



**HAL**  
open science

# Algorithmes de reconstruction et imagerie laser tomographique

Jean-Baptiste Bellet, Gérard Berginc, Jean-Pierre Croisille

► **To cite this version:**

Jean-Baptiste Bellet, Gérard Berginc, Jean-Pierre Croisille. Algorithmes de reconstruction et imagerie laser tomographique. 2013. hal-00830979

**HAL Id: hal-00830979**

**<https://hal.science/hal-00830979>**

Preprint submitted on 6 Jun 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Algorithmes de reconstruction et imagerie laser tomographique\*

Jean-Baptiste Bellet, Gérard Berginc et Jean-Pierre Croisille

6 juin 2013

## 1 Introduction

Le problème générique de l'imagerie consiste à visualiser un milieu à partir de mesures. Cette démarche très générale dont l'un des exemples le plus connu dans le domaine médical est la radiologie, s'est généralisée depuis les années 70 à de multiples situations. Citons par exemple l'imagerie sous-marine par des mesures acoustiques (sonar), l'imagerie en géophysique par des mesures sismiques, et l'imagerie par résonance magnétique (IRM) en médecine. Dans le domaine médical, citons encore la méthode de tomographie de projection optique (OPT), apparue au début des années 2000. Dans tous les cas, les progrès réalisés ces trente dernières années concernent bien sûr les systèmes d'acquisition, mais aussi la partie algorithmique de la reconstruction, connue communément sous le nom d'*imagerie mathématique* [8, 1].

Un nouveau type d'imagerie apparu depuis peu est l'imagerie laser tri-dimensionnelle tomographique [5, 2, 3]. À partir d'images bi-dimensionnelles obtenues par éclairage d'une scène à l'aide d'une source laser, il s'agit de reconstruire la scène en trois dimensions, à des fins d'identification. Le système de détection permet de créer une image fortement résolue à partir de l'intensité rétrodiffusée par la structure à identifier. Cette technique d'imagerie est en pleine croissance dans le milieu industriel, elle ouvre une nouvelle voie vers l'imagerie tri-dimensionnelle, et génère de nombreux défis scientifiques et technologiques. Elle est très générale et peut être appliquée dans un grand nombre de domaines : imagerie médicale, industrie du jeu, sécurité, défense, géophysique, etc. Par exemple, elle permet d'apporter un niveau d'identification important en biophonique (identification de cellules cancéreuses dans des structures d'épidermes). Un autre exemple dans le domaine de la défense est l'identification d'objets camouflés derrière des structures semi-transparentes ou poreuses, (végétation par exemple). Dans ces cas, les structures à identifier ne laissent que partiellement pénétrer la lumière. Le but est alors de reconstruire la surface tri-dimensionnelle de l'objet.

Les techniques d'imagerie laser passent par des avancées technologiques, laser à fort taux de répétition et émettant dans la bande proche infrarouge, grande matrice de détecteurs. Elles passent également par des avancées mathématiques : l'algorithme mathématique de reconstruction va déterminer le niveau d'extraction des signaux faibles, du bruit de la reconstruction et de son efficacité dans des milieux denses. Les besoins industriels comprennent donc une partie mathématique très importante ; cela concerne aussi bien la mise en place de nouveaux types d'algorithmes permettant l'extraction que des questions de représentation complète de l'objet identifié. On s'intéresse aussi bien à des aspects en amont (recherche de nouvelles pistes mathématiques), que d'implémentation concrète (fiabilisation des algorithmes de calcul). Ces besoins industriels sont à l'origine de ce projet PEPS 1, supporté par l'AMIES. Il s'inscrit clairement dans l'analyse des techniques d'imagerie non-conventionnelle 3D qui seront amenées à révolutionner l'imagerie classique. Il s'agit d'une étroite collaboration sur le sujet entre chercheurs de l'Institut Elie Cartan de Lorraine (anciennement LMAM) et de Thales Optronique.

Précisons plus en détails la nature du problème étudié. Nous nous intéressons à la reconstruction d'une scène tri-dimensionnelle à partir d'images laser bi-dimensionnelles en intensité. Ce sujet est

---

\*Ce travail a été en partie financé par une bourse de l'AMIES (Agence pour les Mathématiques en Interaction avec l'Entreprise et la Société - numéro de contrat ANR : ANR-10-LABX-0002-01).

donc à l'intersection de divers thèmes. Tout d'abord, celà concerne le thème général d'imagerie par propagation des ondes : un ensemble de récepteurs capte l'effet d'un milieu sur la propagation d'ondes émises par des sources. Il s'agit d'imager le milieu à partir de ces mesures. Ce thème concerne, par exemple, l'imagerie radar, l'imagerie médicale. Il concerne également l'imagerie optique visible (de 390 nm à 750 nm), et infrarouge (de 750 nm à 10  $\mu\text{m}$ ) pour laquelle c'est le cœur de métier. Les données sont en effet de type optique. En particulier, ce sont des données en intensité. Cette caractéristique essentielle anéantit tout espoir d'utilisation des méthodes standard d'imagerie, de type imagerie radar, qui sont basées sur les temps de trajet (ou phase), ici inconnus. Dans l'expérience concernée, ajoutons que la configuration est monostatique : le dispositif optique d'acquisition d'une image de la séquence est fixé à la source laser. Il n'en demeure pas moins que l'ensemble de la partie (éclairée) de la scène apparaîtra sur chaque image, grâce au régime diffusif induit par la source laser. Enfin, il s'agit de relever une collection d'images 2D en une scène 3D. Ce passage d'une certaine forme de projections 2D à un volume 3D intervient aussi, par exemple, en tomographie médicale, ou bien en reconstruction stéréographique à partir de photos. A noter que la stéréoscopie utilise l'hypothèse de diffusion lambertienne, et requiert de faibles occultations. La première hypothèse étant souvent violée en imagerie laser, et la deuxième l'étant pour un objet camouflé, nous n'emploierons pas cette méthode.

