, vol. 9, pp. 1158–1170, Juillet 2000.

Thiesse (J.-M.), Jung (J.) et Antonini (M.). – Data Hiding of Intra Prediction Information in Chroma Samples for Video Compression . – *IEEE International Conference on Image Processing, ICIP'2010*, pp. 2861 – 2864, Hong Kong, Septembre 2010.

Tzeng (C.H.), Yang (Z.F.) et Tsai (W.H.). – Adaptative Data Hiding in Palette Images by Color Ordering and Mapping With Security Protection. *IEEE Transaction on Communications*, 52(5) :791–800, 2004.

Ungerboeck. (G.). – Channel Coding with Multilevel/Phase Signals. *IEEE Transaction on Information Theory*, 28 :55–67, 1982.

Viterbi (Andrew J.). – *CDMA : Principles of Spread Spectrum Communication*. – Addison-Wesley Wireless Communications, 1995.

Škorić (B.), Katzenbeisser (S.) et Celik (M. U.). – Symmetric Tardos Fingerprinting Codes for Arbitrary Alphabet Sizes. *Designs, Codes and Cryptography*, 46 :137–166, Février 2008.

Škorić (B.), Vladimirova (T. U.), Celik (M. U.) et Talstra (J.). – Tardos Fingerprinting is Better Than we Thought. *IEEE Transactions on Information Theory, TIT'2008*, 54(8) :3663 – 3676, 2008.

Wang (Z.), Bovik (A. C.), Sheikh (H. R.) et Simoncelli (E. P.). – Image Quality Assessment : From Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4) :600–612, 2004.

Wang (C.), Doërr (G.) et Cox (I. J.). – Toward a Better Understanding of Dirty Paper Trellis Codes. – *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP'2006*, vol. 2, pp. 233–236, Toulouse, France, Mai 2006.

Wang (C.), Doërr (G.) et Cox (I. J.). – Trellis Coded Modulation to Improve Dirty Paper Trellis Watermarking. – *IS&T/SPIE 19th Annual Symposium on Electronic Imaging, Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents IX edited by Edward J. Delp III, Ping Wah Wong, SPIE'2007*, vol. 6505, pp. 0G1–0G10, San-Jose, USA, Janvier 2007.

Wang (K.), Lavoué (G.), Denis (F.) et Baskurt (A.). – Robust and Blind Mesh Watermarking Based on Volume Moments. *Computers & Graphics*, 35(1) :1–19, Février 2011.

Watson (A. B.). – DCT Quantization Matrices Optimized for Individual Images. – *Human Vision, Visual Processing, and Digital Display IV, SPIE'1993*, vol. 1913, pp. 202–216, 1993.

Wu (M.-Y.), Ho (Y.-K.) et Lee (J.-H.). – An Iterative Method of Palette-Based Image Steganography. *Pattern Recognition Letters*, 25 :301–309, 2003.

Xie (F.), Furon (T.) et Fontaine (C.). – On-Off Keying Modulation and Tardos Fingerprinting. – *10th ACM Multimedia and Security Workshop, MM&Sec'2008*, pp. 101–106, Septembre 2008.

Xie (F.), Furon (T.) et Fontaine (C.). – Better Security Levels for 'Broken Arrows'. – *IS&T/SPIE 22th Annual Symposium on Electronic Imaging, Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents XII*, vol. 7541, Janvier 2010.

Xie (F.), Furon (T.) et Fontaine (C.). – Towards Robust and Secure Watermarking. – *12th ACM Multimedia and Security Workshop, MM&SEC'2010*, pp. 153–160. ACM, Septembre 2010.

Zhang (Jun), Li (Jie-gu) et Zhang (Ling). – Video Watermark Technique in Motion Vector. – *Proceedings of the 14th Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, SIBGRAPI'2001*, SIBGRAPI'2001, pp. 179–182, Washington, DC, USA, Octobre 2001. IEEE Computer Society.

Zheng (D.), Liu (Y.), Zhao (J.) et Saddik (A. El). – A Survey of RST Invariant Image Watermarking Algorithms. *ACM Computing Surveys*, 39 :70 pages, Juillet 2007.

Zhu (X.) et Tang (Z.). – Improved Quantization Index Modulation Watermarking Robust Against Amplitude Scaling Distortions. – *IEEE International Conference on Multimedia & Expo, ICME'2008*, pp. 237–240, Hannover, Germany, Juin 2008.

Zou (D.) et Bloom (J. A.). – H.264/AVC Substitution Watermarking : a CAVLC Example. – *Media Forensics and Security I, Part of IS&T/SPIE 21th Annual Symposium on Electronic Imaging, MFS'2009, SPIE'2009*, p. 7254, Janvier 2009.

Quatrième partie

Quelques publications supplémentaires

FAST PROTECTION OF H.264/AVC BY SELECTIVE ENCRYPTION OF CAVLC AND CABAC FOR I & P FRAMES

Z. Shahid, M. Chaumont and W. Puech

***Abstract*—This paper presents a novel method for the protection of bitstreams of state of the art video codec H.264/AVC. The problem of selective encryption (SE) is addressed along with the compression in the entropy coding modules. H.264/AVC supports two types of entropy coding modules. Context-adaptive variable length coding (CAVLC) is supported in H.264/AVC baseline profile and context-adaptive binary arithmetic coding (CABAC) is supported in H.264/AVC main profile. SE is performed in both types of entropy coding modules of this video codec. For this purpose, in this paper the encryption step is done simultaneously with the entropy coding CAVLC or CABAC. SE is performed by using the Advanced Encryption Standard (AES) algorithm with the Cipher Feedback (CFB) mode on a subset of *codewords/binstrings*. For CAVLC, SE is performed on equal length *codewords* from a specific variable length coding (VLC) table. In case of CABAC, it is done on equal length *binstrings*. In our scheme, entropy coding module serves the purpose of encryption cipher without affecting the coding efficiency of H.264/AVC by keeping exactly the same bitrate, generating completely compliant bitstream and utilizing negligible computational power. Owing to no escalation in bitrate, our encryption algorithm is better suited for real-time multimedia streaming over heterogeneous networks. It is perfect for playback on hand-held devices because of negligible increase in processing power. Nine different benchmark video sequences containing different combinations of motion, texture and objects are used for experimental evaluation of the proposed algorithm.**

***Index Terms*—Selective Encryption, CABAC, CAVLC, Video Security, AES Algorithm, Stream Cipher**

I. INTRODUCTION

With the rapid growth of processing power and network bandwidth, many multimedia applications have emerged in the recent past. As digital data can easily be copied and modified, the concern about its protection and authentication have surfaced. Digital rights management (DRM) has emerged as an important research field to protect the copyrighted multimedia data. DRM systems enforce the rights of the multimedia property owners while ensuring the efficient rightful usage of such property.

Multimedia data requires either full encryption or selective encryption (SE) depending on the application requirements. For example military and law enforcement applications require full encryption. Nevertheless, there is a large spectrum of applications that demands security on a lower level, as for example that ensured by SE. SE encrypts part of the plaintext and has two main advantages. First, it reduces the computational requirements, since only a part of plaintext is encrypted [6]. Second, encrypted bitstream maintains the essential properties of the original bitstream [3]. SE just prevents abuse of the data. In the context of video, it refers to destroying the commercial value of video to a degree which prevents a pleasant viewing experience.

SE schemes based on H.264/AVC have been already presented on CAVLC [29] and CABAC [30]. These two previous methods fulfill real-time constraints by keeping the same bitrate and by generating completely compliant bitstream. In this paper, we have enhanced the previous proposed approaches by encryption of more syntax elements for CAVLC and extending it for P frames. Here we have also used AES [7] in the Cipher Feedback (CFB) mode which is a stream cipher algorithm. Security of the proposed schemes has also been analyzed in detail.

The rest of the paper is organized as follows. In Section II, overview of H.264/AVC and AES algorithm is presented. We explain the whole system architecture of the proposed methods in Section III. Section IV contains experimental evaluation and security analysis. In Section V, we present the concluding remarks about the proposed schemes.

Laboratory LIRMM, UMR CNRS 5506, University of Montpellier II, 161, rue Ada, 34392 MONTPELLIER Cedex 05, FRANCE zafar.shahid@lirmm.fr, marc.chaumont@lirmm.fr, william.puech@lirmm.fr

II. Description of the H.264/AVC-based video encryption system

A. Overview of H.264/AVC

H.264/AVC (also known as MPEG4 Part 10) [1] is state of the art video coding standard of ITU-T and ISO/IEC. In H.264/AVC, an input video frame is divided into macro-blocks (MB) of 16x16 pixels and each of them is encoded separately. Each video frame can be encoded as *intra* (I frame) or *inter* (P and B frames). In I frame, the current MB is predicted spatially from MBs which have been previously encoded and reconstructed (MB at top and left). In P frame, motion compensated prediction is done from the previous reference frames, while bidirectional prediction from both previous and next reference frames is performed for B frames. The purpose of the reconstruction in the encoder is to ensure that both the encoder and decoder use identical reference frames to create the predictions. If this is not the case, then the predictions in encoder and decoder will not be identical, leading to an increasing error or "drift" between the encoder and decoder. The difference between original and predicted frame is call residual. This residual is coded using transform coding followed by quantization and zigzag scan. In the last step, entropy coding comes into action. Quantized transform coefficients are then coded using either CAVLC [4] or CABAC [20]. The block diagram of H.264/AVC is shown in Fig. 1. On the decoding side, compressed bitstream is decoded by entropy decoding module, followed by inverse-zigzag scan. These coefficients are then rescaled and inverse transformed to get the residual signal which is added to the predicted signal to get the decoded video frame. H.264/AVC has some additional features as compared to

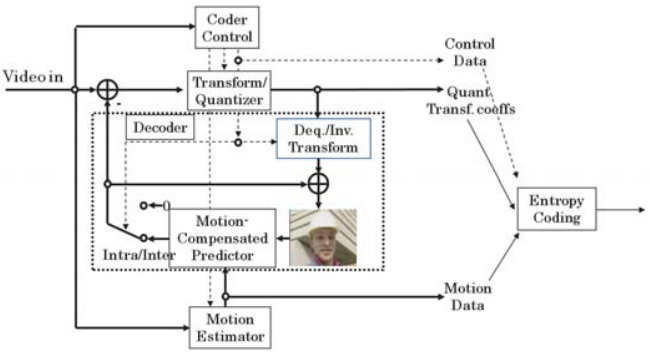


Fig. 1: Block diagram of H.264/AVC video encoder.

previous video standards including MPEG2 and MPEG4 Part II. In *baseline* profile of H.264/AVC, it has 4×4 integer transform (IT) in contrast to 8×8 transform of previous standards. In higher profiles, it offers transform coding for adaptive size. DCT transform has been replaced by IT which does not need any multiplication operation and can be implemented by only additions and shifts and thus requires lesser number of computations. For *Inter* frame, H.264/AVC supports variable block size motion estimation, quarter pixel accuracy, multiple reference frames, improved skipped and direct motion inference. For *Intra* frame, it offers additional spatial prediction modes. All these additional features of H.264/AVC are aimed to outperform previous video coding standards [35].

H.264 scans the non-zero coefficients (NZs) in inverse zigzag order (from high frequency NZs to low frequency NZs) which are then passed to entropy coding module. We review the basic working of CAVLC in Section II-A1 and of CABAC in Section II-A2.

1) Context-Adaptive Variable Length Coding: In CAVLC, Run-length coding is performed first as it encodes levels and runs separately. CAVLC is designed to exploit the characteristics of NZs and works in several steps.

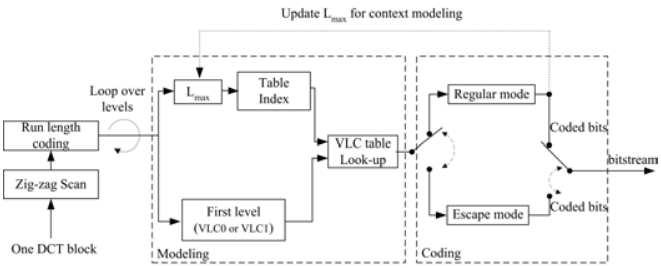


Fig. 2: Block diagram of level coding in CAVLC of H.264/AVC.

To adapt to the local statistical features of DCT coefficients, CAVLC uses seven fixed variable length coding (VLC) tables. For example, $'2'$ will be coded as $'010'$ using VLC1 table, while it will be coded as $'1010'$ using VLC3 table. If magnitude of NZ lies within the range of that VLC table, it is coded by regular mode, otherwise escape mode is used. Adaptive nature is introduced by changing the table for the next NZ based on the magnitude of the current NZ as shown in Fig. 2. For the first NZ, VLC0 table is used unless there are more than 10 NZs and less than 3 trailing ones, in which case it is coded with VLC1 table. The tree representation of first four VLC tables is shown in Fig. 3.

2) Context-Adaptive Binary Arithmetic Coding: CABAC is designed to better exploit the characteristics of NZs as compared to CAVLC, consumes more processing and offers about 10% better compression than CAVLC on average [22]. Run-length coding has been replaced by *significant map* coding which specifies the

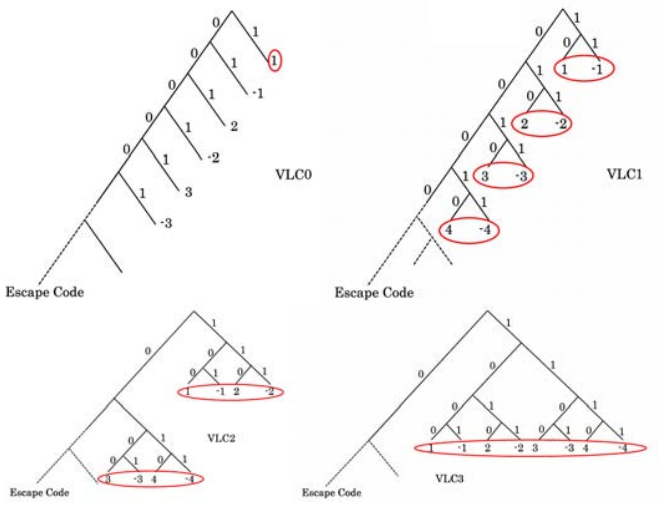


Fig. 3: Tree representation of first four VLC tables used in CAVLC. In each VLC table, VLC codes for encircled coefficients have same code length.

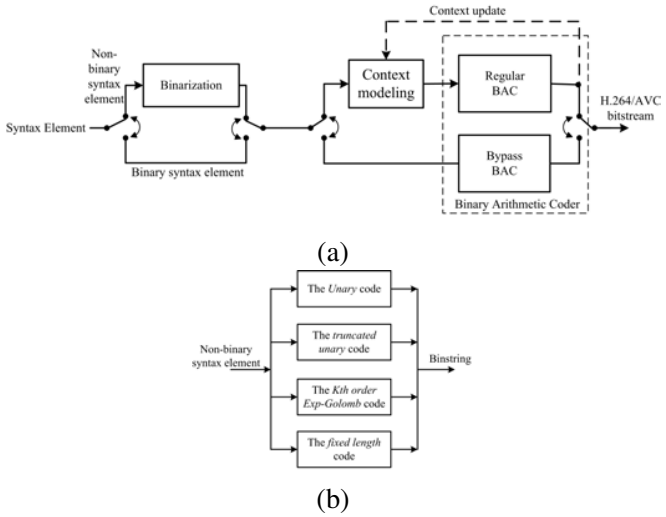


Fig. 4: (a) Block diagram of CABAC of H.264/AVC, (b) Binarization stage.

position of NZs in the 4x4 block. Binary arithmetic coding module (BAC) of CABAC uses many context models to encode NZs and context model for a specific NZ depends on recently coded NZs.

CABAC consists of multiple stages as shown in Fig. 4.a. First of all, *binarization* is done in which, non-binary syntax elements are converted to binary form called *binstrings* which are more amenable to compression by BAC. Binary representation for a non-binary syntax element is done in such a way that it is close to minimum redundancy code. In CABAC, there are four basic code trees for *binarization* step, namely the *unary* code, the *truncated unary* code, the *kth order Exp-Golomb* code (EGk) and the *fixed length* code as shown in Fig. 4.b.

For an unsigned integer value $x \geq 0$, the *unary* code consists of x 1's plus a terminating 0 bit. The *truncated unary* code is only defined for x with $0 \leq x \leq s$. For $x < s$ the code is given by the *unary* code, whereas for $x = s$ the terminating "0" bit is neglected. EGk is constructed by a concatenation of a prefix and a suffix parts and is suitable for binarization of syntax elements that represent prediction residuals. For a given unsigned integer value $x > 0$, the prefix part of the EGk *binstring* consists of a unary code corresponding to the length $l(x) = \left[log_2(\frac{x}{2k} + 1)\right]$. The EGk suffix part is computed as the binary representation of $x + 2^k(1 - 2^{l(x)})$ using $k + l(x)$ significant bits. Consequently for EGk binarization, the code length is $2l(x) + k + 1$. When k = 0, $2l(x) + k + 1 = 2l(x) + 1$.

The *fixed length* code is applied to syntax elements with a nearly uniform distribution or to syntax elements, for which each bit in the *fixed length* code *binstring* represents a specific coding decision e.g., *coded block flag*. Three syntax elements are binarized by concatenation of the basic code trees, namely *coded block pattern*, NZ and the motion vector difference (MVD). Binarization of absolute level of NZs is done by concatenation of *truncated unary* code and EG0. The *truncated unary* code constitutes the prefix part with cutoff value $S = 14$. Binarization and subsequent arithmetic coding process is applied to the syntax element $coeff\_abs\_value\_minus1 = abs\_level - 1$, since quantized transformed coefficients with zero magnitude are encoded using *significant map*. For MVD, *binstring* is constructed by concatenation of the *truncated unary* code and EG3. The *truncated unary* constitutes the prefix part with cutoff value $S = 9$. Suffix part of MVDs contains EG3 of $|MVD| - 9$ for $|MVD| > 9$ and sign bit.

B. The AES encryption algorithm

The Advanced Encryption Standard (AES) algorithm consists of a set of processing steps repeated for a number of iterations called rounds [7]. The number of rounds depends on the size of the key and the size of the data block. The number of rounds is 9 for example, if both the block and the key are 128 bits long. Given a sequence $\{X_1, X_2, ..., X_n\}$ of bit plaintext blocks, each X_i is encrypted with the same secret key k producing the ciphertext blocks $\{Y_1, Y_2, ..., Y_n\}$. To encipher a data block X_i in AES you first perform an AddRoundKey step by XORing a subkey with the block. The incoming data and the key are added together in the first AddRoundKey step. Afterward, it follows the

round operation. Each regular round operation involves four steps which are SubBytes, ShiftRows, MixColumns and AddRoundKey. Before producing the final ciphered data Y_i, the AES performs an extra final routine that is composed of SubBytes, ShiftRows and AddRoundKey steps.

The AES algorithm can support several cipher modes: ECB (Electronic Code Book), CBC (Cipher Block Chaining), OFB (Output Feedback), CFB (Cipher Feedback) and CTR (Counter) [31]. The ECB mode is actually the basic AES algorithm. With the ECB mode, each plaintext block X_i is encrypted with the same secret key k producing the ciphertext block $Y_i = E_k(X_i)$. The CBC mode adds a feedback mechanism to a block cipher. Each ciphertext block Y_i is XORed with the incoming plaintext block X_{i+1} before being encrypted with the key k. An initialization vector (IV) is used for the first iteration. In fact, all modes (except the ECB mode) require the use of an IV. In CFB mode, as shown in Fig. 5, the keystream element Z_i is generated and the ciphertext block Y_i is produced as:

$$\begin{cases} Z_i &= E_k(Y_{i-1}), for\ i \geq 1 \\ Y_i &= X_i \oplus Z_i \end{cases}, \qquad (1)$$

where $\oplus$ is the XOR operator.

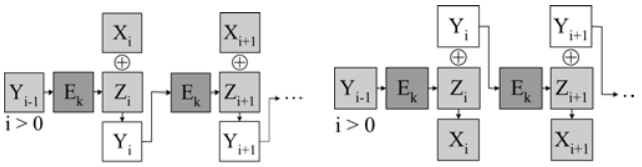


Fig. 5: CFB stream cipher: (a) Encryption, (b) Decryption.

In the OFB mode, Z_0 is substituted by the IV and the input data is encrypted by XORing it with the output Z_i. The CTR mode has very similar characteristics to OFB, but in addition it allows pseudo random access for decryption. It generates the next keystream block by encrypting successive values of a counter.

Although AES is a block cipher, in the OFB, CFB and CTR modes it operates as a stream cipher. These modes do not require any special measures to handle messages whose lengths are not multiples of the block size since they all work by XORing the plaintext with the output of the block cipher. Each mode has its advantages and disadvantages. For example in ECB and OFB modes, any modification in the plaintext block X_i causes the corresponding ciphered block Y_i to be altered, but other ciphered blocks are not affected. On the other hand, if a plaintext block X_i is changed in CBC and CFB modes, then Y_i and all subsequent ciphered blocks will be affected. These properties mean that CBC and CFB modes are useful for the purpose of authentication while ECB and OFB modes treat separately each block. Therefore, we can notice that OFB does not spread noise, while the CFB does that.

C. SE of image and video

Selective encryption (SE) is a technique aiming to save computational time or to enable new system functionalities by only encrypting a portion of a compressed bitstream while still achieving adequate security [18]. SE as well as partial encryption (PE) are applied only on certain parts of the bitstream. In the decoding stage, both the encrypted and the non-encrypted information should be appropriately identified and displayed [6], [21], [26]. The copyright protection of the multimedia content is a required feature for DRM systems. The technical challenges posed by such systems are high and previous approaches have not entirely succeeded in tackling them [17].

In [32], Tang proposed a technique called zigzag permutation applicable to DCT-based image and video codecs. On one hand this method provides a certain level of confidentiality, while on the other hand it increases the overall bitrate. For image, several SE techniques have bee proposed in literature. In [8], Droogenbroeck and Benedett proposed a technique for encryption of JPEG images. It encrypts a selected number of AC coefficients. The DC coefficients are not ciphered since they carry important visual information and they are highly predictable. In spite of the constancy in the bitrate while preserving the bitstream compliance, the compression and the encryption process are separated and consequently the computational complexity is increased.

The Advanced Encryption Standard (AES) [7] has been used for SE of image and video in literature. The AES was applied on the Haar discrete wavelet transform compressed images in [23]. The encryption of color images in the wavelet transform has been addressed in [21]. In this approach the encryption is performed on the resulting wavelet code bits. In [25], SE was performed on color JPEG images by selectively encrypting only *luma* component using AES cipher. The protection rights of individuals and the privacy of certain moving objects in the context of security surveillance systems using viewer generated masking and the AES encryption standard has been addressed in [37].

Combining PE and image/video compression using the set partitioning in hierarchical trees was used in [6].

Nevertheless, this approach requires a significant computational complexity. A method that does not require significant processing time and which operates directly on the bit planes of the image was proposed in [19]. The robustness of partially encrypted videos to attacks which exploit the information from non-encrypted bits together with the availability of side information was studied in [27]. Fisch *et al.* [10] proposed a scalable encryption method for a DCT-coded visual data wherein the data are organized in a scalable bitstream form. These bitstreams are constructed with the DC and some AC coefficients of each block which are then arranged in layers according to their visual importance and PE process is applied over these layers.

For video, there are several SE techniques for different video codecs presented in literature. SE of MPEG4 video standard was studied in [34] wherein Data Encryption Standard (DES) was used to encrypt fixed length and variable length codes. In this approach, the encrypted bitstream is completely compliant with MPEG4 bitstream format but it increases the bitrate. A trade off has to be made among complexity, security and the bit overhead. In [38], SE of MPEG4 video standard is proposed by doing frequency domain selective scrambling, DCT block shuffling and rotation. This scheme is very easy to perform but its limitation is its bitrate overhead. SE of ROI of MPEG4 video has been presented in [9]. It performs SE by pseudo randomly inverting sign of DCT coefficients in ROI. SE of H.264/AVC has been studied in [15] wherein encryption has been carried out in some fields like intra-prediction mode, residual data, inter-prediction mode and motion vectors. A scheme for commutative encryption and watermarking of H.264/AVC is presented in [16]. Here SE of some MB header fields is combined with watermarking of magnitude of DCT coefficients. This scheme presents a watermarking solution in encrypted domain without exposing video content. The limitation of techniques proposed in [15], [16] is that they are not format compliant. Encryption for H.264/AVC has been discussed in [5] wherein they do permutations of the pixels of MBs which are in *region of interest* (ROI). The drawback of this scheme is that bitrate increases as the size of ROI increases. This is due to change in the statistics of ROI as it is no more a slow varying region which is the basic assumption for video signals.

SE of H.264/AVC at network abstraction layer (NAL) has been proposed by [14]. Important NAL units namely instantaneous decoding refresh (IDR) picture, sequence parameter set (SPS), and picture parameter set (PPS) are encrypted with a stream cipher. The limitation of this scheme is that it is not format compliant and cannot be parsed even at frame level. SE of H.264/AVC using AES has been proposed in [2]. In this scheme, encryption of I frame is performed, since P and B frame are not significant without I frames.. This scheme is not format compliant.

The use of general entropy coder as encryption cipher using statistical models has been studied in the literature in [36]. It encrypts by using different Huffman tables for different input symbols. The tables, as well as the order in which they are used, are kept secret. This technique is vulnerable to known plaintext attacks as explained in [12]. Key-based interval splitting of arithmetic coding (KSAC) has used an approach [13] wherein intervals are partitioned in each iteration of arithmetic coding. Secret key is used to decide how the interval will be partitioned. Number of sub intervals in which an interval is divided should be kept small as it increases the bitrate of bitstream. Randomized arithmetic coding [11] is aimed at arithmetic coding but instead of partitioning of intervals like in KSAC, secret key is used to scramble the order of intervals. The limitation of these entropy coding based techniques is that encrypted bitstream is not format compliant. Moreover, these techniques require lot of processing power.

In the context of DRM systems, our study addresses the simultaneous SE and compression for state of the art H.264/AVC. The encrypted bitstream is format compliant with absolutely no escalation in bitrate. Furthermore, it does not require lot of processing power for encryption and decryption. In Section III we describe our proposed approaches to apply simultaneously SE and H.264/AVC compression in video sequences.

III. The proposed selective encryption schemes

Our approach consists of SE during the entropy coding stage of H.264/AVC as shown in Fig. 6. In baseline profile, SE is performed in CAVLC entropy coding stage (SE-CAVLC). While in main profile, it is performed in CABAC entropy coding stage (SE-CABAC). In SE of video, encrypted bitstream compliance is a required feature for some direct operations such displaying, time seeking and browsing. Encrypted bitstream will be compliant and fulfills real-time constraints if the following three conditions are fulfilled:

- To keep the bitrate of encrypted bitstream same as the original bitstream, encrypted *codewords/binstrings* must have the same size as the original *codewords/binstrings*.
- The encrypted *codewords/binstrings* must be valid so that they may be decoded by entropy decoder.

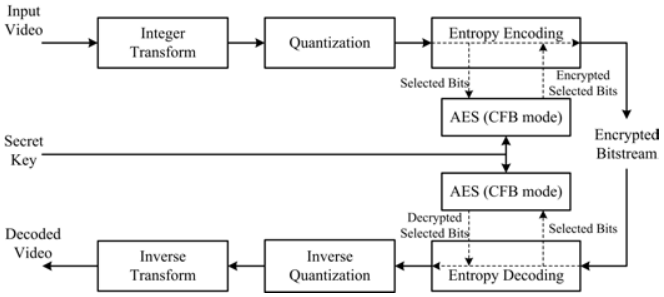


Fig. 6: Block diagram of encryption and decryption process in H.264/AVC.

- The decoded value of syntax element from encrypted *codewords/binstrings* must stay in the valid range for that syntax element. Any syntax element which is used for prediction of neighboring MBs should not be encrypted. Otherwise the drift in the value of syntax element will keep on increasing and after a few iterations, value of syntax element will fall outside the valid range and bitstream will be no more decodable.

In each MB, header information is encoded first, which is followed by the encoding of MB data. To keep the bitstream compliant, we cannot encrypt MB header, since it is used for prediction of future MBs. MB data contains NZs and can be encrypted. A MB is further divided into 16 blocks of 4x4 pixels to be processed by IT module. The *coded block pattern* is a syntax element used to indicate which 8x8 blocks within a MB contain NZs. The *macroblock mode* (MBmode) is used to indicate whether a MB is *skipped* or not. If MB is not *skipped*, then MBmode indicates the prediction method for a specific MB. For a 4x4 block inside MB, if *coded block pattern* and MBmode are set, it indicates that this block is encoded. Inside 4x4 block, *coded block flag* is the syntax element used to indicate whether it contains NZs or not. It is encoded first. If it is zero, no further data is transmitted; otherwise, it is followed by encoding of *significant map* in case of CABAC. Finally, the absolute value of each NZ and its sign are encoded. Similar to MB header, header of 4x4 block which includes *coded block flag* and *significant map*, should not be encrypted for the sake of bitstream compliance.
Available encryption space (ES) which fulfills the above mentioned conditions for SE-CAVLC and SE-CABAC is presented in Section III-A and III-B respectively. Encryption and decryption of the protected bitstream are presented in Section III-C and III-D respectively.

A. Encryption space (ES) for SE-CAVLC

In CAVLC, five syntax elements are used to code levels and runs as shown in Fig. 7. NZs are coded by three syntax elements namely coeff_token, signs of trailing ones and remaining non-zero levels. Zeros are coded by two syntax elements namely total no. of zeros and runs of zeros. A single syntax element namely coeff_token is used to code total NZs and number of trailing ones. It is followed by coding of signs of trailing ones (T1's). Remaining NZs are then coded using seven VLC look-up tables either by regular mode or by escape mode as explained in Section II-A1. They are mapped to some code from a specific VLC look-up table.

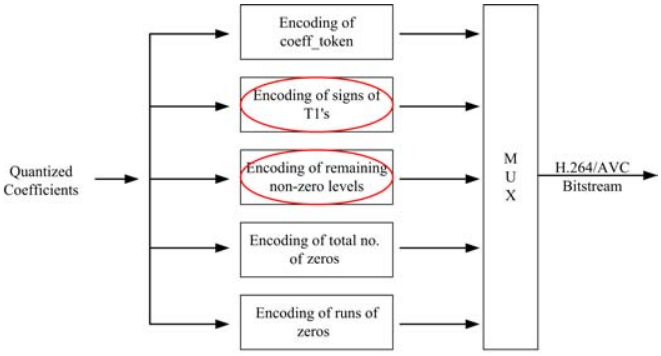


Fig. 7: Block diagram of CAVLC of H.264/AVC. Encircled syntax elements are used for SE-CAVLC.

To keep the bitstream compliant, we cannot encrypt coeff_token, total number of zeros and runs of zeros. Two syntax elements fulfill the above mentioned conditions for encryptions. First is signs of trailing ones. Second is sign and magnitude of remaining NZs, both in regular and escape mode. For the sake of same bitrate, ES of SE-CAVLC consists of only those NZs whose VLC *codewords* have the same length. CAVLC uses multiple VLC tables with some threshold for incrementing the table as given in equation (2). Since the threshold for a specific table is highest possible value possible with that *codeword* length (this is the case when all the suffix bits of the *codeword* are 1), magnitude of encrypted NZ is such that VLC table transition is not affected. VLC codes, having same code length, constitute the ES. For VLCn table, ES is 2^n as given in equation (3). For table VLC0, every NZ has different *codeword* length, consequently we cannot encrypt the NZs in this table:

$$TH[0\ldots6] = (0,\ 2,\ 3,\ 6,\ 12,\ 24,\ 48,\ \infty). \quad (2)$$

$$ES[0\ldots6] = (1,\ 2,\ 4,\ 8,\ 16,\ 32,\ 64,\ \infty). \quad (3)$$

B. Encryption space (ES) for SE-CABAC

The main difference between SE-CAVLC and SE-CABAC is that in SE-CABAC, SE is not performed on CABAC bitstream. Rather it is performed on *binstrings* which are input to BAC as shown in Fig. 8. Among all the four *binarization* techniques, the *unary* and *truncated unary* codes have different code lengths for each input value as explained in Section II-A2. They do not fulfill the first condition and their encryption will change the bitrate of bitstream. Suffix of EGk and the *fixed length* code can be encrypted while keeping the bitrate unchanged. EGk is used for binarization of absolute value of levels and MVDs. Number of MVD *binstrings* have the same length and hence, first and second conditions are fulfilled. But owing to the fact that MVDs are part of MB header and are used for prediction of future motion vectors, their encryption does not fulfill third condition and their encryption makes the bitstream non-compliant. To conclude, the syntax elements which fulfill the criteria for encryption of H.264/AVC compliant bitstream are suffix of EG0 and sign bits of levels. Hence for each NZ with $|NZ| > 14$, encryption is performed on $l(x)$ of EG0. It is followed by encryption of syntax element *coeff_sign_flag* which represents sign of levels of all non-zero levels. The *fixed length* code is used for binarization of syntax elements which belong to MB header and cannot be encrypted.

To keep the bitrate intact, ES for SE-CABAC consists of only those NZs whose EG0 *binstrings* have the same length as shown in Fig. 9. EG0 codes, having same code length, constitute the ES and it depends upon $\|NZ\|$. The ES is $2^{log_2(n+1)}$ where n is the maximum possible value by suffix bits of EG0 *i.e.* when all the bits in suffix are 1.

Fig. 8: SE of *binstrings* in SE-CABAC.

C. SE of NZs in the entropy coding stage of H.264/AVC

Let us consider $Y_i = X_i \oplus E_k(Y_{i-1})$ as the notation for the encryption of a n bit block X_i, using the secret key k with the AES cipher in CFB mode as given by equation (1), and performed as described in the scheme from Fig. 5. We have chosen to use this mode in order to keep the original compression rate. Indeed, with the CFB mode for each block, the size of the encrypted data Y_i can be exactly the same one as the size of the plaintext X_i. In this mode, the code from the previously encrypted block is used to encrypt the current one as shown in Fig. 5. The three stages of the proposed algorithm are: the construction of the plaintext X_i, described in Section III-C1, the encryption of X_i to create Y_i which is provided in Section III-C2 and the substitution of the original *codeword/binstring* with the encrypted information, which is explained in Section III-C3. The overview of the proposed SE method is provided in Fig. 10.

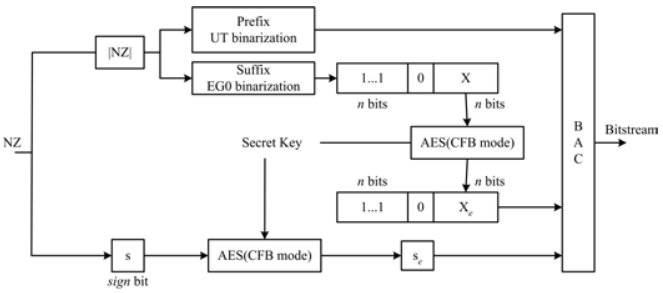


Fig. 9: Encryption process for NZs and their signs in CABAC of H.264/AVC.

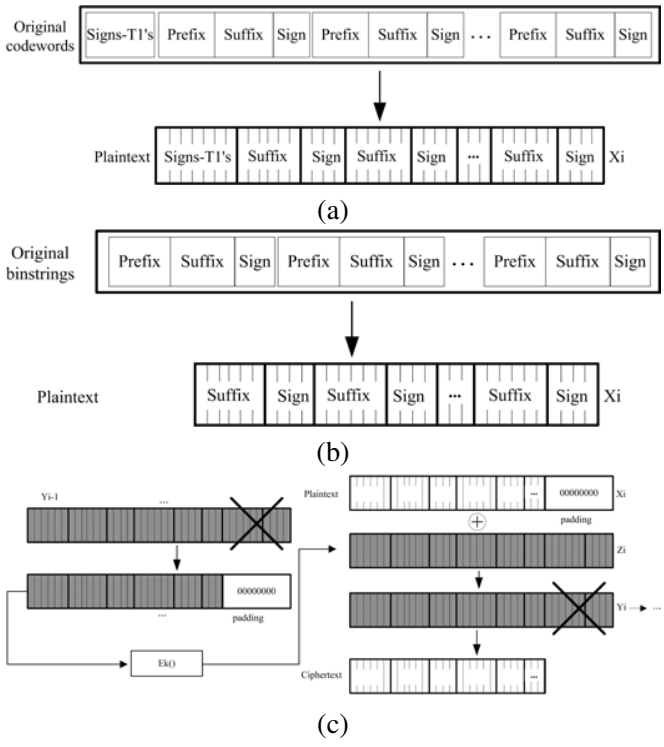


Fig. 10: Global overview of the proposed SE method (a) Preparation of plaintext for CAVLC, (b) Preparation of plaintext for CABAC, (c) Proposed SE scheme.

1) The construction of plaintext: As slices are independent coding units, SE should be performed on them independently. In case of SE-CAVLC, the plaintext is

created by copying the encrypt-able bits from CAVLC bitstream to the vector X_i until either X_i is completely filled or slice-boundary comes as shown in Fig. 10.a. Let C, the length of the vector X_i, is 128. In case of SE-CABAC, we perform SE before BAC as shown in Fig. 10.b. In that case, we transform the non-binary syntax elements to *binstrings* through process of binarization and at the same time we fill the X_i with encrypted bits until either the vector X_i is completely filled or the slice boundary comes. The binarization of many syntax elements at the same time also makes the CABAC coding faster and increases its throughput [39].

Let $L(X_i)$ be the length up to which vector X_i is filled. In case of slice boundary, if $L(X_i) < C$, we apply a padding function $p(j) = 0$, where $j \in \{L(X_i) + 1, \ldots, C\}$, to fill in the vector X_i with zeros up to C bits. Historically, padding was used to increase the security of the encryption, but in here it is used for rather technical reasons [28].

