

RAPPORT

Travaux antérieurs

Simon RIT

Résumé

Mes travaux de recherche peuvent être séparés en trois périodes distinctes.

La première période est mon stage de DEA DISIC option Image sur l'*Analyse d'une séquence d'images par contraste spatio-temporel*. Ce travail a été effectué au Laboratoire d'InfoRmatique en Image et Systèmes d'information (LIRIS) à l'INSA de Lyon sous la direction de Jean-Michel Jolion.

La deuxième période est ma thèse, qui portait sur la *Prise en compte du mouvement respiratoire pour la reconstruction d'images tomodensitométriques*. Ce travail a été effectué au LIRIS à l'Université Lumière Lyon 2 sous la direction de Serge Miguet et David Sarrut.

La troisième période, toujours en cours, est mon post-doctorat sur la recherche de méthodes adéquates pour l'utilisation clinique de la compensation du mouvement respiratoire en tomodensitométrie. Ce travail est effectué au Nederlands Kanker Instituut à Amsterdam (Pays-Bas) sous la responsabilité de Jan-Jakob Sonke et Marcel van Herk.

Ce document résume ces travaux par ordre chronologique

Sommaire

1	Stage de DEA (Mars 2004 - Juin 2004)	2
2	Thèse (Oct. 2004 - Sept. 2007)	3
2.1	Extraction du signal respiratoire à partir de projections coniques	4
2.2	Reconstruction d'images TDM à partir d'une sélection de projections coniques	5
2.3	Reconstruction d'images TDM avec compensation du mouvement	6
2.4	Imagerie TDM 4D du thorax sur scanner conventionnel	7
3	Post-doc (Depuis Oct. 2007)	8
4	Annexes	9

1 Stage de DEA (Mars 2004 - Juin 2004)

<i>Lieu du stage</i>	Laboratoire LIRIS, INSA de Lyon
<i>Intitulé du DEA</i>	DEA Documents Multimédia Images et Systèmes d'Information Communicants
<i>Option</i>	Image
<i>Classement</i>	2 ^{ème} , mention Bien
<i>Sujet de stage</i>	Analyse d'une séquence d'images par contraste spatio-temporel
<i>Directeur</i>	Jean-Michel JOLION

L'avènement de la vidéo et l'augmentation des capacités de traitement des ordinateurs pousse aujourd'hui la recherche en traitement du signal à proposer de nouvelles méthodes de traitement spatio-temporel des séquences d'images. En s'inspirant des opérateurs spatiaux existants qui ont fait leurs preuves, on peut dégager de nouveaux opérateurs spatio-temporels pour le traitement des vidéos.

Mon travail a consisté à proposer plusieurs opérateurs spatio-temporels pour l'analyse d'une séquence d'images par le contraste à partir de la méthode de Jolion sur l'analyse spatiale multi-résolution d'images par le contraste. Cette méthode consiste à construire une pyramide de contrastes pour que le processus de réhaussement du contraste se fasse en tenant compte du voisinage local et global. J'ai dégagé différentes solutions dans l'optique de tenir compte de l'hétérogénéité entre les dimensions spatiales et la dimension temporelle tout en conservant les propriétés intéressantes de la méthode de Jolion. Celles-ci empruntent différentes voies, dont les extrêmes sont des traitements spatiaux et temporels purs (figure 1.1), et les intermédiaires s'attachent à tenir compte des deux.



FIG. 1.1 – Illustration des travaux de DEA. A gauche, une image d'une séquence représentant une personne en mouvement sur un fond fixe. Au milieu, l'image correspondante dans le temps après binarisation avec l'opérateur purement temporel. A droite, l'image correspondante dans le temps après binarisation avec l'opérateur purement spatial.

Publication associée (1 rapport)

S. RIT : Analyse d'une séquence d'images par contraste spatio-temporel. Mémoire de D.E.A., Institut National des Sciences Appliquées (INSA), 2004.

2 Thèse (Oct. 2004 - Sept. 2007)

<i>Lieu</i>	Université Lumière Lyon 2 – Laboratoire LIRIS	
<i>Titre de la thèse</i>	Prise en compte du mouvement respiratoire pour la reconstruction d'images tomodensitométriques	
<i>Directeurs</i>	Serge MIGUET et David SARRUT	
<i>Soutenue</i>	le 21 septembre 2007	
<i>Mention</i>	Très honorable avec félicitations	
<i>Jury</i>		
<i>rapporteur</i>	Isabelle BLOCH	Professeur
<i>rapporteur</i>	Pierre GRANGEAT	Directeur de recherche CEA
<i>président</i>	Grégoire MALANDAIN	Directeur de recherche INRIA
<i>examineur</i>	Isabelle MAGNIN	Directrice de recherche INSERM
<i>examineur</i>	Marcel VAN HERK	Professeur
<i>directeur</i>	Serge MIGUET	Professeur
<i>co-directeur</i>	David SARRUT	Maître de conférences

J'ai effectué ma thèse à l'université Lumière Lyon 2 sous la direction de Serge Miguet et David Sarrut. Mon laboratoire de rattachement était le Laboratoire d'InfoRmatique en Image et Systèmes d'information (LIRIS), axe *Images et Vidéos : segmentation et extraction d'information*, équipe *imagine : Extraction de Caractéristiques et Identification*. La thèse était financée par un contrat CIFRE avec la société Elekta SA. Elle se déroulait au sein du département de radiothérapie du Centre Léon Bérard, dans le groupe *Rayonnement, Images, Oncologie*¹.