En revanche, les méthodes développées en tomographie médicale (CT) pour les scanners à rayons X sont très intéressantes pour notre sujet. Ce type de méthodes a par ailleurs également fait ses preuves dans le spectre visible avec la méthode OPT [9]. L'idée est désormais d'employer ce genre de techniques dans le spectre infrarouge, avec en plus la difficulté suivante à surmonter. Dans les méthodes CT et OPT, le signal est acquis en transmission, *i.e.* traverse le milieu à imager entre l'émission et la réception ; pour le problème que l'on étudie ici, le signal est enregistré en réflexion : le faisceau laser incident est réfléchi (ou plutôt diffusé) par les surfaces rugueuses de la scène, mais ne les traverse pas. Dans ce cas, les données utilisables sont donc restreintes puisque l'identification ne pourra utiliser que des données surfaciques. L'idée d'utiliser les méthodes de tomographie en transmission pour de telles données de réflexion a été introduite par G. Berginc et M. Jouffroy [3]. Aussi, nous sommes là au cœur de ce projet.

Nous présentons donc dans un premier temps la tomographie par transmission, de l'expérience d'acquisition aux méthodes d'imagerie. La formulation mathématique du problème repose sur l'inversion de transformées de type Radon par des méthodes de rétroprojection filtrée. Notre principale référence sur le sujet est l'ouvrage très complet [7]. Citons également le célèbre algorithme de FDK [6] permettant des reconstructions 3D en adaptant une formule de rétroprojection 2D. Nous illustrerons nos propos à l'aide de résultats numériques produits après implémentation des méthodes. Dans un deuxième temps, nous nous intéressons à l'utilisation de ces méthodes pour l'imagerie laser, en s'appuyant sur un rapport interne à l'entreprise Thales [4]. Nous présentons le problème concerné ainsi que ses similitudes avec le problème de la tomographie. Puis, à partir de données fournies par l'entreprise, nous testons numériquement l'algorithme de FDK dans ce cadre. Enfin, on identifie un problème mathématique modèle sous-jacent.

## 2 Tomographie en transmission

### 2.1 Expérience

L'expérience typique de la tomographie en transmission est la suivante. On éclaire un objet avec une radiation dont on connaît l'intensité, et supposée non diffractante, par exemple des rayons X pour le corps humain. La radiation se propage alors en ligne droite à travers l'objet. On mesure l'intensité de la radiation en un capteur situé sur cette ligne, de l'autre côté de l'objet. Le but du jeu est alors d'imager l'intérieur de l'objet à partir de ces mesures. On distingue plusieurs types de géométries d'acquisition ; plus particulièrement, nous nous intéressons au balayage parallèle et au balayage par faisceau en éventail.

La géométrie dite du balayage parallèle est celle qui conduit à l'analyse mathématique la plus naturelle. Elle consiste à balayer l'objet en déplaçant la source et le capteur parallèlement à une

direction de référence. Les différents rayons sont alors parallèles. Puis, on répète le processus pour toutes les orientations angulaires possibles de l'objet (ou pour toutes les orientations possibles de la direction de référence). La géométrie dite du balayage par faisceau en éventail est la géométrie d'acquisition pour laquelle l'algorithme de FDK a été conçu. La source parcourt un cercle qui entoure l'objet, tandis qu'un tableau de récepteurs est diamétralement opposé à la source. À chaque position de source, on considère le faisceau de rayons en éventail formé par l'ensemble des rayons joignant la source à l'un des récepteurs. Voir la Figure 1.

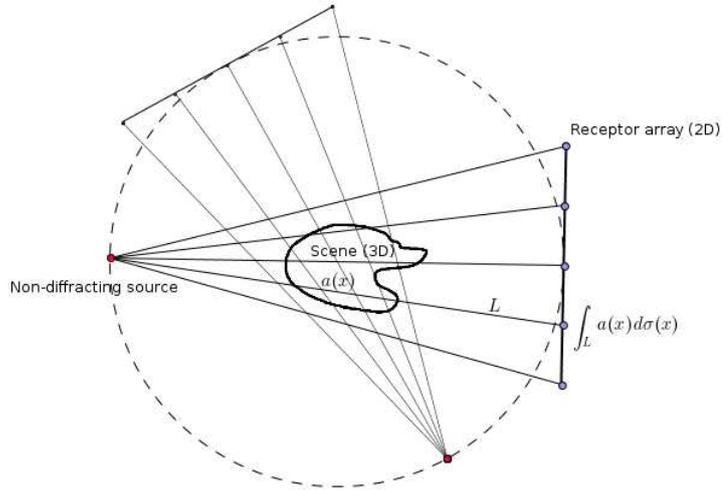


FIGURE 1 – Balayage par faisceau en éventail (coupe dans le plan du cercle parcouru par la source).

## 2.2 Problème direct associé

Dans une expérience de tomographie par transmission, pour chaque rayon de projection, le rapport intensité mesurée sur intensité émise permet de déterminer l'intégrale du coefficient d'atténuation de l'objet sur le rayon. Mathématiquement, une expérience revient donc à mesurer la transformée des rayons du coefficient d'atténuation de l'objet. En 2D, cette transformée est aussi appelée transformée de Radon. En pratique, cette transformée est mesurée sur un ensemble discret de rayons, paramétré en fonction du choix de géométrie d'acquisition. À ce propos, la configuration par balayage parallèle correspond à une paramétrisation naturelle de la transformée de Radon, d'où son intérêt.

Pour la simulation numérique de données, il faut donc estimer numériquement la transformée de rayons d'une fonction spatiale d'atténuation. En pratique, la coutume consiste à choisir pour coefficient d'atténuation une fonction de type fantôme de Shepp-Logan : une combinaison linéaire d'indicatrices d'ellipsoïdes (ou ellipses en 2D) ; historiquement, cela servait de modèle canonique de cerveau. Cela permet de choisir des coefficients d'atténuation plus ou moins délicats à reconstruire, le tout avec un calcul de transformée complètement explicite (et non approché), ce qui est un avantage certain.