2) Encryption of the plaintext with AES in the CFB mode: In the encryption step with AES in the CFB mode, the previous encrypted block Y_{i-1} is used as the input of the AES algorithm in order to create Z_i. Then, the current plaintext X_i is XORed with Z_i in order to generate the encrypted text Y_i as given by equation (1). For the initialization, the IV is created from the secret key k according to the following strategy. The secret key k is used as the seed of the pseudo random number generator (PRNG). Firstly, the secret key k is divided into 8 bits (byte) sequences. The PRNG produces a random number for each byte component of the key that defines the order of IV formation. Then, we substitute Y_0 with the IV, and Y_0 is used in AES to produce Z_1. As illustrated in Fig. 10.c, with the CFB mode of the AES algorithm, the generation of the keystream Z_i depends on the previous encrypted block Y_{i-1}. Consequently, if two plaintexts are identical $X_i = X_j$ in the CFB mode, then always the two corresponding encrypted blocks are different, $Y_i \neq Y_j$.

3) Substitution of the original bitstream: The third step is the substitution of the original Y_i by the encrypted Y_i. For SE-CAVLC, CAVLC bitstream is accessed in sequential order as in the first step (construction of the plaintext X_i). Given the length in bits of each amplitude $(S_n, S_{n-1}, \ldots, S_1)$, we start substituting the original bits in the bitstream by the corresponding parts of Y_i as shown in Fig. 10. For SE-CABAC, *binstrings* are accessed in sequential order and we start substituting the original bits in them by the corresponding parts of Y_i as shown in Fig. 10. In case of slice boundaries, the total quantity of replaced bits is $L(X_i)$ and consequently we do not necessarily use all the bits of Y_i.

D. Decryption process

The decryption process in the CFB mode works as follows. The previous block Y_{i-1} is used as the input to the AES algorithm in order to generate Z_i. By knowing the secret key k, we apply the same function $E_k(\cdot)$ as that used in the encryption stage. The difference is that the input of this process is now the ciphered vector. In case of SE-CAVLC, the ciphered vector is accessed in the sequential way in order to construct the plaintext Y_{i-1} which is then used in the AES to generate the keystream Z_i. The keystream Z_i is then XORed with the current block Y_i to generate X_i, as shown in Fig. 5.b. For SE-CAVLC, the resulting plaintext vector is split into segments in order to substitute the signs of trailing ones and suffixes $(S_n, S_{n-1}...S_1)$ in the ciphered bitstream and to generate the original CAVLC bitstream. Afterward, we apply the entropy decoding and retrieve the quantized DCT coefficients. After the inverse quantization and the inverse DCT we get the decrypted and decoded video frame.

In case of SE-CABAC, the difference is that binary arithmetic decoder is used to transform the SE-CABAC bitstream to encrypted *binstrings* which are then accessed to make the plaintext Y_{i-1}. The plaintext is decrypted and substituted back to generate original *binstrings*. They are then passed through inverse binarization, inverse quantization and inverse DCT steps to get the decrypted and decoded video frame.

IV. Experimental results

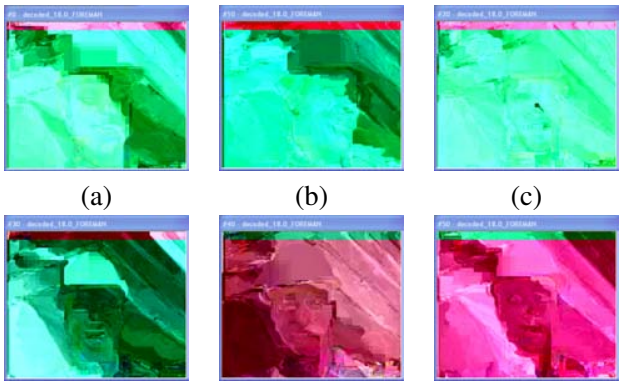
In this section we analyze the results for SE-CAVLC and SE-CABAC. We have used the reference implementation of H.264 JSVM 10.2 in AVC mode for video sequences in QCIF and SD resolution. For the experimental results, nine benchmark video sequences have been used for the analysis in QCIF format. Each of them represents different combinations of motion (fast/slow, pan/zoom/rotation), color (bright/dull), contrast (high/low) and objects (vehicle, buildings, people). The video sequences 'bus', 'city' and 'foreman' contain camera motion while 'football' and 'soccer' contain camera panning and zooming along with object motion and texture in background. The video sequences 'harbour' and 'ice' contain high luminance images with smooth motion. 'Mobile' sequence contains a complex still background and foreground motion.

In Section IV-A we present an analysis of joint SE and H.264/AVC compression while in Section IV-B we compare PSNR and quality when applying SE only on I frames and on I+P frames. In Section IV-C, security

analysis, showing the efficiency of the proposed method, is developed[1].

A. Analysis of joint SE and H.264/AVC compression

We have applied simultaneously our SE and H.264/AVC compression as described in Section III, on all the benchmark video sequences. SE-CAVLC and SE-CABAC impart some characteristics to the bitstream. In spatial domain, SE video gets flat regions and change in pixel values mostly occur on MB boundaries. In temporal domain, *luma* and *chroma* values rise up to maximum limit and then come back to minimum values. This cycle keeps on repeating. Owing to this phenomenon, the pixel values change drastically in temporal domain. Lot of transitions are observed in values of color and brightness. This phenomenon can be observed for SE-CAVLC and SE-CABAC in Fig. 11 and Fig. 12 respectively for QP value 18 for *foreman* video sequence.

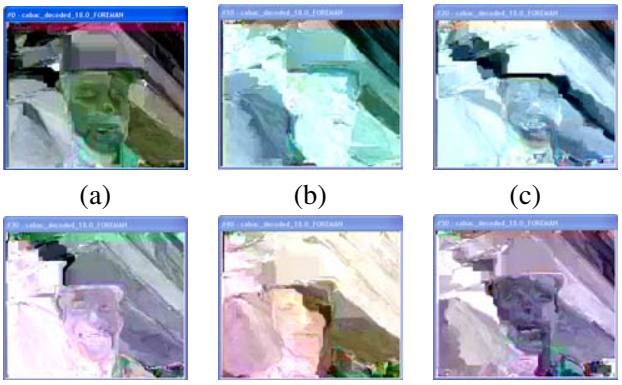


(a) (b) (c) (d) (e) (f)

Fig. 11: Six frames of *foreman* video sequence for SE-CAVLC for QP value 18 with frame: a) #0, b) #10, c) #20, d) #30, e) #40, f) #50.

In a first set of experiments, we have analyzed the available encryption space (ES) in H.264/AVC bitstreams for both of SE-CAVLC and SE-CABAC. ES is defined as percentage of total bitstream size. MBs that contain many details and texture will have lot of NZs and consequently, will be strongly encrypted. On the other hand, the homogeneous MBs, *i.e.* blocks that contain series of identical pixels, are less ciphered because they contain a lot of null coefficients which are represented by runs in CAVLC and by significant map in CABAC. In Table I, we provide ES for SE-CAVLC and SE-CABAC for different benchmark video sequences for QP value 18. While in Table II, ES for various QP values is shown for *foreman* video sequence. Here the average number of bits available for SE per MB are also provided. One can note that ES is inversely proportional to QP value. When QP value is higher and implicitly the video compression is higher, we are able to encrypt fewer bits in the compressed frame. This is due to the fact that H.264/AVC has lesser number of NZs at higher QP values. From both these tables, it is evident that more ES is available for SE-CAVLC as compared to SE-CABAC. But ES is more affected by change in QP values for SE-CAVLC as compared to SE-CABAC. For example, for *foreman* video sequence, ES varies from 28.55% to 6.70% for SE-CAVLC when QP varies from 12 to 42. For the same QP range, the change in ES for SE-CABAC is from 19.97% to 9.46% as shown in Table II. From Table I and II, since PSNR of original H.264/AVC are very similar for both CAVLC and CABAC, in the rest of this section for the sake of comparison, we list only PSNR of CAVLC bitstreams.

[1]Encrypted video bitstreams are available on http://www.lirmm.fr/~shahid/.



(a) (b) (c) (d) (e) (f)

Fig. 12: Six frames of *foreman* video sequence for SE-CABAC for QP value 18 with frame: a) #0, b) #10, c) #20, d) #30, e) #40, f) #50.

Seq.	SE-CAVLC				SE-CABAC			
	encoder		decoder		encoder		decoder	
	I (%)	I+P (%)	I (%)	I+P (%)	I (%)	I+P (%)	I (%)	I+P (%)
bus	0.69	0.31	3.77	2.7	0.57	0.25	3.37	2.3
city	0.5	0.26	3.36	2.4	0.44	0.23	3.06	2.1
crew	0.31	0.15	2.52	1.5	0.29	0.14	2.22	1.2
football	0.41	0.23	3.46	2.4	0.31	0.18	3.26	2.2
foreman	0.47	0.23	3.19	2.2	0.41	0.20	2.99	2.0
harbour	0.55	0.30	3.65	2.7	0.47	0.26	3.25	2.3
ice	0.41	0.21	3.16	2.1	0.33	0.17	2.96	1.9
mobile	0.76	0.35	4.33	3.3	0.72	0.33	4.03	3.0
soccer	0.44	0.21	3.17	2.2	0.38	0.18	2.87	1.9

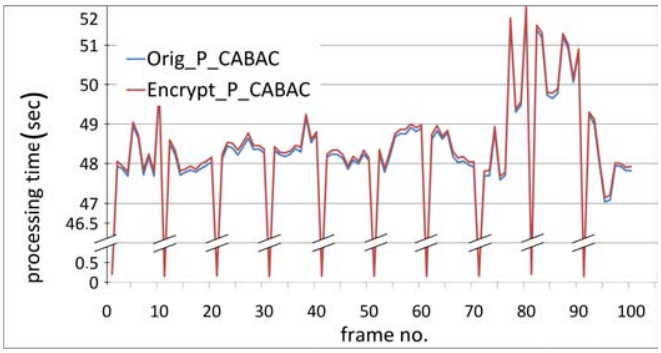
TABLE III: Analysis of increase in processing power for SE-CAVLC and SE-CABAC at QP value 18.

Seq.	SE-CAVLC				SE-CABAC			
	PSNR (dB)	Total Size (Bytes)	*ES* (%)	Avg. *ES* Bits/MB.	PSNR (dB)	Total Size Bytes	*ES* (%)	Avg. *ES* Bits/MB.
bus	44.25	1254523	31.05	39	44.24	1255497	19.93	25
city	44.29	1022852	26.41	27	44.27	1024053	19.79	20
crew	44.82	779480	20.66	16	44.81	777037	18.97	15
football	44.61	997640	25.33	26	44.59	987936	19.45	19
foreman	44.38	813195	22.76	19	44.36	806063	18.72	15
harbour	44.10	1279309	30.49	39	44.09	1268153	20.01	26
ice	46.47	472573	24.64	12	46.46	469323	17.72	8
mobile	44.44	1768771	36.17	65	44.43	1753381	19.80	35
soccer	44.27	922527	23.42	22	44.21	902847	19.94	18

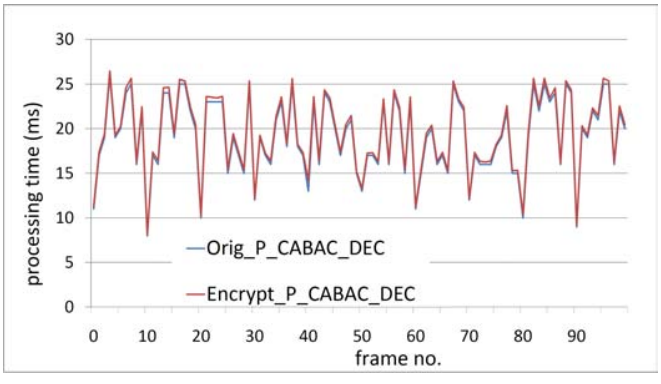
TABLE I: Analysis of ES for SE for different benchmark video sequences at QP value 18.

QP	SE-CAVLC				SE-CABAC			
	PSNR (dB)	Total Size (Bytes)	*ES* (%)	Avg. *ES* Bits/MB.	PSNR (dB)	Total Size Bytes	*ES* (%)	Avg. *ES* Bits/MB.
12	50.07	1260001	28.55	36	50.05	1257024	19.97	25
18	44.38	813195	22.76	19	44.36	806063	18.72	15
24	39.43	478496	17.13	8	39.42	464794	17.61	8
30	35.08	268012	13.24	4	35.08	255287	15.65	4
36	31.04	145736	9.88	1	31.06	134143	12.22	2
42	27.23	88333	6.70	1	27.35	70616	9.46	1

TABLE II: Analysis of ES for SE over whole range of QP values for *foreman* video sequence.



(a)



(b)

Fig. 13: Framewise time taken by SE-CABAC of *foreman* video sequence for I+P frames at QP value 18 with *intra period* 10 during: a) Encoding, b) Decoding.

Table III gives a detailed overview of the required processing power for I and I+P video sequences at QP value 18. *intra period* has been set 10 for I+P video sequences. One can observe that increase in computation time for encoder is less than 0.4% for both of SE-CAVLC and SE-CABAC while it is below than 3% for decoder for I+P sequence.

Fig. 13.a and 13.b show the framewise analysis of increase in processing power for SE-CABAC at QP value 18 for *foreman*. For experimentation, 2.1 GHz Intel Core 2 Duo T8100 machine with 3072 MB RAM has been used. For I+P sequence encoding of 100 frames with *intra period* 10, it took 4372.5 seconds and 4381.3 seconds for CABAC and SE-CABAC respectively. While it took 2.005 seconds and 2.045 seconds for CABAC and SE-CABAC decoding. It is a negligible increase in processing power and can be managed well even by hand-held devices. It is important to note that increase is processing power of SE-CABAC is less than SE-CAVLC owing to two reasons. First, ES of SE-CABAC is lesser than that of SE-CAVLC as shown in Table I and Table II. Second, CABAC takes lot more processing power than CAVLC. So increase in processing power because of encryption will be lower in terms of percentage. Thus, SE-CAVLC and SE-CABAC is possible in real-time along with compression.

B. PSNR and Quality of SE-CAVLC & SE-CABAC for I Frames and I+P Frames

Peak signal to noise ratio (PSNR) is widely used objective video quality metric. However, it does not perfectly correlate with a perceived visual quality due to non-linear behavior of human visual system. Structural similarity index (SSIM) [33] takes into account the structural distortion measurement, since human vision system is highly specialized in extracting structural information from the viewing field. SSIM has a better correlation to the subjective impression. SSIM ranges from -1 to 1. SSIM is 1 when both the images are the same.
To present the visual protection of encrypted video sequences, PSNR and SSIM of I and I+P frames are presented.

1) I Frames: To demonstrate the efficiency of our proposed scheme, we have compressed 100 I frames of each sequence at 30 fps. Fig. 14 and Fig. 15 show the encrypted first frame of *foreman* video sequence at different QP values for SE-CAVLC and SE-CABAC respectively. In H.264/AVC, blocks on the top array are predicted only from left while blocks on left are always predicted from top. Owing to this prediction, a band having width of 8 pixels at top of video frames can be observed for both of SE-CAVLC and SE-CABAC while this band has width of 4 pixels on left of video frames as shown in Fig. 14 and Fig. 15. The average PSNR values of *foreman* is given in Table IV over whole QP range. It is also compared with the PSNR obtained for the same video sequence without encryption. In Table IV we present PSNR of original video only for CAVLC. PSNR for CABAC is very much similar as presented in Table I. One can note that whatever is the QP value, the quality of the encrypted video remains in the same lower range.

Table V compares the average PSNR of 100 I frames of all benchmark video sequences at QP value 18 without encryption and with SE. Average PSNR value of *luma* for all the sequences at QP value 18 is $9.49\ dB$ for SE-CAVLC and $9.80\ dB$ for SE-CABAC. It confirms that this algorithm works well for various combinations of motion, texture and objects for I frames. It is also evident in frame-wise PSNR of *luma* of I frames of *foreman* video sequence as shown in Fig. 16.
Table VI contains the experimental results of SE of 100 I frames for SD resolution. Here, Average PSNR value of *luma* is $9.82\ dB$ for SE-CAVLC and $9.83\ dB$ for SE-CABAC, which is almost the same as that of QCIF resolution. It is evident that this algorithm is capable to encrypt high quality information at all resolutions. For the rest of the section, we present analysis for QCIF resolution only, since more benchmark video sequences are available in this resolution.

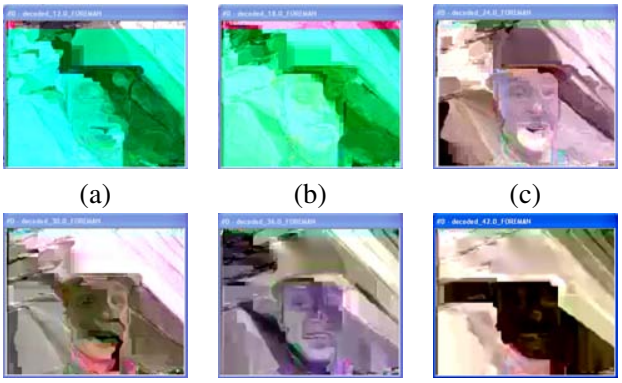


Fig. 14: Decoding of SE-CAVLC frame #1 of *foreman* video sequence with QP value equal to: a) 12, b) 18, c) 24, d) 30 e) 36, f) 42.

Fig. 15: Decoding of SE-CABAC frame #1 of *foreman* video sequence with QP value equal to: a) 12, b) 18, c) 24, d) 30, e) 36, f) 42.

Table VII shows the SSIM values of *luma* of benchmark video sequences without encryption and with SE. Results verify the proposed scheme has distorted the structural information present in the original video. Average SSIM value of video sequences without encryption is 0.993, while it is 0.164 and 0.180 for SE-CAVLC and SE-CABAC respectively. Fig. 17 shows the frame-wise SSIM of *luma* of *foreman* video sequence for I frames. It is important to note SSIM value of complex video sequences is less than that of simple video sequences.

2) I+P Frames: Video data normally consists of an I frame and a trail of P frames. I frames are inserted periodically to restrict the drift because of lossy compression and rounding errors. In these experiments, *intra period* is set at 10 in a sequence of 100 frames. Results shown in Table VIII verify the effectiveness of our scheme over the

	PSNR (Y) (dB)			PSNR (U) (dB)			PSNR (V) (dB)		
QP	ORIG	SE-CAVLC	SE-CABAC	ORIG	SE-CAVLC	SE-CABAC	ORIG	SE-CAVLC	SE-CABAC
12	50.07	8.61	8.43	50.00	19.78	24.09	50.79	9.57	22.58
18	44.38	8.67	8.58	45.68	24.14	24.40	47.57	10.16	22.10
24	39.43	8.71	8.72	41.93	26.39	24.35	44.19	24.91	22.84
30	35.08	9.43	8.69	39.75	27.45	24.58	41.41	25.36	23.64
36	31.04	9.37	8.53	37.74	28.12	24.93	38.62	24.78	23.16
42	27.23	9.45	8.67	36.23	25.51	24.91	36.86	24.59	24.02

TABLE IV: PSNR comparison for I frames without encryption and with SE for *foreman* at different QP values.

	PSNR (Y) (dB)			PSNR (U) (dB)			PSNR (V) (dB)		
Seq.	ORIG	SE-CAVLC	SE-CABAC	ORIG	SE-CAVLC	SE-CABAC	ORIG	SE-CAVLC	SE-CABAC
bus	44.25	7.90	8.18	45.22	26.82	24.95	46.55	26.65	27.25
city	44.29	10.90	11.23	45.84	31.89	30.27	46.83	33.47	31.80
crew	44.82	8.96	9.90	45.84	23.99	23.45	45.70	19.74	19.79
football	44.61	11.48	11.49	45.77	14.85	14.39	46.05	24.28	23.59
foreman	44.38	8.67	8.58	45.68	24.14	24.40	47.57	10.16	22.10
harbour	44.10	9.25	9.50	45.61	27.07	24.61	46.67	33.25	31.31
ice	46.47	10.59	10.40	48.81	24.26	25.58	49.28	16.86	20.39
mobile	44.44	8.32	8.29	44.15	10.44	13.08	44.06	9.58	10.97
soccer	44.27	9.34	10.61	46.62	22.10	19.73	47.93	28.21	24.41
avg.	44.63	9.49	9.80	45.95	22.84	22.27	46.74	22.47	23.51

TABLE V: PSNR comparison for I frames without encryption and with SE at QP value 18.

	PSNR (Y) (dB)			PSNR (U) (dB)			PSNR (V) (dB)		
Seq.	ORIG	SE-CAVLC	SE-CABAC	ORIG	SE-CAVLC	SE-CABAC	ORIG	SE-CAVLC	SE-CABAC
city	44.65	9.94	10.12	47.82	27.34	26.20	49.07	31.37	29.92
crew	45.15	9.16	9.08	46.56	24.52	22.80	47.74	20.14	19.97
harbour	44.54	9.35	9.37	47.48	22.91	22.92	48.73	28.79	26.81
ice	46.17	10.67	10.38	51.50	27.79	27.72	52.01	25.04	26.09
soccer	45.12	9.96	10.19	47.68	18.36	18.02	49.21	26.68	24.08
avg.	45.13	9.82	9.83	48.21	24.18	23.53	49.35	26.40	25.37

TABLE VI: PSNR comparison for I frames without encryption and with SE at QP value 18 (SD resolution).

Seq.	ORIG-CAVLC	SE-CAVLC	ORIG-CABAC	SE-CABAC
bus	0.995	0.069	0.994	0.064
city	0.994	0.115	0.994	0.093
crew	0.991	0.184	0.991	0.153
football	0.991	0.219	0.991	0.184
foreman	0.990	0.198	0.990	0.165
harbour	0.998	0.047	0.998	0.038
ice	0.990	0.419	0.990	0.398
mobile	0.998	0.040	0.998	0.356
soccer	0.988	0.185	0.988	0.171
avg	0.993	0.164	0.993	0.180

TABLE VII: SSIM comparison of *luma* of I frames without encryption and with SE at QP value 18.

	PSNR (Y) (dB)			PSNR (U) (dB)			PSNR (V) (dB)		
QP	ORIG	SE-CAVLC	SE-CABAC	ORIG	SE-CAVLC	SE-CABAC	ORIG	SE-CAVLC	SE-CABAC
12	49.55	8.73	8.11	49.89	18.35	22.98	50.63	10.41	21.63
18	43.93	9.14	10.44	45.53	23.56	23.87	47.56	8.03	23.19
24	38.92	9.60	9.72	42.04	26.93	24.87	44.27	25.77	24.98
30	34.60	9.24	9.25	39.84	28.61	24.95	41.54	26.63	24.03
36	30.72	10.09	8.19	37.91	28.45	24.28	38.75	22.78	23.36
42	26.95	9.44	8.64	36.30	26.46	26.82	36.92	25.60	24.65

TABLE VIII: PSNR comparison for I+P frames without encryption and with SE for *foreman* at different QP values.

	PSNR (Y) (dB)			PSNR (U) (dB)			PSNR (V) (dB)		
Seq.	ORIG	SE-CAVLC	SE-CABAC	ORIG	SE-CAVLC	SE-CABAC	ORIG	SE-CAVLC	SE-CABAC
bus	43.73	7.58	7.72	45.10	27.15	25.42	46.42	24.73	27.01
city	43.81	11.42	11.14	45.73	32.47	30.16	46.76	32.53	31.66
crew	44.46	8.97	10.00	45.81	25.09	21.98	45.73	19.63	20.18
football	44.16	12.13	11.28	45.72	14.31	14.58	46.06	24.77	24.27
foreman	43.93	9.14	10.44	45.53	23.56	23.87	47.56	8.03	23.19
harbour	43.71	9.46	9.78	45.45	24.53	22.93	46.58	33.87	31.67
ice	46.14	10.93	10.38	48.61	23.63	25.29	49.14	19.17	19.71
mobile	43.85	8.44	8.84	44.16	10.09	12.48	44.07	9.61	11.85
soccer	43.56	9.65	10.56	46.47	21.83	20.76	47.76	27.40	22.24
avg.	44.15	9.75	10.02	45.84	22.52	21.94	46.68	22.19	23.53

TABLE IX: Comparison of PSNR without encryption and with SE for I+P frames at QP value 18.

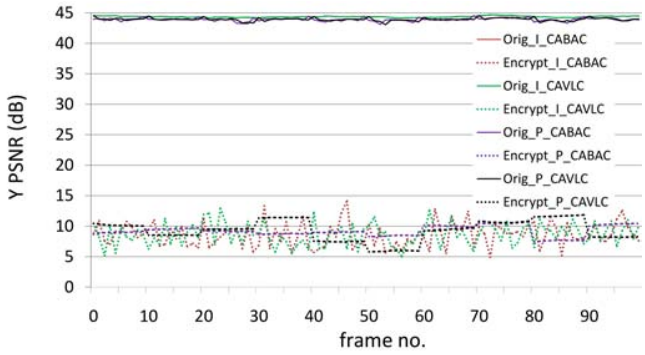


Fig. 16: Framewise PSNR of I and I+P frames for *foreman* for SE-CAVLC and SE-CABAC at QP value 18.

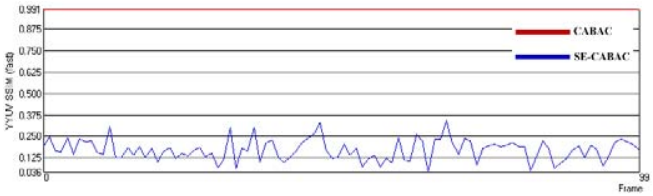


Fig. 17: Framewise SSIM of I frames for *foreman* for SE-CABAC at QP value 18.

whole range of QP values for *foreman* video sequence. Table IX verifies the performance of our algorithm for all video sequences for I+P frames at QP value 18. Average PSNR of *luma* for all the sequences is 9.75 dB and 10.02 dB for SE-CAVLC and SE-CABAC respectively. Fig. 16 shows the frame-wise PSNR of *luma* of *foreman* video sequence for I+P. Here PSNR of SE-CAVLC and SE-CABAC remains almost the same for sequence of P frames and changes at every I frame, thus producing a staircase graph. SSIM quality metric has very low values and is not given here for the sake of brevity.

C. Security Analysis

1) Analysis of entropy and local standard deviation: The security of the encrypted image can be measured by considering the variations (local or global) in the protected image. Entropy is a statistical measure of randomness or disorder of a system which is mostly used to characterize the texture in the input images. Considering this, the information content of image can be measured with the entropy $H(X)$ and local standard deviation $\sigma(j)$. If an image has 2^k gray levels α_i with $0 \leq i \leq 2^k$ and the probability of gray level α_i is $P(\alpha_i)$, and without considering the correlation of gray levels, the 1^{st} order entropy $H(X)$ is defined as:

$$H(X) = -\sum_{i=0}^{2^k-1} P(\alpha_i) log_2(P(\alpha_i)). \tag{4}$$

If the probability of each gray level in the image is $P(\alpha_i) = \frac{1}{2^k}$, then the encryption of such image is robust against statistical attacks of 1^{st} order, and thus $H(X) = log_2(2^k) = k$ bits/pixel. In the image the information redundancy r is defined as:

$$r = k - H(X). \tag{5}$$

Similarly the local standard deviation $\sigma(j)$ for each pixel $p(j)$ taking account of its neighbors to calculate the local mean $\overline{p(j)}$, is given as:

$$\sigma(j) = \sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(p(i) - \overline{p(j)})}, \tag{6}$$

where m is the size of the pixel block to calculate the local mean and standard deviation, and $0 \leq j < M$, if M is the image size.

In case of full encryption, entropy $H(X)$ is maximized with high values of local standard deviation. But in case of SE-CAVLC and SE-CABAC, the video frame is transformed to flat regions with blocking artifacts as depicted in Fig. 14 and Fig. 15. It is generally owing to variation in pixel values at MB boundaries. For

all the benchmark sequences, the average information redundancy r for SE-CAVLC and SE-CABAC sequences is 0.94 and 0.55 respectively, while it is 1.11 for all the original sequences. Despite the fact that SE-CAVLC and SE-CABAC transform the video frames into flat region, the entropy of the encrypted video sequences from equation (4) is higher as compared to original sequences.

These flat regions are because of two reasons. Firstly, flat regions are due to the fact that prediction is performed from edge pixels of neighboring MBs. Secondly, pixels have either with very high value(bright video frame) or very low value (dark video frame) in SE video frame. This is owing to the fact that during reconstruction pixel value are clipped to 255 if they are greater than it and to 0 if they are below this lower range. So if many pixels have value beyond the upper or lower range, all of them will be clipped to the same value, thus creating a flat region which is either dark or bright. Based on this analysis, the statistical characteristics of SE-CAVLC and SE-CABAC bitstreams vary from full encryption systems. Fig. 18.a, 18.b and 18.c show the histogram of the original and the encrypted NZs for the *foreman* video sequence using for SE-CAVLC. Here we can see that SE has given an effect of staircase because of treating the coefficients with equal probability in the same interval.

From equation (6), we also analyzed the local standard deviation σ for each pixel while taking into account its neighbors. In Table X, the mean local standard deviation for *foreman* sequence at different QP values is given. For all benchmark video sequences, the mean local standard deviation of *luma* equals to 69.15 and 61.48 for the SE-CAVLC and SE-CABAC bitstreams respectively, where the mean local standard deviation is less than 10 gray levels for the original benchmark sequences. One can note that local standard deviation of encrypted sequences is higher than original sequences.

	CAVLC		CABAC	
QP	ORIG	SE-CAVLC	ORIG	SE-CABAC
12	6.75	71.49	7.02	69.69
18	7.21	73.23	7.53	59.97
24	8.57	91.98	8.63	84.55
30	6.35	35.99	6.71	57.87
36	6.90	47.42	6.93	68.04
42	7.91	75.26	8.11	71.17

TABLE X: Standard deviation for SE of *foreman* video sequence at different QP values.

2) Correlation of adjacent pixels: Visual data is highly correlated i.e. pixels values are highly probable to repeat in horizontal, vertical and diagonal directions. A correlation of a pixel with its neighboring pixel is then

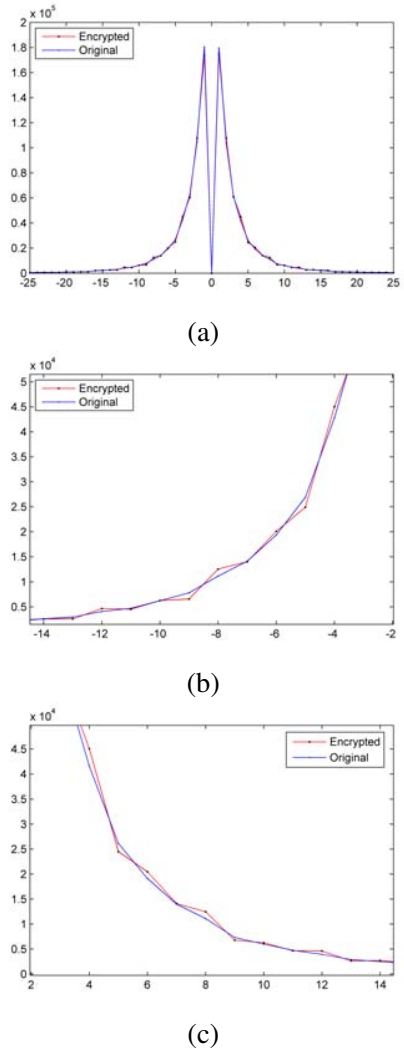


Fig. 18: Histograms of original and SE-CAVLC NZs: a) Complete graph, b) Zoomed graph of negative x-axis, c) Zoomed graph of positive x-axis.

given by a tuple (x_i, y_i) where y_i is the adjacent pixel of x_i. Since there is always three directions in images *i.e.* horizontal, vertical and diagonal, so we can define correlation direction between any two adjacent pixels as:

$$corr_{(x,y)} = \frac{1}{n-1}\sum_{0}^{n}(\frac{x_i - \overline{x_i}}{\sigma_x})(\frac{y_i - \overline{y_i}}{\sigma_y}), \qquad (7)$$

where n represents the total number of tuples (x_i, y_i), $\overline{x_i}$ and $\overline{y_i}$ represent the local mean and σ_x and σ_y represent the local standard deviation respectively.

Owing to the flat regions in SE-CAVLC and SE-CABAC video sequences, the correlation values in these sequences will be higher as compared to original image which contain texture and edges. For all the benchmark sequences, the average horizontal correlation coefficient

is 0.88 and 0.87 for the SE-CAVLC and SE-CABAC respectively, while it is 0.80 for the original sequences.

3) Key sensitivity test: Robustness against cryptanalyst can be improved if the cryptosystem is highly sensitive towards the key. The more the visual data is sensitive towards the key, the more we would have data randomness. For this purpose, a key sensitivity test is assumed where we pick one key and then apply the proposed technique for encryption and then make a one bit change in the key and decode the bitstream. Numerical results show that the proposed technique is highly sensitive towards the key change, that is, a different version of encrypted video sequence is produced when the keys are changed, as shown in Fig. 19. PSNR of *luma* of decrypted frames with 1-bit different key is 10.39 dB and 8.31 dB for SE-CAVLC and SE-CABAC as shown in Table XI. It lies in the same lower range as decoded frames without decryption.

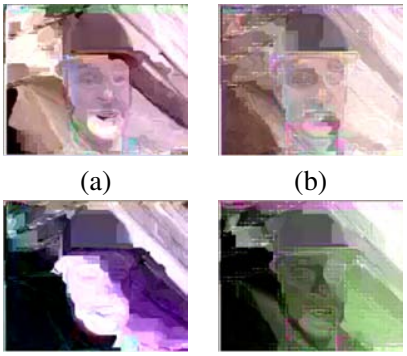
(a) (b) (c)

Fig. 19: Key sensitivity test for encrypted frame #1 of *foreman* video sequence for QP value 18. Encrypted frames are decrypted and decoded with: a) original key, b) 1-bit different key(SE-CAVLC), c) 1-bit different key(SE-CABAC).

4) Removal of encrypted data attack: In another experiment we have replaced the encrypted bits with constant values in order to measure the strength of SE-CAVLC and SE-CABAC proposed method as described in [27]. Here we have used frame #1 of *foreman* video sequence with QP value 24. Fig. 20 shows both encrypted and attacked video frames for SE-CAVLC and SE-CABAC. For example, Fig. 20.a shows SE-CAVLC video frame with $PSNR = 10.01\ dB$ for *luma*. If we set the encrypted bits of all NZs to zero, we get the video frame illustrated in Fig. 20.b with *luma* $PSNR = 8.87\ dB$. Similarly, Fig. 20.c shows SE-CABAC video frame having $PSNR = 8.20\ dB$ while the attacked SE-CABAC video frame has $PSNR = 7.72\ dB$ as shown in Fig. 20.d.

D. Comparative evaluation

For the sake of comparative evaluation of our scheme, we have compared it with six other recent techniques, which include scrambling [9], NAL unit encryption [14],



(a) (b) (c) (d)

Fig. 20: Attack in the selectively encrypted image by removing the encrypted data: a) SE-CAVLC encrypted image {Y, U, V} = {10.01, 26.86, 25.24} dB, b) SE-CAVLC attacked image {Y, U, V} = {8.87, 27.3, 26.3} dB, c) SE-CABAC encrypted image {Y, U, V} = {8.20, 17.95, 24.53} dB, d) SE-CABAC attacked image {Y, U, V} = {7.72, 28.6, 24.6} dB.

MB header encryption [16], reversible ROI encryption [5], I frame encryption [2] and multiple Huffman table permutation [36]. These techniques are different from each other in several aspects e.g. working domain (pixel, transform or bitstream) and encryption algorithm (pseud orandom permutation, stream cipher or AES). The comparison has been made based on several important characteristics of SE systems and is summarized in Table XII.

Encryption algorithm used in SE scheme is of vital importance for the security level. AES has the highest security among all the known ciphers and our proposed scheme utilizes AES. Among the recent techniques, AES has been used only in [2] but their SE scheme is very naive and encrypts only I frames.

Selective encryption should not result in increase of bitrate. For example, if a video for 3G wireless connection has bitrate of 384 kbps. Its encrypted version should have the same bitrate. Otherwise it cannot not be played back on 3G connection. Our scheme keeps the bitrate intact. It is in contrast to other schemes which either allow increase in bitrate [9], [5], [36], or use stream cipher for the sake of same bitrate [14], [16], thus compromising on the security of the system.

Format compliance is another important aspect for encrypted video data. Most of the schemes are not format complaint and their encrypted bitstreams cannot be decoded by reference decoder except SE schemes which work in pixel domain [5] and transform domain [9].

Our SE-CABAC scheme is the first format compliant technique which is for arithmetic coding based entropy

	PSNR (Y) (dB)	PSNR (U) (dB)	PSNR (V) (dB)
Original key	44.60	45.73	47.35
SE-CAVLC (1-bit different key)	10.39	24.46	14.02
SE-CABAC (1-bit different key)	8.31	25.13	24.82

TABLE XI: Key sensitivity test of SE-CAVLC and SE-CABAC encrypted video for frame #1 *foreman* video sequence for QP value 18.

coding module, while keeping the bitrate unchanged. Recent encryption techniques for arithmetic coding [13], [11] are not format complaint and require lot of processing power.

To summarize, our proposed schemes (SE-CAVLC and SE-CABAC) meet all the requirements of an integrated compression-encryption systems. Our proposed system is fully compliant to H.264/AVC decoder, with no change in bitrate and has the security of AES cipher.