L'ensemble des contributions avait pour application les images tomodensitométriques (TDM) qui représentent la carte 3D des coefficients d'atténuation linéaire d'un faisceau de rayons X. Elles sont obtenues par reconstruction à partir de projections acquises sous différentes incidences autour du patient supposé statique. Si le patient respire et le mouvement n'est pas pris en compte, les images TDM du thorax sont perturbées par d'importants artefacts, tels que du flou, des traits et des bandes.

Mes travaux de recherche ont consisté à proposer des méthodes de correction et à les appliquer dans le cadre de la radiothérapie du cancer des poumons, à partir de séquences de projections acquises en salle de traitement par un faisceau à géométrie conique embarqué sur un accélérateur linéaire. Je résume ici mes principaux axes de recherche.

¹Site web : <http://www.creatis.insa-lyon.fr/rio/>

2.1 Extraction du signal respiratoire à partir de projections coniques

Le mouvement respiratoire est un mouvement complexe généralement modélisé en première approximation par un mouvement cyclique. La position du patient dans le cycle respiratoire, également appelée phase respiratoire, est alors donnée par un signal unidimensionnel appelé signal respiratoire. Ce signal permet de corrélérer le mouvement pendant une séquence donnée à un modèle du cycle respiratoire.

Ce signal respiratoire est généralement acquis à partir d'un appareil externe (spiromètre, capteur optique, etc...) qui doit être synchronisé à l'acquisition. Pour se passer de l'utilisation d'un tel appareil, nous avons proposé une méthode d'extraction automatique du signal respiratoire à partir des projections coniques. La méthode proposée extrait le mouvement observé sur les projection coniques à partir d'un algorithme de suivi de blocs. Les trajectoires extraites sont alors combinées pour en déduire le signal respiratoire pendant la durée de l'acquisition des projections coniques.

La méthode proposée a été validée sur données simulées et réelles. Par la suite, elle a été utilisée pour l'application sur données patient des deux méthodes de reconstruction décrites ci-dessous.

Publications associées (2 conférences internationales, 2 conférences nationales)

- S. RIT, D. SARRUT et C. GINESTET : Respiratory signal extraction for 4D CT imaging of the thorax from cone-beam CT projections. *In Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*, volume 3749, pages 556–563, Palm Springs, USA, 2005a.
- S. RIT, D. SARRUT et C. GINESTET : Respiratory signal extraction for 4D CT imaging of the thorax from cone-beam CT projections. *In Proceedings of the 47th Annual ASTRO Meeting*, pages S533–S534, 2005b.
- S. RIT, D. SARRUT, V. BOLDEA et C. GINESTET : Extraction du signal respiratoire à partir de projections cone-beam du thorax pour l'imagerie TDM 4D en radiothérapie. *In Journées Scientifiques de la Société Française de Physique Médicale (SFPM)*, Avignon, France, 2005c.
- S. RIT, D. SARRUT, V. BOLDEA et C. GINESTET : Extraction du signal respiratoire à partir de projections cone-beam du thorax pour l'imagerie TDM 4D en radiothérapie. *In Congrès de la Société Française de Radiothérapie Oncologique (SFRO)*, Paris, France, 2005d.

2.2 Reconstruction d'images TDM à partir d'une sélection de projections coniques

La prise en compte du mouvement respiratoire dans la reconstruction d'images TDM peut s'appuyer sur la périodicité du mouvement respiratoire pour se ramener au cas statique. En effet, si le mouvement est exactement périodique, le patient retrouve régulièrement la même position. On peut alors sélectionner les projections correspondant à une même phase du cycle respiratoire pour reconstruire l'image TDM 3D de cette phase. En répétant l'opération pour chaque phase, on obtient une image TDM 4D représentant le cycle respiratoire du patient.

Dans ma thèse, j'ai mené une étude quantitative pour évaluer les paramètres de reconstruction optimaux étant donnés un jeu de projections coniques et un signal respiratoire associé. A partir des résultats de cette étude et du signal respiratoire extrait des projections coniques, nous avons pu réaliser les premières images TDM 4D sur fantôme et patient (figure 2.1).