À titre d'exemples, sur la Figure 2, nous représentons la transformée de Radon d'un fantôme, calculée dans la géométrie du balayage parallèle, en 2D. Sur la Figure 3, on représente la transformée de Radon d'un fantôme, calculée dans la géométrie du faisceau en éventail, en 2D. Dans chaque cas, l'ordonnée représente le paramètre angulaire de l'acquisition, tandis que l'abscisse représente le rayon d'acquisition, à paramètre angulaire fixé. De telles représentations s'appellent sinogrammes. Enfin, sur la Figure 4, on représente la transformée des rayons d'un fantôme en 3D, calculée dans la géométrie du faisceau en éventail. Au passage, on commence à rencontrer la difficulté de la visualisation d'un volume en 3D. Ici, on a choisi une représentation en coupes.

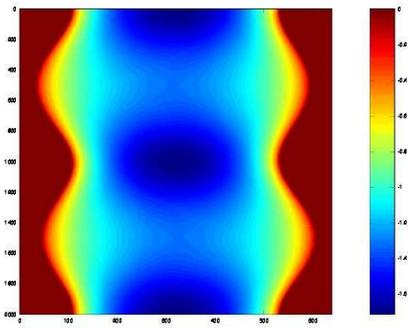


FIGURE 2 – Transformée de Radon d'un fantôme, acquisition par balayage parallèle en 2D.

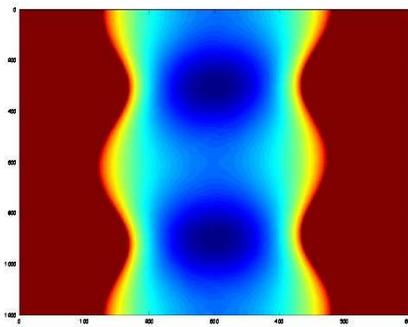


FIGURE 3 – Transformée de Radon d'un fantôme; géométrie du faisceau en éventail, en 2D.

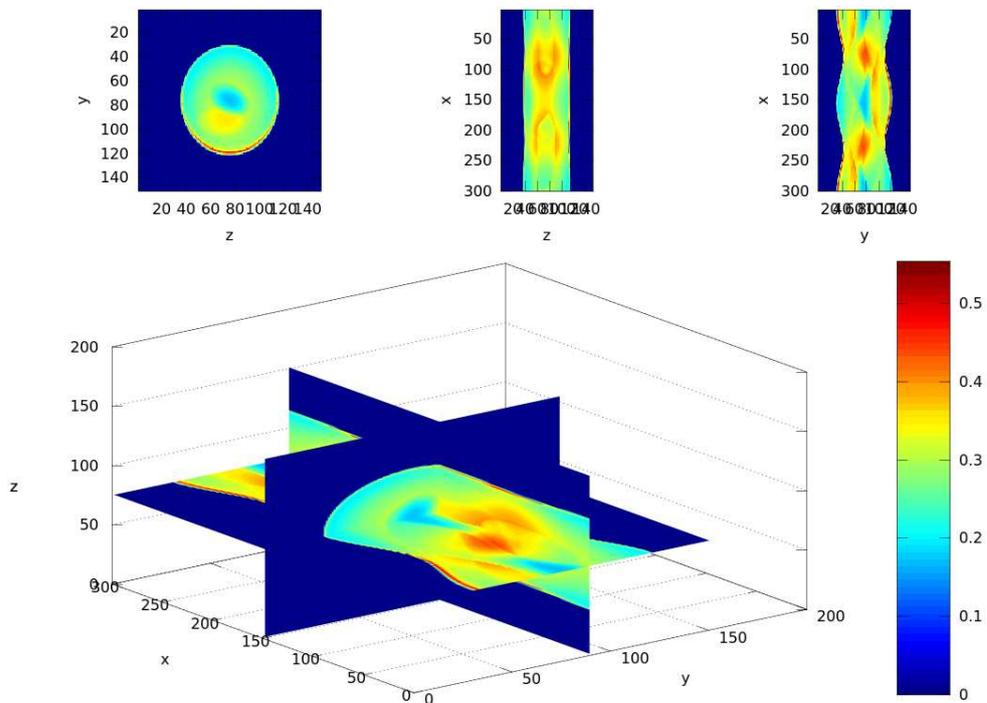


FIGURE 4 – Vue en coupes de la transformée des rayons d'un fantôme en 3D; géométrie du faisceau en éventail. Ici le plan de récepteurs est  $y-z$ ;  $x$  désigne une paramétrisation angulaire de la position des sources.

## 2.3 Problème inverse

Nous venons de voir que les données mesurées correspondent à la transformée de rayons d'un coefficient (spatial) d'atténuation. Imager l'objet consiste donc à reconstruire l'atténuation, en inversant la transformée de rayons.

En 2D, la méthode d'inversion standard est la rétroprojection filtrée. La rétroprojection consiste à calculer, en chaque point, la somme des transformées de Radon des rayons passant par le point. Couplé à un filtre préliminaire judicieusement choisi, l'opérateur de rétroprojection permet de reconstruire parfaitement les fonctions à contenu fréquentiel borné. Différents algorithmes résultent de la discrétisation de cette méthode, en fonction de la géométrie d'acquisition. Sur la Figure 5, on représente le fantôme à l'origine du sinogramme 2 (configuration balayage parallèle), ainsi que sa reconstruction ainsi obtenue. Idem sur la Figure 6, en partant du sinogramme 3, pour la géométrie du faisceau en éventail. Dans les deux cas, nous avons utilisé un filtre de Shepp-Logan.

Par ailleurs, l'algorithme de FDK [6] a été spécialement conçu pour traiter le cas de la configuration faisceau en éventail en 3D. Il s'agit d'une heuristique qui utilise astucieusement la formule de rétroprojection 2D pour obtenir une inversion approchée en 3D. Par hypothèse, la source se déplace sur un cercle, contenu dans un plan. L'idée de la méthode est la suivante. En chaque point du volume à imager, on doit sommer la contribution des différents rayons source-récepteur passant par le point. Pour chacun de ses rayons, on calcule sa contribution en utilisant la formule de rétroprojection 2D, pour le problème restreint au plan qui contient le rayon et qui intersecte le tableau de récepteurs en une ligne parallèle au plan du cercle. L'algorithme ignore que ce plan varie quand la source bouge ; il s'agit donc d'une méthode approchée. En tout cas, les résultats de la méthode sont très bons et la méthode est performante. Sur la Figure 7, on représente le fantôme à l'origine du sinogramme 4, ainsi que sa reconstruction.