V. Conclusion

In this paper, an efficient SE system has been proposed for H.264/AVC video codec for CAVLC and CABAC. The SE is performed in the entropy coding stage of the H.264/AVC using the AES encryption algorithm in the CFB mode. In this way the proposed encryption method does not affect the bitrate and the H.264/AVC bitstream compliance. The SE is performed in CAVLC *codewords* and CABAC *binstrings* such that they remain a valid *codewords/binstrings* thereafter having exactly the same length. Experimental analysis has been presented for I and P frames. The proposed scheme can be used for B frames without any modification, since B frames are also *inter* frames but have bidirectional prediction.
The proposed method has the advantage of being suitable for streaming over heterogeneous networks because of no change in bitrate. The experiments have shown that we can achieve the desired level of encryption, while maintaining the full bitstream compliance, under a minimal set of computational requirements. The presented security analysis confirms a sufficient security level for multimedia applications in the context of SE. The proposed system can be extended for ROI specific video protection [26] for video surveillance and can be applied to medical video transmission [24].

VI. Acknowledgment

This work is in part supported by the VOODDO project (2008-2011) which is a French national project of ANR *Agence Nationale de la Recherche* and the region of Languedoc Roussillon, France.

References

[1] "Draft ITU-T Recommendation and Final Draft International Standard of Joint Video Specification (ITU-T Rec. H.264 / ISO/IEC 14496-10 AVC)," Joint Video Team (JVT), Doc. JVT-G050, Tech. Rep., March 2003.

[2] M. Abomhara, O. Zakaria, O. Khalifa, A. Zaiden, and B. Zaiden, "Enhancing Selective Encryption for H.264/AVC Using Advanced Encryption Standard," *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 223–229, 2010.

[3] M. Bellare, T. Ristenpart, P. Rogaway, and T. Stegers, "Format-Preserving Encryption," in *in Proc. 16th Annual International Workshop on Selected Areas in Cryptography*, Calgary, Canada, 2009, pp. 295–312.

[4] G. Bjontegaard and K. Lillevold, "Context-Adaptive VLC Coding of Coefficients," in *JVT Document JVT-C028*, Fairfax, VA, May 2002.

[5] P. Carrillo, H. Kalva, and S. Magliveras, "Compression Independent Reversible Encryption for Privacy in Video Surveillance," *EURASIP Journal on Information Security*, vol. 2009, p. 13, 2009.

[6] H. Cheng and X. Li, "Partial Encryption of Compressed Images and Videos," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 48, no. 8, pp. 2439–2445, Aug. 2000.

[7] J. Daemen and V. Rijmen, "AES Proposal: The Rijndael Block Cipher," Proton World Int.l, Katholieke Universiteit Leuven, ESAT-COSIC, Belgium, Tech. Rep., 2002.

[8] M. V. Droogenbroeck and R. Benedett, "Techniques for a Selective Encryption of Uncompressed and Compressed Images," in *Proc. of Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems (ACIVS) 2002, Ghent, Belgium*, Sept. 2002, pp. 90–97.

[9] F. Dufaux and T. Ebrahimi, "Scrambling for privacy protection in video surveillance systems," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 18, no. 8, pp. 1168 –1174, aug. 2008.

[10] M. M. Fisch, H. Stgner, and A. Uhl, "Layered Encryption Techniques for DCT-Coded Visual Data," in *Proc.* 12^{th} *European Signal Processing Conference (EUSIPCO'04), Vienna, Austria*, Sep. 2004, pp. 821–824.

[11] M. Grangetto, E. Magli, and G. Olmo, "Multimedia Selective Encryption by Means of Randomized Arithmetic Coding," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 8, no. 5, pp. 905–917, Oct. 2006.

[12] G. Jakimoski and K. Subbalakshmi, "Cryptanalysis of Some Multimedia Encryption Schemes," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 10, no. 3, pp. 330–338, April 2008. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1109/TMM.2008.917355

[13] W. Jiangtao, K. Hyungjin, and J. Villasenor, "Binary arithmetic coding with key-based interval splitting," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 13, no. 2, pp. 69–72, Feb. 2006.

[14] C. Li, X. Zhou, and Y. Zong, "NAL Level Encryption for Scalable Video Coding," *Lecture notes in Computer Science, Springer*, no. 5353, pp. 496–505, 2008.

[15] S. Lian, Z. Liu, Z. Ren, and Z. Wang, "Selective Video Encryption Based on Advanced Video Coding," *Lecture notes*

Video Selective Encryption Scheme	Format compliant	Robust to transcoding	Domain	Bitrate increase	Compression independent	Encryption algorithm
Scrambling for privacy protection [9]	Yes	No	Transform	Yes	Yes	Pseudo random sign inversion
NAL unit encryption [14]	No	No	Bitstream	No	No	Stream Cipher
MB header data encryption [16]	No	No	Transform	No	No	Stream Cipher
Reversible encryption of ROI [5]	Yes	Yes	Pixel	Yes	Yes	Pseudo random pixel permutations
I frame encryption [2]	No	No	Bitstream	No	No	AES
Multiple Huffman tables [36]	No	No	Bitstream	Yes	No	Huffman Table permutations
Our scheme	Yes	No	Bitstream*	No	No	AES (CFB mode)

* For SE-CAVLC, bitstream is encrypted, while for SE-CABAC, binstrings are encrypted as explained in Section III-B.

TABLE XII: Comparison of proposed scheme with other recent methods.

in Computer Science, Springer-verlag, no. 3768, pp. 281–290, 2005.

[16] S. Lian, Z. Liu, Z. Ren, and H. Wang, "Commutative Encryption and Watermarking in Video Compression," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 17, no. 6, pp. 774–778, June 2007.

[17] E. Lin, A. Eskicioglu, R. Lagendijk, and E. Delp, "Advances in Digital Video Content Protection," *Proc. of the IEEE*, vol. 93, no. 1, pp. 171–183, Jan. 2005.

[18] T. Lookabaugh and D. Sicker, "Selective Encryption for Consumer Applications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 5, pp. 124–129, May 2004.

[19] R. Lukac and K. Plataniotis, "Bit-Level Based Secret Sharing for Image Encryption," *Pattern Recognition*, vol. 38, no. 5, pp. 767–772, May 2005.

[20] D. Marpe, H. Schwarz, and T. Wiegand, "Context-Based Adaptive Binary Arithmetic Coding in the H.264/AVC Video Compression Standard," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 13, no. 7, pp. 620–636, July 2003.

[21] K. Martin, R. Lukac, and K. Plataniotis, "Efficient Encryption of Wavelet-Based Coded Color Images," *Pattern Recognition*, vol. 38, no. 7, pp. 1111–1115, Jul. 2005.

[22] I. Moccagatta and K. Ratakonda, "A Performance Comparison of CABAC and VCL-Based Entropy Coders for SD and HD Sequences," Joint Video Team (JVT), Doc. JVT-E079r2, Tech. Rep., Oct. 2002.

[23] S. Ou, H. Chung, and W. Sung, "Improving the Compression and Encryption of Images Using FPGA-Based Cryptosystems," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 28, no. 1, pp. 5–22, Jan 2006.

[24] W. Puech and J. Rodrigues, "A New Crypto-Watermarking Method for Medical Images Safe Transfer," in *Proc. 12^{th} European Signal Processing Conference (EUSIPCO'04), Vienna, Austria*, 2004.

[25] J.-M. Rodrigues, W. Puech, and A. Bors, "A Selective Encryption for Heterogenous Color JPEG Images Based on VLC and AES Stream Cipher," in *Proc. European Conference on Colour in Graphics, Imaging and Vision (CGIV'06), Leeds, UK*, Jun. 2006, pp. 34–39.

[26] ——, "Selective Encryption of Human Skin in JPEG Images," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing, Atlanta, USA*, Oct. 2006, pp. 1981–1984.

[27] A. Said, "Measuring the Strength of Partial Encryption Scheme," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Image Processing, Genova, Italy*, vol. 2, 2005, pp. 1126–1129.

[28] B. Schneier, *Applied cryptography*. Wiley, New-York, USA, 1995.

[29] Z. Shahid, M. Chaumont, and W. Puech, "Fast Protection of H.264/AVC by Selective Encryption," in *SinFra 2009, Singaporean-French IPAL Symposium, Fusionopolis*, Singapore, 18-20 Feb. 2009.

[30] ——, "Fast Protection of H.264/AVC by Selective Encryption of CABAC for I & P frames," in *Proc. 17^{th} European Signal Processing Conference (EUSIPCO'09)*, Glasgow, Scotland, Aug. 2009, pp. 2201–2205.

[31] D. R. Stinson, *Cryptography: Theory and Practice, (Discrete Mathematics and Its Applications)*. New York: Chapman & Hall/CRC Press, November 2005.

[32] L. Tang, "Methods for Encrypting and Decrypting MPEG Video Data Efficiently," in *Proc. ACM Multimedia*, vol. 3, New York, NY, USA, 1996, pp. 219–229.

[33] Z. Wang, A. Bovik, H. Sheikh, and E. Simoncelli, "Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, pp. 600–612, 2004.

[34] J. Wen, M. Severa, W. Zeng, M. Luttrell, and W. Jin, "A Format-Compliant Configurable Encryption Framework for Access Control of Video," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 12, no. 6, pp. 545–557, Jun. 2002.

[35] T. Wiegand, G. J. Sullivan, G. Bjontegaard, and A. Luthra, "Overview of the h.264/AVC video coding standard," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 13, no. 7, pp. 560–576, July 2003.

[36] C.-P. Wu and C.-C. Kuo, "Design of Integrated Multimedia Compression and Encryption Systems," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 7, pp. 828–839, 2005.

[37] K. Yabuta, H. Kitazawa, and T. Tanaka, "A New Concept of Security Camera Monitoring with Privacy Protection by Masking Moving Objects," in *Proc. Advances in Multimedia Information Processing*, vol. 1, no. LNCS 3767, 2005, pp. 831–842.

[38] W. Zeng and S. Lei, "Efficient Frequency Domain Selective Scrambling of Digital Video," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 5, pp. 118–129, 2003.

[39] S. Ziauddin, I. U. Haq, and M. A. Khan, "Method and System for Fast Context based Adaptive Binary Arithmetic Coding," Patent US7 221 296, 2007.

SIViP
DOI 10.1007/s11760-011-0225-9

ORIGINAL PAPER

Considering the reconstruction loop for data hiding of intra- and inter-frames of H.264/AVC

Zafar Shahid · Marc Chaumont · William Puech

Received: 7 April 2010 / Revised: 26 February 2011 / Accepted: 8 March 2011

Abstract This paper presents and analyzes a new approach to data hiding that embeds in both the *intra*- and *inter*-frames from the H.264/AVC video codec. Most of the current video data hiding algorithms take into account only the *intra*-frames for message embedding. This may be attributed to the perception that *inter*-frames are highly compressed due to the motion compensation, and any embedding message inside these may adversely affect the compression efficiency significantly. Payload of the *inter*-frames is also thought to be less, compared with the *intra*-frames, because of the lesser residual data. We analyze data hiding in both *intra*- and *inter*-frames over a wide range of QP values and observe that the payload of the *inter* is comparable with that of the *intra*-frames. Message embedding, in only those non-zero quantized transform coefficients (QTCs) which are above a specific threshold, enables us to detect and extract the message on the decoding side. There is no significant effect on the overall bitrate and PSNR of the video bitstream because instead of embedding message in the compressed bitstream, we have embedded it during the encoding process by taking into account the reconstruction loop. For the non-zero QTCs, in the case of *intra*-frames, we benefit from the spatial masking, while in the case of *inter*-frames, we exploit the motion and texture masking. We can notice that the data hiding is done during the compression process and the proposed scheme takes into account the reconstruction loop. The proposed scheme does not target robustness and the obtained payload is higher, with a better trade-off in terms of quality and bitrate, as compared with previous works.

Keywords Video data hiding · Non-zero quantized transform coefficients · H.264/AVC · Reconstruction loop · Intra- and inter-frames

Z. Shahid · M. Chaumont · W. Puech (✉)
LIRMM Laboratory, UMR 5506 CNRS, University of Montpellier II, 161, rue Ada, 34392 Montpellier Cedex 05, France
e-mail: william.puech@lirmm.fr

Z. Shahid
e-mail: zafar.shahid@lirmm.fr

M. Chaumont
e-mail: marc.chaumont@lirmm.fr

1 Introduction

Many multimedia applications have emerged in the last decade thanks to the rapid growth in processing powers and network bandwidths. The relative ease, with which digital data can be copied or modified, necessitates its proper protection and authentication. Digital video watermarking has emerged as an important research field to protect the copyrighted multimedia data. Watermarking, steganography, and more generally data hiding are used in many applications for owner identification, copyright protection, integrity, and metadata embedding. For a video codec, data hiding can be carried out in either spatial or frequency domain. Data embedded in spatial domain can be lost because of the lossy stage of quantization. In the frequency domain, data hiding is done normally in the QTCs. Normally, for large videos with real-time constraints, the data hiding process is made part of the video encoder. In this context, few specific methods have been developed for the MPEG video standards [1,13]. The purpose of this paper is to investigate the payload capacity of *intra*- and *inter*-frames, since a typical video consists of an *intra* followed by a trail of *inters*. Challenge lies in the fact that the bitrate may rise significantly because of the message embedding. To overcome this limitation, the message has been embedded in only those QTCs which have a magnitude beyond a certain threshold.

Published online: 05 April 2011

In H.264/AVC video codec, both the intra- and inter-predictions should be taken into account by embedding the hidden message inside the reconstruction loop. It is crucial, especially while streaming over heterogeneous networks, to keep the bitrate intact. Hence, bitrate escalation, due to the message embedding, must be taken into account by the rate distortion module.

The rest of the paper is organized as follows. In Sect. 2, first, we present the H.264/AVC video codec, with its integer transform (IT) and the quantization process, followed by an overview of the previous watermarking and data hiding techniques related to this video standard. We present, in Sect. 3, the proposed method by elaborating its embedding and extraction steps while taking into account the reconstruction loop. Sect. 4 contains the experimental results and a performance analysis of both *intra*- and *inter*-frames after embedding in more than one least significant bits (LSBs). In the said section, we also present a comparison of message embedding in a given video bitstream inside and outside the reconstruction loop. Finally, in Sect. 5, we present some concluding remarks about the proposed method.

2 H.264/AVC data hiding, challenges and prospects

Since significant changes have been incorporated in the H.264/AVC standard as compared to the previous video coding standards. An overview of H.264/AVC, with an emphasis on transform and quantization, is presented in Sect. 2.1. It is followed, in Sect. 2.2, by an overview of the previous watermarking and data hiding techniques already proposed in the literature for H.264/AVC. We have used capital letters to represent matrices e.g., A, Y, W and small letters along with index to represent the elements of matrices e.g., $x(i, j)$ represents jth element in ith row of matrix X.

2.1 Overview of H.264/AVC

The H.264/AVC standard [12] has some additional features as compared to previous video standards. The *baseline* standard has a 4×4 transform in contrast to 8×8 transform of the previous standards. DCT transform has been replaced by the integer transform (IT), which can be implemented by just additions and shifts in 16-bit arithmetic without any multiplication and hence requires lesser number of computations. The H.264/AVC codec uses a uniform scalar quantization. For *inter*-frame, H.264/AVC supports variable block size motion estimation, quarter pixel accuracy, multiple reference frames, improved skipped, and direct motion inference. For *intra*-frame, it offers additional spatial prediction modes. All these additional features of H.264/AVC are aimed at outperforming the previous video coding standards [36]. The block diagram of H.264/AVC is shown in Fig. 1.

The 4×4 IT has two main advantages. Firstly, it can be exhaustively implemented with simple 16-bit additions and shifts. Secondly, in contrast to floating point arithmetic, which gives different results on different platforms, there is no problem of mismatch on the encoder and decoder side for the integer arithmetic. A macro-block (MB) is divided into 16 blocks of 4×4 pixels which are processed one by one.

In the *intra*-mode, H.264/AVC has three alternatives, namely, *Intra*_4 $\times$ 4, *Intra*_16 $\times$ 16, and *I_PCM*. In *Intra*_16 $\times$ 16 mode, Hadamard transform is additionally employed to encode the DC coefficients. In the *Intra*_16 $\times$ 16 mode, the entire MB is predicted from top and left neighboring pixels and has 4 modes namely *horizontal*, *vertical*, *DC*, and *plane* modes. In the *Intra*_4 $\times$ 4 mode, each 4×4 luma block is predicted from top and left pixels of the reconstructed 4×4 neighbors. This alternative has nine different prediction modes. The *I_PCM* mode is used to limit the maximum size of the encoded block and is directly entropy encoded by skipping the transform and quantization stages. The scanning of these 4×4 blocks, inside MB, is not in a raster scan fashion, as illustrated with the help of numbers in Fig. 2. In the case of *Intra*_16 $\times$ 16 mode, Hadamard transform coefficients are sent first.

Transform and quantization process are embedded with each other to save the processing power and to avoid multiplications. Let a 4×4 block is defined as $X = \{x(i, j)|i, j\epsilon\{0, 3\}\}$ as shown in Fig. 1. $x(i, j)$ is predicted from its neighboring blocks, and we get the residual block:

$$e(i, j) = P(x(i, j), b_1(i, j), b_2(i, j), b_3(i, j), b_4(i, j)), \tag{1}$$

where $b_k(i, j)$ are the pixels from the reconstructed top and left blocks from intra-prediction, and $P(.)$ is the prediction function. For example, for a vertical prediction mode, the prediction will be performed from top block as $P(x, a, b, c, d) = x - a$, where a is the reconstructed block at top. From [25], the forward and inverse IT 4×4 matrices (A, A_{inv}) are as follows:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1/2 \\ 1 & 1/2 & -1 & -1 \\ 1 & -1/2 & -1 & 1 \\ 1 & -2 & 2 & -1 \end{bmatrix} A_{inv} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & -1 & -2 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 & -1/2 \end{bmatrix}. \tag{2}$$

The residual block E is then transformed using the following equation:

$$Y = AEA^T, \tag{3}$$

where $E = \{e(i, j)|i, j\epsilon\{0, 3\}\}$ is in the spatial domain, and $Y = \{y(i, j)|i, j\epsilon\{0, 3\}\}$ is in the frequency domain. Scalar multiplication and quantization are defined as:

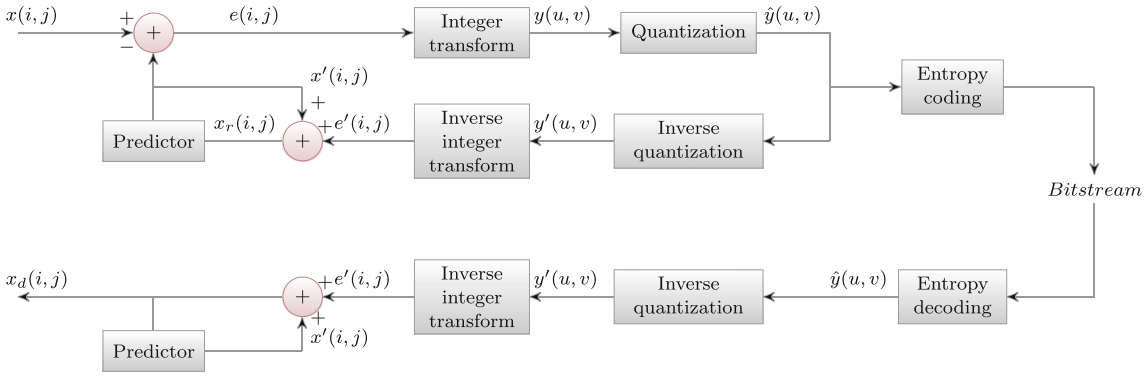


Fig. 1 Detailed block diagram explaining the prediction, the transform and the quantization steps in the H.264/AVC

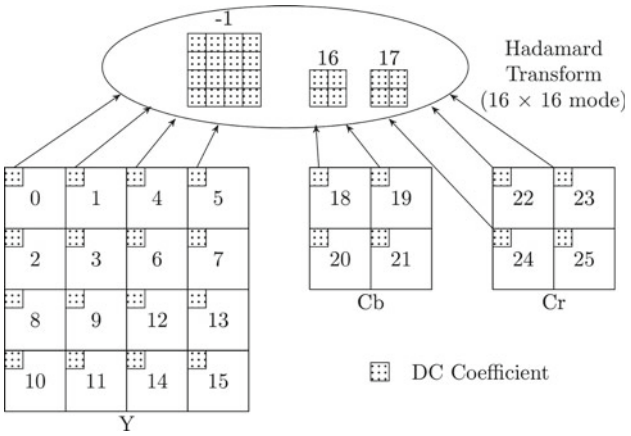


Fig. 2 Order of transmission of the luma and the chroma $Intra\_4\times4$ blocks inside MB

$$\hat{y}(u,v) = sign\{y(u,v)\}[(\mid y(u,v) \mid \times Aq(u,v) + Fq(u,v) \times 2^{15+Eq(u,v)})/2^{(15+Eq(u,v))}], \quad (4)$$

where $\hat{y}(u,v)$ is a QTC, $Aq(u,v)$ is the value from the 4×4 quantization matrix, and $Eq(u,v)$ is the shifting value from the shifting matrix. Both $Aq(u,v)$ and $Eq(u,v)$ are indexed by QP. $Fq(u,v)$ is the rounding off factor from the quantization rounding of factor matrix. This $\hat{y}(u,v)$ is entropy coded and sent to the decoder side.

On the decoder side, inverse quantization is carried out according to the expression:

$$y'(u,v) = \{[(\hat{y}(u,v) \times (Bq(u,v) \times 2^4)) \times 2^{Eq(u,v)}] + 2^3\}/2^4,$$

where $Bq(u,v)$ and $Eq(u,v)$ are the values from the inverse 4×4 quantization matrix and the shifting factor, respectively. $y'(u,v)$ is then inverse transformed to get $E' = (A_{inv}Y'A_{inv}^T + 2^5)/2^6$. The decoded residual signal $e'(i,j)$ is then added to the predicted signal to reconstruct the original signal back.

2.2 Previous work on video watermarking and data hiding

Many digital watermarking and data hiding schemes have been proposed in the literature for both image and video data. Data hiding methods can be classified into three broad categories namely robust [6,20,33,38,39], semi-fragile [14] and fragile [22]. Different watermarking and data hiding techniques offer various combinations of rate, distortion, and robustness. For each application, a particular watermark algorithm can be selected depending on its requirements. For example, applications for copyright protection would require using a robust watermark, while applications for proving integrity would employ a fragile or semi-fragile watermark.

As far as standard video codecs are concerned, five encoding stages can be identified where embedding can take place, namely the pre-compression stage, the video codec structure, the transform stage, the quantization step, and the bitstream as illustrated in Fig. 3. The embedding is primarily motivated by the goal of integrating data hiding and compression to reduce overall real-time video processing complexity.

In the pre-compression stage, marked as stage 1 in Fig. 3, message embedding is performed before the compression process [5,8,9,15,23,26]. Embedding can be performed either in the pixel domain or in some transform domain e.g., DCT, DFT, DWT. Temporal aspect of the video can also be exploited for watermark embedding by taking into account multiple frames at the same time [3,30]. In spatial domain, LSB modification is a very simple method to embed hidden message into the cover object [17]. This method may survive against attacks such as cropping but any addition of noise or lossy compression is likely to defeat the message extraction. In [17], a method has been proposed to use PRNG to decide the pixels for LSB substitution. This may improve the security but still vulnerable to the substitution of the LSB(s) with a constant value. LSB modification may be imperceptible but statistically still discernible. In [2], an upper bound for the LSB payload has been defined so that it remains statistically invisible.

In [4], the transform domain has been employed for LSB embedding. Here, the signature image is first quantized using vector quantization in order to hide larger message. The bit-by-bit message is then directly embedded into LSB of DCT coefficients of the image. Using the embedding replicate of

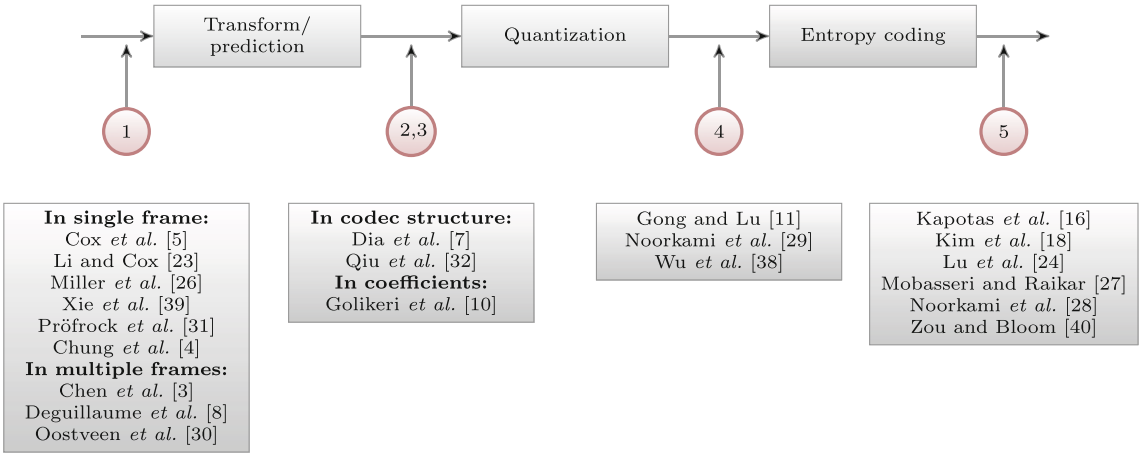


Fig. 3 Classification of the watermarking schemes on the basis of the working domain: *1* pre-compression, *2* video codec structure, *3* transform domain, *4* Quantized transform domain, *5* bitstream

the message provides further robustness against the signal processing attacks.

In [31], Pröfrock et al. have presented a watermarking technique in the spatial domain, which is robust to H.264/AVC video compression. Hidden message is embedded in the perceptually significant parts of the video in an imperceptible manner, by changing the spatial position of the object borders. Borders are defined by new normed center of gravity (NCG). Influence of lossy compression on NCGs is predicted, and watermark is embedded with enough robustness to compensate the lossy compression. A geometric warping process is proposed to quantize the NCG and embeds the watermark payload with a defined robustness. Xie et al. [39] have also proposed robust watermarking based on the on-off keying scheme which uses the DWT transform to embed the watermark.

The video codec structure is the second candidate domain for data hiding. Some researchers have proposed to embed the message in motion vectors [7,32]. In [21], Li et al. propose to perform robust watermarking for H.264/AVC by embedding the hidden message in a new syntax element named reference index. They also modify the current block to improve the robustness of the scheme by a geometric method with the least degradation in the video quality. These video watermarking techniques are vulnerable to re-encoding and conversion to other video codecs.

Hidden message can also be embedded in the transformed coefficients before quantization, as proposed by Golikeri et al. [10]. This kind of approach is illustrated by stage 3 in Fig. 3. They have used the visual models, developed by Watson [35], to choose the coefficients to be watermarked based on their frequency sensitivity, luminance masking, and contrast masking.

Some researchers have proposed algorithms to embed hidden message in the QTCs of H.264/AVC, as shown by stage 4 in Fig. 3. For example, Noorkami and Merserau [29] have presented a technique to embed message in both *intra*- and *inter*-frames in all the non-zero QTCs. They claim that visual quality of *inter*-frames is not compromised even if we embed message in all the non-zero QTCs. Owing to the embedding of the message, only in the non-zero QTCs, their method does not affect the compression efficiency of the run-length coding. The performance of context-based adaptive variable length coding (CAVLC), however, gets affected, and as a result, a controlled increase in the bitrate is eventually observed, since there are a lot of QTCs whose magnitude is 1 and CAVLC encodes *trailing ones* (T1's) separately. In [11], Gong and Lu embedded watermarks in the H.264/AVC video by modifying the quantized DC coefficients in the *luma* residual blocks. To increase the robustness while maintaining the perceptual quality of the video, a texture-masking-based perceptual model is used to adaptively choose the watermark strength for each block. To eliminate the effects of drift, a drift compensation algorithm is proposed which adds the drift compensation signal before embedding the watermark bit.

To avoid processing intensive decoding followed by re-encoding along with watermarking, some methods have suggested embedding the message into the compressed bitstream [18,24,27,28,40]. Kim et al. [18] suggest to hide the message in the sign bit of the trailing ones in CAVLC of H.264/AVC. Bitrate of the watermarked video remains exactly the same with the resultant PSNR greater than 43 dB. In [27], authentication of the H.264/AVC is performed by the direct watermarking of CAVLC codes. Zou and Bloom [40] have proposed to perform direct replacement of CAVLC. Kapotas et al. [16] have presented a data hiding method in H.264 streams for fragile watermarking. It takes advantage of the different block sizes used by the H.264 encoder during the inter-prediction stage, in order to hide the desired data.

The message can be extracted directly from the encoded stream without any need of the original host video. This approach can be mainly used for content-based authentication. Such algorithms face two major limitations. First, payload of such algorithms is very low—of the order of a few bytes per second [13]. Second, there is a continuous drift that degrades the visual quality significantly.

3 The proposed algorithm

In this paper, we have used LSB modification approach in the DCT domain and the hidden message is not embedded in all the non-zero QTCs. Rather, we have embedded the message in only those QTCs which are above a certain threshold. The threshold value depends on the number of message bits being embedded. This offers two advantages. First, it makes it possible to extract the message on the decoder side. Second, it does not affect the compression efficiency of the entropy coding engine significantly. We have not targeted robustness here. Rather, we have demonstrated the high payload capability of the proposed scheme which is very high as compared with other schemes. Hence, the proposed scheme can be used in application where robustness is not required, e.g., broadcasting and hiding of metadata.

In H.264/AVC, intra-prediction is performed in the spatial domain. Hence, even for the *intra*-mode, the transform is performed on prediction residuals. In contrast to previous methods, which embed hidden message in the DC coefficients, we have embedded the message in all those non-zeros QTCs having magnitude above a certain threshold, with the exception of the DC coefficients. Our algorithm is not robust but has a very high payload. For $Intra\_4\times4$ mode, we have not embedded message in the DC QTCs, while for $Intra\_16\times16$ mode, we have not modified the Hadamard transform coefficients either, since DC QTCs contain most of the energy and embedding message in these may affect the video quality and the bitrate significantly. We have embedded the message in the LSBs of QTCs keeping in view the following points:

- QTC, which we want to use for data hiding, should be non-zero. If a QTC with zero magnitude becomes non-zero in the course of embedding, it will highly affect the compression efficiency of run-length encoding.
- QTC to be used for data hiding should be preferably greater than 1 because there are many QTC, with magnitude '1' and in CAVLC, they are also encoded as T1's. Thus, changing of number of T1's will affect the compression efficiency of CAVLC.
- Finally, the message is embedded in such a fashion that it can be completely extracted on the decoder side.

3.1 The watermark embedding

The embedding process is performed on QTCs of Eq. 4 as:

$$\hat{y}_w(u,v) = f(\hat{y}(u,v), M, [K]), \tag{5}$$

where $f()$ is the data hiding process, M is the hidden message and K is an optional key.

3.1.1 Analysis of embedding after the encoding loop

Message embedding can be done in QTC before the entropy coding, as shown in Fig. 4. It is analogous to embedding the message in a compressed bitstream. This includes two data hiding approaches. The first approach embeds the message in the VLC domain, and the bitstream needs only be entropy decoded to use this approach e.g., as proposed by Lu et al. [24]. Another approach embeds the message in DCT domain, and for this approach, bitstream has to be entropy decoded and inverse quantized. An example of this approach is differential energy watermarking scheme proposed by Langelaar et al. [19].

Embedding the message after the reconstruction loop creates two problems. Firstly, we start reconstruction on the encoder side with QTC $\hat{y}(u,v)$, while on the decoder side we start decoding with watermarked QTC $\hat{y}_w(u,v)$. This may result in a mismatch on the decoder side, which may keep on increasing because of the prediction process. Because of this mismatch, the difference in PSNR may be considerable, even for *intra*-frames, let alone the *inter*-frames. Secondly, the rate distortion (RD) bit allocation algorithm works in the quantization module, and any change in bitrate/quality tradeoff, because of the watermarking of QTCs, is not taken into account.

3.1.2 Embedding within the encoding loop

To solve both the aforementioned problems, message embedding should be performed inside the reconstruction loop as shown in Fig. 5. In this case, we have the same watermarked QTC $\hat{y}_w(u,v)$ on both encoder and decoder side for prediction, and the RD bit allocation algorithm is working on $\hat{y}_w(u,v)$ for both *intra*- and *inter*-frames. In the next section, we present the data embedding while taking into account the reconstruction loop.

3.2 Hidden message—aware rate distortion

Many encoding parameters, like the prediction modes, the quantization parameter (QP) value and the motion vectors are adjusted in the encoding process based on the video content and the required quality. Since a video data are very diverse in nature, both spatially and temporally, these parameters vary from scene to scene. The bit allocation algorithms are used to

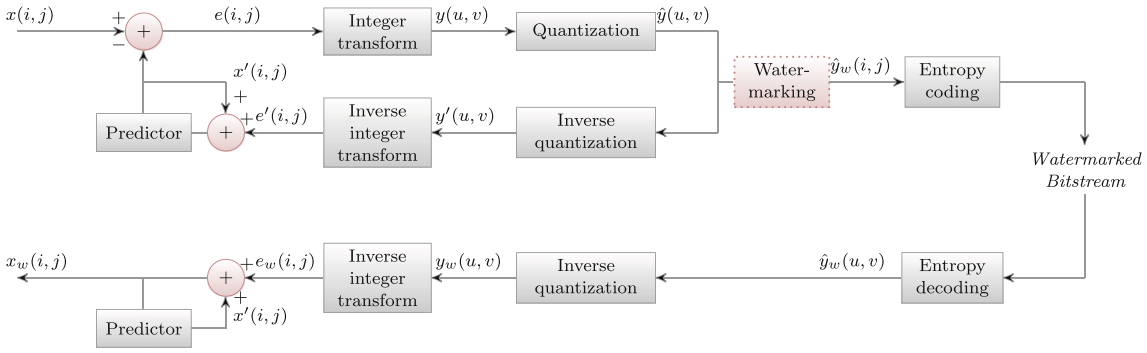


Fig. 4 Block diagram of the H.264/AVC along with the data hiding module outside the reconstruction loop

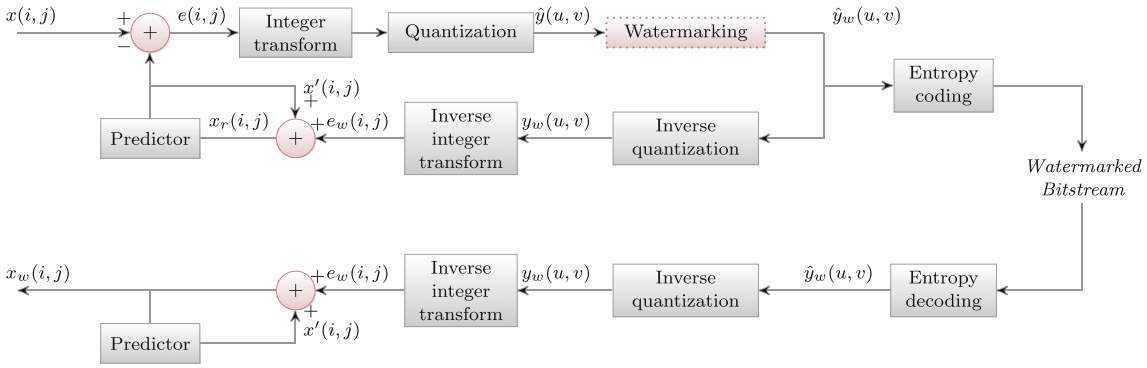


Fig. 5 The proposed data hiding method inside the reconstruction loop

find the best-suited values of these parameters to achieve the trade-off between bitrate and quality. For RD, the Lagrangian bit allocation is widely used owing to its simplicity and effectiveness. The simplified Lagrangian cost function is $J = D + \lambda R$, where J represents the cost of encoding for a given MB, D is the distortion, λ is the Lagrangian parameter, which depends on the QP value, and R is the number of bits to encode a MB. In H.264/AVC, several modes are supported to encode a MB as *intra* or *inter*, as shown in Fig. 6. To obtain the cost J, for a specific prediction mode P, we first predict the MB for that mode to get the residual E. We then apply IT on the residual E, followed by quantization with some QP value, to get the QTCs which are then entropy coded. The number of bits, R, consists of MB header bits and data bits. The residual is, then, reconstructed by performing inverse quantization and inverse IT to give the reconstructed residual E'. Generally, the distortion, D, may be the sum of absolute differences (SAD), the sum of squared differences (SSD), or the sum of absolute transformed differences (SATD) between E and E'. Thus, we end up with the cost J for encoding this MB in the prediction mode, P. In a similar fashion, we find the cost J for all other prediction modes. The mode which yields the minimum cost is selected as the RD optimized mode for this MB.

Embedding a message in a video bitstream affects quality of the picture. It also affects the bitrate because this frame is used for the prediction after the reconstruction. Hence, RD optimization should take into account the embedding of the hidden message in QTCs in order to select the best prediction mode. In this case, simplified Lagrangian cost function is $J_w = D_w + \lambda R_w$, for finding the cost for a specific prediction mode. QTCs are first watermarked to get QTC_w, which are then entropy coded to find the number of bits R_w to encode MB and reconstructed to measure the distortion D_w. By moving the message-embedding process to the inside of the reconstruction loop constitutes the best suitable mode for the watermarked blocks.

3.3 The embedding strategy

For message embedding in the video bitstream, we developed a strategy to embed message in the 1 LSB, 2 LSBs, or '1 & 2' LSBs together. For the n LSB mode, the hidden message is embedded in a QTC in n LSBs if its magnitude is greater than $2^n - 1$. Owing to this threshold, detection and extraction of the message are performed on the decoder side. Algorithm 1 describes the embedding of 1 watermark bit (WMBit) in the LSB of $|QTC|$. Here, the threshold value is 1. If $|QTC|$ is less than or equal to 1, it will remain unchanged. For $|QTC| \geq 2$, output will either be the same or will get modified by ± 1, depending on whether the WMBit is '0' or '1'.