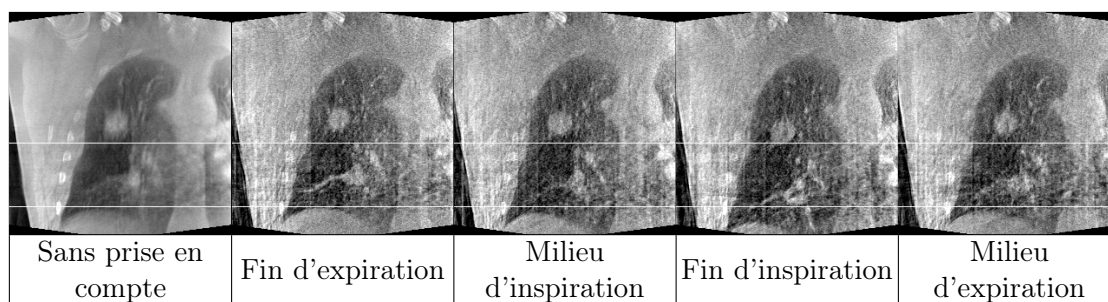


FIG. 2.1 – Coupes coronales des images d'un patient reconstruites à partir d'une même séquence de projections coniques du patient en respiration libre, avec toutes les projections (reconstruction statique) ou une sélection de projections. Les traits horizontaux blancs ont été ajoutés pour observer le mouvement de la tumeur et du diaphragme.

Publications associées (1 journal national, 2 conférences internationales)

- S. RIT, D. SARRUT, V. BOLDEA et C. GINESTET : Extraction du signal respiratoire à partir de projections cone-beam. *Traitement du signal*, 23(3-4):307-319, 2006.
- S. RIT, D. SARRUT et S. MIGUET : Gated cone-beam CT imaging of the thorax : a reconstruction study. *In SPIE Medical Imaging*, volume 6510, San Diego, California, USA, 2007a.
- S. RIT, D. SARRUT et C. GINESTET : Comparison of gated and dynamic cone-beam CT reconstruction methods. *In International Conference on the Use of Computers in Radiation Therapy (ICCR)*, Toronto, Canada, 2007b.

2.3 Reconstruction d'images TDM avec compensation du mouvement

La qualité des images TDM 4D est limitée par le faible nombre de projections coniques utilisé pour la reconstruction de chacun de ses instants. Nous nous sommes donc intéressés aux méthodes de reconstruction qui utilisent toutes les projections mais compensent le mouvement pendant la reconstruction. Deux méthodes différentes ont été proposées.

La première méthode est une adaptation locale et heuristique de la méthode analytique de Feldkamp, Davis et Kress. Elle améliore significativement les résultats par rapport à la méthode précédente mais ne corrige qu'en partie les artefacts de traits et bandes.

La seconde méthode est une méthode algébrique (*Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique*) qui résout un système d'équations traduisant la nature discrète des données utilisées. Dans un premier temps, nous avons proposé deux nouvelles méthodes pour projeter un volume numérique déformable et construire le système d'équation. Dans un second temps, nous avons comparé les résultats obtenus à la méthode analytique et nous avons observé que, au contraire de la méthode analytique, la méthode algébrique corrige significativement les artefacts dus au mouvement (figure 2.2).

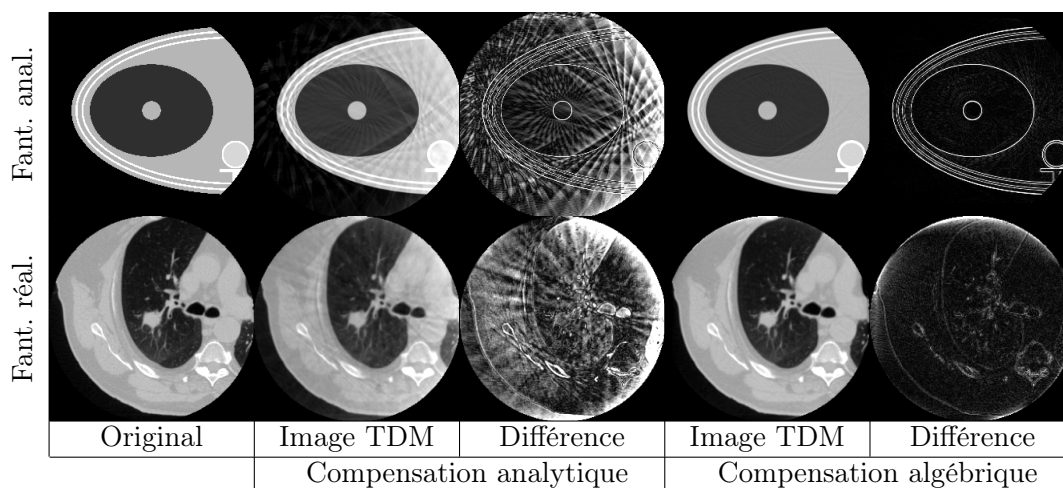


FIG. 2.2 – Comparaison des coupes axiales au niveau de la tumeur de l'image originale des deux fantômes numériques et des images reconstruites avec compensation du mouvement par une méthode analytique heuristique et une méthode algébrique.