## 2.4 Implémentation numérique

Les méthodes présentées ont été implémentées dans le cadre du projet. Des codes de simulation de données de tomographie par transmission ont donc été écrits. Ils consistent en un calcul explicite de la transformée des rayons d'un fantôme. Différentes discrétisations ont été implémentées ; en particulier, la discrétisation associée à la géométrie du faisceau en éventail en 3D.

Aussi, pour chaque géométrie d'acquisition, une version discrète spécifique de la méthode de rétroprojection filtrée a été écrite. En particulier, l'algorithme de FDK a été implémenté. Précisons que le domaine de calculs d'une rétroprojection peut être découpé en blocs ; ceci nous a permis de distribuer les calculs sur plusieurs cœurs simultanément, et donc de tirer profit de la machine multicœurs achetée lors du projet.

# 3 Imagerie laser surfacique

## 3.1 Problème posé

Le problème posé est le suivant. Une source laser tourne autour d'une scène. À chaque illumination, on mesure, au point d'éclairage, l'intensité rétrodiffusée par la scène. Une mesure est réalisée à l'aide d'un instrument d'optique contenant un tableau de récepteurs. On obtient ainsi une collection d'images laser 2D de la scène. Thales a mis à notre disposition plusieurs jeux de données laser réelles ; à titre illustratif, on a représenté deux de ces images réelles sur la Figure 8.

Il s'agit alors de reconstruire la scène en 3D, intégralement ou partiellement, à partir d'une collection d'images 2D. La scène peut être constituée d'un objet seul, auquel cas il convient de le reconstruire. La scène peut également contenir un objet camouflé, auquel cas il convient de reconstruire l'objet, avec extraction du camouflage. Aussi, à des fins de visualisation ou d'identification, il convient de pouvoir représenter la surface de l'objet. Par reconstruction, on peut donc entendre fonction volumique, permettant de visualiser l'objet en coupes, ou bien surface de l'objet.

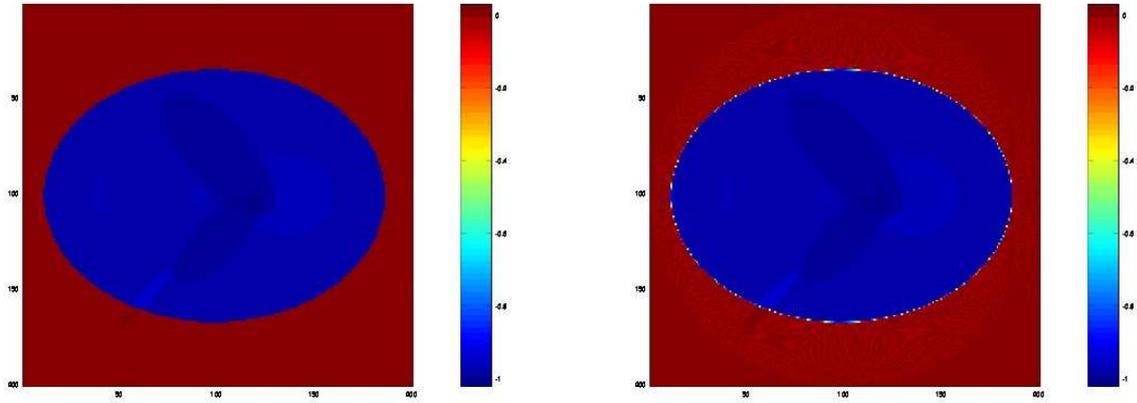


FIGURE 5 – À gauche, fantôme à l'origine du sinogramme 2 ; à droite, sa reconstruction par rétro-projection filtrée. (Balayage parallèle)

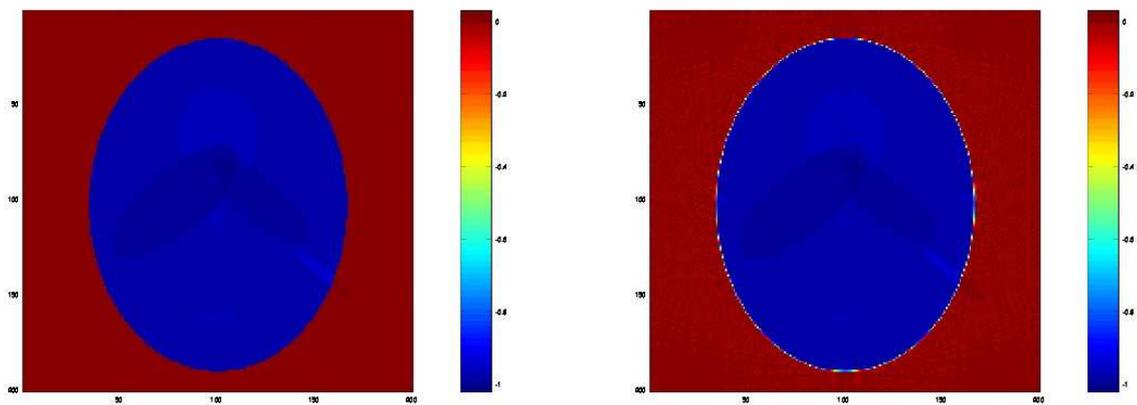


FIGURE 6 – À gauche, fantôme à l'origine du sinogramme 3 ; à droite, sa reconstruction par rétro-projection filtrée. (Faisceau en éventail)