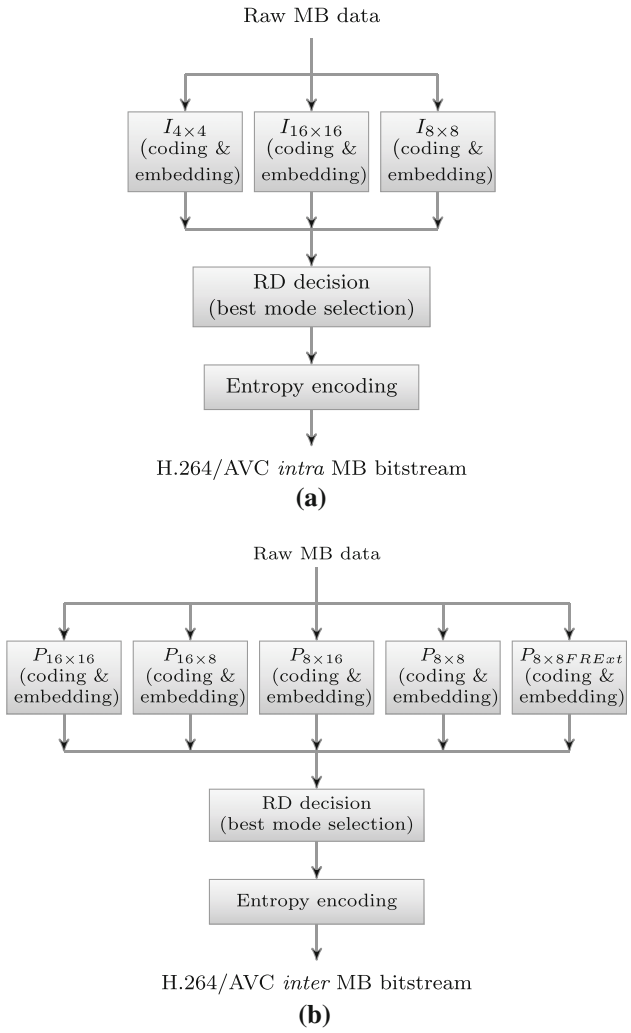


Fig. 6 Different prediction modes in the H.264/AVC for: **a** the *intra*-MBs **b** the *inter*-MBs

In this case, we have a 50% probability that the coefficient will remain unchanged even after being watermarked.

Algorithm 1 The embedding strategy in the 1 LSB.

1: **if** $|QTC| > 1$ **then**
2: $|QTC_w| \leftarrow |QTC| - |QTC| \; mod \; 2 + WMBit$
3: **end if**
4: **end**

Similarly, Algorithm 2 outlines the embedding of 2 bits in 2 LSBs of a QTC. By keeping the threshold more than '3', we can extract the hidden message on the decoder side successfully. QTC will remain unchanged if $|QTC| < 4$, otherwise it will get modified depending on whether WMBits are '00', '01', '10', or '11'. In this case, we have only 0.25 probability that the coefficient will remain unchanged even after being watermarked.

Algorithm 2 The embedding strategy in the 2 LSBs.

1: **if** $|QTC| > 3$ **then**
2: $|QTC_w| \leftarrow |QTC| - |QTC| \; mod \; 4 + WMBits$
3: **end if**
4: **end**

We can also perform a '1 & 2' LSBs embedding together. In this case, we embed message in 0, '1 & 2' LSBs depending on value of $|QTC|$, as shown in Algorithm 3. So we embed 2 WMBits if $|QTC|$ is high enough or 1 WMBit if $|QTC| > 1$.

Algorithm 3 The embedding strategy in the '1 & 2' LSBs.

1: **if** $|QTC| > 3$ **then**
2: $|QTCw| \leftarrow |QTC| - |QTC| \; mod \; 4 + WMBits$
3: **else**
4: **if** $|QTC| > 1$ **then**
5: $|QTCw| \leftarrow |QTC| - |QTC| \; mod \; 2 + WMBit$
6: **end if**
7: **end if**
8: **end**

3.4 The hidden message extraction

During the extraction process, we can extract the message from the watermarked QTCs as follows:

$$M = g(\hat{y}_w(u, v), [K]), \tag{6}$$

where $g()$ is the data hiding detection/extraction process, $\hat{y}_w(u, v)$ is the watermarked QTC, and K an optional key required for extraction. When using '1 & 2' LSBs watermark extraction, $g()$ can be given as shown in Algorithm 4.

Algorithm 4 The extraction strategy using the '1 & 2' LSBs.

1: **if** $|QTC| > 3$ **then**
2: $WMBits \leftarrow |QTC_w| \; mod \; 4$
3: **else**
4: **if** $|QTC| > 1$ **then**
5: $WMBit \leftarrow |QTC_w| \; mod \; 2$
6: **end if**
7: **end if**
8: **end**

4 Experimental results

For experimental simulations, we have used the reference implementation of H.264[1] and applied our method on 150 frames of each of the nine selected standard video sequences

[1] We have used reference software JSVM 10.2 in AVC mode.

in the CIF format. Each of them represents different combinations of motion (fast/slow and pan/zoom/rotation), color (bright/dull), contrast (high/low), and objects (vehicle, buildings, people). The video sequences 'bus', 'city', and 'foreman' contain camera motion, while 'football' and 'soccer' contain camera panning and zooming along with object motion and texture in the background. The video sequences 'harbor' and 'ice' contain high luminance images with smooth motion. 'Mobile' sequence contains a still complex background and motion in the foreground. In case of the *intra*- and *inter*-sequences, *intra-period* has been set to 15 for all the simulations. In these simulations, the hidden message, being embedded, is of noise type and has been generated using a pseudorandom number generator.

Peak signal to noise ratio (PSNR) is a widely used objective video quality metric. However, it does not perfectly correlate with a perceived visual quality due to the non-linear behavior of the human visual system (HVS). Structural similarity index (SSIM) [34] takes into account the structural distortion measurement, since the HVS is highly specialized in extracting the structural information from the viewing field. SSIM has a better correlation to the subjective impression. SSIM ranges from −1 to 1. SSIM is 1 when both the images are the same. To present the visual comparison of original and watermarked video sequences, both PSNR and SSIM values are presented.

The detailed results for both *intra*- and *inter*-frames are explained in Sects. 4.1 and 4.2, respectively. They also contain the comparison of our scheme with: (1) the outside loop embedding and (2) the message embedding in LSBs of all the QTCs. A comparative analysis of our proposed method with other recent techniques has been presented in Sect. 4.3.

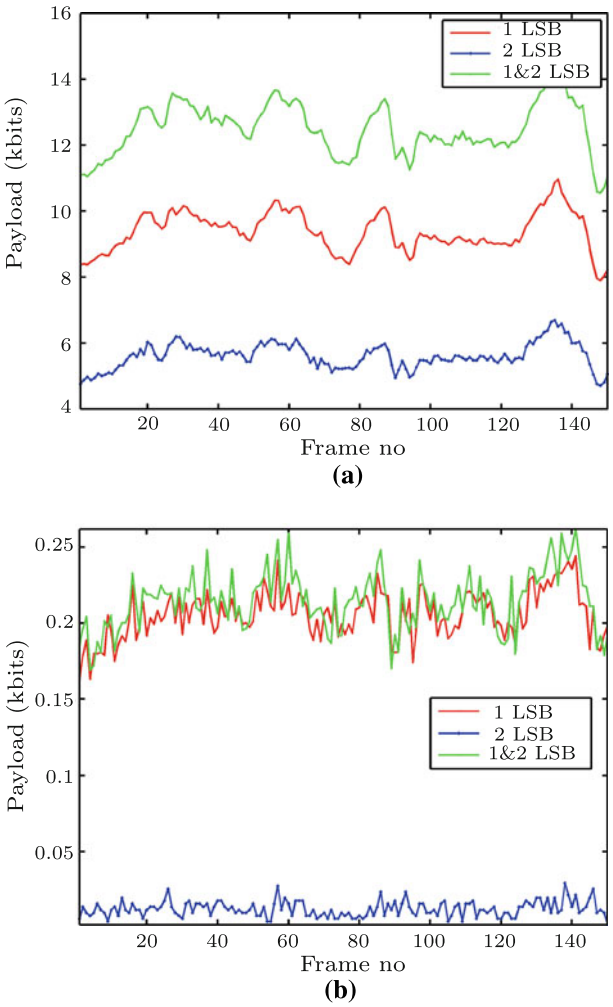


Fig. 7 Analysis of the payload capability for the hidden message embedding of the *intra*-frames in *foreman* for the QP value of: **a** 18 **b** 36

4.1 Analysis of *intra*-frames

In *intra*-frames, non-zero QTCs are present in those parts which contain texture and edges. These are the spatial masking areas, and the hidden message is naturally embedded in these areas of *intra*-frames. To analyze the effect of message embedding on payload, bitrate and PSNR, the video sequences have been encoded at QP values of 18 and 36.

Figure 7a, b illustrate the payload for each *intra*-frame in the *foreman* for the QP values of 18 and 36 for all of the three data hiding modes, namely the 1 LSB, the 2 LSBs and the 1 & 2 LSBs. At a QP value of 18, we have a large number of QTCs which can be watermarked and hence payload is high for all the modes. At a QP value of 36, we have an adequate number of QTCs for the 1 LSB mode and hence enough number of WMBits to embed. But the payload for the 2 LSBs mode is, however, lower since fewer QTCs have magnitudes above the threshold for this mode. Figure 8a, b show the effect of message embedding on the bitrate. Owing to the fact that we have neither modified the QTCs with magnitude '0' and T1's, the bitrate has increased only slightly. This increase in bitrate is due to two reasons. One, watermarked reconstructed QTCs are used for the prediction of the future MBs, which results in more residuals and hence increase in the bitrate. Two, the absolute value of QTCs increases gradually in the inverse scan order, and the entropy coding is designed for this distribution. After the WMBit embedding, this order may get disturbed and depends on the WMBits being embedded. With the embedding of the WMBits, the QTCs are modified and hence there is a decrease in the PSNR as shown in Fig. 9a, b. At the QP value of 18, higher number of coefficients are watermarked and hence a greater reduction in the PSNR is observed. While at the QP value of '36', we have lesser QTCs to be watermarked, hence less degradation in the quality is observed. At the QP value of 36, few QTCs have magnitude above threshold, for the 2 LSBs embedding, and very few WMBits can be embedded in this mode. But we have adequate number of QTCs with magnitude greater than 1,

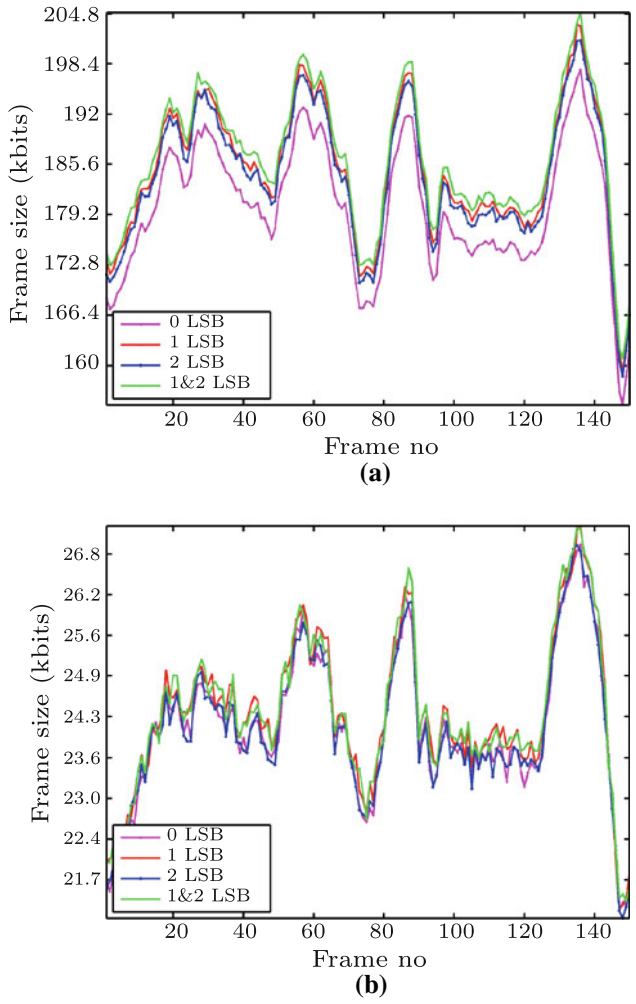


Fig. 8 Analysis of the bitrate variation for the hidden message embedding of the *intra*-frames in *foreman* for the QP values of: **a** 18 **b** 36

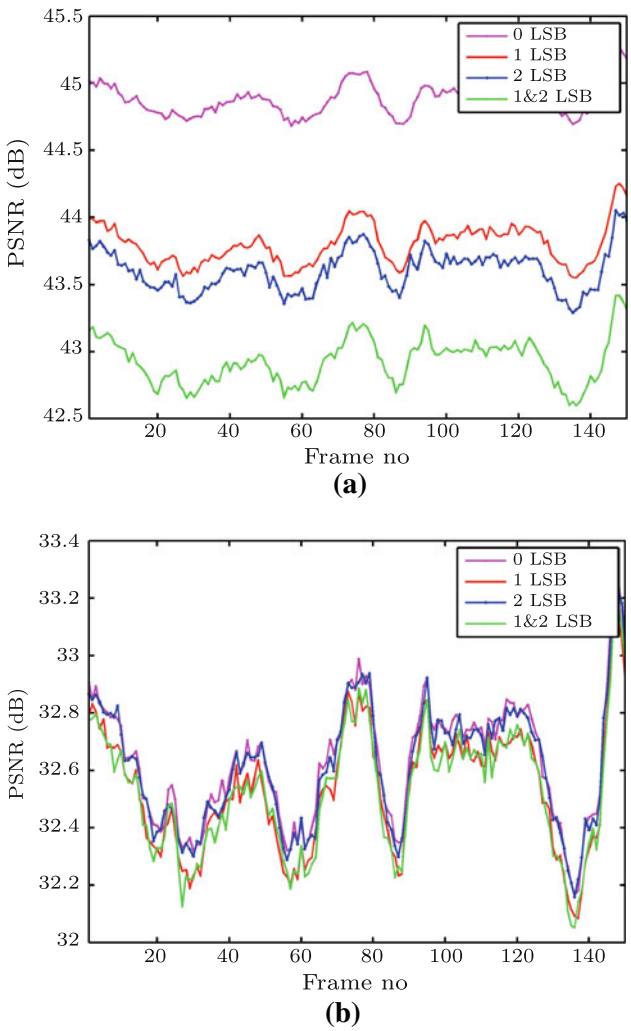


Fig. 9 Analysis of the change in PSNR for the hidden message embedding of the *intra*-frames *foreman* for the QP values of: **a** 18 **b** 36

resulting in enough number of WMBits embedded for this mode. Table 1 contains the payload, bitrate, and PSNR analysis for the *foreman* and the *football* sequences at the QP values of 18 and 36. For the 1 & 2 LSBs mode, with the QP value of 18, the increase in the bitrate is 3.34 and 5.68%, the payload equals to 312.10 and 396.80 kbps, and the decrease in the PSNR is 1.95 and 2.03 dB for the *foreman* and the *football*, respectively.

Table 1 Results for the *intra* for the *foreman* and the *football* sequences

QP	Hiding mode (LSBs)	*Foreman*			*Football*		
		Payload (kbps)	Bitrate (kbps)	PSNR (dB)	Payload (kbps)	Bitrate (kbps)	PSNR (dB)
	0	0	4504	44.88	0	4730	45.32
18	1	234.38	4622	43.80	293.88	4928	44.13
	2	140.13	4600	43.61	188.23	4920	43.99
	1&2	312.10	4654	42.93	396.80	4999	43.29
	0	0.00	603.2	32.63	0.00	750.1	32.52
36	1	5.15	609.6	32.54	8.26	759.9	32.40
	2	0.30	603.2	32.61	0.84	752.5	32.50
	1&2	5.35	609.6	32.53	8.73	760.4	32.39

Table 2 Comparison of the bitrate, the payload and the PSNR at the QP 18 for the data hiding embedding inside and outside the reconstruction loop for the *intra* sequence with the 1&2 LSBs mode

Seq.	Orig		LSB-inside Loop (Proposed method)			LSB-outside Loop		
	PSNR (dB) (SSIM)	Bitrate (mbps)	PSNR (dB) (SSIM)	Bitrate (mbps)	Payload (kbps)	PSNR (dB) (SSIM)	Bitrate (mbps)	Payload (kbps)
Bus	44.52 (0.9932)	6.90	40.43 (0.9897)	7.32	856.00	24.35 (0.9232)	6.93	891.93
City	44.52 (0.9921)	6.07	41.66 (0.9881)	6.33	611.36	24.91 (0.9306)	6.10	640.82
Crew	45.22 (0.9883)	4.34	43.80 (0.9864)	4.48	290.64	27.72 (0.9412)	4.37	305.74
Football	45.32 (0.9901)	4.62	43.29 (0.9877)	4.88	396.80	27.54 (0.9464)	4.64	435.15
Foreman	44.88 (0.9872)	4.40	42.93 (0.9851)	4.55	312.10	24.54 (0.9432)	4.43	315.49
Harbour	44.30 (0.9967)	7.20	40.38 (0.9935)	7.70	895.74	22.22 (0.9386)	7.22	937.46
Ice	47.29 (0.9898)	2.25	45.08 (0.9886)	2.34	197.28	29.34 (0.9588)	2.26	194.80
Mobile	44.59 (0.9958)	10.38	41.07 (0.9930)	10.63	895.74	22.85 (0.9369)	10.38	1640.64
Soccer	45.19 (0.9889)	4.42	43.29 (0.9860)	4.68	373.39	26.81 (0.9434)	4.45	410.98
Avg.	45.09 (0.9913)	5.62	42.44 (0.9887)	5.88	536.56	25.59 (0.9403)	5.64	641.45

Table 2 shows the SSIM/PSNR, bitrate, and payload trade-off of our scheme for the *intra*-sequences of all the benchmark video sequences at the QP value of 18. It also contains a comparison with the embedding after the reconstruction loop. For our algorithm, decrease in the SSIM/PSNR is 0.0026/2.65 dB, whereas it is 0.0510/19.5 dB for embedding after the encoding loop, on the average (Fig 10).

For a subjective quality comparison, Fig. 11 contains frame # 0 of the *foreman* and the *football* sequences. Artifacts can be observed in the *intra*-frame because of the message embedding after the encoding loop. Ghost artifacts are encircled red in these video frames. For flat regions, a change in luminance can also be observed in the video frames. These artifacts are because of the spatial prediction from the top and the left blocks. If the encoding loop is not taken into account, during the embedding process, a drift or 'increasing error' will be created between the encoder and the decoder and different values will be used for the prediction on the encoder and the decoder side. Hence, distortion will increase gradually from the top-left corner to the bottom-right corner of the image.

To show the efficiency of the QTC selection criteria of our scheme, we have compared it with a naive data hiding in LSBs of all the QTCs, while taking into account the reconstruction loop. Figure 12 shows the frame # 0 of the *foreman* and the *football*. In contrast to our algorithm, one can note the noise artifacts in the frames in which message embedding is performed in all the QTCs using the naive 1 LSB and 2 LSBs

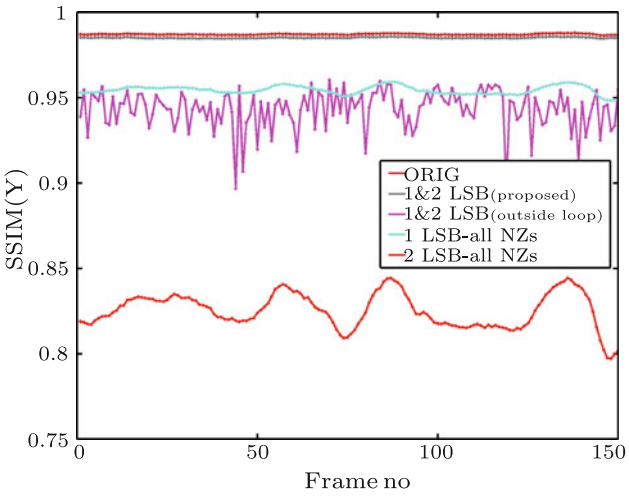


Fig. 10 SSIM of proposed scheme with: *1* the embedding outside the reconstruction loop, *2* the naive embedding in all the QTCs for the *intra*-frames for the *foreman* sequence at the QP value 18

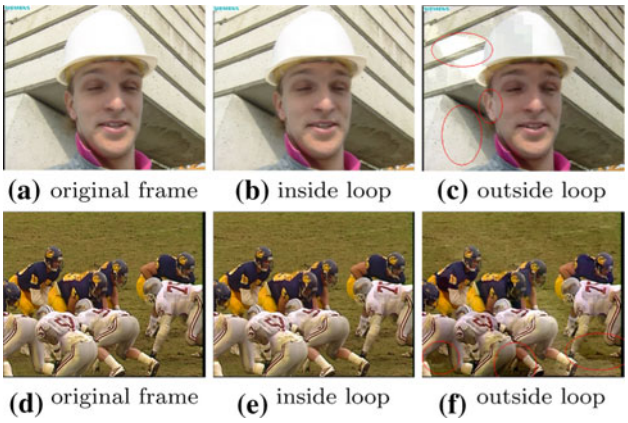


Fig. 11 Artifacts created in *intra* due to outside loop data hiding embedding with the 1&2 LSBs mode with the QP 18 for the frame # 0 of *foreman* and *football*

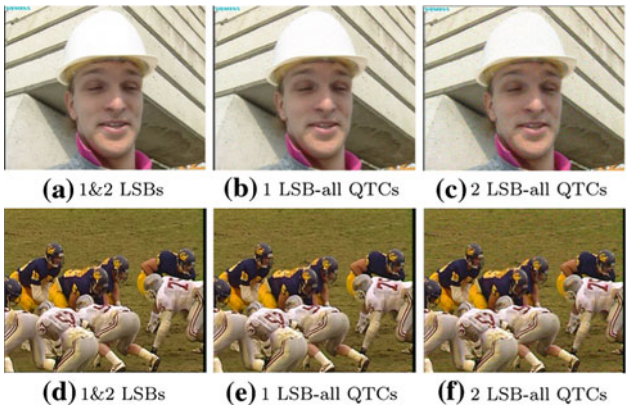


Fig. 12 Visual comparison of the 1&2 LSBs mode with the 1 LSB and the 2 LSBs embedding in all the QTCs for the *intra*-frame # 0 for the QP value of 18

embeddings. This noise is due to the introduction of new frequencies as a result of the conversion of the zero QTCs to non-zeros. Table 3 shows the SSIM/PSNR, bitrate, and payload analysis for the naive 1 LSB and 2 LSBs embeddings. We have compared it with the 1&2 LSBs mode of our algorithm, which has the highest trade-offs in terms of the SSIM/PSNR and the bitrate. When the *skip-mode* is off, the payload for the CIF resolution at 25 fps will be 3712.5 and 7425 kbps for naive 1 LSB and 2 LSBs embeddings, respectively. One can note that the decrease in the SSIM/PSNR for the 1&2

Table 3 Comparison of the bitrate and the PSNR of our scheme with the data hiding embedding in all the QTCs for the *intra* sequence at the QP 18

Seq.	Orig		1&2 LSBs mode (Our method)			1 LSB-all NZs		2 LSBs-all NZs	
	PSNR (dB) (SSIM)	Bitrate (mbps)	PSNR (dB) (SSIM)	Bitrate (mbps)	Payload (kbps)	PSNR (dB) (SSIM)	Bitrate (mbps)	PSNR (dB)	Bitrate (mbps)
Bus	44.52 (0.9932)	6.90	40.43 (0.9897)	7.32	856.00	38.87 (0.9760)	9.55	32.71 (0.9087)	12.67
City	44.52 (0.9921)	6.07	41.66 (0.9881)	6.33	611.36	38.99 (0.9723)	8.74	32.74 (0.8935)	11.92
Crew	45.22 (0.9883)	4.34	43.8 (0.9864)	4.48	290.64	39.53 (0.9564)	7.61	32.73 (0.8257)	11.34
Football	45.32 (0.9901)	4.62	43.29 (0.9877)	4.88	396.80	39.44 (0.9615)	8.01	32.69 (0.8432)	11.61
Foreman	44.88 (0.9872)	4.40	42.93 (0.9852)	4.55	312.10	39.39 (0.9545)	7.59	32.76 (0.8253)	11.41
Harbour	44.3 (0.9967)	7.20	40.38 (0.9935)	7.70	895.74	38.68 (0.9880)	9.81	32.72 (0.9531)	12.94
Ice	47.29 (0.9898)	2.25	45.08 (0.9886)	2.34	197.28	39.78 (0.9312)	6.71	32.53 (0.7258)	11.00
Mobile	44.59 (0.9958)	10.38	41.07 (0.9930)	10.63	895.74	38.63 (0.9820)	12.20	32.47 (0.9302)	14.31
Soccer	45.19 (0.9890)	4.42	43.29 (0.9860)	4.68	373.39	39.3 (0.9564)	7.85	32.70 (0.8305)	11.41
Avg.	45.09 (0.9913)	5.62	42.44 (0.9887)	5.88	536.56	39.18 (0.9642)	8.68	32.67 (0.8596)	12.07

The reconstruction loop has been taken into account for the data hiding embedding in all the QTCs

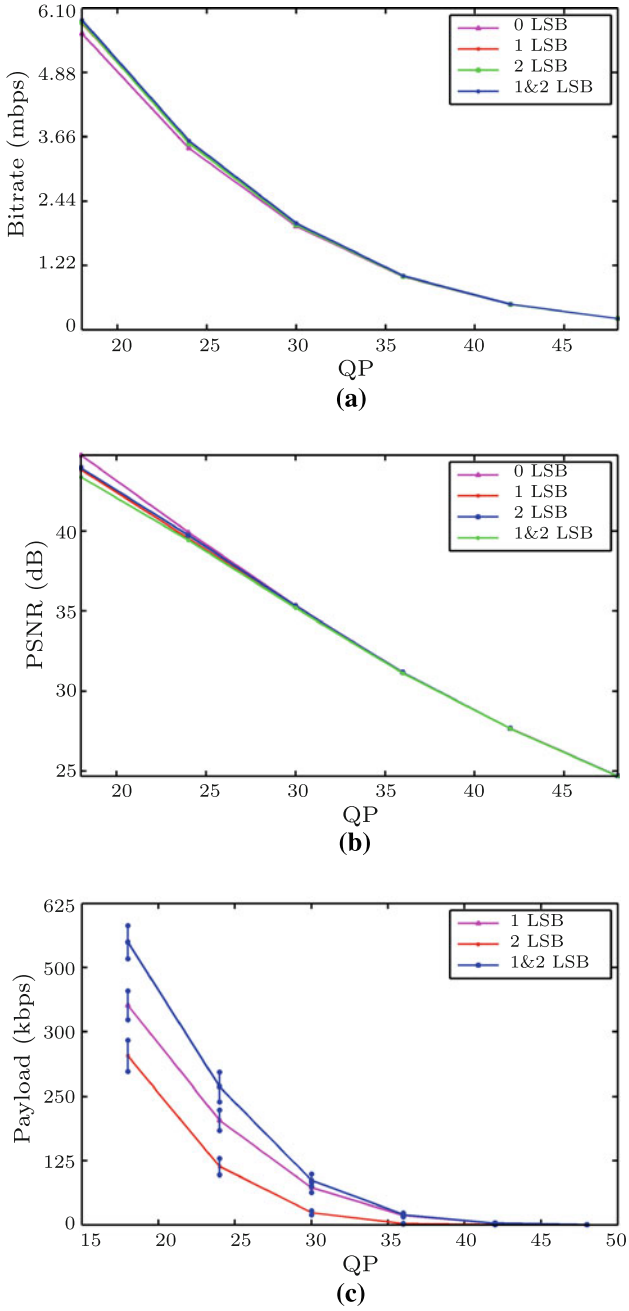


Fig. 13 Analysis of the data hiding for the *intra*-frames for all the nine benchmark video sequences over the whole range of the QP values for: **a** the bitrate, **b** the PSNR, **c** the payload. The standard deviation of the payload for all the QP values is also shown

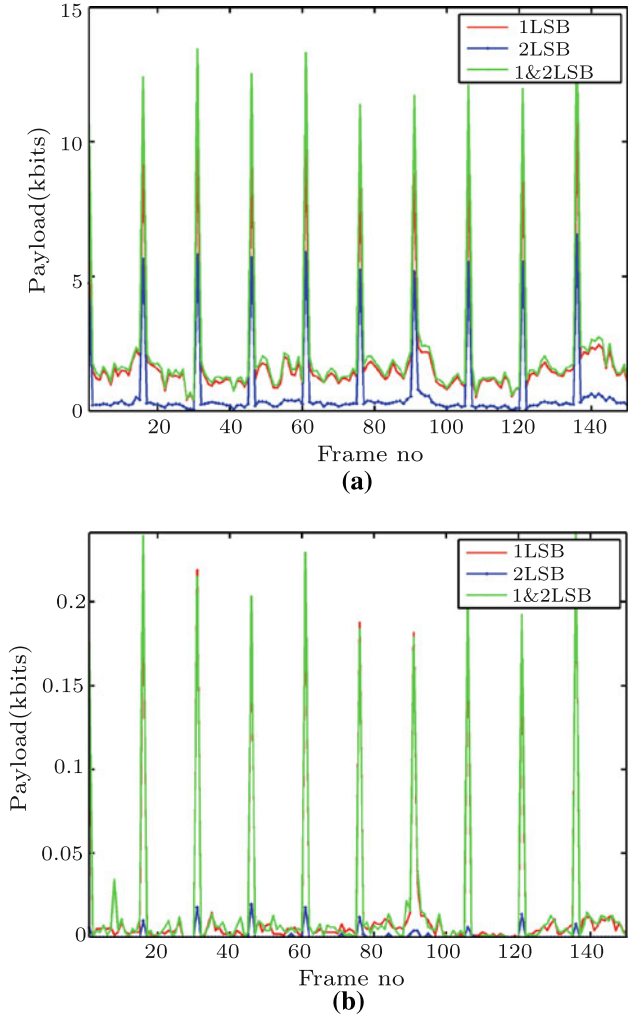


Fig. 14 Analysis of the payload capability for the message embedding of the *intra- & inter*-frames for *foreman* for the QP values: **a** 18 **b** 36

LSBs mode of our algorithm is 0.0026/2.65 dB, in contrast to the naive versions where it is 0.0271/5.91 dB for the naive 1 LSB embedding and 0.1307/12.42 dB for the naive 2 LSBs embedding for all the benchmark sequences. Increase in the bitrate is 4.6% for our algorithm, in comparison with 54.44 and 114.76% for the naive 1 LSB and the 2 LSBs modifications, respectively. Hence, the trade-offs for the SSIM/PSNR and the bitrate are so high that the naive LSB embeddings cannot be used in practical applications. A framewise SSIM comparison of our scheme has been presented in Fig. 10 with the outside loop embedding and embedding in all the QTCs. One can note that visual quality of the proposed scheme is consistently preserved for the *intra*-sequence.

4.1.1 Analysis over a whole range of QP values for the intra-frames

The results of our data hiding algorithm over a whole range of QP values—18, 24, 30, 36, 42, and 48—have been demonstrated in Fig. 13 for all the nine video sequences. Figure 13a illustrates the change in the bitrate over the whole range for 1 LSB, 2 LSBs, and 1 & 2 LSBs. Figure 13b shows the PSNR while Fig. 13c illustrates the payload capacity at various QP values. The PSNR graph is linear, and from the QP value of 36 onward, there is no considerable degradation in the quality. It is important to note that unlike the PSNR, bitrate and

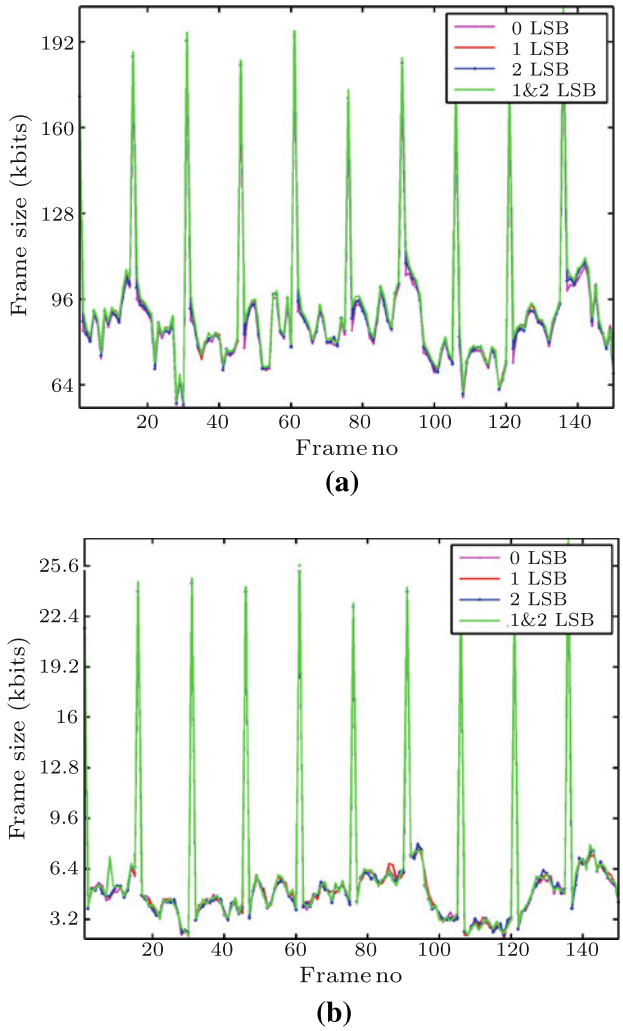


Fig. 15 Analysis of the change in bitrate for the message embedding of the *intra- & inter*-frames for *foreman* for the QP values: **a** 18 **b** 36

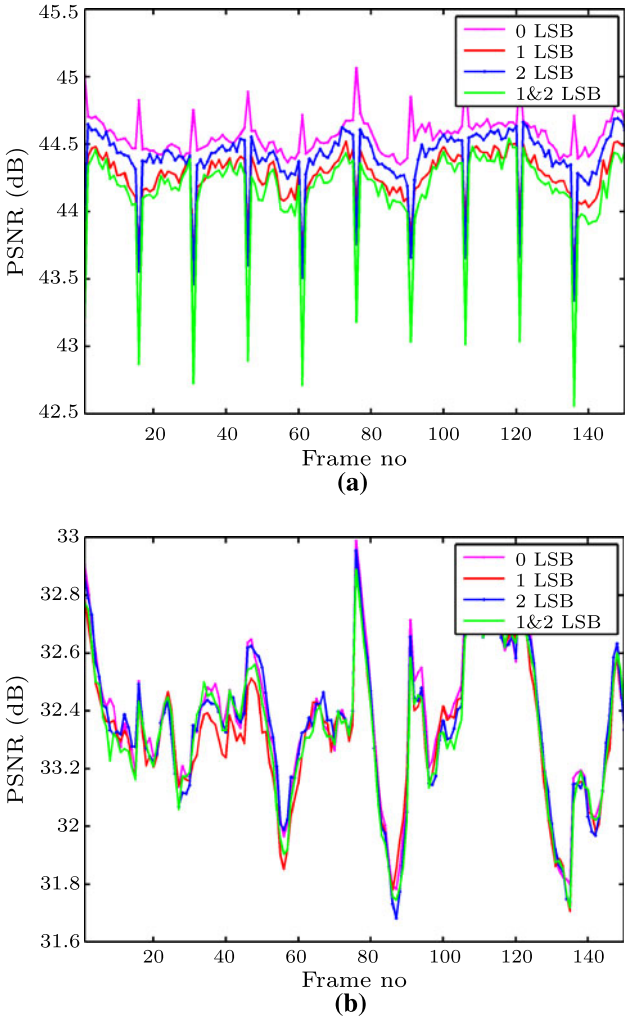


Fig. 16 Analysis of the change in PSNR for the message embedding of the *intra- & inter*-frames for *foreman* for the QP values: **a** 18, **b** 36

payload graphs are non-linear. The reason is that the quantization value is an exponential function of the QP value and PSNR is a logarithmic measure.

4.2 Analysis of the *inter*-frames

The *inter*-frames contain both *intra*- and *inter*-MBs. The prediction is performed from the preceding video frames in the case of *inter*-MBs, and from the top and the left blocks in the case of *intra*-MBs. The non-zero QTCs are found in the parts of frames containing motion and texture. The message is naturally embedded in these temporal masking areas of the *inter*-frames. In a video sequence, after every *intra*-frame, first few *inter*-frames are better predicted and contain lesser residual errors. Hence, any message embedding affects more the quality and the compression ratio. But as we go away from *intra*-frames, accumulated errors appear and message embedding does not affect much the quality of the *inter*-frames. On the average, after 5 *inter*-frames followed by *intra*-frame, the ratio of the payload to the size of the *inter*-frames is comparable with that of the *intra*-frames, especially at the lower QP values.