Publications associées (1 journal international, 2 conférences internationales)

- S. RIT, D. SARRUT et L. DESBAT : Comparison of analytic and algebraic methods for motion-compensated cone-beam CT reconstruction of the thorax. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, In press.
- S. RIT et D. SARRUT : Cone-beam projection of a deformable volume for motion compensated algebraic reconstruction. *In Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, volume 2007, pages 6544–6547, Lyon, France, 2007.
- L. DESBAT, S. RIT, R. CLACKDOYLE, C. MENNESSIER, E. PROMAYON et S. NTALAMPEKI : Algebraic and analytic reconstruction methods for dynamic tomography. *In IEEE Engineering in Medicine and Biology Conference (EMBC)*, pages 726–730, Lyon, France, 2007.

2.4 Imagerie TDM 4D du thorax sur scanner conventionnel

Avec David Sarrut, j'ai co-encadré Elsa Giroud et Emel Chaieb dans le cadre de leur stage de 2ème année du Master Ingénierie pour la Santé de l'Université Claude Bernard Lyon 1. Leur sujet portait sur l'acquisition d'images TDM 4D sur un scanner conventionnel non prévu à cet effet.

Dans un premier temps, nous avons proposé un système d'acquisition du signal respiratoire. Le système consistait en une baguette visible sous la forme d'un point sur chaque coupe scanner. Des méthodes de traitement d'images ont alors été élaborées pour extraire automatiquement la position de ce point de coupes en coupes. La trajectoire ainsi obtenue a été traitée pour en déduire le signal respiratoire.

Dans un deuxième temps, nous avons évalué différents protocoles d'acquisition pour optimiser la qualité des images TDM 4D. Ces travaux de recherche ont permis l'optimisation des protocoles d'acquisition d'images TDM 4D au centre de lutte contre le cancer Léon Bérard.

Publication associée (1 conférence nationale)

E. CHAIEB, S. RIT, E. GIROUD, M. AYADI, C. GINESTET et D. SARRUT : Evaluation des différents protocoles pour l'acquisition d'images 4D sur un scanner non prévu à cet effet. *In Journées Scientifiques de la Société Française de Physique Médicale (SFPM)*, Lyon, France, 2006.

3 Post-doc (Depuis Oct. 2007)

<i>Laboratoire</i>	Nederlands Kanker Instituut
<i>Lieu</i>	Amsterdam, Pays-Bas
<i>Intitulé du projet</i> ...	Motion compensated cone-beam CT reconstruction
<i>Responsables</i>	Jan-Jakob Sonke et Marcel van Herk

Mon projet de recherche dans cet institut s'inscrit dans la continuité de mes travaux de thèse sur la reconstruction d'images TDM avec compensation du mouvement. L'objectif de ce travail est la recherche de méthodes adéquates pour l'utilisation clinique de la compensation du mouvement respiratoire en tomodensitométrie conique. Le gain clinique attendu est la réduction des temps d'acquisition et des doses de rayons délivrées au patient par rapport aux images TDM 4D qui nécessitent un suréchantillonnage.

Nous avons proposé une méthode de reconstruction *à la volée*, i.e. pendant l'acquisition des projections coniques. La problématique de l'estimation du mouvement a été résolue en utilisant un modèle *a priori* du cycle respiratoire estimé à partir de l'image TDM 4D acquise sur un scanner conventionnel. Pendant l'acquisition, ce modèle 4D est corrélé à la respiration à partir du signal respiratoire estimé sur les projections coniques. Le mouvement estimé est alors intégré à la méthode de reconstruction analytique étudiée pendant ma thèse, dont une implémentation originale a été développée pour reconstruire l'image dans le temps de l'acquisition et obtenir le résultat final quelques secondes après l'acquisition.

La méthode proposée a été évaluée sur 26 acquisitions réalisées sur 3 patients atteints de cancers des poumons ainsi que sur 2 acquisitions réalisées sur un patient atteint d'un cancer du foie. Nous nous attachons actuellement à l'évaluer sur un nombre plus important de patients pour la valider avant déploiement clinique au sein de l'institut.

Publications associées (1 journal international, 2 conférences internationales)

- S. RIT, J. WOLTHAUS, M. VAN HERK et J.-J. SONKE : On-the-fly motion-compensated cone-beam CT using an a priori model of the respiratory motion. *Medical Physics*, 2009. **Tentatively accepted with revision.**
- S. RIT, J. WOLTHAUS, M. VAN HERK et J.-J. SONKE : On-the-fly motion-compensated cone-beam CT using an a priori motion model. *In Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*, volume 5241, pages 729–736, New York, USA, 2008a. **Young investigator award.**
- S. RIT, J. WOLTHAUS, M. VAN HERK et J.-J. SONKE : Motion-compensated cone-beam CT for accurate online assessment of the position of lung tumors. *In Proceedings of the 27th Annual ESTRO Meeting*, 2008b.