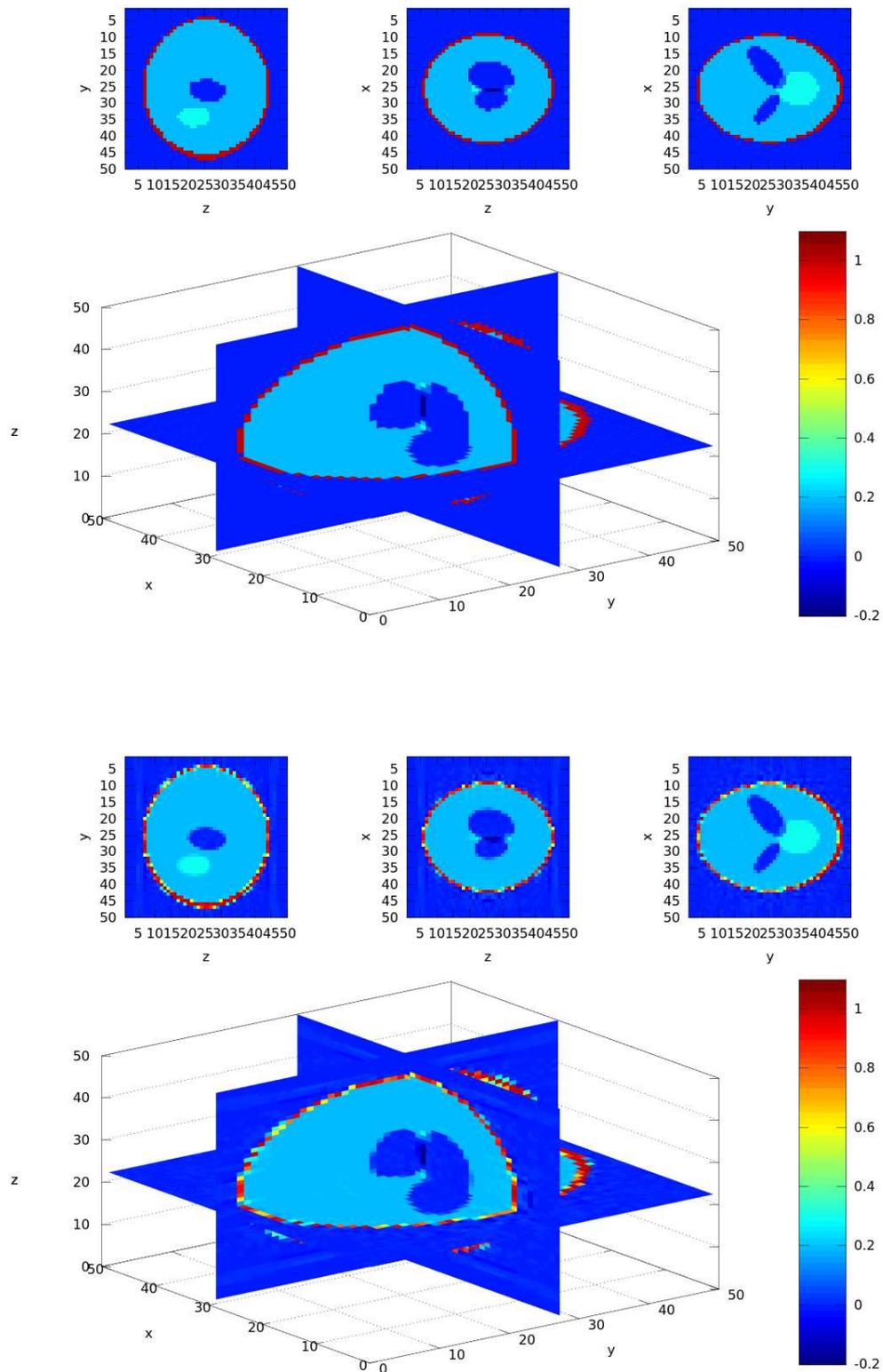


FIGURE 7 – En haut, fantôme à l’origine du sinogramme 4 ; en bas, sa reconstruction par algorithme de FDK. (Faisceau en éventail)

### 3.2 Problème direct

Les données proviennent de l'interaction d'un faisceau laser avec les surfaces rugueuses de la scène. On peut modéliser ce problème difficile par une approche purement électromagnétique, à l'aide de modèles de type diffusion par des surfaces rugueuses. Une approche numérique possible est donc l'approximation des faibles pentes de Voronovich (SSA). Thales a fourni des jeux de données ainsi simulés, à l'aide de ses codes internes. Sur la Figure 9, on a représenté une de ces images.

Un autre modèle, non quantitatif mais très intéressant, est un modèle de type optique. Après illumination laser, chaque point (objet) de la scène réémet dans plusieurs directions. L'instrument optique employé permet de refocaliser les différents rayons provenant d'un même point objet vers un même point image dans le plan du tableau de récepteurs ; ce point image est aligné avec le centre optique de l'appareil et le point objet. En somme, une image est une projection de la scène, le long des rayons d'un modèle du sténopé ; voir Figure 10. La configuration géométrique de l'acquisition est donc similaire à celle du balayage par faisceau en éventail en tomographie (Figure 1). Précisons que la nature des données est toutefois différente : ici, il ne s'agit plus d'une intégrale sur des rayons suite à l'atténuation pendant une transmission.

### 3.3 Heuristique d'imagerie

Pour reconstruire la scène en 3D à partir d'une collection d'images laser 2D, on tire profit de la géométrie d'acquisition, similaire au balayage par faisceau en éventail comme nous venons de le signaler. Ainsi, comme dans [4], on utilise les algorithmes initialement élaborés pour la tomographie en transmission : la rétroprojection filtrée en 2D, ou l'algorithme de FDK en 3D.

Testons cette méthode pour le jeu de données simulées contenant l'image de la Figure 9. En haut de la Figure 11, on montre le volume reconstruit. Pour la représentation 3D, on peut aussi binariser le volume pour extraire l'objet à imager, et coupler avec un lissage. On obtient alors le bas de la Figure. Plus difficile, on effectue le même travail pour le jeu de données réelles contenant l'image de gauche de la Figure 8. Les résultats sont présentés sur la Figure 12. Encore plus difficile, on effectue sur la Figure 13 le même travail, pour le jeu d'images réelles d'un objet camouflé, contenant l'image de droite de la Figure 8. Sur ces quelques tests, on obtient des résultats numériques très encourageants, y compris dans le cas d'images réelles pour un objet avec occultations.