Figures 14, 15, and 16 have been used for the payload, the bitrate, and the PSNR analysis, respectively at the QP values of 18 and 36 for the *foreman* sequence. One can note that the payload is adequate at the QP value of 18, and it decreases sharply. In fact, at the QP value of 36, we have very few QTCs with magnitudes above the threshold for the 1 LSB mode, let alone the 2 LSBs mode. Tables 4, 5 show the payload, the bitrate, and the PSNR analysis for the *foreman* and the *football* sequences at the QP value of 18 and 36 for the *intra*-& *inter*-frames. For the *foreman* sequence with the 1 & 2 LSBs mode at the QP value of 18, the increase in the bitrate is 2.81 and 2.89%, the payload is 38.25 and 56.45 kbps, and the PSNR decrease is 0.22 and 0.20 dB for the *inter* and the *intra*& *inter*, respectively. In contrast, for the *football*

Table 4 Data hiding results with the *intra* and the *inter* frames of the *foreman* and the *football* video sequences for the QP value of 18

QP	Hiding mode (LSBs)	*Foreman*			*Football*		
		Payload (kbps)	Bitrate (kbps)	PSNR (dB)	Payload (kbps)	Bitrate (kbps)	PSNR (dB)
	0	0	4.40	44.88	0	4.67	45.29
I	1	233.80	4.51	43.80	295.62	4.86	44.10
	2	139.65	4.49	43.61	196.25	4.85	43.90
	1&2	311.30	4.55	42.92	402.42	4.93	43.20
	0	0.00	2.05	44.54	0	3.47	44.76
p	1	34.45	2.09	44.30	172.91	3.58	43.65
	2	7.00	2.08	44.45	82.01	3.64	43.68
	1&2	38.25	2.11	44.23	207.43	3.70	43.05
I	0	0	2.21	44.56	0	3.55	44.79
+	1	47.73	2.25	44.27	181.09	3.67	43.69
P	2	15.83	2.24	44.39	89.62	3.72	43.70
	1&2	56.45	2.27	44.14	220.43	3.70	43.06

Table 5 Data hiding results with the *intra* and the *inter* frames of the *foreman* and the *football* video sequences for the QP value of 36

QP	Hiding mode (LSBs)	*foreman*			*football*		
		Payload (kbps)	Bitrate (kbps)	PSNR (dB)	Payload (kbps)	Bitrate (kbps)	PSNR (dB)
	0	0	601.6	32.61	0	781.3	32.42
I	1	4.96	608.5	32.52	9.08	791.2	32.30
	2	0.28	601.4	32.59	0.97	782.4	32.38
	1&2	5.19	609.4	32.52	9.70	792.6	32.28
	0	0	117.8	32.35	0	441.9	31.62
P	1	0.11	117.9	32.31	2.91	448.0	31.55
	2	0.003	117.1	32.34	0.12	443.0	31.62
	1&2	0.13	118.7	32.32	2.93	448.2	31.55
I	0	0	149.9	32.37	0	464.5	31.67
+	1	0.44	150.6	32.33	3.32	470.9	31.60
P	2	0.02	149.4	32.35	0.18	465.6	31.67
	1&2	0.47	151.3	32.33	3.38	471.0	31.60

sequence, the increase in the bitrate is 6.73 and 6.62%, the payload is 207.43 and 220.43 kbps, and the PSNR decrease is 1.71 and 1.73 dB for the *inter* and the *intra*& *inter*, respectively. The *football* sequence has greater payload capacity than the *foreman*, especially in the P frames. It is because of the texture and the high amount of motion in the *football* sequence.

The overall analysis of all the benchmark video sequences is given in Table 6. It also contains a comparison with the message embedding after the encoding loop. Decrease in the SSIM/PSNR for our scheme is 0.0106/1.38 dB, while it is 0.0687/19.2 dB for the embedding after the encoding loop. For a subjective quality comparison with the outside loop watermark embedding, Fig. 18 contains frame # 89 of the *foreman* and the *football* sequences and shows the artifacts in the *inter*-frame because of the watermark embedding after the encoding loop. One can note that the *inter*-frame is heavily distorted in this case. The results show that any data hiding after the encoding loop distorts the video fame in the case of *inter*. Hence, message embedding after the encoding loop is not a workable solution for state of the art video codecs because of the spatial and the temporal prediction.

For comparison, with the naive message embedding in the LSBs of all the QTCs, Fig. 19 shows frame # 28 of the *foreman* and the *football*. Just like the *intra*-frames, one can only note the noise artifacts in those frames in which message embedding is performed in all the QTCs using the 1 LSB and the 2 LSBs embeddings, owing to the introduc-

Table 6 Comparison of the bitrate, the payload and the PSNR for the message embedding inside and outside the reconstruction loop for the *intra* & *inter* sequence with the 1&2 LSBs mode

Seq.	Orig		LSB-inside Loop (Proposed method)			LSB-outside Loop		
	PSNR (dB) (SSIM)	Bitrate (mbps)	PSNR (dB) (SSIM)	Bitrate (mbps)	Payload (kbps)	PSNR (dB) (SSIM)	Bitrate (mbps)	Payload (kbps)
Bus	44.27 (0.9923)	4.00	42.21 (0.9916)	4.22	278.38	24.12 (0.9101)	4.34	356.86
City	44.36 (0.9916)	2.57	43.80 (0.9912)	2.66	87.14	25.16 (0.9304)	2.76	115.12
Crew	44.80 (0.9859)	3.12	44.00 (0.9854)	3.24	111.90	28.48 (0.9020)	3.50	164.94
Football	44.79 (0.9876)	3.56	43.06 (0.9867)	3.79	220.43	26.94 (0.8898)	3.99	320.76
Foreman	44.56 (0.9856)	2.22	44.14 (0.9856)	2.28	56.46	25.04 (0.9323)	2.53	92.18
Harbour	44.18 (0.9963)	4.45	42.05 (0.9950)	4.72	330.15	22.46 (0.9331)	4.70	380.64
Ice	46.93 (0.9884)	1.06	46.27 (0.9886)	1.11	46.03	29.14 (0.9475)	1.29	89.51
Mobile	44.18 (0.9951)	5.70	41.00 (0.9937)	5.96	526.03	22.97 (0.9285)	5.98	581.07
Soccer	44.82 (0.9873)	2.35	43.99 (0.9870)	2.46	100.12	25.86 (0.9178)	2.64	153.12
Avg.	44.77 (0.9900)	3.23	43.39 (0.9894)	3.38	195.18	25.57 (0.9213)	3.52	250.47

The QP value is 18 and the *Intra period* is 15.

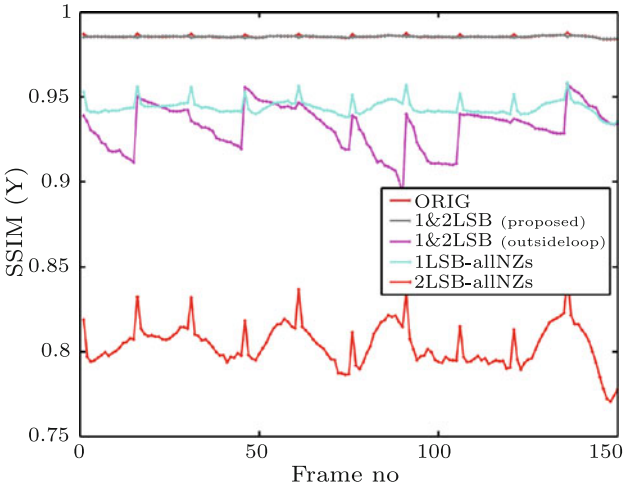


Fig. 17 SSIM of the proposed scheme with: *1* The embedding outside reconstruction loop, *2* The naive embedding in all the QTCs for the *intra- & inter*-frames for the *foreman* sequence at the QP value 18

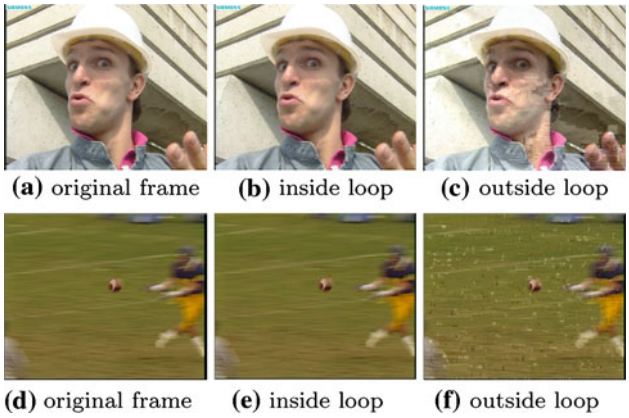


Fig. 18 Artifacts created in the *inter* due to the outside loop message embedding with the 1&2 LSBs mode with the QP 18 for the frame # 89 of *foreman* and *football*

tion of new frequencies. Table 7 shows the SSIM/PSNR, the bitrate, and the payload analysis at the QP value of 18. The payload, for the naive 1 LSB and 2 LSBs embedding, will be similar to the *intra*-frames, *i.e.* 3712.5 and 7425 kbps, respectively. Average decrease in the SSIM/PSNR for our algorithm is 0.0106/1.38 dB, while it is 0.0345/6.62 dB for the naive 1 LSB embedding and 0.1498/12.93 dB for the naive 2 LSBs

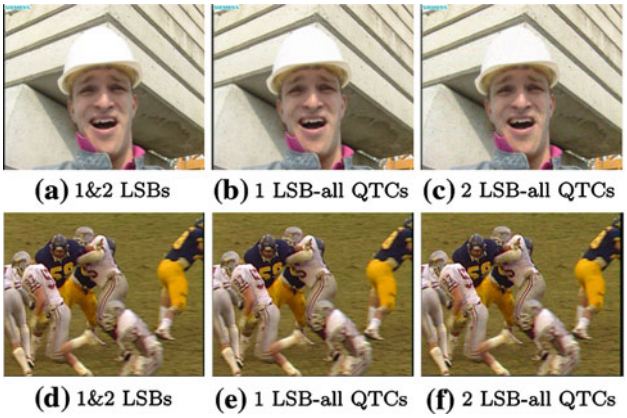


Fig. 19 Visual comparison of the 1&2 LSBs mode with the naive 1 LSB and 2 LSBs embeddings in all the QTCs. for the *inter*-frame # 28 for the QP value of 18

embedding. Increase in the bitrate is 4.6% for our algorithm, while it is 101.23 and 216.09% for the naive 1 LSB and 2 LSB modifications. Such high trade-offs for SSIM/PSNR and bitrate make it inappropriate for practical applications. Framewise SSIM comparison of our scheme in Fig. 17 for the *foreman* sequence at the QP value 18 verifies that the visual quality of the proposed scheme is consistently preserved for the *intra* & *intra*-sequence.

4.2.1 Analysis over whole range of QP values for inter-frames

The overall performance analysis of all the nine video sequences with an *intra-period* of '15' is shown in the form of graphs in Fig. 20. Figure 20a illustrates the effect of data hiding on the bitrate, while Fig. 20b shows the change in the PSNR for different message embedding modes. Figure 20c illustrates the payload capability of our algorithm along with the standard deviation of the payload at different QP values. Among the 1 LSB and 2 LSBs embedding modes, 1 LSB performs better, having higher payloads and minimum increase in the bitrate. In the 2 LSBs mode, 2 bits are embedded in the same coefficient and thus the magnitude of compromise is higher. The 2 LSBs should be used in combination with the 1 LSB mode (1 & 2 LSBs embedding mode) when higher payload is required. One can note that just like the bitrate, the payload varies with the QP both in the case of *intra* and *inter*.

4.3 Comparative evaluation

For the sake of comparative evaluation of our scheme, we have compared it with seven other recent techniques

Table 7 Comparison of the bitrate and the PSNR of our scheme with the message embedding in all the QTCs for the *intra* & *inter* sequence with the QP 18

Seq.	Orig		1&2 LSBs mode (Proposed method)			1 LSB-all NZs		2 LSBs-all NZs	
	PSNR (dB) (SSIM)	Bitrate (mbps)	PSNR (dB) (SSIM)	Bitrate (mbps)	Payload (kbps)	PSNR (dB) (SSIM)	Bitrate (mbps)	PSNR (dB) (SSIM)	Bitrate (mbps)
Bus	44.27 (0.9923)	4.00	42.21 (0.9916)	4.22	278.38	37.86 (0.9703)	6.87	31.79 (0.8948)	10.36
City	44.36 (0.9916)	2.57	43.80 (0.9912)	2.66	87.14	38.28 (0.9677)	5.82	32.07 (0.8807)	9.82
Crew	44.80 (0.9859)	3.12	44.00 (0.9854)	3.24	111.90	38.33 (0.9431)	6.36	31.97 (0.8009)	10.16
Football	44.79 (0.9876)	3.56	43.06 (0.9867)	3.79	220.43	38.16 (0.9499)	6.87	31.77 (0.8187)	10.54
Foreman	44.56 (0.9856)	2.22	44.14 (0.9856)	2.28	56.46	38.45 (0.9436)	5.76	32.11 (0.8040)	9.85
Harbour	44.18 (0.9963)	4.45	42.05 (0.9951)	4.72	330.15	37.65 (0.9845)	7.02	31.79 (0.9442)	10.26
Ice	46.93 (0.9884)	1.06	46.27 (0.9886)	1.11	46.03	38.70 (0.9145)	6.08	31.51 (0.6863)	10.31
Mobile	44.18 (0.9951)	5.70	41.00 (0.9937)	5.96	526.03	37.50 (0.9777)	7.74	31.60 (0.9218)	10.57
Soccer	44.82 (0.9873)	2.35	43.99 (0.9870)	2.46	100.12	38.41 (0.9481)	5.98	31.95 (0.8100)	10.04
Avg.	44.77 (0.9900)	3.23	43.39 (0.9894)	3.38	195.18	38.15 (0.9555)	6.50	31.84 (0.8402)	10.21

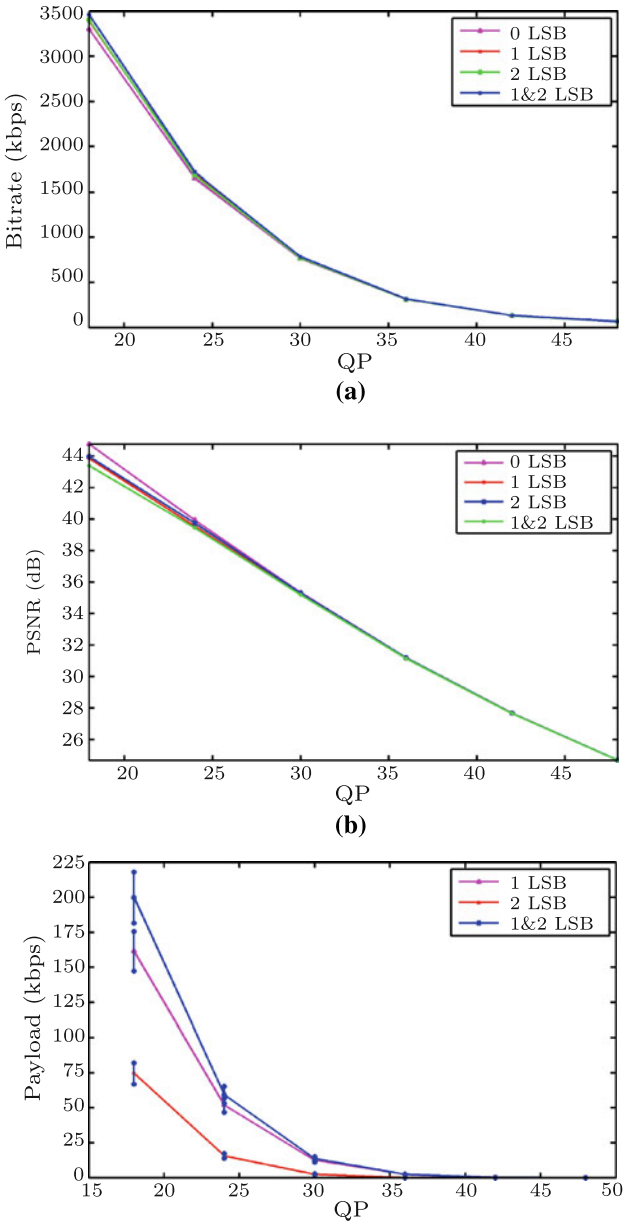


Fig. 20 Analysis of the data hiding for the *intra- & inter*-frames for all the nine benchmark video sequences over the whole range of the QP values for: **a** the bitrate, **b** the PSNR, **c** the payload. The standard deviation of the payload for all the the QP values is also shown

which are as follows: the particle swarm optimization-based dither modulation scheme [37], the bitstream replacement of CAVLC bitstream [40], the hybrid watermarking scheme [32], the data hiding in the H.264/AVC compressed video [18], the reference index-based watermarking of the H.264/AVC [21], the spread transform scalar Costa scheme [10], and the robust watermarking for P frames [29]. These techniques are different from each other in several aspects e.g., the working domain (pixel, transform, or bitstream) and the embedding algorithm (dither modulation, spread transform, or quantization based). The comparison has been made based on several important characteristics of the data hiding systems and summarized in Table 8.

The embedding domain is of vital importance for a watermarking system. The watermarking algorithms of Zou and Bloom [40], and Kim et al. work in the bitstream domain (outside the reconstruction loop). These algorithms can work on compressed video, without decoding it. These schemes, however, have lower payload and can lead to a considerable decrease in the PSNR because of the drift error. For [18], the PSNR drops to 43 dB even for the I frame, let alone the P frames. Moreover, a flickering effect is visible along the temporal dimension of the video. The video quality decreases with the increase in the encoded spatial resolution because of this drift error. The bitrate change is also another important aspect of these data hiding algorithms. For the algorithms that work in bitstream domain [18], there is no change in bitrate. For our algorithm, the increase in the bitrate is 4.6% with a decrease in the PSNR of 1.38 dB for the *intra- & inter*-sequence.

Different watermarking algorithms have different embedding space. Some of them work on the video data (pixels or coefficients), while other embed hidden message in the video header. Our scheme works inside the reconstruction loop, while utilizing the largest possible embedding space with minimal trade-off in terms of the bitrate and the SSIM/PSNR. It is in contrast to other schemes which either use the video header fields [21,40] or some part of the video data e.g., the luma [10,37], or the I frames only [18,32,37]; hence, not fully utilizing the embedding capacity. In [29], the watermark is embedded in all the non-zero QTCs, (even having the magnitude of 1). Let the *watermark cost* be the increase in the bitrate (in bits) per watermark bit. In the case of the *intra*, the *watermark cost* is 0.06 and 0.15 at the QP values of 18 and 36, respectively. These results are far better than 1.54, the result presented in [29]. In the case of *intra* and *inter*, we get the *watermark costs* of 0.15 and 0.42 at the QP values of 18 and 36, respectively, which is far better than 1.50, the result of the work presented in [29]. At the higher QP values, we do not have lot of non-zero QTCs which can be watermarked but the ratio between the payload and the bitrate is still conserved.

To summarize, our proposed scheme presents a good payload capability with a minimal trade-off for the PSNR and the bitrate. This trade-off is possible because of the selection of the AC QTCs with magnitudes above a certain threshold and embedding inside the reconstruction loop.

5 Conclusion

In this paper, we have designed and analyzed a new video data hiding scheme with a high payload for the H.264/AVC.

Table 8 Comparison of the proposed scheme with other recent watermarking techniques for the H.264/AVC video codec.

Wm Scheme	Working domain	Insertion technique	Payload	Bitrate increase	PSNR (dB)	Embedding space
Wu et al. [37]	Transform	Dither modulation	1 bit/4x4 block	Yes	Yes	DCT coeff. of *luma* (I frames only)
Zou and Bloom [40]	Bitstream	Replacement		Yes	Yes	Intra prediction (mode change)
Qiu et al. [32]	Transform/MB header	Replacement	1 bit/MB	Yes	Yes	AC coeffs (I frames) MVs (P frames)
Kim et al. [18]	Bitstream	Replacement	1 bit/MB	No	(up to 43 dB)	Signs-T1's (only I frames)
Li et al. [21]	Transform	Spread spectrum		3.22%	–0.75 dB	reference index (P frames) except 1st P frame)
Golikeri et al. [10]	Transform (before quantization)	Spread transform scalar Costa scheme	1 bit/MB	Yes	Yes	DC coeff. of *luma* (I and P frames, HVS based)
Noorkami et al. [29]	Transform	Spread spectrum	1 bit/MB	Yes	Yes	All non-zero QTCs (I and P frames)
Our scheme	Transform	Quantization based	195.18 kbps (20.19 bits/MB)	4.6%	–1.38 dB	AC coefficients (above threshold)

Our scheme embeds the RD optimized hidden message in the QTCs for both the *intra*- and *inter*-frames. Having a regard for the reconstruction loop, the proposed scheme offers consistent payload capability to the H.264/AVC standard at different bitrates without adversely affecting the overall bitrate and the SSIM/PSNR of the video bitstream. The watermark is embedded in those regions of the *intra*-frames, which contain edges and texture, and for the *inter*-frames, message embedding is naturally done in the temporal masking regions, which contains motion and texture. The experimental results have demonstrated that the *inter*-frames can be equally good for the message embedding owing to its motion and texture masking.

Acknowledgments This work is in part supported by the project VOODDO (2008–2011) of the french ANR and the region of Languedoc Roussillon, France.

References

1. Alattar, A.M., Lin, E.T., Celik, M.U.: Digital watermarking of low bit-rate advanced simple profile MPEG-4 compressed video. IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol. **13**, 787–800 (2003)
2. Chandramouli, R., Memon, N.: Analysis of LSB based image steganography Techniques. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, vol. 3, pp. 1019–1022. (2001)
3. Chen, C., Ni, J., Huang, J.: Temporal statistic based video watermarking scheme robust against geometric attacks and frame dropping. In: IWDW '09: Proceedings of the 8th International Workshop on Digital Watermarking, pp. 81–95. Springer, Heidelberg (2009)
4. Chung, Y., Wang, P., Chen, X., Bae, C., Otoom, A., Tran, T.: A performance comparison of high capacity digital watermarking systems. In: KES, vol. 1, pp. 1193–1198. (2005)
5. Cox, I., Kilian, J., Leighton, F., Shamoon, T.: Secure spread spectrum watermarking for multimedia. IEEE Trans. Image Process. **6**, 1673–1687 (1997)
6. Cox, R.D., Henri, C.J., Bret, P.M.: CD-based image archival and management on a hybrid radiology intranet. Can. J. Med. Radiat. Technol. **28**(3), (1997)
7. Dai, Y., Zhang, L., Yang, Y.: A new method of MPEG video watermarking technology. In: Proceedings of International Conference on Communication Technology, vol. 2, pp. 1845–1847. (2003)
8. Deguillaume, F., Csurka, G., O'Ruanaidh, J., Pun, T.: Robust 3D DFT video watermarking. SPIE **3657**, 113–124 (1999)
9. Ejima, M., Miyazaki, A.: A wavelet-based watermarking for digital images and video. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, vol. 3, pp. 678–681. (2000)
10. Golikeri, A., Nasiopoulos, P., Wang, Z.: Robust digital video watermarking scheme for H.264 advanced video coding standard. J. Electron. Imaging **16**(4), 043008 (2007)
11. Gong, X., Lu, H.: Towards fast and robust watermarking scheme for H.264 video. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Multimedia, pp. 649–653. (2008)
12. H264. Draft ITU-T Recommendation and Final Draft International Standard of Joint Video Specification (ITU-T Rec. H.264 ISO/IEC 14496-10 AVC). Technical report, Joint Video Team (JVT), Doc. JVT-G050, March (2003)
13. Hartung, F., Girod, B.: Watermarking of uncompressed and compressed video. Signal Process **66**, 283–333 (1998)
14. He, D., Sun, Q., Tian, Q.: A semi-fragile object based video authentication system. In: Proceedings of International Symposium on Circuits and Systems, **3**, pp. 814–817 (2003)
15. Kang, X., Huang, J., Shi, Y., Lin, Y.: A DWT-DFT composite watermarking scheme robust to both affine transform and JPEG compression. IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol. **13**(8), 776–786 (2003)
16. Kapotas, S., Varsaki, E., Skodras, A.: Data hiding in H.264 encoded video sequences. In: Proceedings of IEEE International Workshop on Multimedia Signal Processing, (2007)
17. Katzenbeisser, S., Petitcolas, F. (eds.): Information Hiding Techniques for Steganography and Digital Watermarking. Artech House Inc., Norwood (2000)

18. Kim, S., Kim, S., Hong, Y., Won, C.: Data hiding on H.264/AVC compressed video. In: Image Analysis and Recognition Lecture Notes in Computer Science, chapter 62, pp. 698–707 (2007)
19. Langelaar, G., Lagendijk, R.: Differential energy watermarking of DCT encoded images and video. IEEE Trans. Image Process. **10**, 148–158 (2001)
20. Lee, P., Chen, M.: Robust error concealment algorithm for video decoder. IEEE Trans. Consumer Electron. **45**(3), 851–859 (1999)
21. Li, J., Liu, H., Huang, J., Zhang, Y.: A robust watermarking scheme for H.264. In: Digital Watermarking volume 5450 of Lecture Notes in Computer Science, pp. 1–15. Springer, Heidelberg (2009)
22. Li, K., Zhang X.: Reliable adaptive watermarking scheme integrated with JPEG2000. In: Proceedings of 3rd International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA 2003). Rome, Italy (2003)
23. Li, Q., Cox, I.: Using perceptual models to improve fidelity and provide resistance to volumetric scaling for quantization index modulation watermarking. IEEE Trans. Inf. Forensics Security **2**(2), 127–139 (2007)
24. Lu, C., Chen, J., Fan, K.: Real-time frame-dependent video watermarking in VLC domain. Signal Process. Image Commun. **20**(7), 624–642 (2005)
25. Malvar, H., Hallapuro, A., Karczewicz, M., Kerofsky, L.: Low-complexity transform and quantization in H.264/AVC. IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol. **13**(7), 598–603 (2003)
26. Miller, M., Doerr, G., Cox, I.: Applying informed coding and embedding to design a robust high capacity watermark. IEEE Trans. Image Process. **13**(2), 792–807 (2004)
27. Mobasseri, B., Raikar, Y.: Authentication of H.264 streams by direct watermarking of CAVLC blocks. In: Proceedings of Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents IX volume 6505 SPIE, San Jose, CA (2007)
28. Noorkami, M., Mersereau, R.: Compressed-domain video watermarking for h.264. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, pp. 890–893. Genoa, Italy (2005)
29. Noorkami, M., Mersereau, R.: Digital video watermarking in P-frames with controlled video bit-rate increase. IEEE Trans. Inf. Forensics Security **3**(3), 441–455 (2008)
30. Oostveen, J., Kalker, T., Haitsma J.: Visual hashing of digital video: applications and techniques. In: Proceedings of SPIE, Applications of Digital Image Processing XXIV. vol. 4472, pp. 121–131. San Diego CA, USA (2009)
31. Pröfrock, D., Schlauweg, M., Müller, E.: A new uncompressed-domain video watermarking approach robust to H.264/AVC compression. In: Proceedings of IASTED International Conference on Signal Processing, Pattern Recognition, and Applications, pp. 99–104. Anaheim, CA, USA (2006)
32. Qiu, G., Marziliano, P., Ho, A.T.S., He, D., Sun, Q.: A hybrid watermarking scheme for h.264/avc video. Pattern Recognition, International Conference on **4**, pp. 865–869 (2004)
33. Ramkumar, M., Akansu, A.: Robust protocols for proving ownership of images. In: Proceedings of International Conference on Information Technology: Coding and Computing, pp. 22–27 (2000)
34. Wang, Q., Zhao, D., Ma, S., Lu, Y., Huang, Q., Ga, W.: Context-based 2D-VLC for video coding. In: Proceedings of IEEE International Conference on Multimedia and Expo, pp. 89–92 (2004)
35. Watson, A.: DCT quantization matrices visually optimized for individual images. In: Proceedings of SPIE Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, vol. 1913, pp. 202–216 (1993)
36. Wiegand, T., Sullivan, G., Bjntegaard, G., Luthra, A.: Overview of the H.264/AVC video coding standard. IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol. **13**, 560–576 (2003)
37. Wu, C., Zheng, Y., Ip, W., Chan, C., Yung, K., Lu, Z.: A fexible H.264/AVC compressed video watermarking scheme using particle swarm optimization based Dither modulation. AEU Int. J. Electron. Commun. (2010)
38. Wu, G., Wang, Y., Hsu, W.: Robust watermark embedding/detection algorithm for H.264 video. J. Electron. Imaging **14**(1), (2005)
39. Xie, F., Furon, T., Fontaine, C.: On-Off keying modulation and Tardos fingerprinting. In: Proceedings of ACM Workshop on Multimedia and security, pp. 101–106. New York, NY, USA (2008)
40. Zou, D., Bloom, J.: H.264/AVC stream replacement technique for video watermarking. In: Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp. 1749 –1752 (2008)

A Novel Embedding Technique for Dirty Paper Trellis Codes Watermarking

Marc Chaumont[a,b]

[a] University of Nîmes, Place Gabriel Péri, 30000 Nîmes, France.
[b] Laboratory LIRMM, UMR CNRS 5506, University of Montpellier II,
161, rue Ada, 34392 Montpellier cedex 05, France.

ABSTRACT

Dirty Paper Trellis Codes (DPTC) watermarking, published in 2004, is a very efficient high rate scheme. Nevertheless, it has two strong drawbacks: its security weakness and its CPU computation complexity. We propose an embedding space at least as secure and a faster embedding. The embedding space is built on the projections of some wavelet coefficients onto secret carriers. It keeps a good security level and has also good psycho-visual properties. The embedding is based on a dichotomous rotation in the Cox, Miller and Boom Plane. It gives better performances than previous fast embedding approaches. Four different attacks are performed and revealed good robustness and rapidity performances.

Keywords: Watermarking, Dirty Paper Trellis Codes, High rate, Informed-coding, Informed-embedding, Robustness, Secure embedding space, Rotation-based embedding, RB-DPTC.

1. INTRODUCTION

The generation of watermarking schemes named informed schemes or side information schemes appeared around 1998 when Costa's work has been rediscovered.[1] The two principal techniques' categories for multi-bits watermarking are the lattice codes also named quantized based watermarking schemes (DC-QIM,[2] SCS..[3]) and the Dirty Paper Trellis Codes (DPTC).[4]

The original DPTC algorithm is known for its good robustness and its high embedding payload but own two strong weaknesses: the *informed embedding* step uses a Monte Carlo approach which is very CPU time consuming and the scheme owns security weakness facing collusion attack.[5] In that paper, we thus propose a DPTC at least as secure and less complex.

Lin *et al.*[6] propose to replace the Monte Carlo approach with a non-optimal technique but of low complexity. We propose an even more efficient solution. We use the wavelet domain which gives less blocking effects than the DCT domain. In order to counter-attack the security hole given in,[5] we embed in a secret space. Finally, since our technique is rapid and the space well adapted, we increase the trellis size (i.e. the codebook' size) and thus the robustness-distortion efficiency.[7]

In Section 2, we remind the principle of the original Dirty Paper Trellis Codes (DPTC).[4] In Section 3 we present the embedding space and the embedding algorithm. In Section 4 we compare the original DPTC,[4] the Lin *et al.* approach[6] and our *rotation-based* approach (RB-DPTC).

2. DPTC WATERMARKING SCHEME

The original DPTC scheme applied on a $N = 240 \times 368$ image is shown on Fig.1. The first step of the scheme is the image transformation into a spatio-frequential space (DCT transformation) in order to obtain the host signal $\mathbf{x}$. In the original scheme, an image is 8×8 DCT transformed, the twelve first ACs coefficients of each DCT blocks are extracted and pseudo-randomly ordered in a vector $\mathbf{x}$ of size $12 \times N/64 = 3 \times N/16$. The second step of the DPTC scheme is the *informed coding*. The input message m is coded into a codeword $\mathbf{c}^*$ by taking

Send correspondence to Marc.Chaumont@lirmm.fr.
Telephone: + (33)4.67.41.85.14; Fax: + (33)4.67.41.85.00.
Website: http://www.lirmm.fr/~chaumont.

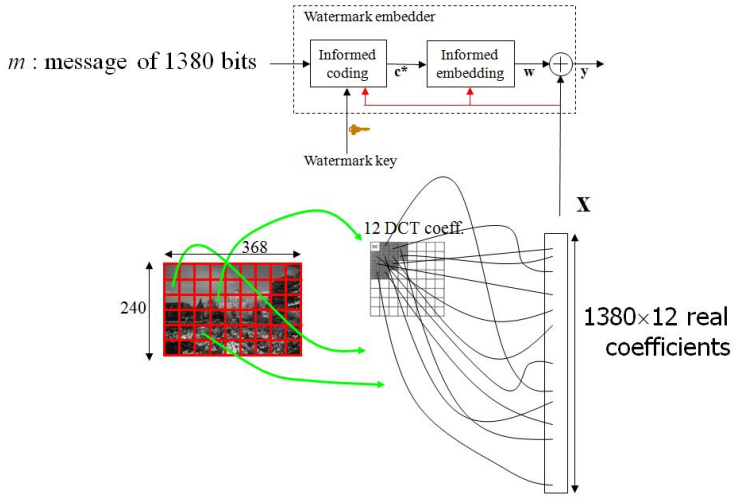


Figure 1. Dirty Paper Trellis Codes apply on a 240 × 368 image.

into account the host signal $\mathbf{x}$. The last step of the DPTC scheme is the *informed embedding*. It consists in modifying the host signal $\mathbf{x}$ in order to "put-it" in the Voronoï region of the codeword $\mathbf{c}^*$. Let's now define more precisely the trellis structure, the informed coding and the informed embedding.

2.1 Trellis structure

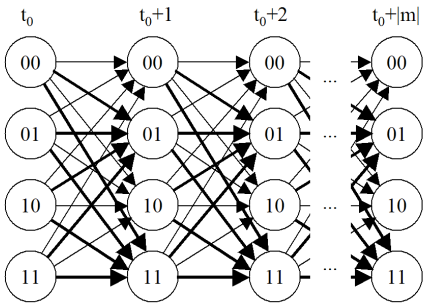


Figure 2. Dirty paper code's trellis with 4 states and 4 arcs per state.

In DPTC,[4] a special trellis is used. In this trellis, each state owns multiple possible transitions given an input bit. Each transition generates outputs coefficients. Fig.2 gives an example of a trellis with 4 states and 4 arcs per state. With this trellis, an input sequence owns multiple possible output codewords (a codeword is the result of the concatenation of outputs coefficients) since for each state there is multiple possible transitions for the same input bit. This signifies that an input sequence may be coded with different codewords. This property is essential in informed watermarking. In the original DPTC algorithm, the trellis own 64 states, 64 arcs per state and there is $N_{arc} = 12$ real coefficients pseudo-randomly generated as output arcs values.

2.2 Informed coding

The set of all the trellis paths i.e. all the possible outputs sequences, is the codebook $\mathcal{C}$ of the coder. A codeword $\mathbf{c}^i \in \mathcal{C}$ is the resultant coding of a message m. The informed coding is a way to choose the codeword $\mathbf{c}^i$ (encoding a given message m) the closest (for a given distance) to the host signal $\mathbf{x}$. Thus, informed coding allows to encode a message m by taking into account the host signal $\mathbf{x}$.

In the DPTC algorithm, given a message m, the informed coding is achieved:

- by pruning the trellis in order to keep the only valid paths. Thus, for a given transition, there is only the 0 input arcs or the 1 input arcs;
- by running a Viterbi decoder algorithm on this prune trellis in order to find the closest codeword $\mathbf{c}^*$. The distance used in order to compare the codewords with the original host $\mathbf{x}$ is the scalar product (the scalar product is a classical correlation measure). The Viterbi decoder thus retains the path (i.e. the codeword $\mathbf{c}^*$) of highest correlation with the host signal $\mathbf{x}$.

2.3 Informed embedding

In the original DPTC algorithm,[4] a Monte Carlo approach is used in order to displace the host signal $\mathbf{x}$ into the Voronoï region of the codeword $\mathbf{c}^*$. This embedding is achieved in order to meet a given robustness. Moreover the modification of $\mathbf{x}$ is achieved by taking into account the psycho-visual degradation by using the Watson perceptual measure.[8] The Monte Carlo principle is iterative and consists to attack and counter-attack a watermarked signal $\mathbf{y}$.

The Monte Carlo approach requires to run the Viterbi algorithm a high number of times. Even with the proposed optimizations in,[4] the time complexity is very high and this is at present a strong brake for intensive experiments studies and also for its use in industry. The DPTC watermarking scheme is thus seriously competed with faster quantization-based approaches.[2,3]

3. NEW EMBEDDING APPROACH

In this section, we present our new embedding space, our embedding approach and discuss about our proposition.

3.1 Embedding space

The recent work of Bas and Doërr[5] about security of DPTC shows that in the Kerckhoffs's framework,[9] i.e. when embedding and extracting algorithms are known by an attacker, the trellis codebook may be retrieved by observing a large number of watermarked images. Those conclusions are drawn based on a simplified version of the DPTC algorithm (non pseudo-random-ordering of DCT coefficients) but show a certain security weakness of DPTC.[4] The private space, that we use in this paper, allows to hide the structure of the trellis. A security attack based on the principle exposed in[5] is thus at least as difficult to lead with our proposition. Moreover, it is certainly very difficult to estimate the secret projections in the same way as[10] since there is a high number of codewords (with a trellis made of 128 states and 128 arcs per state and with a payload of 1024 bits, there is more than 10^{387} codewords).

Fig.3 illustrates our proposition : the Rotation-Based Dirty Trellis Codes (RB-DPTC). Our new embedding space is obtained by first, a wavelet transform of the image, and second, projections of the host signal $\mathbf{x}$ of dimension N_{wlt} ($\mathbf{x}$ is the concatenation of sub-bands coefficients except LL sub-band's coefficients) onto N_{sec} carriers (noted $\mathbf{u}_i$ with $i \in [1, N_{sec}]$). Note that a projection is just a scalar product. The obtained vector $\mathbf{v_x}$ of dimension N_{sec} may then be used for the informed-coding (see Section 2.2) and informed-embedding (see Section 2.3).