4 Annexes

- ◇ Rapport de soutenance de thèse
- ◇ Pré-rapport de soutenance de thèse - Isabelle Bloch
- ◇ Pré-rapport de soutenance de thèse - Pierre Grangeat
- ◇ Young investigator award - MICCAI 2008



Rapport de soutenance

Simon Rit a fait un exposé très clair et très pédagogique de ses travaux de thèse, dans lequel il a apporté un grand soin à l'exposé de ses discussions et conclusions. Sa présentation reflète bien la grande quantité de travail, tant sur le plan méthodologique qu'expérimental, qu'il a fourni. En particulier, le jury a été sensible à la mise en place d'une plateforme d'expérimentations permettant une évaluation graduelle de ses résultats. Le but ambitieux de sa thèse était de fournir une méthode de reconstruction de données coniques avec compensation du mouvement respiratoire : la démarche scientifique cohérente de Simon Rit lui a permis d'aboutir à des résultats probants sur de vraies données cliniques, en étant à l'interface entre cliniciens et informaticiens. Le jury a également apprécié le recul et la maturité dont Simon Rit a fait preuve dans ses réponses aux nombreuses questions qui lui ont été posées. En conséquence, le jury lui décerne le diplôme de docteur en informatique de l'université Lumière Lyon 2, avec la mention très honorable avec félicitations.

I. BLOCH

I. Bloch

I. MAGWIN

I. Magwin

D. SARRUT

D. Sarrut

M. van Herk

M. van Herk

S. RIGUET

S. Riguet

G. NOLLADUIN

G. Nolladuin

P. GRANGEAT

P. Grangeat



DÉPARTEMENT TSI

Isabelle BLOCH

téléphone : 01 45 81 75 85

télécopie : 01 45 81 37 94

E-mail : Isabelle.Bloch@enst.fr

Rapport sur la thèse de Simon Rit

Prise en compte du mouvement respiratoire pour la reconstruction d'images tomодensitométriques

La thèse de Simon Rit traite du problème de la prise en compte de la respiration lors de la reconstruction d'images tomодensitométriques (TDM) à partir de projections. Ce problème est à la fois difficile et important. L'application principale envisagée dans la thèse concerne le calcul d'images 4D (3D au cours du cycle respiratoire) et leur utilisation en radiothérapie pour le traitement du cancer du poumon.

Une brève introduction présente de manière claire le contexte et les objectifs de la thèse. Il serait bien de mieux faire ressortir les idées principales qui ont conduit aux méthodes développées et de les situer dans le contexte de la recherche actuelle.

Le premier chapitre développe le contexte médical, tant du point de vue de la radiothérapie que de l'imagerie. Les problèmes liés au mouvement et à leur prise en compte lors de la reconstruction sont clairement décrits. L'état de l'art est ici très succinct, ce qui laisse un peu sur sa faim, l'auteur ayant choisi de le reporter au début des chapitres 4 et 5.

Le deuxième chapitre est consacré à la reconstruction dans le cas statique (sans mouvement). La présentation des principales classes de méthodes est classique mais bien faite. En particulier les méthodes de Feldkamp et SART, constituant les exemples de méthodes respectivement analytique et algébrique sur lesquels vont s'appuyer les développements ultérieurs, sont précisément exposées. Le chapitre conclut sur une bonne discussion sur la mise en œuvre pratique de ces méthodes et sur les artéfacts.

Avec le troisième chapitre commencent les contributions de l'auteur. Ce chapitre présente la plateforme d'évaluation mise en place pour valider les méthodes développées dans les deux chapitres suivants. La place de ce chapitre très intéressant dans la thèse montre l'importance qui a été accordée à la mise en œuvre, aux expérimentations, et à la rigueur de l'évaluation. Une description minutieuse des types de données utilisées (données réelles acquises sur un patient et sur un fantôme et données simulées) montre que l'évaluation pourra se faire de manière graduelle en partant de données entièrement contrôlées et en allant jusqu'à des données correspondant à la routine clinique. Le réalisme des simulations mériterait d'être brièvement discuté. Les métriques d'évaluation utilisées sont ensuite présentées. Elles portent sur la qualité de l'image reconstruite (critères de bruit, de contraste, de flou). Curieusement elles ne font pas apparaître la précision et la justesse de la reconstruction (au sens par exemple d'une proximité avec une reconstruction

idéale). Ce point mériterait d'être discuté.

Le chapitre 4 détaille une des contributions méthodologiques importantes de la thèse. L'idée développée est que la reconstruction peut être faite en choisissant de manière appropriée les projections pour tenir compte de la respiration. La première partie du chapitre est consacrée à l'obtention du signal respiratoire, de manière synchronisée par rapport aux acquisitions. Cette étape est réalisée par analyse du mouvement entre les projections, selon une méthode de mise en correspondance par blocs, à partir de points d'intérêt uniformément répartis (ce choix pourrait être plus discuté). La deuxième partie de ce chapitre porte sur la sélection des projections et la reconstruction 3D ou 4D. Une analyse systématique de l'influence des paramètres est réalisée. Les résultats avec la méthode analytique de Feldkamp montrent que les effets de flou dus à la respiration sont bien corrigés. La sélection entraîne une diminution du nombre de données utilisées pour la reconstruction, ce qui renforce les artéfacts de traits ou bandes sur l'image. Avec la méthode algébrique SART, l'image reconstruite est moins nette mais aussi moins bruitée.