Pour justifier ces résultats, il reste un fossé mathématique à combler. En effet, nous avons là un algorithme de rétroprojection, qui, bien qu'utilisé hors de son domaine de validité théorique (données de tomographie de transmission), donne de bons résultats. Ce fossé reste un problème ouvert à ce jour. Il est très important de répondre à cette question d'un point de vue mathématique convenable. D'un point de vue théorique, il s'agit de trouver un analogue de la transformée de Radon et de son inverse, adapté pour des objets réfléchissants dont les fluctuations de la surface sont de l'ordre de la longueur d'onde. D'un point de vue plus pratique, cela pourrait permettre de : trouver des pré-traitements et post-traitements plus efficaces, trouver une méthode d'extraction du camouflage, déterminer les limites de la méthode de reconstruction.

### 3.4 Piste mathématique à explorer

En vue de pouvoir justifier ou améliorer l'heuristique proposée, il est important d'extraire un problème mathématique modèle. Un tel problème doit contenir certaines des difficultés caractéristiques à surmonter, tout en étant plus abordable que le problème initial.

En tomographie par transmission, l'ingrédient de base est la rétroprojection 2D dans la configuration du balayage parallèle. Une fois cet ingrédient obtenu, il ne s'agit alors que de l'adapter pour obtenir la rétroprojection 2D par balayage en éventail, dont on déduit ensuite l'algorithme de FDK en 3D. On revient donc à la géométrie du balayage parallèle en 2D. Ce changement de dimension et de géométrie simplifie l'étude, sans être trop restrictif quant à la compréhension du problème.

Une difficulté majeure à conserver, est le passage de la transmission à la réflexion. Autrement dit, par rapport au problème usuel de la tomographie par transmission, nous remplaçons la transmission par la projection en réflexion. Aussi, comme dans tout contexte de projection, on simplifie le problème en utilisant un objet convexe. On suppose donc que l'on projette en réflexion une fonction

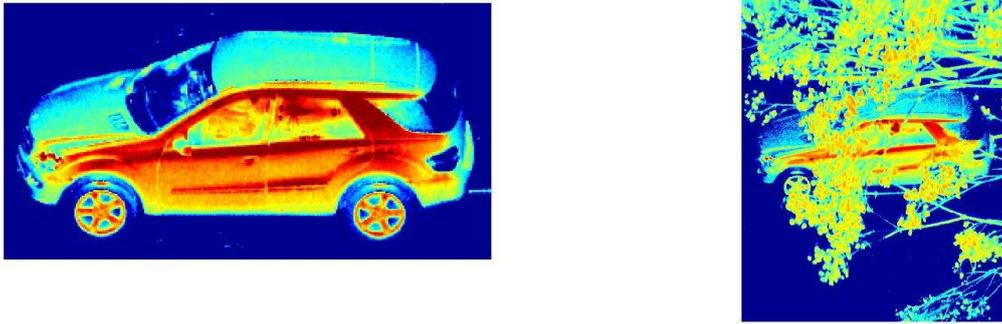


FIGURE 8 – À gauche, image laser réelle d'un objet ; à droite, image laser réelle d'un objet camouflé. (Images Thales)

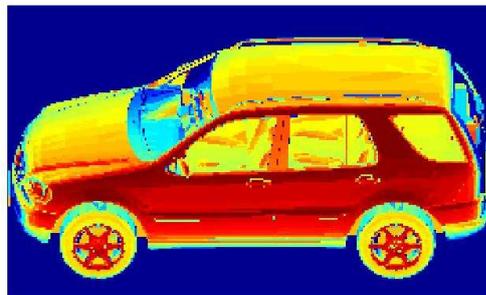


FIGURE 9 – Exemple d'image laser simulée. (Image Thales)

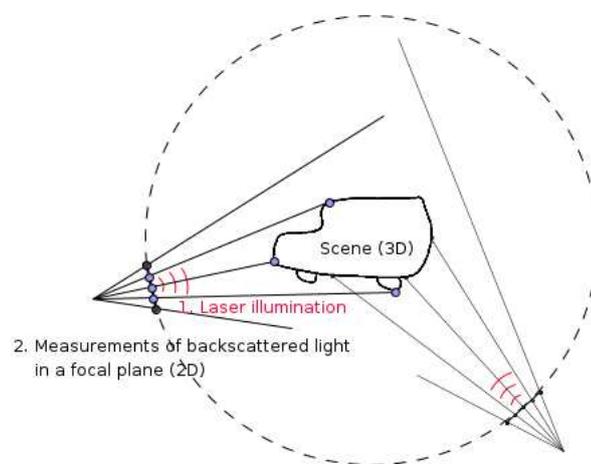


FIGURE 10 – Modèle du sténopé pour la formation d'une image laser (coupe dans le plan du cercle parcouru par la source).