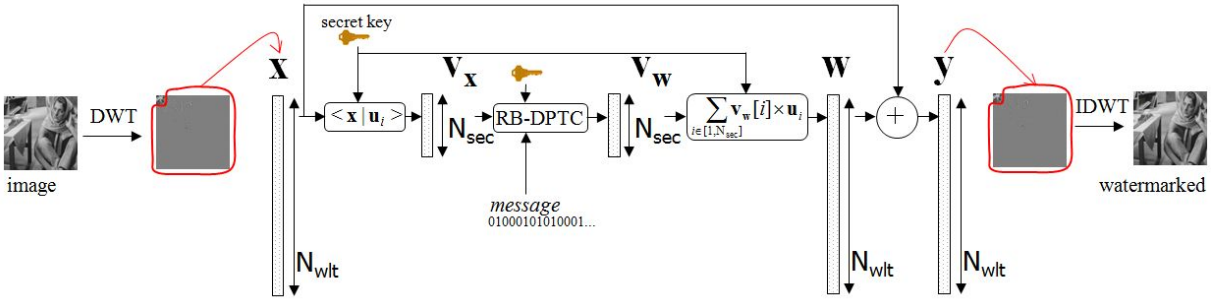


Figure 3. Our Rotation-Based Dirty Paper Trellis Codes (RB-DPTC) scheme.

This embedding space is at least as secure than the original one and it allows to spread the watermark signal on almost all the frequency domain (no super-robustness[11]). Moreover, the projections onto N_{sec} carriers give to the embedding space a Gaussian aspect which is known for its good property for the channel capacity.[1] Finally, the wavelet domain is known for its good psycho-visual properties and is less disturbing than the block effects present in the DPTC.[4]

3.2 Embedding algorithm

The informed coding in our approach is the same than the original one (see section 2.2) but is achieved with the host vector $\mathbf{v_x}$ (secret space). After achieving the informed coding, the codeword $\mathbf{c}^*$ is extracted. The Lin *et al.*[6] solution, in order to speed-up the embedding, and keeps a good robustness-distortion tradeoff, is not satisfying since the degradation is too strong. Our solution is not optimal but gives better results (The Lin *et al.* solution is also non optimal).

Remember that **at the decoder**, the most correlated codeword $\tilde{\mathbf{c}^*}$ is obtained by running the Viterbi algorithm. This codeword $\tilde{\mathbf{c}^*}$ belongs to the codebook $\mathcal{C}$ and maximizes the correlation with the attacked-watermarked vector $\tilde{\mathbf{v_y}}$ such that:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{c}^*} &= \arg\max_{\mathbf{c}^i \ \forall \mathbf{c}^i \in \mathcal{C}} (\tilde{\mathbf{v_y}}.\mathbf{c}^i) \\ &= \arg\max_{\mathbf{c}^i \ \forall \mathbf{c}^i \in \mathcal{C}} (||\tilde{\mathbf{v_y}}||.||\mathbf{c}^i||.cos\theta_i),\end{aligned}$$

with θ_i the angle between $\tilde{\mathbf{v_y}}$ and $\mathbf{c}^i$. Thus, the highest correlation gives the closest codeword $\tilde{\mathbf{c}^*}$ and the retrieved message m'.

Knowing that all the codewords own the same norm, the Viterbi algorithm extracts the codeword $\mathbf{c}^i$ owning the smallest angle with $\tilde{\mathbf{v_y}}$. The idea, in order to embed the message m at the coder side, is thus to reduce the angle between the host vector $\mathbf{v_x}$ and the codeword $\mathbf{c}^*$ until obtaining the smallest angle regarding all the other angles $(\widehat{\mathbf{v_x}, \mathbf{c}^i})$.

In order to reduce the angle between $\mathbf{v_x}$ and $\mathbf{c}^*$, we first express these two vectors in the Miller, Cox and Bloom plane (*abbr.* MCB plane).[12] Fig.4 illustrates this MCB plane. The MCB plane is defined by an ortho-normalize basis ($\mathbf{v_1}$, $\mathbf{v_2}$) such that $\mathbf{v_x}$ and $\mathbf{c}^*$ belong to that plane (Gram-Schmidt algorithm):

$$\begin{aligned}\mathbf{v_1} &= \frac{\mathbf{c}^*}{||\mathbf{c}^*||}, \\ \mathbf{v_2} &= \frac{\mathbf{v_x} - (\mathbf{v_x}.\mathbf{v_1})\mathbf{v_1}}{||\mathbf{v_x} - (\mathbf{v_x}.\mathbf{v_1})\mathbf{v_1}||}.\end{aligned}$$

In the MCB plane, the 2D coordinates of the host vector $\mathbf{v_x}$ are:

$$\begin{aligned}\mathbf{v_x^{2D}}(1) &= \mathbf{v_x}.\mathbf{v_1}, \\ \mathbf{v_x^{2D}}(2) &= \mathbf{v_x}.\mathbf{v_2},\end{aligned}$$

and the 2D coordinates of the codeword $\mathbf{c}^*$ are:

$$\begin{aligned}\mathbf{c^*_{2D}}(1) &= ||\mathbf{c}^*||, \\ \mathbf{c^*_{2D}}(2) &= 0.\end{aligned}$$

A rotation of the host vector $\mathbf{v_x^{2D}}$ of a θ angle in the MCB plane is such that:

$$\begin{aligned}\mathbf{v_y^{2D}}(1) &= cos\theta.\mathbf{v_x^{2D}}(1) - sin\theta.\mathbf{v_x^{2D}}(2), \\ \mathbf{v_y^{2D}}(2) &= sin\theta.\mathbf{v_x^{2D}}(1) + cos\theta.\mathbf{v_x^{2D}}(2).\end{aligned}$$

If we reduce the absolute angle between the host vector $\mathbf{v_x}$ and the codeword $\mathbf{c}^*$ in the MCB plane, it increases the correlation $\mathbf{v_x}.\mathbf{c}^*$. With a dichotomous approach on rotation angle, one can rapidly found a Voronoï frontier. The algorithm for obtaining this Voronoï frontier is iterative and dichotomous (there is less than 10 trials):

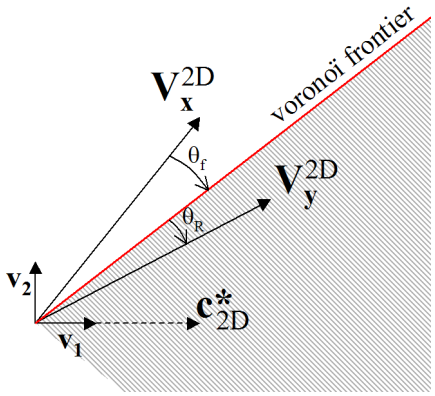


Figure 4. Rotation-based embedding in the Miller, Cox and Bloom plane.

1. rotate $\mathbf{v_x}$ and obtain $\mathbf{v_y}$ in the MCB,
2. run the Viterbi algorithm to check if $\mathbf{v_y}$ belongs or not to the Voronoï region of $\mathbf{c}^*$ i.e. that the decoded vector is equal or not to $\mathbf{c}^*$.
3. modify (dichotomous approach) the rotation angle depending on Voronoï region's belonging. Return to 1.

Once the frontier angle θ_f in the MCB is found, we improve the embedding robustness by penetrate inside the Voronoï region with a given angle θ_R. Our informed embedding is thus a rotation of $\mathbf{v_x}$ of an oriented angle equals to the $\max(\theta_f + \theta_R, (\widehat{\mathbf{v_x}, \mathbf{c}^*}))$. Fig.4 illustrates $\mathbf{v_x}$, $\mathbf{v_y}$, θ_f and θ_R in the MCB plane.

4. RESULTS

Tests were carried on the first 100 images of the BOWS2 data-base* with images resized to 256×256†. Those images are 8-bits grey-level images and are personal photos.

The trellis structure owns 128 (resp. 64) states with 128 (resp. 64) arcs per states for Lin *et al.* **cone-based** algorithm and our **rotation-based** algorithm (resp. for the **original DPTC**). Outputs arcs labels are drawn from a Gaussian distribution and there are 12 coefficients by output arc. The payload is 1 bit for 64 pixels which is the same as the original DPTC algorithm.[4] The number of embedded bits is thus 1024 bits.

For Lin *et al.* cone-based algorithm and our rotation-based algorithm, Wavelet transform is a 9/7 Daubechies with $l = 3$ decompositions levels. Except the LL sub-band, all the other sub-bands are used to form the host signal $\mathbf{x}$. With 256×256 images, the wavelet space size is thus $N_{wlt} = 64\,512$ coefficients. Knowing that the payload is 1/64 *bits per pixel* and that the number of outputs coefficients for an arc is $N_{arc} = 12$ coefficients, the private space size is thus $N_{sec} = 1024 \times 12 = 12\,288$ coefficients. The carriers $\mathbf{u}_i$ are built from normalized bipolar pseudo-random sequences.

Four kinds of robustness attacks have been applied: Gaussian noise attack, Gaussian filtering attack, valumetric attack and jpeg attack. The Bit Error Rate (BER) is the number of erroneous extracted bits divided by the total number of embedded bits. The BER is computed for each attack. Three algorithms are competing: the **original DPTC** with an average embedding PSNR = 42.6 dB, the Lin *et al.* **cone-based** algorithm with the robustness set to a noise power of $n^2 = 1$ (it corresponds to $R_t = 1$ in the paper[6]) and an average embedding PSNR = 34.2 dB (Note that it is impossible to increase the Lin *et al.* PSNR. Indeed, their technique is really sub-optimal with real images), and our **rotation-based** algorithm with the inside angle penetration set to $\theta_R = 0.1$ radian and an average embedding PSNR = 42.4 dB.

*BOWS2 data-base is located at http://bows2.gipsa-lab.inpg.fr/.

†The images subsampling has been achieved with xnview program and using Lanczos interpolation.

In Figure 5, 6, 7, 8 we observe the different BER results for the four different attacks. The Lin *et al.* curves just give an idea of the BER bound. They may not be used for fair comparison, since the average embedding PSNR is only of 34.2 dB. We should conclude that Lin *et al.* algorithm may not be used as a faster DPTC[4] substitute, since it is not able to achieved a reasonable PSNR of 42 dB. Comparison are thus only achieved between the **original DPTC** and the **rotation-based** algorithm.

For the comparison, we just look at BER below 10% which is large enough. With this criteria, the **rotation-based** algorithm performs identical or close results to the **original DPTC** algorithm for filtering and Gaussian attack. The two approaches strongly differ with jpeg and valumetric scaling. For the jpeg attack, the **original DPTC** performs very good robustness whereas the **rotation-based** is not robust at all. Results are opposite for the valumeric scaling, since the **rotation-based** is really better than the **original DPTC**.

We should then conclude that our **rotation-based** approach is the currently best approach in order to reduce the **original DPTC** complexity. Moreover, our approach assures a good security by using a secure embedding space as in.[13] The approach should nevertheless be improved in order to be robust to jpeg compression.

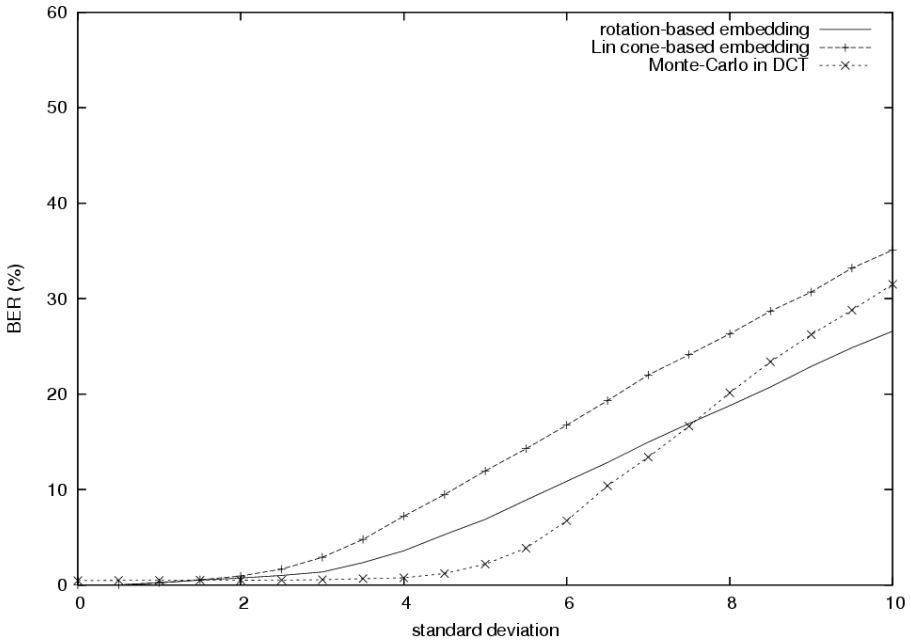


Figure 5. BER for Gaussian noise attack on the original DPTC algorithm (average PSNR = 42.6 dB), on Lin *et al.* cone-based algorithm (average PSNR = 34.2 dB) and on our rotation-based algorithm (average PSNR = 42.4 dB).

5. CONCLUSION

In that paper, we introduce a new Dirty Trellis Paper Codes algorithm (the Rotation-Based Dirty Paper Trellis Codes : RB-DPTC). Compared to the original algorithm, the wavelet domain is used instead of the DCT one. The security is assured by the add of a secret embedding space. This secret space is obtained by projecting the wavelet coefficients onto quasi-orthogonal carriers. Those projections also ensure (during the retro-projections) a spreading of the watermark on the majority of wavelet coefficients. Another interesting point is the embedding proposition based on a penetration into the Voronoï region of interest. This penetration necessitate first, to localize a frontier thanks to few rotations trials and second, to rotate of a fixed angle. The obtained results are good in comparison to the state of the art original DPTC.[4]

We explained how to reduce CPU complexity of the projections step in.[14] We also studied the psychovisual aspects in.[15] Future work will improve the robustness to the jpeg attack. The trellis structure and the codeword

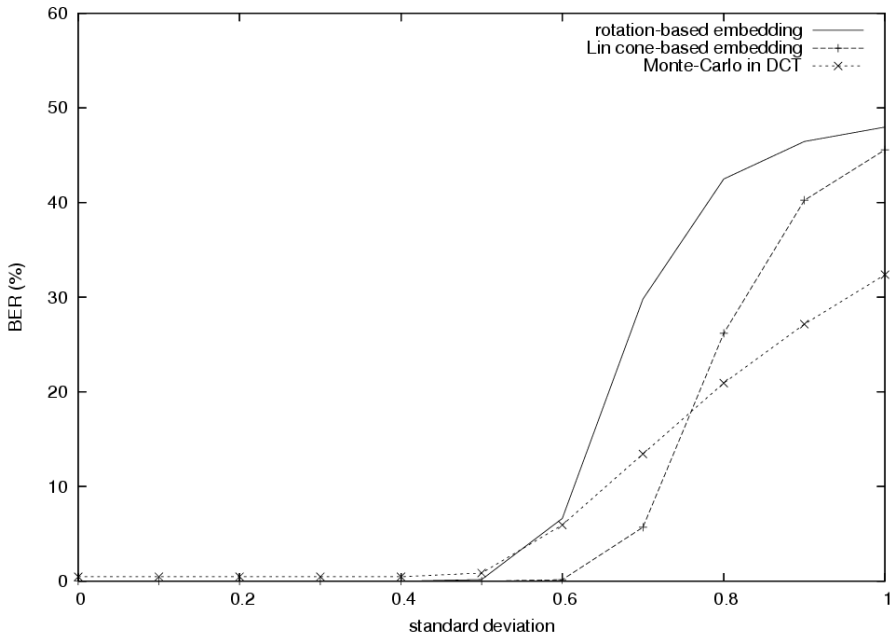


Figure 6. BER for Gaussian filtering attack on the original DPTC algorithm (average PSNR = 42.6 dB), on Lin *et al.* cone-based algorithm (average PSNR = 34.2 dB) and on our rotation-based algorithm (average PSNR = 42.4 dB).

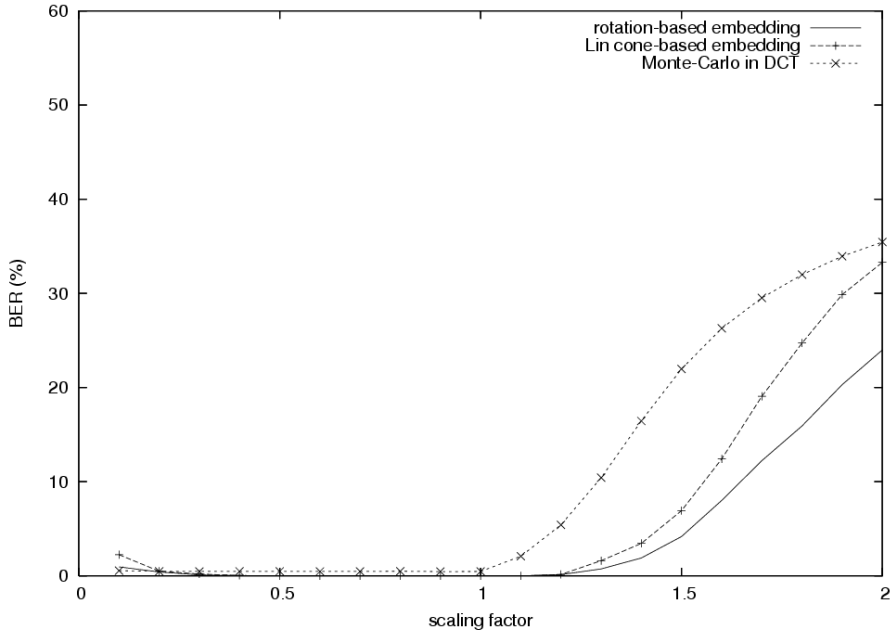


Figure 7. BER for valumetric up and down scaling attack on the original DPTC algorithm (average PSNR = 42.6 dB), on Lin *et al.* cone-based algorithm (average PSNR = 34.2 dB) and on our rotation-based algorithm (average PSNR = 42.4 dB).

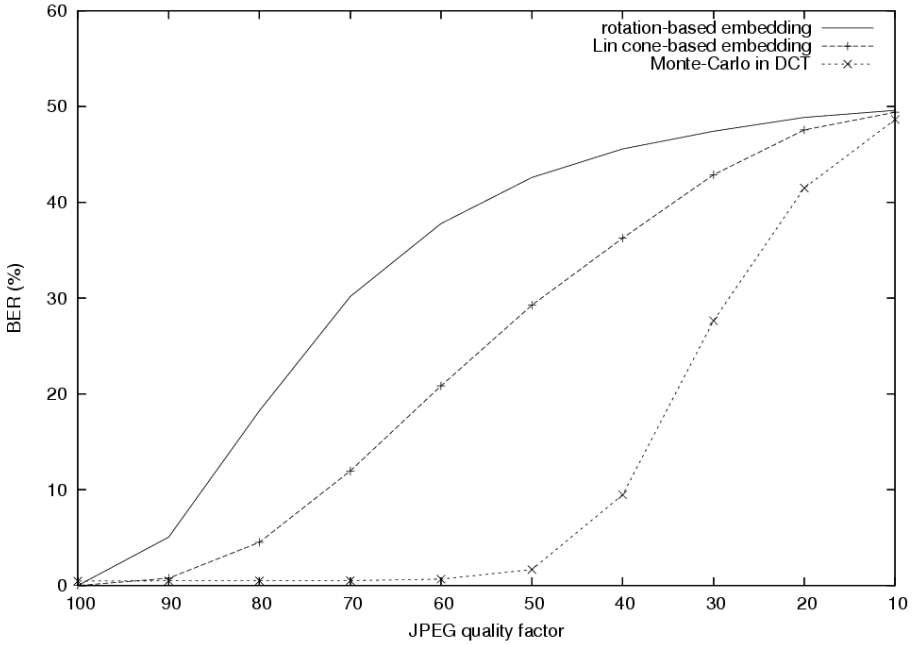


Figure 8. BER for jpeg attack on the original DPTC algorithm (average PSNR = 42.6 dB), on Lin *et al.* cone-based algorithm (average PSNR = 34.2 dB) and on our rotation-based algorithm (average PSNR = 42.4 dB).

construction should also be clarified as exposed in.[16] Security of our approach should also be evaluated as it has been done for the original DPTC in[5] and for the Broken Arrows algorithm in.[10]

REFERENCES

[1] Costa, M., "Writing on dirty paper," *IEEE Transactions on Information Theory* **29**(3), 439–441 (1983).

[2] Chen, B. and Wornell, G., "Quantization Index Modulation: A Class of Provably Good Methods for Digital Watermarking and Information Embedding," *IEEE Transactions on Information Theory* **47**(4), 1423–1443 (2001).

[3] Eggers, J. J., Bäuml, R., Tzschoppe, R., and Girod, B., "Scalar Costa Scheme for Information Embedding," *IEEE Transactions on Signal Processing* **51**(4), 1003–1019 (2003).

[4] Miller, M. L., Doërr, G. J., and Cox, I. J., "Applying Informed Coding and Informed Embedding to Design a Robust, High Capacity Watermark," *IEEE Transactions on Image Processing* **13**(6), 792–807 (2004).

[5] Bas, P. and Doërr, G., "Evaluation of an Optimal Watermark Tampering Attack Against Dirty Paper Trellis Schemes," in [*10th ACM workshop on Multimedia and Security, MM&Sec'2008*], 227–232 (Sept. 2008).

[6] Lin, L., Cox, I. J., Doërr, G., and Miller, M. L., "An Efficient Algorithm for Informed Embedding of Dirty Paper Trellis Codes for Watermarking," in [*IEEE International Conference on Image Processing, ICIP'2005*], **1**, 697–700 (Sept. 2005).

[7] Wang, C., Doërr, G., and Cox, I. J., "Toward a Better Understanding of Dirty Paper Trellis Codes," in [*IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP'2006*], **2**, 233–236 (May 2006).

[8] Watson, A. B., "DCT Quantization Matrices Optimized for Individual Images," in [*Human Vision, Visual Processing, and Digital Display IV, SPIE'1993*], **1913**, 202–216 (1993).

[9] Kerckhoffs, A., "La Cryptographie Militaire," *Journal des Sciences Militaires* **IX** (pp. 5-38 Jan. 1883, pp. 161-191, Feb. 1883).

[10] Bas, P. and Westfeld, A., "Two Key Estimation Techniques for the Broken-Arrows Watermarking Scheme," in [*11th ACM workshop on Multimedia and Security, MM&Sec'2009*], 1–8, ACM (Sept. 2009).

[11] Craver, S., Atakli, I., and Yua, J., "How we broke the BOWS watermark," in [*IS&T/SPIE 19th Annual Symposium on Electronic Imaging, Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents IX edited by Edward J. Delp III, Ping Wah Wong, SPIE'2007*], **6505**, 1–8 (Jan. 2007).

[12] Cox, I., Miller, M., Bloom, J., Fridrich, J., and Kalker, T., [*Digital Watermarking and Steganography*], ch. 5, 142–143, in Multimedia Information and Systems, Morgan Kaufmann, 2nd ed. (Nov. 2007).

[13] Furon, T. and Bas, P., "Broken Arrows," *EURASIP Journal on Information Security* **2008** (2008).

[14] Chaumont, M., "Fast Embedding Technique For Dirty Paper Trellis Watermarking," in [*8th International Workshop on Digital Watermarking, IWDW'2009*], 110–120, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (Aug. 2009).

[15] Chaumont, M., "Psychovisual Rotation-based DPTC Watermarking Scheme," in [*17th European Signal Processing Conference, EUSIPCO'2009*], (Aug. 2009).

[16] Wang, C., Doërr, G., and Cox, I. J., "Trellis Coded Modulation to Improve Dirty Paper Trellis Watermarking," in [*IS&T/SPIE 19th Annual Symposium on Electronic Imaging, Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents IX edited by Edward J. Delp III, Ping Wah Wong, SPIE'2007*], **6505**, 0G1–0G10 (Jan. 2007).

ACKNOWLEDGMENTS

This investigation was supported by the VOODDO project which is a French national project of the ANR (*Agence Nationale de la Recherche*) "Contenu et Interaction". We would also like to thank the Languedoc-Roussillon Region.

A High Capacity Reversible Watermarking Scheme

Marc Chaumont[a,b] and William Puech[a,b]

[a] Laboratory LIRMM, UMR CNRS 5506, University of Montpellier II,
161, rue Ada, 34392 Montpellier cedex 05, France.

[b] University of Nîmes, Place Gabriel Péri, 30000 Nîmes, France.

ABSTRACT

Many **reversible** watermarking solutions have been proposed since 1996: spread-spectrum approaches, circular interpretation on histogram approaches, lossless compression approaches, expansion approaches and histogram approaches. In this paper, we propose a solution whose embedding capacity goes beyond all those reversible schemes. For certain images, the reach payload of the proposed method is over **2 bpp**. This solution is an improvement of the Coltuc reversible watermarking approach published in ICIP'2007.

Keywords: Reversible watermarking, high-capacity, congruence-based watermarking.

1. INTRODUCTION

Reversible watermarking methods for images own three major requirements: a high embedding payload, a small complexity and a good visual quality. In this paper we mostly look at a high payload scheme with a small complexity. Our algorithm does not care about the quality criteria. It produce a kind of "salt-and-pepper" noise.

> "Although salt-and-pepper artifacts might appear ugly, it must be remembered that they will be removed when the original Work is recovered. ... For example, suppose the watermarked Works are used only for browsing. ... In such a scenario, the watermarked Works need only to be recognizable, and salt-and-pepper artifacts might not be a serious problem. (Digital Watermarking and Steganography, 2007, p. 382)[1]".

We then believe that this approach might been used for medical or satellite images. Moreover, it has already been successfully used for color information protection in.[2]

Since 1996, lots of reversible watermarking solutions have been proposed: spread-spectrum approaches,[3] circular interpretation on histogram approaches,[4] lossless compression approaches,[5,6] expansion approaches[7] and histogram approaches.[8,9] Our proposed solution allows to obtain an embedding-payload going beyond all the previous reversible schemes. Moreover, the algorithm complexity is very small. The proposed solution in this paper is an improvement of the Coltuc reversible watermarking approach.[10] More precisely, our objective is to correct the Coltuc scheme. Indeed, in some cases the process of[10] can not be reverted due to a problem of dependencies during the decoding process. We have then re-formulated its scheme in order to clarified it. We also provide lots of experimental results. In Section 2 we deal with the new watermarking scheme. In Section 3 we treat more precisely few technical points and have a discussion about the scheme. Finally, in Section 4 and 5, we give results and conclude.

Send correspondence to Marc.Chaumont@lirmm.fr.

2. ALGORITHM PRINCIPLE

In the same way as the method proposed by,[10] our algorithm lies on congruence computations. But in,[10] Coltuc proposes only two possible states for each pixel of an image. In our approach, we define **three possible states** for a pixel:

- the state ***embedding*** which corresponds to a pixel *embedding* an integer coefficient belonging to $[1, n]$,
- the state ***to-correct*** which corresponds to a pixel that has been modified but *does not embed* any information; this pixel will be *corrected* during the reverting process,
- the state ***original*** which corresponds to an *original* pixel (i.e unchanged). This state is new compared to those defined in.[10]

Lets define a constant integer value n greater or equals to 3. Lets also define the T transform which takes two integers x_1 and x_2 as input and return an integer:

$$\begin{aligned} T &: \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N} \\ & T(x_1, x_2) = (n+1).x_1 - n.x_2. \end{aligned}$$

In order to clarify the paper, we will name the coding process, the act of embedding a message into an image and the decoding process, the act of extracting the message and rebuilding the original image. Lets now define the three possible states and the coding-decoding algorithms.

2.1 Embedding state

A pixel i in the *embedding* state is a pixel such that:

$$0 \leq T(I(i), I(i+1)) \;\; and \;\; T(I(i), I(i+1)) + n \leq L, \tag{1}$$

with I the original image (of N pixel size) whose grey-levels belongs to $[0, L]$. In the case of 8-bits images, L equals to 255. All pixels i which are in the *embedding* state:

1. are T transformed such that $I_T(i) = T(I(i), I(i+1))$, with $I_T(i)$ the resulting transformed pixel,
2. **must** then embed **a** coefficient w **belonging to** $[1, n]$ such that $I_w(i) = I_T(i) + w$.

Note that after the embedding of a coefficient w belonging to $[1, n]$, it is impossible to recover $I(i)$ with the only knowledge of $I(i+1)$. Indeed $I_w(i) = (n+1).I(i) - n.I(i+1) + w$ with $w \neq 0$, thus $I(i) = \frac{I_w(i)+n.I(i+1)-w}{n+1}$ and so:

$$(I_w(i) + n.I(i+1)) \; mod \; (n+1) \neq 0. \tag{2}$$

This **congruence property** (2) allows to detect an *embedding* pixel during the decoding process. Note that during the decoding process, the $I_w(i+1)$ pixel should have been previously reverted to $I(i+1)$ in order to compute this congruence. This implies that the image order scan used during the decoding process is the opposite of the one used during the coding process.

2.2 To-correct state

A pixel i in the *to-correct* state is a pixel such that the negation of equation (1) is true:

$$T(I(i), I(i+1)) < 0 \;\; or \;\; T(I(i), I(i+1)) + n > L.$$

All pixels that are in this *to-correct* state are then modified such that:

$$\begin{aligned} & c \leftarrow (I(i) + n.I(i+1)) \; mod \; (n+1); \\ & if \; (I(i) - c) < 0 \;\; then \;\; c \leftarrow -(n+1-c); \\ & I_w(i) \leftarrow I(i) - c. \end{aligned} \tag{3}$$

The c coefficients belong to $[-n, n]^*$ and are embedded (into the *embedding* pixels) in order to enable the reversibility of the *to-correct* pixels during the decoding process. We name the c coefficients the **corrective codes**. Note that after the modification expressed by equation (3), pixel $I_w(i)$ checks the property:

$$(I_w(i) + n.I(i+1))\ mod\ (n+1) = 0. \tag{4}$$

This **congruence property** (4) allows to detect a *to-correct* pixel at the reverting process. Note that at the decoding process the $I_w(i+1)$ pixels should have been previously reverted to $I(i+1)$ in order to compute this congruence.

2.3 Original state

Given an image order scan for the coding, a pixel in the *original* state (i.e. unmodified pixel) must always be present just before a pixel in the *to-correct* state. For a top-bottom-left-right scan order, if a pixel i is in the *to-correct* state, then the pixel $i-1$ **must be** in the *original* state. In order to ensure this strong property (*original* and *to-correct* pixels go by pairs), during the scan, when a pixel i is detected as a *to-correct* one, a forward research is proceeded in order to find the next *embedding* one (noted *next*). *Original* and *to-correct* states are then alternates between the i (or $i-1$) position and the $next-1$ position. See 3.1 for more details and Appendix section for the algorithms.

This grouping constraint (additional state to Coltuc scheme[10†]) breaks the problematic dependencies during the decoding process. Remember that during the decoding, the image scan order is inverted. A *to-correct* pixel i may not be reverted immediately if its associated corrective code is still not extracted. Nevertheless, because the pixel $i-1$ is an *original* pixel, the pixel $i-2$ may be treated immediately and the decoding process may continue (pixel i will be corrected later, in a second pass).

2.4 Coding and decoding algorithms

The **coding** process is composed of two steps (see Appendix section for the coding algorithm):

1. classify each pixel in one of the three states: *embedding*, *to-correct*, *original*,
2. embed into the *embedding* pixels, the watermark made of corrective codes plus the message.

Note that the image scan order has been chosen to be from top to bottom and from left to right.

For the **decoding** process, the image scan order is inverted; it is perform from bottom to top and from right to left. The decoding process is also composed of two steps (see Appendix section for the decoding algorithm):

1. extract the watermark from the *embedding* pixels, revert (during the scan) all those pixels and localize the *to-correct* pixels,
2. from the extracted watermark retrieve the corrective codes and the message, and correct the *to-correct* pixels.

3. FEW TECHNICAL DETAILS

3.1 About pairs of to-correct and original pixels

During the first step of the coding process the image is scan from top to bottom and from left to right in order to classify each pixel in one of the three states: *embedding*, *to-correct* and *original*. A pixel is classified in the *embedding* state if equation (1) is verified. When equation (1) is not verified, one have to alternate *original* and *to-correct* sites until reaching an *embedding* site. In this case, **we have** then to respect the constraint of producing **pairs** of *original* and *to-correct* sites.

Lets note i the position of the encountered pixel which does not verify equation (1). Lets note j the position of the first encountered pixel starting from i which verifies equation (1). If $j-i$ is odd (respectively even) then alternate *original* and *to-correct* sites from $i-1$ (respectively i) to $j-1$ (respectively $j-1$).

*In,[10] the author forget the case $I(i) - c < 0$; this mistake implies a wrong range $c \in [0, n]$.

†Without this additional constraint, the scheme proposed in[10] does not work in lots of cases.

3.2 About the embedding of corrective codes

During the first step of the **coding process**, the image is scanned from top to bottom and from left to right, and when a *to-correct* site is found, a corrective code is built. At the end of the first step of the coding, the coder own a list of corrective codes which are arranged in the find order. This list is then concatenated to the message before embedding. **During the decoding process**, after the first step, the corrective codes list is extracted and *to-correct* pixels are then corrected.

Another important point is that corrective codes belong to $[-n, n]$ and embedding is possible only with coefficients belonging to $[1, n]$. One can entropically encode (Huffman or Arithmetic coding) the corrective codes and then embed the obtained binary vector with respect to the embedding sites payload (i.e $log_2(n)$ bits per pixel (bpp)). In a first approach and for simplicity we do not have chosen this solution. Our solution consists in embedding:

- either directly the corrective code **plus one**, if the corrective code belongs to [0, n-3];
- either two coefficients w_1 and w_2, if the corrective code c belongs to $[-n, -1]$ or $[n-2, n]$. The first coefficient w_1 is a special code used to communicate to the decoder. If $w_1 = n-1$, this signify to the decoder that w_2 represents a corrective code belonging to $[n-2, n]$. If $w_1 = n$, this signify to the decoder that w_2 represents a corrective code belonging to $[-n, -1]$. Thus, the coefficient w_2 allows to recover the corrective code.

Equations below resume the method used to code a *corrective code* c belonging to $[-n, n]$ in order to obtain coefficient(s) belonging to $[1, n]$:

$$\begin{cases} \text{if } c \in [0, n-3] & \text{embed } w_1 = c+1 & \\ \text{if } c \in [n-2, n] & \text{embed } w_1 = n-1 & \text{and } w_2 = c-n+3 \\ \text{if } c \in [-n, -1] & \text{embed } w_1 = n & \text{and } w_2 = -c \end{cases}$$

At the decoding step, the decoder extract a coefficient w_1 and, depending of the case, extract coefficient w_2:

$$\begin{cases} \text{if } w_1 \in [1, n-2] & \text{decode } c = w_1 - 1 \\ \text{if } w_1 = n-1 & \text{decode } c = w_2 + n - 3 \\ \text{if } w_1 = n & \text{decode } c = -w_2 \end{cases}$$

3.3 Hiding payload

Lets k be the number of *embedding* pixels. Each *embedding* pixel allows the insertion of **one** coefficient belonging to the range $[1, n]$ which corresponds to an embedding-payload of $log_2(n)$ bits. The $N-k$ remaining pixels[‡] (*to-correct* and *original* pixels) represent $(N-k)/2$ **corrective codes**. Indeed, the *to-correct* and *original* pixels go by pairs and there is corrective codes only for the *to-correct* pixels. A **corrective code** belongs to the range $[-n, n]$ and is thus corresponding to a rate of $log_2(2n+1)$ bits. The theoretical **real** payload of the watermarking scheme equals to the embedding payload **minus** the **corrective codes** bitrate[§] i.e:

$$\frac{k}{N} log_2(n) - \frac{N-k}{2N} log_2(2n+1) \; bits \; per \; pixel. \tag{5}$$

When the number k of *embedding* pixels is close to N the payload is approximately of $log_2(n)$ bpp. For example, if $k \approx N$, the payload can be close to 2 bpp with $n = 4$.

[‡]N is the image size.

[§]In[10] Coltuc gives a theoretical payload of $\frac{k}{N} log_2(n) - \frac{N-k}{N} log_2(n+1)$ bpp which is in practical impossible.

3.4 Discussions

In the Coltuc scheme[10] the decoding process necessitates for each watermarked pixel $I_w(i)$ the knowledge of the original pixel $I(i+1)$. There is thus a dependency between each pixel going from the last one to the first one. Unfortunately, only two states are used in its scheme (named in our paper the *to-correct* state and the *embedding* state). During the decoding process (i.e message extraction + reversibility), for any watermarked pixel $I_w(i)$ all the pixels $I_w(i+1), I_w(i+2), ..., I_w(N)$ should have been recovered. This strong dependency yield to a **not always possible scheme**.

Indeed, in its scheme, some pixels are modified by adding them a coefficient (named in our paper **corrective code**). Those corrective codes must be embedded additionally to the user message. At the decoding process, if a pixel $I_w(i)$ has to be corrected and if the associated corrective code has not still been extracted, then the decoding process is impossible and the message extraction fails. For example, take the two last coefficients $I_w(N-1)$ and $I(N)$ and suppose that the pixel $I_w(N-1)$ should be corrected thanks to a corrective code. This correcting code is supposed to be embedded in the image but is still not extracted. It is thus impossible to revert the pixel $I_w(N-1)$ and thus impossible to continue the decoding process. Other cases of impossibility may occur during the decoding process.

In order to break this dependency problem, we introduce the supplementary *original* state. *Original* pixels and *to-correct* pixels go by couple and are alternate if a suite of non-embedding pixels occurs. Those improvement enable to have a valid scheme and to proceed to multiple watermarking.

4. RESULTS

In this section, few results are given for classical grey-level images, 512×512, 8 bits per pixel. Table 1 gives the payload results with parameter **n=4**. The obtained payload is really impressive. For example, for the Lena image the embedding payload is 457 256 bits. To the author knowledge, the best reachable payload is with an expansion approach proposed in.[7] In,[7] Tian obtains a payload of 1.97 bpp $\equiv$ 516 794 bits for Lena image; In our proposed approach we reach a maximum payload of 2.06 bpp $\equiv$ 541 464 bits with **n=9**. We could moreover remark that the scheme own a very small computational complexity and that the payload may still be improved thanks to the corrective codes entropic coding.