Le chapitre 5 constitue la deuxième contribution méthodologique importante de la thèse. Il porte sur la reconstruction avec compensation du mouvement. Cette fois la reconstruction est faite à un instant, en utilisant toutes les projections (sans sélection), et la méthode exploite donc une voie complètement différente de celle suivie dans le chapitre précédent. Ici il est supposé que le mouvement est connu (ce qui est vérifié pour les données simulées de la plateforme de test). Là encore les deux méthodes analytique et algébrique sont testées, et adaptées pour tenir compte de la respiration. Dans le cas de la méthode analytique, la méthode repose sur une heuristique, qui semble assez forte. Il serait bon de la discuter d'emblée. La méthode développée permet d'éliminer le flou, mais les artéfacts de traits et bandes ne le sont pas. Dans le cas de la méthode algébrique, deux modes d'introduction des déformations dans le système d'équations linéaires sont proposés. Les résultats obtenus sont meilleurs et les artéfacts sont tous éliminés. Le prix à payer est un temps de calcul plus important, ce qui n'est pas forcément très gênant pour les applications de radiothérapie visées.

Dans ces deux chapitres, les aspects théoriques sont décrits avec précision et clarté. Il faut noter également le très grand soin et la rigueur apportés dans les expérimentations et leur discussion.

En conclusion, la thèse de Simon Rit apporte des solutions nouvelles et efficaces au problème de la reconstruction prenant en compte le mouvement de la respiration. La thèse est très bien écrite, avec précision et rigueur. Les expérimentations sont remarquablement bien menées et discutées. Les contributions de la thèse ouvrent de nombreuses perspectives, aussi bien du point de vue applicatif que méthodologique.

Je donne donc un avis favorable à la soutenance en vue de l'obtention du doctorat en Informatique de l'Université Lumière Lyon 2.

Isabelle Bloch
Professeur à l'ENST, HDR



M. Olivier Koenig
Université Lumière Lyon 2
Service général de la Recherche et des Ecoles Doctorales
Campus Berges du Rhône
86, Rue Pasteur
69365 LYON cedex 07

Grenoble, le 5 septembre 2007

Objet : Pré-rapport sur la thèse de Simon Rit
Réf : DTBS/STD/07-234

Pré-rapport de M. Pierre GRANGEAT sur le manuscrit de thèse soumis par M. Simon RIT en
vue d'une soutenance en Doctorat INFORMATIQUE auprès de l'Université Lumière Lyon 2 :

Prise en compte du mouvement respiratoire pour la reconstruction d'images tomodensitométriques.

La radiothérapie contribue au traitement de près de 60% des cancers et l'on estime que la moitié des cancers ont été guéris grâce à la radiothérapie. Le principe des traitements est d'affecter une dose de rayonnement ionisant létale au niveau de la zone cible englobant la tumeur, tout en préservant au maximum l'intégrité des tissus sains environnants. Cette irradiation est réalisée grâce à un accélérateur linéaire qui envoie un rayonnement à haute énergie suivant diverses incidences. Cette stratégie se complique singulièrement quand l'organe cible se déplace en cours de traitement. C'est ce qui se produit quand on souhaite traiter une tumeur thoracique et que l'on laisse le patient respirer librement. Il est alors nécessaire de prendre en compte les mouvements spatio-temporels du patient. On parle alors de radiothérapie 4D.

Pour bien positionner le patient et l'organe cible, dans l'étude présentée, un système d'acquisition tomographique est intégré à l'accélérateur linéaire. Une source de rayons X additionnelle, dans une gamme d'énergie de l'ordre du kilovolt (kV) et un détecteur plan sont montés sur l'arceau de l'accélérateur. Le dispositif réalise l'acquisition d'un ensemble de radiographies X autour du patient sur quelques minutes. Un algorithme de reconstruction permet ensuite de calculer les images tomodensitométriques c'est-à-dire la cartographie 3D de la densité de matière sur la zone investiguée. Cette image 3D est alors utilisée pour positionner au mieux la zone cible à irradier et les zones saines à préserver. Mais pour reconstruire une image 3D, il est nécessaire de disposer de l'ensemble de ses projections radiographiques sur au moins un demi-tour et d'en disposer suivant un échantillonnage angulaire suffisant. Cette condition n'est plus vérifiée si pendant l'acquisition le patient respire librement. On dispose alors d'un jeu de projections non-cohérentes qui, si on applique sans précaution un algorithme de reconstruction standard vont délivrer des images de mauvaise qualité, entachées de défauts comme des flous de bouger, des traits et des bandes. L'objectif de cette thèse est de proposer

des solutions pour éliminer les artefacts induits par le mouvement respiratoire dans la reconstruction d'images tomodensitométriques thoraciques.

Le manuscrit de Monsieur Rit comporte une introduction, 6 chapitres, et une conclusion.

L'introduction décrit brièvement le sujet et le plan du document.

Le chapitre 1 « Contexte médical » introduit le contexte thérapeutique, les différentes modalités d'imagerie thoracique, les tomographes à rayons X, la problématique du mouvement et de sa prise en compte en tomographie.