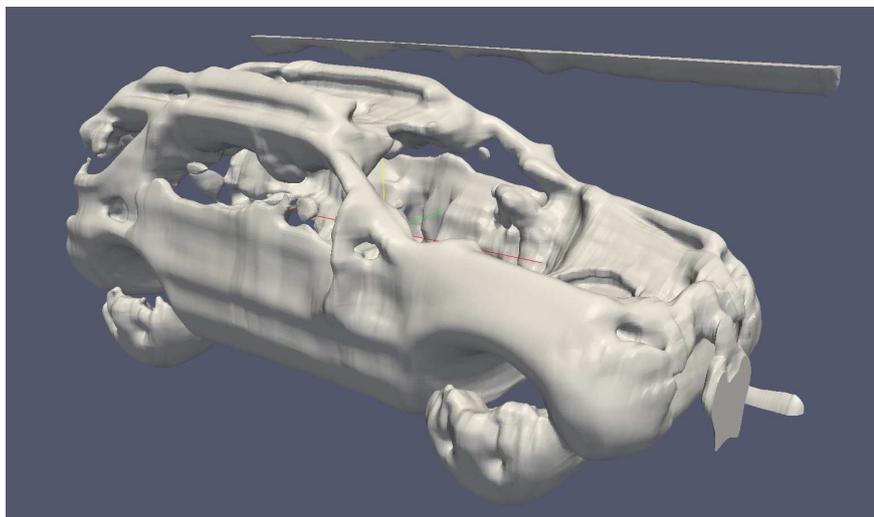
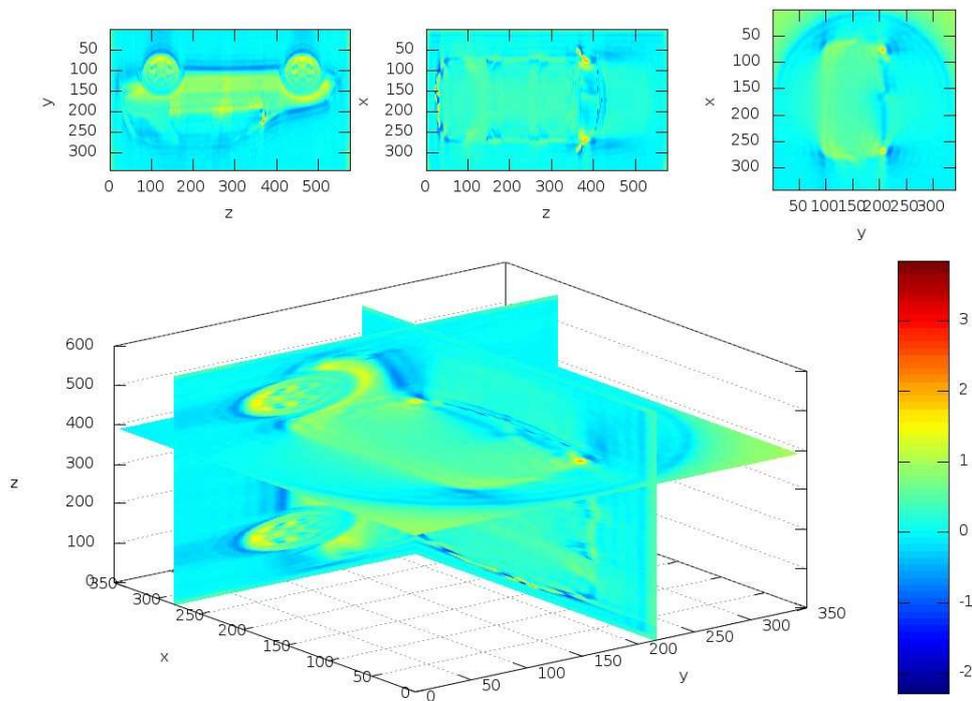


FIGURE 11 – Reconstruction par algorithme de FBK, à partir d’images laser simulées. En haut, vue en coupes du volume de reconstruction. L’image du bas est obtenue par binarisation et lissage.

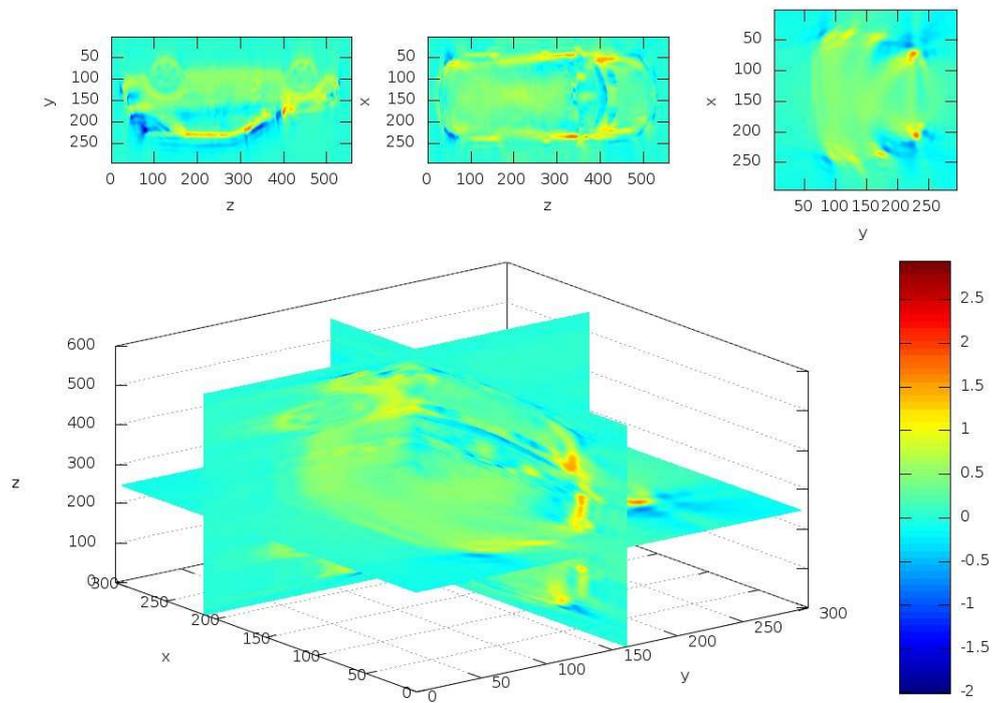


FIGURE 12 – Reconstruction par algorithme de FBK, à partir d'images laser réelles. En haut, vue en coupes du volume de reconstruction. L'image du bas est obtenue par binarisation et lissage.