Image	payload		PSNR
Airplane	457 256 bits	1.74 bpp	20.90 dB
Lena	445 294 bits	1.70 bpp	19.60 dB
Godhill	435 040 bits	1.66 bpp	18.56 dB
Peppers	418 710 bits	1.60 bpp	19.56 dB
Boat	409 444 bits	1.56 bpp	19.52 dB
Barbara	285 620 bits	1.09 bpp	18.82 dB
Baboon	195 608 bits	0.75 bpp	16.10 dB

Table 1. Payload on few classical grey-level images, 512×512, 8-bits per pixel with $\mathbf{n = 4}$.

In theory the algorithm may be run several times. In practice, with $\mathbf{n = 4}$, the algorithm succeed in embedding bits in a second algorithm execution only with Airplane and Lena images and the payload is very low (0.4 bpp for Lena and 0.03 bpp for Airplane). With Godhill, Peppers, Boat, Barbara and Baboon there were not enough payload for a second pass embedding. From equation (5), the first term is smaller than the second one.

As a consequence, for an higher embedding payload, it is most of the time more interesting to use the algorithm just with one pass execution and with a value for parameter **n** higher than 4. Indeed, as it could be observed in Figure 1, excepted for Baboon[¶] image, a higher payload is reached when $n > 4$.

Figures 2 and 3 give results of the embedding of a pseudo-random binary vector with parameter n=4 on the grey-level image Lena 512×512 shown in Figure 2(a) and on the grey-level image *head* 228×256 shown in Figure 3(a). Figure 2(b) and 3(b) show the resulting watermarked image. Figure 2(c) and 3(c) show the three

[¶]In general, the payload is week for strongly textured images and one should choose a small value for n.

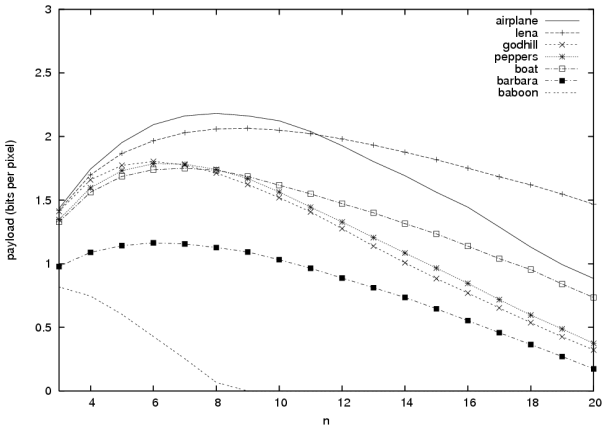


Figure 1. Real payload variation in function of the parameter **n** for few classical 512×512, 8 bits images.

(a) 512×512 Lena image.

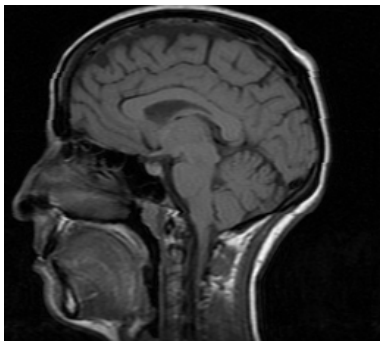
(b) Watermarked image, 1^{st} pass, n=4, PSNR=19.6 dB, payload=1.7 bpp.

(c) States image (1^{st} pass), White: embedding, Red: to-correct, Black: original.

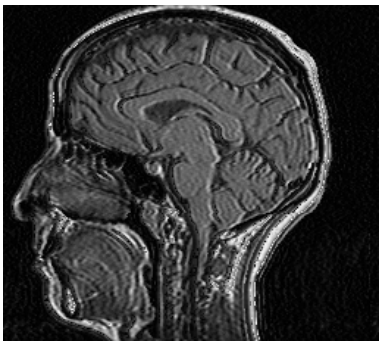
(d) Watermarked image, 2^{nd} pass, n=4, PSNR=14 dB, combined payload=1.7+0.4 bpp.

(e) States image (2^{nd} pass).

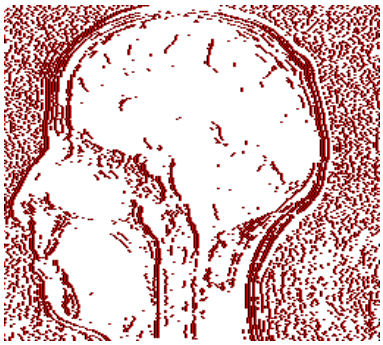
Figure 2. Illustration of the algorithm on Lena 512×512 image, with n=4 and 2 passes. The total embedding **real** payload equals to **2.1 bpp** i.e **550 940 bits**.



(a) 228×256 *head* image.

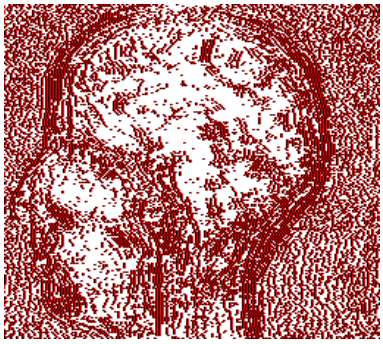


(b) Watermarked image, 1^{st} pass, n=4, PSNR=19.8 dB, payload=0.99 bpp.



(c) States image (1^{st} pass), White: embedding, Red: to-correct, Black: original.

(d) Watermarked image, 2^{nd} pass, n=4, PSNR=14.3 dB, combined payload=0.99+0.04 bpp.



(e) States image (2^{nd} pass).

Figure 3. Illustration of the algorithm on *head* 228×256 medical image with n=4 and 2 passes. The total embedding **real** payload equals to **1.03 bpp** i.e **60 478 bits**.

different sites: in white, there are the pixels embedding a coefficient belonging to $[1, n]$, in red there are the pixels to-correct (those pixels produce a corrective code belonging to [-n, n]) and in black there are the non-modified original pixels. The watermarked image obtained after two consecutive embedding is shown in Figure 2(d) and 3(d). One can remark, on Figure 2(e) and 3(e), that in the second algorithm execution, there is lots of non-embedding sites (*to-correct* and *original* pixels).

5. CONCLUSION

To conclude, the proposed scheme in this paper improves the previous Coltuc scheme[10] by breaking dependencies and thus ensuring that watermarking may always be reverted. Moreover, those dependencies broken allows multiple consecutive watermarkings. Thus, embedding payload reach amazing values **around 2 bbp**. Such high capacities were never previously reached (see circular interpretation on histogram approaches,[4] lossless compression approaches,[5,6] expansion approaches,[7] and histogram approaches[8,9]). Future work should deal with the tradeoff between distortion and payload; indeed the current work always reach the maximum payload without taking into account distortion. Future work should also deal with the corrective codes compression and the used of a secret-key (modifying the order-scan) for the scheme' security.

ACKNOWLEDGMENTS

This investigation was supported in part by the TSAR project which is a french national project ANR-05-SSIA-0017-05 of the ANR ARA SSIA (*Agence Nationale de la Recherche, Action de Recherche Amont, Sécurité Systèmes Embarqués et Intelligence Ambiante*) and in part by the VOODDO project which is a french national project of the ANR Contenu et Interaction. We would also like to thank the Languedoc-Roussillon Region.

APPENDIX

Listing 1. *Embedding algorithm*

```
const Integer n;                                          // n ≥ 3

Procedure embed(Image: I, Message: m):I_w                 // m coefficients ∈ [0, n−1]
begin

  List embedding;                                         // Declaration of the embedding list
  List codes;                                             // Declaration of the corrective codes list

  // FIRST STEP
  for i from 1 to N−1
  begin

    t ← (n+1).I(i) − n.I(i+1);                            // T transform

    if ((0 ≤ t) and (t+n ≤ L))
    then
      I_w(i) ← t;                                         // Apply T transformation to the i^th pixel
      embedding ← embedding ⊕ i;                          // Add pixel i to the embedding list
    else
      next ← look_forward_for_next_embedding_pixel(i);    // next is the next embedding pixel

      if (next − i is odd)
      then
        k ← i−1;
        I_w(i−1) ← I(i−1);                                // Pixel i−1 come back to its original value
        embedding ← embedding ⊖ i;                        // Remove pixel i from the embedding list
      else
        k ← i;
      end−if

      for j from k to next−1 alternate original and to_correct pixels
      begin
        if (it is to_correct turn)
        then
          c ← (I(j) + n.I(j+1)) mod (n+1);                // Positive code
          if ((I(j) − c) < 0) then c ← −(n+1−c);          // Negative code
          I_w(j) ← I(j) − c;
          codes ← codes ⊕ c;                              // Add corrective code c to the codes list
        end−if
      end−for
      i ← next−1;                                         // Next iteration, goes to the next embedding pixel
    end−if
  end−for

  Generate a coefficient sequence w with the corrective code list codes and the message m;

  // SECOND STEP : embedding OF THE WATERMARK w
  ∀i ∈ embedding  I_w(i) ← I_w(i) + w(i);                 // w(i) ∈ [1, n]
end
```

Listing 2. *Extraction algorithm*

```
Procedure extract(Image: I_w):I, m
begin

  List to_correct;                          // Declaration of the to_correct list

  I ← I_w;                                  // copy I_w into I

  // FIRST STEP: EXTRACTION OF THE WATERMARK w
  for i from N−1 to 1
  begin

    v ← (I_w(i) + n.I(i+1)) mod (n+1);

    if (v = 0)                              // Congruence property test
    then                                    // Case: pixel i is a to_correct pixel
      to_correct ← to_correct ⊕ i;          // Add pixel i to the to_correct list
      i ← i − 1;                            // Important lign: pixel i−1 is original and is not to treat
    else                                    // Case: pixel i is an embedding pixel
      w ← w ⊕ v;                            // Concatenate coefficient v to the watermark w
      I_w(i) ← I_w(i) − v;                  // Remove coefficient v
      I(i) ← (I_w(i)+n.I(i+1))/(n+1)        // Invert T transformation
    end−if
  end

  Retrieve from the coefficient sequence w the corrective codes list codes and the message m;

  // SECOND STEP: CORRECTION OF THE to_correct PIXELS
  ∀i ∈ to_correct  I(i) = I_w(i) + codes(i);
end
```

REFERENCES

[1] Cox, I., Miller, M., Bloom, J., Fridrich, J., and Kalker, T., [*Digital Watermarking and Steganography*], ch. 11, 382, in Multimedia Information and Systems, Morgan Kaufmann, 2nd ed. (Nov. 2007).

[2] Chaumont, M. and Puech, W., "A 8-Bit-Grey-Level Image Embedding its 512 Color Palette," in [*The 16th European Signal Processing Conference, EUSIPCO'2008*], 5 pages (Aug. 2008).

[3] Bender, W., Gruhl, D., Morimoto, N., and Lu, A., "Techniques for data-hiding," in [*IBM Syst. J.*], **35**(3), 313–336 (1996).

[4] Vleeschouwer, C. D., Delaigle, J., and Macq, B., "Circular Interpretation on Histogram for Reversible Watermarking," in [*IEEE International Multimedia Signal Processecing Workshop, IMSPW'2001*], 345–350 (Oct. 2001).

[5] Fridrich, J., Goljan, M., and Du, R., "Invertible Authentication," in [*IS&T/SPIE Annual Symposium on Electronic Imaging, Security Watermarking Multimedia Contents, SPIE'2001*], **4314**, 197–208 (Jan. 2001).

[6] Celik, M. U., Sharma, G., and Tekalp, A. M., "Lossless Watermarking for Image Authentication: A New Framework and an Implementation," *IEEE Transactions on Image Processing* **15** (Apr. 2006).

[7] Tian, J., "Reversible Data Embedding Using a Difference Expansion," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* **13**, 890–896 (Aug. 2003).

[8] van Leest, A., van der Veen, M., and Bruekers, A., "Reversible Watermarking for Images," in [*IS&T/SPIE Annual Symposium on Electronic Imaging, Security Watermarking Multimedia Contents, SPIE'2004*], **5306** (Jan. 2004).

[9] Ni, Z., Shi, Y.-Q., Ansari, N., and Su, W., "Reversible Data Hiding," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology* **16** (Mar. 2006).

[10] Coltuc, D., "Improved Capacity Reversible Watermarking," in [*IEEE International Conference on Image Processing, ICIP'2007*], (Sept. 2007).

A GREY-LEVEL IMAGE EMBEDDING ITS COLOR PALETTE

M. Chaumont and W. Puech

Laboratory LIRMM, UMR CNRS 5506, University of Montpellier II
161, rue Ada, 34392 MONTPELLIER CEDEX 05, FRANCE
email: marc.chaumont@lirmm.fr, william.puech@lirmm.fr

ABSTRACT

In this paper, we propose a method to embed the color information of an image in its corresponding grey-level image. The objective of this work is to allow free access to the grey-level image and give color image access to secret key owners. This method is made of two steps which are the color image decomposition (in a grey-level image and its associated color information) and the data-hiding. The main contribution of this papper is the energetic function proposed to model the decomposition of the color image. The optimization of the proposed energetic function leads to the obtention of an *index* image and a color palette. The good properties of that decomposition are an *index* image which is similar to the luminance of the color image and a color palette which is well suit for the data-hiding. The obtained results confirm the model quality.

Index Terms ***(from IEEE keyword list)***— Image processing, Image transmission, Data security, Data transmission, Color.

1. INTRODUCTION

Nowadays, only few secure solutions are proposed in order to give both a free access to low-quality images and a secure access to the same images with an higher quality. Our proposed solution is built on a data-hiding method. The image may be freely obtained but its high quality visualization requires a secret key. More precisely, in our solution, a grey-level image is freely accessible but only secret key owners may rebuild the color image. Our aim is thus to protect the color information by embedding this information in the grey level image. Note that this work is though to be used to give a limited access to the private digital painting data-base of the Louvre Museum of Paris, France.

In order to obtain a grey-level image embedding its color information, we decompose a color image in an *index* image and a color palette. The color palette is then hidden in the *index* image. The *index* image should be similar to the luminance of the color image, the embedding process should be of week magnitude and the color palette should be cleverly ordered. The originality of this paper is to propose a solution for this very constrained decomposition. Thus, the main contribution is the energetic function proposed to model the decomposition of the color image. The optimization of the proposed energetic function leads to the obtention of a well suit *index* image and a well ordered color palette.

Many works propose solutions to hide information by using the decomposition of a color image in an *index* image and a color palette. The data-hiding may occur in the *index* image [1] or in the color palette [2, 3]. Nevertheless, none of those techniques tries to protect the color information by hiding the color palette in the *index* image. Only the previous work of [4] protect the color information by hiding the color palette in the *index* image. Authors of [4] sort the colors of the color palette in order to get an *index* image which is near of the luminance of the original color image and in the same time they get a color palette whose consecutive colors are close. In this paper, the approach is completely different and relies on a function optimization of the global problem formulation.

Other works such that [5, 6, 7] based on wavelet decomposition and sub-band substitution propose solutions to embed the color information in a grey-level image. Their areas are perceptive compression and image authentication for [5, 6] and image printing for [7]. Even if those techniques embed the color information, their approach and their purpose are clearly different from that exposed in that paper.

In section 2, we present the proposed energetic model. Section 3 deals with the secured data-hiding method. In section 4, results are presented and are compared to those of [4].

2. ENERGETIC MODEL

The goal of the first step is to find an *index* image and a color palette with the following constraints:

- the *index* image should be close from the luminance of the original color image,
- the color quantized image should be close from the color image,
- and the color palette should own consecutive couples of close color.

In [4] the proposed approach was made of three points: a quantization, a color palette re-ordering and the data-hiding.

The major contribution lied on the definition of a *running layer algorithm* which aim was to run the RGB color space in order to find a re-organized color palette. This previous approach is extremely rapid but the obtained *index* image is strongly contrasted in regard of the luminance of the original color image.

In this paper, we propose a solution to obtain a visually more pleasant *index* image and to obtain a better quality equilibrium between the *index* image and the quantized color image. The proposed approach is completely different since quantization and color palette ordering are made in only one step, the color palette constraint is weaker and the main contribution lies on the modeling and the optimization of an energetic model.

As explain previously, the problem of the computation of a color palette made of couples of close colors and an *index* image similar to the luminance may be expressed by three constraints. Mathematically this comes to find the K colors $C(k)$ (C is the color palette) and the $P_{i,k}$ ownership values giving the degree of belongingness of a pixel i to the k^{th} color. Note that $P_{i,k}$ belongs to $[0,1]$ and are named fuzzy membership values in fuzzy c-mean clustering approach [8]. Also note that the $P_{i,k}$ give indirectly the *index* image such that: $Index(i) = \arg_k \max_k P_{i,k}$

Thus, we are looking to minimize the above energetic model in order to obtain $\forall i \in [1,N]$, $\forall k \in [1,K]$, $P_{i,k}$ and $C(k)$:

$$\begin{aligned} E = & \sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} P_{i,k}^m (C(k) - I(i))^2 \\ & + \lambda_1 \sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} P_{i,k}^m (Y(i) - k)^2 \\ & + \lambda_2 \sum_{k|k\in[1..K] \text{ and } k \text{ is odd}} (C(k) - C(k+1))^2, \end{aligned} \quad (1)$$

with I the color image, Y the luminance image, $\lambda 1$ and $\lambda 2$ two scalar values and $m \in]1,\infty[$ the fuzzy coefficient tuning the equi-probability degree[1].

The first term is expressing the constraint of color quantization. The aim is to found the best representative K colors. The second term stand for getting the *index* image the nearest to the luminance image Y. The last term constrain couples of consecutive color from the palette to be close.

The minimization of Equation 1 such that:

$$\{P_{i,k}, C(k)\} = \arg\min_{\{P_{i,k}, C(k)\}} E, \quad (2)$$

is performed iteratively in a two steps loop as in conventional fuzzy c-mean algorithms. In the first step, colors $C(k)$ are updated, given $P_{i,k}$, by solving the linear system below:

$$\begin{aligned} & \underline{\forall k \text{ odd}:} \\ & (\lambda_2 + \sum_{i=1}^{N} P_{i,k}^m) \times C(k) - \lambda_2 \times C(k+1) = \sum_{i=1}^{N} P_{i,k}^m I(i), \\ & \underline{\forall k \text{ even}:} \\ & -\lambda_2 \times C(k-1) + (\lambda_2 + \sum_{i=1}^{N} P_{i,k}^m) \times C(k) = \sum_{i=1}^{N} P_{i,k}^m I(i). \end{aligned} \quad (3)$$

In the second step, $P_{i,k}$ (with m=2) are updated given the colors $C(k)$ with:

$$P_{i,k} = \frac{\frac{1}{\sum_{l=1}^{l=K} \frac{1}{2\times((C(l)-I(i))^2+\lambda_1(Y(i)-l)^2)}}}{2 \times ((C(k) - I(i))^2 + \lambda_1 (Y(i) - k)^2)} \quad (4)$$

Mathematical details are given in the Appendix.

3. SPATIAL DATA HIDING METHOD

The methods in spatial domain embed directly the information into the pixel of the original image. The first techniques embedded the bit message in a sequential way in the LSB (Low Significant Bit) of the pixel image [9, 10]. They have been improved by using a PRNG (Pseudo-Random Number Generator) and a secret key in order to have private access to the embedded information. The PRNG spreads over the image the message and makes hard the steganalyses [11]. Although those spatial hiding methods are not robust against attacks, they enable to embed a great amount of information.

For this paper, we have used an algorithm to embed the color palette information in the LSB of the *index* image of N pixels. The objective is thus to embed a message W made up of l bits b_j ($W = b_1 b_2 ... b_l$). The embedding factor, in $bit/pixel$, is $E_f = l/N$. The *index* image is then divided in areas of size $\lfloor 1/E_f \rfloor$ pixels. Each area is used to hide only one bit b_j of the message. This splitting procedure guarantees that the message is spread homogeneously over the whole *index* image. In order to hide the color palette in the *index* image we need to embed $l = 3 \times 256 \times 8 = 6144$ bits (the number of colors is $K = 256$).

Consequently, the embedding factor E_f, only depends on the *index* image size N. In our process, the PRNG selects randomly, for each region, a pixel $Index(i)$. In order to get a marked pixel $Index_W(i)$, the LSB of this selected pixel $Index(i)$ is then modified according to the message bit b_j[2]:

$$Index_W(i) = Index(i) - Index(i) \bmod 2 + b_j.$$

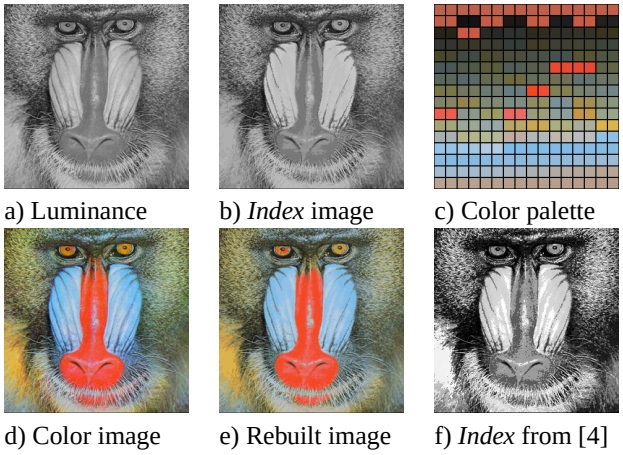
[1] m is set to 2 for computational complexity reduction.

[2] The formula is given for *index* values belonging to [0,K-1].

This way to embed the color palette ensure that each marked pixel is at worst modified by one grey-level and in the same time that the rebuilt color pixel would not be very far from the right color value. Indeed, the third term of Equation 1 ensures that consecutive couples of color are close.

4. RESULTS

We have applied our method on well known color images of size 256×256 pixels. For all the experiments, $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 0.01 \times N/(K+1)$ and $m = 2$ (see Equation 1). The results obtained show that the approach is efficient whatever the image type. In Figure 1, the main steps of our approach are comment for the baboon image.



a) Luminance b) *Index* image c) Color palette

d) Color image e) Rebuilt image f) *Index* from [4]

Fig. 1. Steps of the color secured.

After proceeding to the minimization of Equation 1 on the baboon image with $K = 256$ colors we obtain an *index* image in Figure 1.b and its color palette in Figure 1.c. The luminance image of the original color image is given in Figure 1.a. One could observe the good similarity between *index* image and luminance image. The good PSNR value of 27.90 dB confirms this subjective feeling. In comparison to the *index* image obtained in [4] and given in Figure 1.f (PSNR = 16.32 dB) the proposed approach is really better to obtain a visually pleasant *index* image. The first step of the method proposed in [4] was a quantization on K=256 colors which implies a quite flat histogram (see *Index* histogram with k-mean in Figure 2) and then a week similarity with the luminance histogram. In our proposed method, the grey-level range and the histogram shape of the *index* image (Figure 2) are nearer from the luminance histogram. One could also observe on the *index* histogram of Figure 2 that lots of *index* color are unused which explain the presence of some useless colors on the color palette of Figure 1.c. Also note that in the color palette in Figure 1.c, consecutive couples of color are colorimetricly close as expressed by the third term of Equation 1.

The length of our embedded message (color palette) is

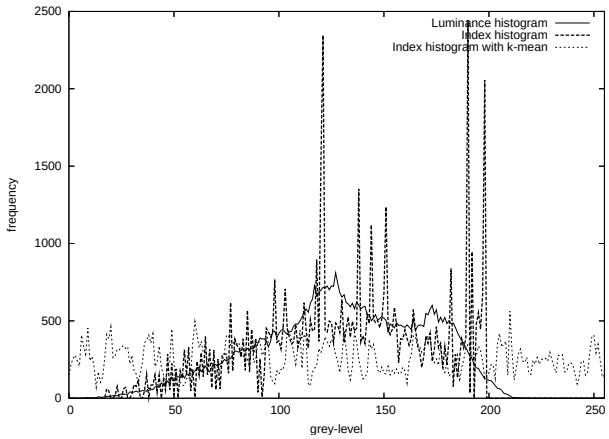


Fig. 2. Histograms.

$l = 6144$ bits which gives an embedding factor for an image of 256×256 pixels of $E_f = 6144/(256 \times 256) = 0.093$ bits/pixels. The *index* image is then cut in block of 10 pixels. In each 10-pixel block, a bit of the color palette is embedded at the position selected by the PRNG as explain in Section 3. The secured is obtain through the used of a secret key of 128 bits as a seed for the PRNG. The distribution of the message over the image is then key-related.

Figure 1.e shows the rebuilt color image from the *index*-marked one. This image is not visually far from the original color image even if the PSNR value of 27.90 dB is of middle quality. Note that the degradation due to the data-hiding method is weak because it disturb *index* values of a maximum of one. This is made possible thanks to the color palette property to own consecutive couples of close colors.

Few PSNR values are given on the Table 1. Rebuilt color images are of midle quality (over 27 dB) but visually pleasant. PSNR values for *index*-marked images are over 29 dB which is a really good result in comparison to the results of [4].

Table 1. PSNR comparisons

images	$\text{PSNR}^{luminance}_{(original,index-marked)}$	$\text{PSNR}^{color}_{(original,rebuilt)}$
baboon	29.74 dB	27.90 dB
airplane	35.95 dB	33.66 dB
pepper	35.03 dB	31.68 dB
house	35.40 dB	35.45 dB
barbara	34.86 dB	30.74 dB

5. CONCLUSION

In this paper, we have proposed a method to embed securely into a grey level image its color information. This method is built on a decomposition of a color image in a *index* image and a color palette. The *index* image is playing the role of the

luminance image and the color palette is hidden into this *index* image. The method is made of two main steps which are the color image decomposition (into an *index* image and a color palette) and the data hiding. The originality of this paper is to model the problem with an energetic function and then minimize it. Obtained results show a real improvement in comparison to [4]. Our perspective work will treat of compression possibilities and other more robust data-hiding approaches.

APPENDIX

$P_{i,k}$ computation

Knowing that the membership values should belong to the range [0, 1] and that $\forall i \sum_{k=1}^{K} P_{i,k} = 1$ we are expressing this supplementary constraint by re-writing Equation 1:

$$E_{mod} = E + \lambda \sum_{i=1}^{N} \sum_{k=1}^{K} (1 - P_{i,k})$$

By cancelling $\frac{\partial E_{mod}}{\partial P_{i,k}}$ we are able to expressed $P_{i,k}$:

$$P_{i,k} = \frac{\lambda}{2 \times ((C(k) - I(i))^2 + \lambda_1 (Y(i) - k)^2)} \quad (5)$$

λ is deduced from the fact that $\forall i \sum_{k=1}^{K} P_{i,k} = 1$:

$$\lambda = \frac{1}{\sum_{l=1}^{K} \frac{1}{2 \times ((C(l) - I(i))^2 + \lambda_1 (Y(i) - l)^2}}$$

Equation (4) is then obtain by substitute λ in Equation (5).

C(k) computation

By cancelling $\frac{\partial E}{\partial C(k)}$ we are able to expressed $C(k)$ with a linear system given in Equation (3); Matrix of that system A.X = B are given below:

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_2 + \sum_{i=1}^{i=N} P_{i,1}^m & -\lambda_2 & 0 & \dots \\ -\lambda_2 & \lambda_2 + \sum_{i=1}^{i=N} P_{i,2}^m & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \lambda_2 + \sum_{i=1}^{i=N} P_{i,3}^m & \dots \\ 0 & 0 & -\lambda_2 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{i=N} P_{i,1}^m I(i) \\ \sum_{i=1}^{i=N} P_{i,2}^m I(i) \\ \dots \\ \sum_{i=1}^{i=N} P_{i,K-1}^m I(i) \\ \sum_{i=1}^{i=N} P_{i,K}^m I(i) \end{pmatrix}$$

ACKNOWLEDGMENTS

This investigation was in part supported by the TSAR project which is a french national project ANR-05-SSIA-0017-05 of the ANR ARA SSIA (*Agence Nationale de la Recherche, Action de Recherche Amont, Sécurité Systèmes Embarqués et Intelligence Ambiante*).

We would like also to thank Mr Lahanier Christian of the C2RMF (*Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France*) and the Louvre Museum for the digital paintings and for valuable discussions.

6. REFERENCES

[1] J. Fridrich, "A New Steganographic Method for Palette-Based Images," in *Proceedings of the IS&T PICS conference*, Apr. 1998.

[2] M.-Y. Wu, Y.-K. Ho, and J.-H. Lee, "An Iterative Method of Palette-Based Image Steganography," *Pattern Recognition Letters*, vol. 25, pp. 301–309, 2003.

[3] C.H. Tzeng, Z.F. Yang, and W.H. Tsai, "Adaptative Data Hiding in Palette Images by Color Ordering and Mapping With Security Protection," *IEEE Transaction on Communications*, vol. 52, no. 5, pp. 791–800, 2004.

[4] M. Chaumont and W. Puech, "A Color Image in a Grey-Level Image," in *IS&T Third European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision, CGIV'2006*, Leeds, UK, June 2006, pp. 226–231.

[5] P. Campisi, D. Kundur, D. Hatzinakos, and A. Neri, "Compressive Data Hiding: An Unconventional Approach for Improved Color Image Coding," *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol. 2002, no. 2, pp. 152–163, 2002.

[6] Y. Zhao, P. Campisi, and D. Kundur, "Dual Domain for Authentication and Compression of Cultural Heritage Images," *IEEE Transaction on Image Processing*, vol. 13, no. 3, pp. 430–448, 2004.

[7] R. de Queiroz and K. Braun, "Color to Gray and Back: Color Embedding Into Textured Gray Images," *IEEE Transaction on Image Processing*, vol. 15, no. 6, pp. 1464–1470, 2006.

[8] J. C. Dunn, "A Fuzzy Relative of the ISODATA Process and its Use in Detecting Compact Well-Separated Clusters," *Journal of Cybernetics*, vol. 3, pp. 32–57, 1974.

[9] W. Bender, D. Gruhl, N. Morimoto, and A. Lu, "Techniques for Data Hiding," *I.B.M. Systems Journal*, vol. 35, no. 3-4, pp. 313–336, 1996.

[10] N. Nikolaidis and I. Pitas, "Robust Image Watermarking in the Spatial Domain," *Signal Processing*, vol. 66, no. 3, pp. 385–403, 1998.

[11] J. Fridrich and M. Goljan, "Practical Steganalysis: State-of-the-Art," in *Proceeding of SPIE Photonics West, Electronic Imaging, SPIE'2002*, 2002, vol. 4675, pp. 1–13.

ATTACK BY COLORIZATION OF A GREY-LEVEL IMAGE HIDING ITS COLOR PALETTE

Chaumont M. and Puech W.

Laboratory LIRMM, UMR CNRS 5506, University of Montpellier II
161, rue Ada, 34392 MONTPELLIER CEDEX 05, FRANCE

ABSTRACT

In this paper, we present a novel attack named *colorization attack*. This attack is specific to color-hiding watermarking schemes. The objective of this work is to demonstrate the feasibility of such an attack and thus to take it into account for the future color-hiding watermarking schemes.

Index Terms— watermarking, color-hiding, colorization attack, cost-function optimization

1. INTRODUCTION

The colorization is the act of adding color to a monochrome image or a movie [1]. This term was introduced by Wilson Markle in 1970 to describe its method for adding color to black and white movies or TV programs. Various techniques have been proposed [2, 3, 4], most of them based on an image segmentation into regions. Those techniques necessitate lots of manual intervention in order: to attribute a color to each regions and to correct the wrongly segmented regions. Recently, the approach of Levin *et al.* [5] based on a very simple energetic model and its optimization leads to amazing good colorization results. Moreover this approach necessitates a very small manual intervention. In this paper, we propose to study the *colorization attack*. This attack is specific to watermarking schemes **hiding the color information** and is an indirect attack in order to retrieve a color image closed to the original one.

Few solutions have been recently proposed in order to **protect** the **color information** with the **data-hiding** paradigm. The grey-level image (embedding the color information) is freely accessible but its color version necessitates to own a key. The first group of solutions is based on wavelet decomposition and sub-band substitution and embed the chroma information in a grey-level image [6, 7, 8]. The purpose is not specifically to protect the color information but more classically to propose perceptive compression and image authentication for Campisi *et al.* [6] and Zhao *et al.* [7] and printing solution for Queiroz and Braun [8]. The second group of solutions is based on the decomposition of a color image into an *index* image and its color palette then the embedding of the color palette image into the *index* image [9, 10].

All those color-hiding solutions produce a grey-level image embedding the color information. The **hidden** color information is used to rebuild the color image. For all those schemes, the **enriched** grey-level **image** is very close to the original luminance image. A **colorization attack** may then be an **indirect** attack to retrieve **a** color image visually pleasant. Even if the colorized image is far from the original color one, it could give an attractive color version and then yield null and void the color-hiding watermarking schemes. Indeed, the added value of the color protection schemes is the color information; if a colorized and nice version is easily generated, the watermarking schemes are no more reliable because, for example, an illegal color printing may be sold.

In this paper we specially treat of colorization attack for the palette-based watermarking scheme [9, 10]. The subband wavelet substitution watermarking scheme [6, 7, 8] may them been attacked thanks to the colorization exposed in [5] or with an adaptation of our proposed method. Comparing to [5], we express analytically the solution to the problem (authors of [5] use a full "matrix inversion" and do not describe explicitly initials conditions) which involves, for the colorization process, a CPU complexity reduction . Moreover, we adapt the *colorization attack* to the palette-based watermarking schemes which implies an easier initialization: user gives generally less than 7 points with their associated colors.

2. THE COLORIZATION ATTACK

2.1. General colorization formulation

As shown in [5] a grey-level image may most of the time be nicely colorized with small human intervention and in low CPU complexity. In this section, we propose a scheme in order to colorize grey-level images that are in the same time $index$ image ("colorization attack" of palette-based schemes). The palette-based schemes own a strong property: there is a bijection between grey-level values and a colors. It is thus easier to found just K colors compared to [5] where the number of unknowns equals to the size of the image.

As we already own an intensity information (the *index* image) we just need to extract the two chrominances planes. Thus, we decide to work in the YUV color space where the luminance plane Y is known (it is the *index* image) and where

U and V are the **two unknown chrominance planes**. Moreover, finding this two unknown planes is equivalent (in the palette-based watermarking scheme) to find the K colors of the palette C. Our unknown is thus the color palette C.

The model for the colorization problem is very simple: two spatially close pixels i and j should own a similar color if their intensity are similar. Mathematically, this may be expressed as minimizing for a pixel i all **weighted neighborhood differences** between the color $C(Index(i))$ of pixel i and the color $C(Index(j))$ of the pixel j belonging to the neighborhood of i which is noted $\mathcal{N}(i)$:

$$\forall i, \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} w_{i,j}.(C(Index(i)) - C(Index(j)))^2, \quad (1)$$

where $w_{i,j}$ is a weighting function, large when $Index(i)$ is similar to $Index(j)$ and small when this two intensities are different. The commonly used weighting function by segmentation algorithms for measuring the similarity between two intensity $Index(i)$ and $Index(j)$ is the Gaussian function:

$$w_{i,j} = a.e^{\frac{-(Index(i)-Index(j))^2}{2\sigma_i^2}},$$

with a, a positive real constant and σ_i^2 the local variance in a window around pixel i. Note that those weighting functions are unsymmetric ($w_{i,j}$ is not necessary equal to $w_{j,i}$). Also note that other weighting functions may be used as proposed in [5]. Those weighting functions give a value around 1 if $Index(i)$ and $Index(j)$ are close with respect to the local variance σ_i^2 and a value near 0 otherwise.

2.2. Specific colorization formulation

Note that the cost function E objective in [5] is to minimize the difference between the color of pixel i and the **weighted neighborhood colors**:

$$E(x) = \sum_{i=1}^{i=N} \left(x(i) - \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} w_{i,j} x(j) \right)^2, \quad (2)$$

where x is either the U plane (of size N pixels), either the V plane (of size N pixels) of the color space YUV. The objective is to find the two unknown U and V. This energetic model owns the same form than the one used in segmentation algorithms based on normalized graph cuts [11]. The solution is obtained by computing the second smallest eigenvector of $D-W$ with W the $N \times N$ weighting matrix and D the diagonal matrix [5]. The minimization is simply proceeded trough eigenvector decomposition of the $N \times N$ high dimension matrix $D - W$.

With the specific case of palette-based watermarking schemes the cost function may be re-written:

$$E(C) = \sum_{i=1}^{i=N} \left(C(Index(i)) - \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} w_{i,j}.C(Index(j)) \right)^2, \quad (3)$$

where C is the unknown color palette. The equation form is not similar to the previous one (2) and we could not use the eigenvector decomposition approach. We then decide to re-write a close form for equation (3) in order to facilitate its analysis and to found an analytic solution for the optimization. We are moreover adding an initialization constraint for user colors guess. The user manually sets L couples (i_l, c_l) where i_l is a pixel position and c_l its associated color. In order to respect the user choices we impose that the color $C(Index(i_l))$ of the pixel i_l will be a color close to given color c_l i.e. minimize $(C(Index(i_l)) - c_l)^2$. The cost function is thus made of a constraint term on neighborhood differences (equation 1) and a constraint term on user colors guess:

$$\begin{aligned} E(C) &= \sum_{i=1}^{N} \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} w_{i,j}.(C(Index(i)) - C(Index(j)))^2 \\ &\quad + \lambda \sum_{l=1}^{L} (C(Index(i_l)) - c_l)^2. \end{aligned} \quad (4)$$

The solution of equation (4) is obtained by canceling $\frac{\partial E}{\partial C(k)}$. The algorithm is iterative and for each k, the $C(k)$ colors (two chrominances U and V unknown) are updated until convergence such that (detail algorithm is given on Listing 1): $\forall k \in [1, K]$,

$$\begin{aligned} N(k) &= \sum_{i|Index(i)=k} \left(\sum_{j \in \mathcal{N}(i) \text{ and } Index(j) \neq k} w_{i,j}.C(Index(j)) \right) \\ &\quad + \sum_{i|Index(i)\neq k} \left(\sum_{j \in \mathcal{N}(i) \text{ and } Index(j) = k} w_{i,j}.C(Index(i)) \right) \\ D(k) &= \sum_{i|Index(i)=k} \left(\sum_{j \in \mathcal{N}(i) \text{ and } Index(j) \neq k} w_{i,j} \right) \\ &\quad + \sum_{i|Index(i)\neq k} \left(\sum_{j \in \mathcal{N}(i) \text{ and } Index(j) = k} w_{i,j} \right) \\ C(k) &= \begin{cases} \frac{\lambda.c_l + N(k)}{\lambda + D(k)} & if\ \exists l,\ Index(i_l) = k, \\ \frac{N(k)}{D(k)} & if\ \nexists l,\ Index(i_l) = k \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

3. RESULTS AND DISCUSSION

Two *colorization attacks* have been proceeded on the color-hiding scheme of Chaumont and Puech [10]. The pirate was familiar to signal processing and had only access to the watermark image (i.e the *index* image). The two concern images are *baboon* 256×256 and *kodak-13 mountain stream* 256×384.