Le chapitre 2 « la reconstruction TDM d'objets statiques » aborde les deux familles d'algorithme de reconstruction étudiées dans cette thèse, à savoir les méthodes analytiques et les méthodes discrètes, et leurs implémentations.

Le chapitre 3 « Plateforme d'évaluation » décrit les jeux de données soit mesurées expérimentalement, soit générées par un logiciel de simulation, et les critères d'évaluation de la qualité des images utilisés.

Le chapitre 4 « Reconstruction à partir d'une sélection rétrospective de projections coniques » présente la méthode innovante conçue par Monsieur Rit pour extraire un indice représentatif du mouvement respiratoire. Cet indice est ensuite utilisé pour extraire les projections associées au même instant du cycle respiratoire. L'image correspondant à ces projections est ensuite reconstruite avec les deux familles d'algorithmes. Le candidat effectue un ensemble d'essais sur son jeu de données. Il conclut que la qualité des images obtenues n'est pas satisfaisante car le nombre de projections sélectionnées est insuffisant. Cela le conduit à diriger ses recherches vers des méthodes de reconstruction utilisant toutes les projections mais en compensant le mouvement.

Le chapitre 5 « reconstruction avec compensation du mouvement » présente les deux algorithmes de compensation du mouvement étudiés, sous l'hypothèse que le mouvement soit connu. L'algorithme de reconstruction analytique associé à la formule 5.8 consiste à tenir compte des déformations dans l'étape de rétroprojection. L'algorithme de reconstruction algébrique consiste à associer dans les phases de projection et de rétroprojection une opération de déformation des volumes paramétrée par des champs de vecteurs. Une implémentation originale de ces algorithmes est proposée. Ces algorithmes sont ensuite évalués sur données simulées et sur données expérimentales. La conclusion sur données simulées est que la méthode de reconstruction analytique développée ne permet pas d'éliminer complètement les artefacts. En revanche, la méthode algébrique développée donne des résultats équivalents à la reconstruction d'un objet statique et les artefacts sont éliminés. Mais la méthode est très coûteuse en temps de calculs. Pour les essais sur données patient, les deux approches permettent d'améliorer la qualité des images. La différence entre les deux méthodes n'est pas perceptible.

La conclusion résume les contributions du candidat et introduit quelques perspectives, notamment pour aborder le problème de l'estimation du mouvement et recommander l'utilisation de l'algorithme analytique quand la contrainte de temps est forte, c'est-à-dire dans la phase de repositionnement du patient, et l'algorithme discret lors des traitements hors ligne, par exemple pour un nouveau calcul de dose.



A travers son manuscrit, Monsieur Rit montre une très bonne connaissance du sujet. Il a su mettre en place une démarche scientifique cohérente pour aboutir à des premiers résultats satisfaisants. Il a atteint les objectifs qu'il s'était fixé, à savoir réduire les artefacts liés au mouvement respiratoire sur les reconstructions d'images thoraciques. Sa démarche repose sur un travail important de conceptualisation, d'analyse bibliographique et de développement algorithmique et sur une analyse méthodique des résultats obtenus sur son jeu de données d'évaluation. Le manuscrit est bien structuré et témoigne d'une aisance dans l'expression écrite.

Les recherches réalisées par Monsieur Rit présentent des innovations sur la méthode d'extraction d'un index représentatif du mouvement respiratoire à partir des acquisitions tomographiques et sur la mise en œuvre des algorithmes de compensation du mouvement. Les résultats ont fait l'objet d'une publication dans la revue *Traitement du Signal*, de cinq articles dans des conférences internationales et de quatre résumés dans des conférences nationales ou internationales.

Sur l'analyse bibliographique, pour l'extraction de l'index du mouvement respiratoire, il aurait été intéressant d'analyser la méthode présentée par Marc Kachelriess sur les « kymogrammes » (M. Kachelriess et al., *Medical Physics*, 29(7):1489-1503, 2002). Plutôt que de travailler sur des points isolés, la méthode repose sur l'analyse des moments sur les projections.

Pour la compensation du mouvement, je regrette que des travaux de thèse qui ont été réalisés dans mon équipe en lien avec le sujet n'aient pas été identifiés et analysés. Je pense en particulier aux thèses suivantes et aux publications associées:

- Solange Delagenière-Guillot (1993), Utilisation d'un modèle d'objet en reconstruction tridimensionnelle, application à l'imagerie médicale, thèse INPG,
- Jérôme De Murcia (1996), Reconstruction d'images cardiaques en tomographie d'émission monophotonique à l'aide de modèles spatio-temporels, thèse INPG,
- Etienne Payot (1996), Reconstruction vasculaire tridimensionnelle en imagerie par rayons X, thèse ENST.

La thèse de Solange Delagenière introduit un modèle dynamique associé à une reconstruction ART.