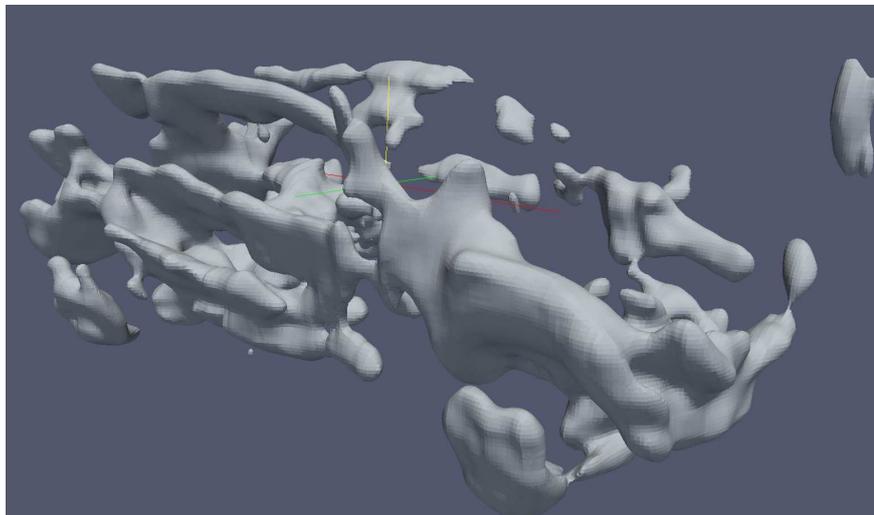
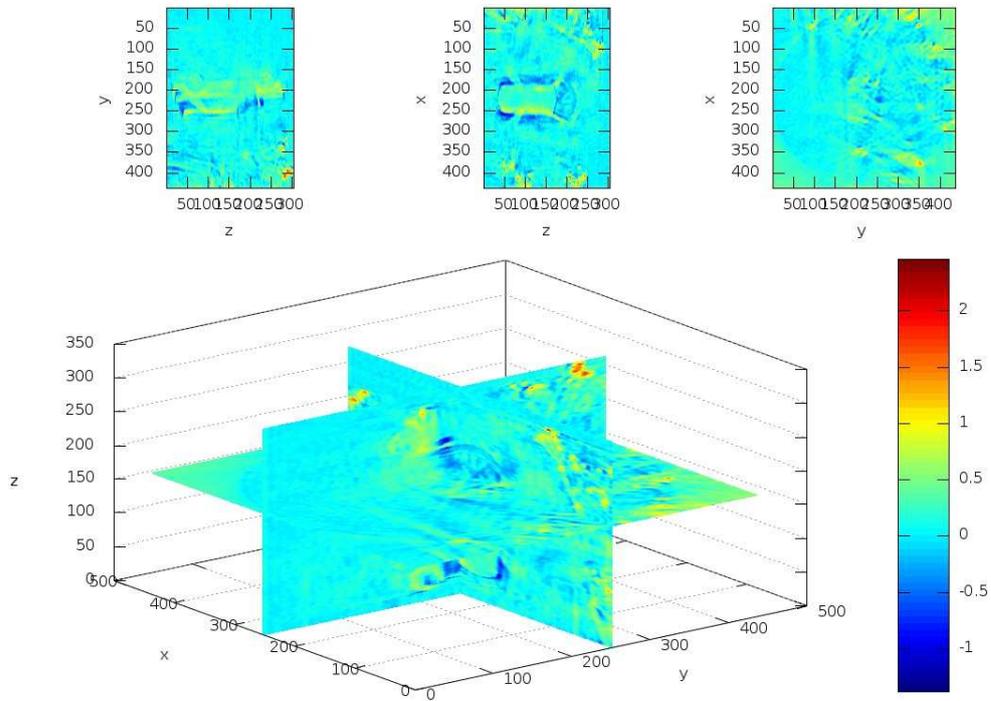


FIGURE 13 – Reconstruction par algorithme de FBK, à partir d'images laser réelles d'un objet camouflé. En haut, vue en coupes du volume de reconstruction. En bas, image obtenue après extraction de la zone d'intérêt, binarisation et lissage.

surfacique définie sur le bord d'un objet convexe. Enfin, on précise que la fonction surfacique est non uniforme, sous peine de retomber dans le contexte de la reconstruction par silhouette déjà connue.

En résumé, il ressort de ce raisonnement un intérêt pour le problème d'imagerie suivant : reconstruction d'une fonction surfacique, non uniforme, définie sur le bord d'un convexe, à partir de ses projections en réflexion, dans la configuration du balayage parallèle en 2D. Ce problème mathématique ouvert semble être une bonne piste à explorer quant à la compréhension du problème d'imagerie laser, et plus particulièrement quant à l'heuristique décrite ci-dessus.

## 4 Conclusion et perspectives

Lors de cette collaboration, nous avons revu les bases mathématiques de la tomographie par transmission. En particulier, nous avons implémenté l'algorithme de FDK. Puis, nous avons étudié un problème industriel d'imagerie laser tri-dimensionnelle. Nous avons ainsi testé l'algorithme de FDK sur des séquences d'images laser réelles. Les résultats de ce type de techniques ouvrent des perspectives intéressantes en imagerie, en particulier concernant l'identification d'objets dissimulés. Il est remarquable que les techniques déployées sont similaires à celles de la tomographie médicale.

Par ailleurs, d'un point de vue théorique, la qualité des résultats de l'heuristique employée soulève des questions mathématiques. En effet, les données de l'imagerie laser sont des données résultant des interactions d'un laser avec les surfaces rugueuses de la scène. On constate numériquement qu'un algorithme de rétroprojection (FDK) appliqué à ces données reconstruit la scène. On peut donc conjecturer que les images laser se rapprochent de données de type Radon. Il paraît important d'identifier plus précisément la transformée en jeu, ainsi que son inverse. Ces questions difficiles restent ouvertes. Répondre à ces questions devrait permettre de justifier la validité de l'heuristique, mais aussi d'en proposer une version améliorée. Une première étape à franchir pourrait être la résolution du problème modèle identifié lors du projet.

## Références

- [1] H. Ammari. *An Introduction to Mathematics of Emerging Biomedical Imaging*. Springer, 2008.
- [2] G. Berginc and M. Jouffroy. Simulation of 3D laser systems. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009*, volume 2, pages 440–444. IEEE, 2009.
- [3] G. Berginc and M. Jouffroy. Simulation of 3D laser imaging. *PIERS Online*, 6(5) :415–419, 2010.
- [4] G. Berginc and M. Jouffroy. Three-dimensional tomographic reconstructions using bi-dimensional conventional active imagery. *Rapport interne Thales*, 2010.
- [5] G. Berginc and M. Jouffroy. 3D laser imaging. *PIERS Online*, 7(5) :411–415, 2011.
- [6] L. Feldkamp, L. Davis, and J. Kress. Practical cone-beam algorithm. *JOSA A*, 1(6) :612–619, 1984.
- [7] F. Natterer and F. Wübbeling. *Mathematical methods in image reconstruction*. SIAM, 2007.
- [8] O. Scherzer. *Handbook of mathematical methods in imaging*. Springer Verlag, 2011.
- [9] J. Sharpe. Optical projection tomography as a new tool for studying embryo anatomy. *Journal of anatomy*, 202(2) :175–181, 2003.