Figures 1.b and 2.b show colorization results obtained respectively with 5 and 6 user colors. Note that the user has been asked to choose few colors without any knowledge of the original color version. Figures 1.c and 2.c give the rebuilt

color images knowing the decoding key i.e knowing the hidden color palettes. One can note a difference between the colorized images and the rebuild images or between the palettes obtain by a colorization attack (Figures 1.e and 2.e) and the hidden palettes (Figures 1.f and 2.f).

Nevertheless, remember that the attack should produce a pleasant color version which could be print and sold. In those conditions, the visual quality of the obtained colorized images are very good. Also note that it was not asked to the user to spend time to tune its results. Those results are obtained in less than 5 tries by image which take less than 5 minutes. Improved results may have been obtained with more allocated time and with an adapted visual interface.

As it is clear that colorization attack may be potentially a security hole; counter-attack should be proposed in order to improved color-hiding watermarking schemes. An immediate solution for those watermarking scheme is to generate a watermark grey-level image which is far from the original luminance image. Other propositions have to be proposed in the future in order to improve color-hiding schemes.

4. CONCLUSION

To conclude, this paper introduces a new (indirect) attack specific to *color-hiding schemes*. This attack does not allow to retrieve the original color version of a watermark image, nevertheless a pleasant colorized image may easily be created. Future *color-hiding schemes* should then take into account this particular attack in order to be more robust.

5. REFERENCES

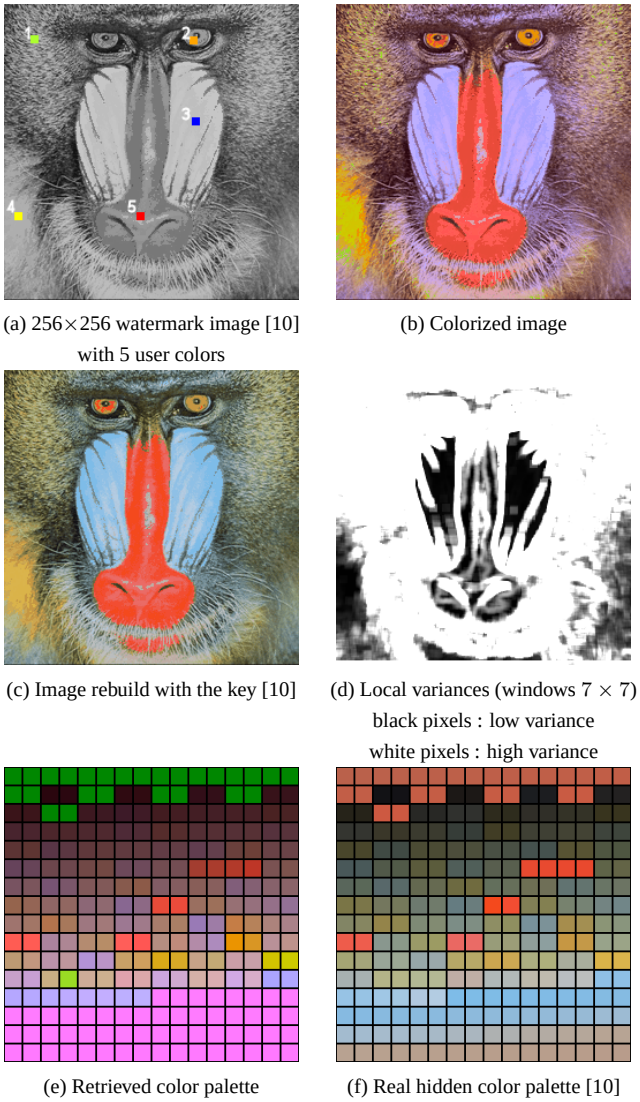
[1] G. Burns, *Colorization (The Encyclopedia of Television)*, Museum of Broadcast Communications, http://www.museum.tv/archives/etv/index.html.

[2] W. Markle and B. Hunt, "Coloring a Black and White Signal Using Motion Detection," in *Canadian patent no. 1291260*, Dec. 1987.

[3] J. Silberg, "The Pleasantville Post Production Team that Focussed on the Absence of Color," Cinesite Press Article, http://www.cinesite.com/core/press/articles/1998/10 00 98-team.html, Oct. 1998.

[4] NeuralTek, "BlackMagic Photo Colorization Software," 2003, http://www.timebrush.com/blackmagic.

[5] A. Levin, D. Lischinski, and Y. Weiss, "Colorization using Optimization," in *International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, ACM SIGGRAPH'2004*, Los Angeles, California, 2004, pp. 689–694.



(a) 256×256 watermark image [10] with 5 user colors

(b) Colorized image

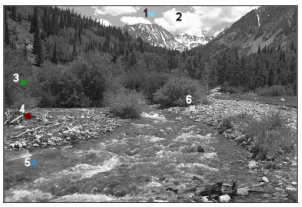
(c) Image rebuild with the key [10]

(d) Local variances (windows 7×7) black pixels : low variance white pixels : high variance

(e) Retrieved color palette

(f) Real hidden color palette [10]

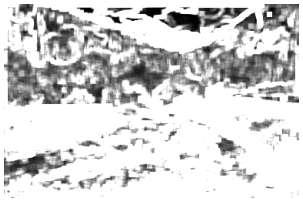
Fig. 1. Illustration of the colorization algorithm on baboon image



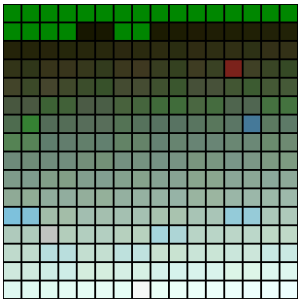
(a) 256×384 watermark image [10] with 6 user colors

(b) Colorized image

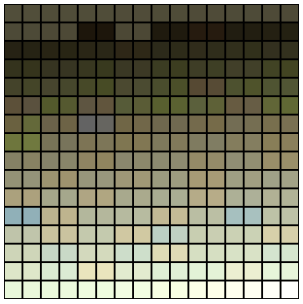
(c) Image rebuild with the key [10]



(d) Local variances (windows 7×7) black pixels : low variance white pixels : high variance



(e) Retrieved color palette



(f) Real hidden color palette [10]

Fig. 2. Illustration of the colorization algorithm on kodak-13 *mountain stream* image

Listing 1. *Colorization algorithm*

```
const Integer NBITER; // maximum number of iteration

Procedure Colorization(): Palette
begin

  Palette Cnew, Cold; // current and previous color palette

  // TAKE INTO ACCOUNT THE L USER COLORS ;
  // ∀l ∈ [1, L], Cnew(Index(i_l)) ← c_l
  init(Cnew);

  // ITERATIONS
  loop until NBITER reached or CONVERGENCE reached
  begin

    // COPY Cnew INTO Cold
    Cold ← Cnew;

    // UPDATE THE PALETTE Cnew WITH Cold KNOWLEDGE
    Apply equation 5;

    // SET IN CONFORMANCE EACH COLOR Cnew(k)
    // (U and V pixels ∈ [0, 255])
    conformance(Cnew);

  end

  // RETURN PALETTE
  return Cnew;
end
```


[6] P. Campisi, D. Kundur, D. Hatzinakos, and A. Neri, "Compressive Data Hiding: An Unconventional Approach for Improved Color Image Coding," *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol. 2002, no. 2, pp. 152–163, 2002.

[7] Y. Zhao, P. Campisi, and D. Kundur, "Dual Domain for Authentication and Compression of Cultural Heritage Images," *IEEE Transaction on Image Processing*, vol. 13, no. 3, pp. 430–448, 2004.

[8] R. de Queiroz and K. Braun, "Color to Gray and Back: Color Embedding Into Textured Gray Images," *IEEE Transaction on Image Processing*, vol. 15, no. 6, pp. 1464–1470, 2006.

[9] M. Chaumont and W. Puech, "A Fast and Efficient Method to Protect Color Images," in *IS&T/SPIE 19th Annual Symposium on Electronic Imaging, Visual Communications and Image Processing, VCIP2007, SPIE2007*, San Jose, California, USA, Jan. 2007, vol. 6508.

[10] M. Chaumont and W. Puech, "A Grey-Level Image Embedding its Color Palette," in *IEEE International Conference on Image Processing, ICIP'2007*, San Antonio, Texas, USA, Sept. 2007.

[11] J. Shi and J. Malik, "Normalized Cuts and Image Segmentation," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, no. 8, pp. 888–905, 2000.

3D-Face Model Tracking Based on a Multi-Resolution Active Search

Chaumont M. and Puech W.

Laboratory LIRMM, UMR CNRS 5506, University of Montpellier II
161, rue Ada, 34392 MONTPELLIER CEDEX 05, FRANCE

ABSTRACT

This paper deals with face tracking in difficult conditions of non calibrated camera, strong head motions, thanks to a deformable 3D model. In those conditions, the proposed approach is able to detect and track a face. The novelty is mainly due to a multi-resolution Active Model search which allows to catch strong head motions. Results show an improvement between the single and the multi-resolution technique. Near real-time results are also provided.

Keywords: Multi-Resolution Active Model Search, 3D Face Tracking, Uncalibrated Camera, Near Real-Time.

1. INTRODUCTION

This paper deals with face tracking in video sequences with the used of a deformable 3D face-model. Current problems in face tracking are real-time constraint and the lack of robustness to luminosity variations, occlusions, fast motions and strong rotations. In this paper we focus especially on the fast motions, the strong rotations and the real-time problems. Our approach lies on a multi-resolution Active Model search (AM search). The novelties of our approach are the multi-resolution Active Model search and the near real-time performances.

In this paper we are limiting the test to an Active Model (AM) instead of an Active Appearance Model (AAM) as Dornaika and Ahlberg.[1] We do not then learn any texture modes variations. Our paper bring an improvement to Active Appearance Model approach[2] (the multi-resolution) but for the experiments and the approach justification we do not need to use the property of variation on textures and then we do not use a complete AAM approach. Additional improvements to the AAM approach, proposed in this paper, are the use of a 3D model and the illustration, trough a complete implementation, that our face tracking solution is near real-time.

In comparison to La Cascia *et al*[3] approach we use a deformable model which is richer than their rigid cylindrical model. Our model's deformations are proceeded directly during the tracking which gives additional informations about the face animation.

In comparison to 3D Model based tracking using an rigid model[4] and a offline camera calibration, our tracking results are good despite no previous calibration. Our technique may thus be used for video sequences where camera characteristics are not known. Moreover, our approach allows a 3D model deformation. Some idea may nevertheless be catch from those matching points techniques. Indeed, as explain in,[4] jitter and drift during tracking may be drastically reduced by using bundle adjustment and small number of matching points.

Lets also note that statistical approaches (particule filtering) give promising solutions. The probabilistic approaches provide better robustness to occlusions and could easily be added to deformable 3D model.[5] The main problem of those solutions are their high CPU consuming time which make them unsuited for real-time applications.

Briefly, the first aim of this paper is to study the interest of *multi-resolution Active Model search* in the case of a tracking using a 3D-deformable face model in order to be more robust to strong motions. The second aim is to illustrate the real-time feasibility of approaches using a rough 3D deformable model. This paper is composed of two parts: the offline learning step (Section 2) where the pre-processing computations are explained and the tracking step (Section 3) where the *multi-resolution Active Model search* is analysed.

marc.chaumont@lirmm.fr; phone: +33 (0)4 67 41 85 14; william.puech@lirmm.fr; phone: +33 (0)4 67 41 86 85

2. OFFLINE LEARNING STEP

During the offline learning step the objective is to learn for a given person its specific 3D shape (Section 2.1), its specific texture (Section 2.2) and its specific update matrix (Section 2.3). Figure 1 shows the **shaped** 3D-face model and its associated texture obtained after the offline learning step. Note that this offline learning step may easily be extend to an AAM learning where a face data-base would have been used.[1] More details on shape learning and texture learning may be found in.[6]

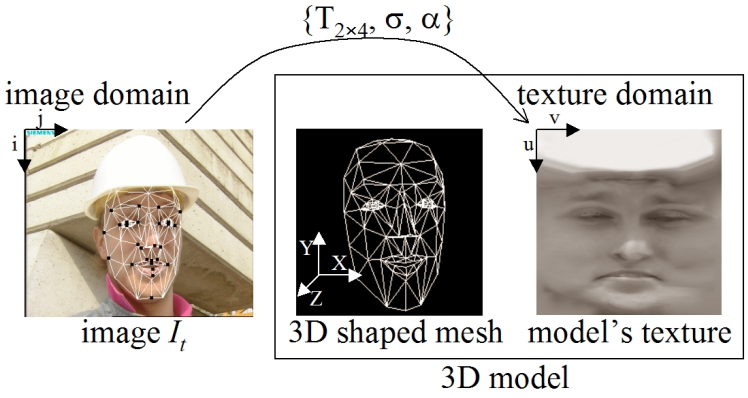


Figure 1. 3D shaped mesh and model's texture.

2.1. Shape learning

In order to learn the 3D shape of a specific person to track, we are using as input some 2D face feature points. The 2D feature points may be set manually or obtained thanks to an automatic approach.

A 3D-face model (CANDIDE-3[7]) is then deformed in order to best fit the 2D feature points. This deformation is proceed thanks to the minimization of the distance error E between the input set of 2D feature points $\{(u_i, v_i)^t\}$ and a set of 2D points $\{(u'_i, v'_i)^t\}$:

$$E = \sum_i (u_i - u'_i)^2 + (v_i - v'_i)^2. \tag{1}$$

The set of 2D points $\{(u'_i, v'_i)^t\}$ is obtained by applying on 3D vertex three linear operations: a shape deformation $(S_i.\sigma)$, an animation displacement $(A_i.\alpha)$ and a week perspective projection* $(T_{2\times4})$ as expressed in the following equation:

$$\begin{pmatrix} u'_i \\ v'_i \end{pmatrix} = T_{2\times4}.[\underbrace{A_i.\alpha + S_i\sigma + M_i}_{M'_i}], \tag{2}$$

where S_i and and A_i are respectively the shape unit and the animation unit matrix, expressing the possible displacement of a vertex i. The displacement intensity is expressed by the weighting vectors σ and α. Equation 1 minimization gives parameters $T_{2\times4}$, σ, and α. Parameters $T_{2\times4}$ and σ are then used to deform the average 3D model and thus learn the specific face shape. More details on the minimization and the underlining hypothesis are given in.[6]

2.2. Texture learning

For an easier intelligibility we will name the image map: the *image domain* and the texture map: the *texture domain*. Once the 3D-model is shaped and the $T_{2\times4}$ pose is obtained (Section 2.1), the texture may be learned. This learning step is a simple warping procedure. The 3D mesh is projected onto the 2D image map in order to

*The week perspective projection is also known as orthographic projection, graduate orthographic projection or affine projection.

give a 2D mesh in the image domain. The same process is done to obtained a 2D mesh in the texture domain. Then, each texture triangle from the 2D mesh of the image domain is warped to the corresponding triangle in the texture domain.

Lets note that the warping process needs two computational costly informations for each pixel: its associated triangle, and its three barycenter coefficients. Those informations are computed offline and do not change during the tracking process (indeed, the 2D mesh in the texture domain do not move). This pre-processing allows to pass of any 3D graphics card for image warping since it enables faster processing during the tracking step.[8]

2.3. Update matrix learning

Thus, once the texture, the 3D shape and the 3D pose are known, one compute the update matrix used for the tracking.

2.3.1. Single-resolution

During the tracking the objective is to project as well as possible the 3D model onto the image map in order to minimize the intensity difference computed between image I_t and projected model's texture. Without high lost of precision, one prefer minimizing the difference between the warped image[†] $W(I_t)$ and the model's texture I_m (Equ. 3.). This choice is done for real-time reason. Indeed, during the tracking step, the warping computation from image domain to texture domain is faster than the inverse warping due to offline pre-processed computation during texture learning (described in Section 2.2).

$$E(p) = ||r(p)||^2 = ||W(I_t) - I_m||^2. \tag{3}$$

Parameter p involved in minimization of Equ. (3) is composed of the animation vector (α) and the pose matrix ($T_{2\times4}$) (see Section 2.1). A first order Taylor expansion gives:

$$r(p + \Delta p) = r(p) + \frac{\delta r(p)}{\delta p}\Delta p.$$

During the model fitting, we wish to minimize the equation $||r(p + \Delta p)||^2$. So we are looking for the Δp which minimizes this equation. The solution of this least square problem is to choose Δp such that:

$$\begin{aligned} \Delta p &= U.r(p), \\ with\ U &= -(G^T G)^{-1} G^T, \\ and\ G &= \frac{\delta r(p)}{\delta p}. \end{aligned}$$

The update U matrix may be processed offline before the tracking. This update matrix is known as the negative pseudo-inverse of the gradient matrix G[‡]. G is computed by numeric differentiation such that the jth column of G is estimated with:

$$G_j = \frac{r(p + hq_j) - r(p - hq_j)}{2h},$$

where h is a disturbance value and q_j is a vector with all elements zero except the jth element that equals to one.

[†]The warping operation (image domain to texture domain) only transforms visible triangles. Hidden triangle regions in the texture domain will not be taken into account in the gradient descent computation ($r(p)$ equals zero in those regions).

[‡]G is a high dimension matrix. The number of lines is the number of parameters p, and the number of columns is the number of pixels.

2.3.2. Multi-resolution

With a single-resolution approach, the face target is lost when there is a strong head motion. To overcome that problem, we have chosen to use a multi-resolution tracking similarly to multi-resolution motion estimation.[9] The multi-resolution approaches allow to keep valid the linear hypothesis near to the solution. Thus, multi-resolution pyramids are built (an image pyramid, a model's texture pyramid and 2D mesh pyramids). A U_{r_i,r_t} matrix is then computed for each couple (r_i, r_t) where r_i is a given image resolution and r_t is a given texture resolution. Figure 2 shows few (r_i, r_t) possible couples.

During the tracking step, the low resolutions allow to catch strong motions (parameter p is roughly estimated) and high resolutions allow to catch motion details (parameter p is refine). Lets remark that experiments show that low resolutions are only of interest for the pose computation (and not for the facial animations) and that texture size should be similar to face-region size.

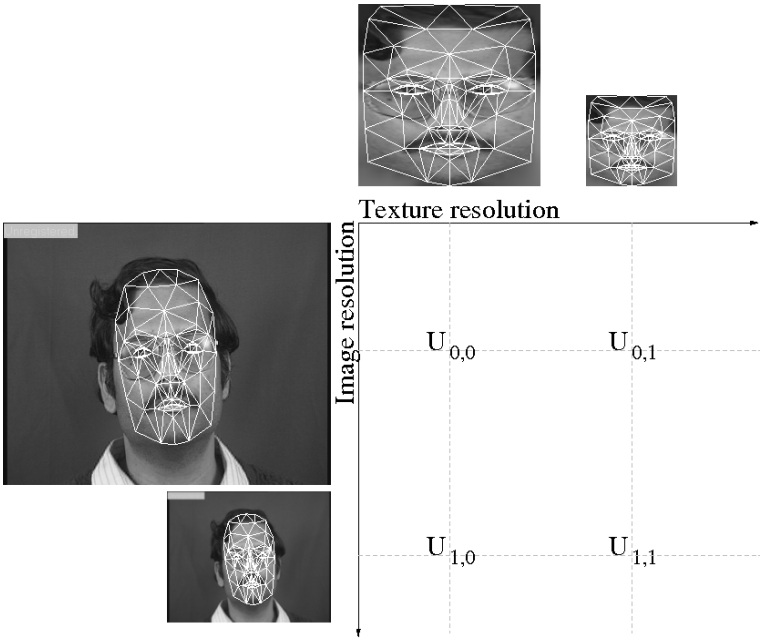


Figure 2. Multi-resolution matrix computations

3. TRACKING: ACTIVE MODEL SEARCH

3.1. Initialisation: face localization

In the case of face tracking, the face localization is in general a difficult problem.[10] Even with a full implementation of an AAM approach one should initialized the 3D-face model pose relatively close to the solution. In the case of frontal view, many solutions have been proposed and the best results seem to be obtained by methods using a previous learning and a complete image scan (Neural Network, Hidden Markov Model, Support Vector Machine, Naive Bayes Classifier ...). We have then chosen to use one of this technique to localize the face.[11]

3.2. Active Model Search

After the face localization, the Active Model search is proceeded by the multi-resolution gradient descent. For each *valid* couple (r_i, r_t), the 3D model is iteratively updated until convergence or until a fixed number of iterations. The Active Model search algorithm is composed of four steps:

- Projection of the current image at resolution r_i into the texture domain at resolution r_t (knowing the current 3D model pose and its animation),

- Computation of the residue $r(p)$ of Equ. (3),
- Computation of the update parameter vector: $\Delta p = U_{r_i,r_t} \times r(p)$,
- Modification of the 3D model and its pose such that $p = p + \Delta p$.

The *valid* couples (r_i, r_t) used for the multi-resolution Active Model search are the *diagonal couples* (see the coordinate system on Figure 2) and the run goes from low resolutions to high ones. This scan choice allows to catch strong motions and is well fit for real-time constraint.

Lets remark that lots of computation are processed offline. Online computations are the image pyramid building, the 3D mesh projections, the images warpings (with the used of pre-processed accelerators), the image differences, the matrix products and the 3D model updates. Actually, the costly operations are the matrix products.

4. RESULTS

Tracking results are shown on two sequences. The sequence named *rotation* (30Hz, 360×288), comes from the M2VTS data-base and shows a person rotating the head and owning glasses. The second sequence named *erik* (CIF, 10Hz) shows a spoken person with lots of facial expressions and head motions. Below, the different steps of our multi-resolution face tracker are illustrated and commented.

For the first image, a face localization as to be proceeded. Remember that this may also be necessary with a complete AAM implementation. Figure 3 shows the result of a face localization, on the first image of the *rotation* sequence, by using a face detector.[11] The grey bounding box shows the face localization. Thanks to this bounding box, one deduce few 2D facial feature points and one minimize Equ. 1 in order to obtain an initial pose $T_{2\times4}$.[6] The mesh (in white) represents the results of the 3D mesh projection obtained after this initial pose processing. Once this rough initialization as been computed, one run the multi-resolution active search (see Section 2.3.2), on this first image, in order to best fit in the 3D-face model.

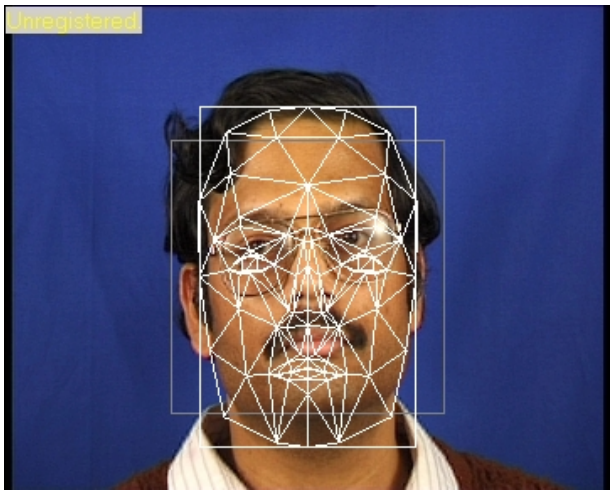
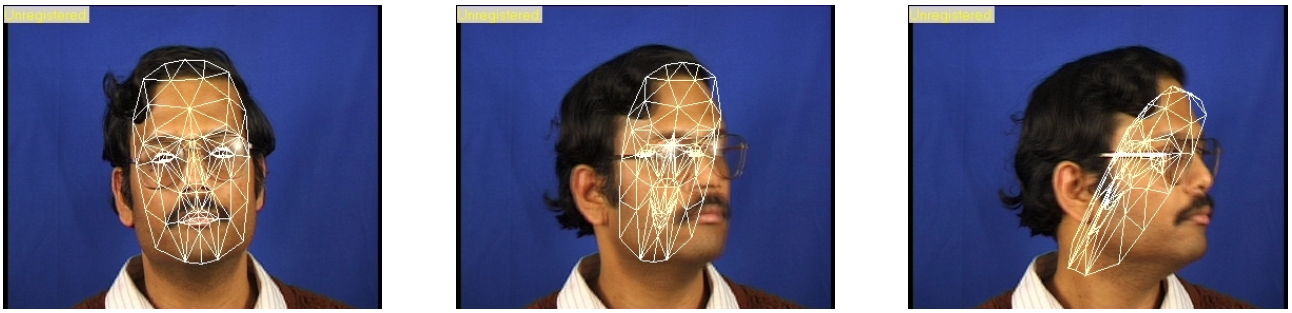


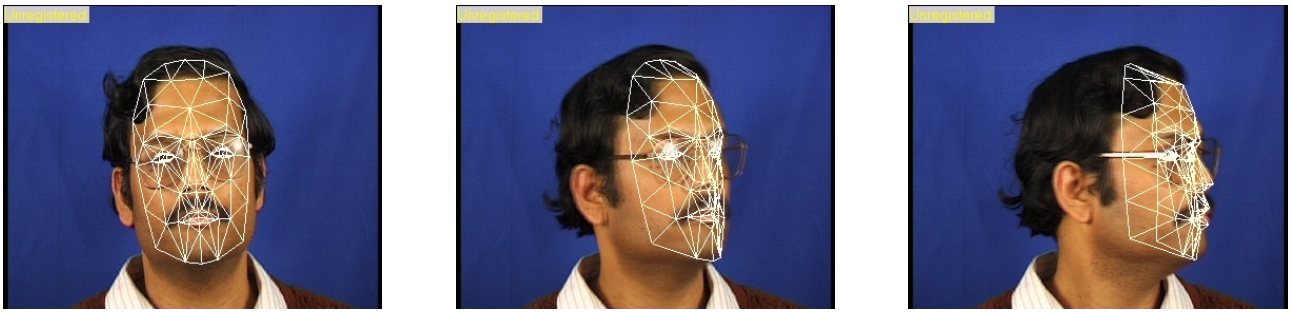
Figure 3. Localization of the face and rough model pose deduction

Figures 4 and 5 show the tracking results on few images. One see on the *rotation* sequence that the multi-resolution approach performs better results than the single-resolution approach. Indeed, there is a strong head motion in this sequence and the linearisation hypothesis is no more valid for the single-resolution approach. For the *erik* sequence, one observe that even if the face region is small, the facial expressions are well recovered. One should remark that those results are obtained without any previous camera calibration.

Images 3, 8 and 13 of the *rotation* sequence.



(a) Tracking **without multi-resolution** search; Images 3, 8 and 13 of the *rotation* sequence.

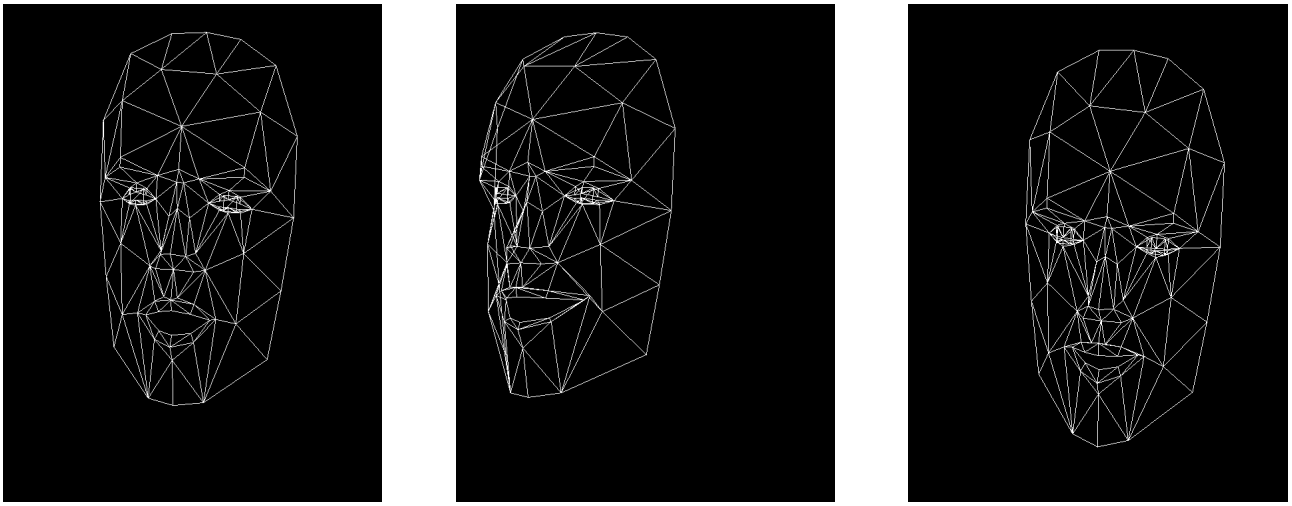


(b) Tracking **with multi-resolution** search; Images 3, 8 and 13 of the *rotation* sequence.

Figure 4. Comparison between a tracking with or without a multi-resolution search.

Images 3, 13 and 25 of the *erik* sequence.

Tracking **with multi-resolution** search; Images 3, 13 and 25 of the *erik* sequence.



3D Mesh for images 3, 13 and 25 of the *erik* sequence.

Figure 5. Illustration of multi-resolution tracking on *erik* sequence.

A software platform for web-cam acquisition, face tracking and screen displaying has been implemented using OpenCV library. Experimental conditions where a texture-image of size 100×100, two levels of resolution, four iterations (resp. seven iterations) for resolution one (resp. resolution zero), non-natural desktop light conditions, and an Intel Pentium 2.4 GHz. With those difficult lighting conditions, the tracking have been released at 8Hz. One should note that this low frequency is due to the high texture-image size and to a non fully optimized code. A way to increase this frequency would be to decrease the texture-image size (40×40 is used in[7]) but results are less robust. Another solution would be to reduce the update matrix dimension (see Section 2.3.1) or to use local descriptors[12] instead of luminance information.

5. CONCLUSION

In this paper we proposed a face tracker based on a deformable 3D model catching facial expressions. The tracking is proceeded by a multi-resolution Active Model search (gradient descent). The novelties are the multi-resolution approach and the experimental proof of real-time possibilities. Results show an improvement of the tracking in the case of strong motions, the possibility to catch facial expressions even with small face-regions and an evaluation of real-time possibilities. Future works will deal with discriminant local descriptors, matrix dimension reduction and with statistical approach such as particle filtering.

REFERENCES

1. F. Dornaika and J. Ahlberg, "Fast and Reliable Active Appearance Model Search for 3D Face Tracking," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics–Part B: Cybernetics* **34**, pp. 1838–1853, Aug. 2004.
2. T.F.Cootes, G. Edwards, and C. Taylor, "Active Appearance Models," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI'2001* **23**, pp. 681–685, June 2001.
3. M. L. Cascia, S. Sclaroff, and V. Athitsos, "Fast, Reliable Head Tracking Under Varying Illumination: An Approach Based on Registration of Texture-Mapped 3D Models," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI'2000* **22**, pp. 322–336, Apr. 2000.
4. L. Vacchetti, V. Lepetit, and P. Fua, "Stable Real-Time 3D Tracking Using Online and Offline Information," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI'2004* **26**, pp. 1385–1391, Oct. 2004.
5. F. Dornaika and F. Davoine, "Simultaneous Facial Action Tracking and Expression Recognition Using a Particle Filter," *IEEE International Conference on Computer Vision, ICCV'2005* , pp. 1838–1853, Aug. 2005.
6. M. Chaumont and B. Beaumesnil, "Robust and Real-Time 3D-Face Model Extraction," in *IEEE International Conference on Image Processing, ICIP'2005*, pp. 461–464, Sept. 2005.
7. J. Ahlberg, "CANDIDE-3 - Un Updated Parameterised Face," tech. rep., Department of Electrical Engineering, Linköping University, Jan. 2001.
8. J. Ahlberg, "Real-Time Facial Feature Tracking Using an Active Model With Fast Image Warping," in *International Workshop on Very Low Bitrate Video, VLBV'2001*, pp. 39–43, Oct. 2001.
9. S. Pateux, G. Marquant, and D. Chavira-Martinez, "Object Mosaicking via Meshes and Crack-Lines Technique. Application to Low Bit-Rate Video Coding," in *Picture Coding Symposium, PCS'2001*, (Seoul, Korea), Apr. 2001.
10. M.-H. Yang, D. Kriegman, and N. Ahuja, "Detecting Faces in Images: A Survey," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, PAMI'2002* **24**, pp. 34–58, Jan. 2002.
11. R. Lienhart and J. Maydt, "An Extended Set of Haar-like Features for Rapid Object Detection," in *IEEE International Conference on Image Processing, ICIP'2002*, pp. 900–903, Sept. 2002.
12. I.M.Scott, T.F.Cootes, and C. Taylor, "Improving Appearance Model Matching Using Local Image Structure," in *Information Processing in Medical Imaging, IPMI'2003*, pp. 258–269, July 2003.

Image watermarking schemes, watermarking schemes jointly to compression, data-hiding schemes.

Abstract

In this manuscript we address data-hiding in images and videos. Specifically we address robust watermarking for images, robust watermarking jointly with compression, and finally non robust data-hiding.

The first part of the manuscript deals with high-rate robust watermarking. After having briefly recalled the concept of informed watermarking, we study the two major watermarking families : trellis-based watermarking and quantized-based watermarking. We propose, firstly to reduce the computational complexity of the trellis-based watermarking, with a rotation based embedding, and secondly to introduce a trellis-based quantization in a watermarking system based on quantization.

The second part of the manuscript addresses the problem of watermarking jointly with a JPEG2000 compression step or an H.264 compression step. The quantization step and the watermarking step are achieved simultaneously, so that these two steps *do not fight* against each other. Watermarking in JPEG2000 is achieved by using the trellis quantization from the part 2 of the standard. Watermarking in H.264 is performed on the fly, after the quantization stage, choosing the best prediction through the process of rate-distortion optimization. We also propose to integrate a Tardos code to build an application for traitors tracing.

The last part of the manuscript describes the different mechanisms of color hiding in a grayscale image. We propose two approaches based on hiding a color palette in its index image. The first approach relies on the optimization of an energetic function to get a decomposition of the color image allowing an easy embedding. The second approach consists in quickly obtaining a color palette of larger size and then in embedding it in a reversible way.

Key words

Watermarking schemes, Dirty Paper Trellis Code, Rotation based embedding, Perceptual QIM, TCQ : Trellis Coded Quantization, H.264, JPEG2000, Color quantization, Color hiding, Color palette.

Schémas de tatouage d'images, schémas de tatouage conjoint à la compression, schémas de dissimulation de données.

Résumé

Dans ce manuscrit nous abordons l'insertion de données dans les images et les vidéos. Plus particulièrement nous traitons du tatouage robuste dans les images, du tatouage robuste conjointement à la compression et enfin de l'insertion de données (non robuste).

La première partie du manuscrit traite du tatouage robuste à haute capacité. Après avoir brièvement rappelé le concept de tatouage informé, nous étudions les deux principales familles de tatouage : le tatouage basé treillis et le tatouage basé quantification. Nous proposons d'une part de réduire la complexité calculatoire du tatouage basé treillis par une approche d'insertion par rotation, ainsi que d'autre part d'introduire une approche par quantification basée treillis au sein d'un système de tatouage basé quantification.

La deuxième partie du manuscrit aborde la problématique de tatouage conjointement à la phase de compression par JPEG2000 ou par H.264. L'idée consiste à faire en même temps l'étape de quantification et l'étape de tatouage, de sorte que ces deux étapes ne « luttent pas » l'une contre l'autre. Le tatouage au sein de JPEG2000 est effectué en détournant l'utilisation de la quantification basée treillis de la partie 2 du standard. Le tatouage au sein de H.264 est effectué à la volée, après la phase de quantification, en choisissant la meilleure prédiction via le processus d'optimisation débit-distorsion. Nous proposons également d'intégrer un code de Tardos pour construire une application de traçage de traîtres.

La dernière partie du manuscrit décrit les différents mécanismes de dissimulation d'une information couleur au sein d'une image en niveaux de gris. Nous proposons deux approches reposant sur la dissimulation d'une palette couleur dans son image d'index. La première approche consiste à modéliser le problème puis à l'optimiser afin d'avoir une bonne décomposition de l'image couleur ainsi qu'une insertion aisée. La seconde approche consiste à obtenir, de manière rapide et sûre, une palette de plus grande dimension puis à l'insérer de manière réversible.

Mots clés

Schémas de tatouage d'images, Dirty Paper Treillis Code, Insertion basée rotation, Perceptual QIM, TCQ : Quantification Codée par Treillis, H.264, JPEG2000, Quantification couleur, Dissimulation de la couleur, Palette de couleurs.