Sur la thèse de Jérôme De Murcia, il a été établi que pour la reconstruction d'un objet en évolution, la reconstruction est plus robuste aux erreurs sur l'estimation des champs de déplacement si on pose le problème de reconstruction comme un problème de reconstruction d'une séquence d'images 3D et qu'on introduit le mouvement comme une contrainte de régularisation, plutôt que l'aborder sous la forme de la reconstruction d'une seule image déformée suivant chaque incidence de projection.

Sur la thèse d'Etienne Payot, une amélioration des algorithmes ART est proposée par l'introduction d'une régularisation sous forme d'une contrainte semi-quadratique. Il est montré que cette approche permet de réduire les artefacts de sous-échantillonnage et de débatement angulaire manquant.

Sur le fond, je trouve regrettable que Simon Rit n'ait pas abordé le problème de l'estimation du mouvement qui me semble difficilement séparable du problème de compensation du mouvement. Le candidat n'en était pas très loin puisqu'il a dû estimer les champs de déplacement sur les données patient au chapitre 5 et qu'il disposait des algorithmes développés au chapitre 4 pour réaliser une reconstruction de chaque phase du cycle respiratoire.

Par ailleurs, je tempérerais son analyse sur la comparaison des algorithmes analytiques et algébriques. La comparaison n'est valide que dans le cadre des mises en œuvre réalisées qui n'intègrent pas tous les raffinements qui pourraient être proposés, en particulier au niveau des techniques de régularisation. D'autre part, d'un point de vue théorique, il faut rappeler qu'un algorithme ART converge vers la solution de norme minimum, qui n'est autre que la reconstruction analytique. Le filtre rampe correspond en effet à l'opérateur inverse de l'opérateur combinant une projection et une rétroprojection. La différence se situe donc plutôt au niveau des techniques de régularisation utilisées. Sur l'algorithme ART, la régularisation est introduite par l'arrêt après un nombre limité d'itérations. C'est en particulier pour cela que les images sont plus floues, mais qu'en revanche elles ont moins d'artefacts. La régularisation sur une méthode analytique nécessite d'optimiser la fenêtre d'apodisation du filtre rampe et de compléter le sinogramme par interpolation quand on a des données manquantes. Si cette régularisation n'est pas faite, on n'obtient pas

les meilleurs résultats. Ceci explique sûrement une partie des artefacts constatés sur les images qui ne sont pas à mon sens uniquement liés au mouvement.



Pour l'évaluation sur données synthétiques, il aurait été instructif d'introduire du bruit sur les projections. La prise en compte du bruit aurait amené le besoin de mieux régulariser. Cela aurait aussi sûrement modifié la comparaison des algorithmes analytiques et algébriques, et l'analyse des artefacts. Ceci explique aussi partiellement pourquoi sur les données expérimentales patient les artefacts n'apparaissent pas car ils sont en partie masqués par le bruit.

Concernant le jeu de données d'évaluation, nous avons utilisé sur nos projets des fantômes constitués de sphères simples ou imbriquées, animées. De tels fantômes permettent de bien étudier qualitativement et quantitativement les performances des algorithmes de compensation du mouvement. L'étude de tels fantômes pourrait compléter le jeu d'évaluation proposé.

Le problème de la reconstruction 4D à partir d'un ensemble 1D de projections 2D est un problème sous-déterminé. Il faut donc trouver les bonnes informations a priori nécessaires pour régulariser. La prise en compte des acquisitions 4D TDM évoquée dans le manuscrit est sûrement une piste à investiguer.

Au niveau du manuscrit, en plus des compléments bibliographiques suggérés ci-dessus et d'une mise à jour du texte pour prendre en compte les remarques formulées, quelques corrections mineures me semblent nécessaires. Par ailleurs, les numéros de page qui apparaissent dans l'index des auteurs cités ne m'apparaissent pas corrects, par exemple pour des auteurs comme Grass ou Grangeat. Je fournirai mon exemplaire du manuscrit annoté au candidat.

Comme correction majeure, il me semblerait souhaitable de mieux décrire d'un point de vue mathématique et algorithmique les algorithmes qui ont été mis en œuvre. La description doit être suffisante pour que les méthodes puissent être reproduites par le lecteur.

En conclusion, les travaux présentés me semblent correspondre à une première étape, à poursuivre dans de nouveaux développements futurs. Néanmoins, je trouve que le document soumis présente une démarche scientifique cohérente ayant abouti aux objectifs fixés. Je donne donc un avis très favorable pour que soit autorisée la soutenance des travaux de thèse de Monsieur Simon Rit.

Fait à Grenoble, le 5 septembre 2007.

Pierre GRANGEAT

Directeur de Recherche au CEA
Direction Scientifique au DTBS
Traitement de l'Information

MICCAI SOCIETY

Young Investigator Award 2008

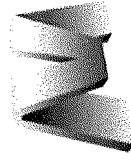
is hereby granted to

Simon Rit

for the paper entitled

ON-THE-FLY MOTION-COMPENSATED CONE-BEAM CT USING AN A PRIORI MOTION MODEL

Awarded: 9th September 2008



MICCAI

Dele Hayry

MICCAI 2008 Executive Committee

James S. Downes

MICCAI Society Board

