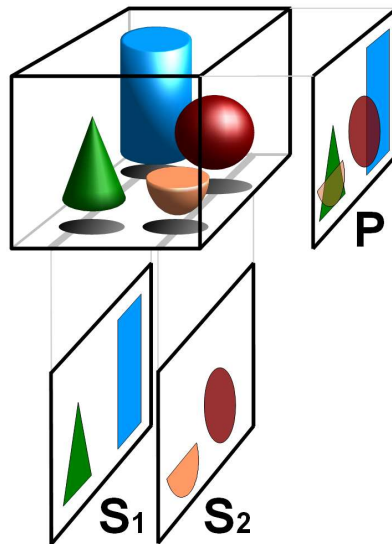


De la reconstruction tomographique à l'exploitation des tomogrammes



Etudiants :

Camille FONT

Niels ETIEN

Mathilde SALAGNAD

Sarah LEMEE

Matthieu MEIGNIN

Marine RICHARD

Enseignant-responsable du projet :

Jérôme YON

Date de remise du rapport : 15/06/2020

Référence du projet : STPI/P6/2020 – #22

Intitulé du projet :

De la reconstruction tomographique à l'exploitation des tomogrammes.

Type de projet : Projet expérimental et analyse numérique de tomogramme grâce à un logiciel.

(expérimental, simulation, veille technologique,...)

Objectifs du projet :

Notre projet de P6 a eu pour objectif de se familiariser avec une technique d'observation et de reconstruction physique qui est la tomographie. En effet, notre but était de comprendre ce principe pour ensuite étudier un agrégat de particules de suies. Après cela, nous devons analyser cette image d'un point de vue physique mais aussi mathématique.

Pour cela nous avons réalisé une reconstruction 3D d'un stack d'images des particules grâce au logiciel TomoJ. Puis une fois obtenue nous avons pu appliquer la transformée de Fourier et ainsi tenter de déterminer les propriétés mathématiques de cette suie.

Mots-clefs du projet: Agrégats, Reconstruction, TomoJ, Imagerie

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons remercier **M. Jérôme YON**, professeur à l'INSA, notre référent de projet qui nous a orienté et dirigé tout au long du semestre. Il nous a fait découvrir la tomographie en nous intégrant dans le cadre plus général de son propre projet de recherche.

Ensuite, nous adressons nos sincères remerciements à **M. Daniel FERRY**, chercheur au Centre Interdisciplinaire de Nanoscience de Marseille. Il nous a été d'une grande aide pour l'avancée de notre projet en nous transmettant des images réelles déjà travaillées car nous ne disposions pas de matériel assez puissant, au vu de la situation. M. Ferry nous a également fait parvenir une documentation simplifiée afin de mieux appréhender le logiciel TomoJ.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	4
1. Introduction.....	6
2. Méthodologie et organisation du projet.....	7
3. Travail réalisé et résultats	9
3.1. Domaines d’applications	9
3.1.1. Imagerie médicale	9
3.1.2. Mécanique des matériaux.....	10
3.1.3. Notre projet : l’étude des suies	12
3.2. Fonctionnement et interprétation mathématique	13
3.2.1. Transformée de Radon et inversion	13
3.3. Reconstruction d’un tomogramme	16
3.3.1. Logiciel TomoJ	16
3.3.2. Résultats obtenus.....	17
3.3.3. Recherches complémentaires	17
3.3.4. Exploitation du tomogramme.....	19
4. Conclusion et perspectives	21
5. Bibliographie	22
6. Annexe.....	24
6.1. Guide de prise en main du logiciel TomoJ.....	24

1. INTRODUCTION

Le mot tomographie tire son origine du grec "tomos" qui signifie tranche et "graph" qui signifie image. La tomographie a pour but de fournir une représentation en coupe des structures anatomiques et/ou de leurs fonctions. Cette méthode permet de reconstruire un volume à partir d'un ensemble de projections de ce volume observées dans plusieurs directions. Elle permet notamment la reconstruction de certaines propriétés intérieures de l'objet en question, pour l'étude de sa topologie, de sa taille, de sa morphologie etc.

Il existe différents types de tomographies s'appliquant dans des domaines variés. La tomographie qui présente une plus grande résolution est celle qui met en jeu des ions et qui s'applique dans les sondes atomiques. Vient ensuite la tomographie électronique puis la tomographie par rayons X. Finalement, la méthode avec la plus basse résolution est l'imagerie par résonance magnétique qui utilise des ondes radiofréquence. Cette imagerie ne nécessite pas de voir des images dans la précision et peut donc s'étudier avec une faible résolution. Ainsi selon le niveau de résolution, on peut étudier divers types d'objets avec plus ou moins de précision au niveau de leur anatomie et de leurs propriétés internes et externes.

La tomographie s'explique aussi d'un point de vue mathématique à travers l'élaboration d'un algorithme de reconstruction.

C'est au début du XX^{ème} siècle que se construit et se développe la méthode de la tomographie.

En 1917, le mathématicien Johann Radon énonce un théorème de projection qui traite de la reconstitution d'une fonction réelle à deux variables à l'aide d'un ensemble de projections selon des droites concourantes.

Notre projet s'est donc orienté sur la reconstruction tomographique d'un agrégat de suies observé au microscope électronique à transmission. Notre but était de produire une image 3D de l'agrégat et d'essayer d'en interpréter le résultat.

2. MÉTHODOLOGIE ET ORGANISATION DU PROJET

Le projet que nous avons mené lors de ce semestre avec M. Yon, s'est révélé très intéressant sur de multiples aspects. En effet, notre professeur a proposé ce sujet de projet car, dans le cadre de son activité de chercheur, il étudie l'aspect des particules de suie. Ainsi, grâce à la tomographie, qui permet la reconstitution 3D de ces particules, il pourra créer une fonction d'autocorrélation de paire et ainsi étudier les propriétés de la suie.

Lorsque nous avons découvert le sujet, nous ne savions ni dans quel sens orienter nos recherches, ni quelles expériences réaliser. Nous avons donc énormément discuté avec notre professeur référent avant de rapidement nous diriger vers la réalisation d'un tomogramme, afin d'acquérir une solide base de notions physiques et mathématiques et de comprendre au mieux notre projet. Le fait que ce dernier aboutisse à quelque chose d'inconnu nous a motivé et a rendu notre projet très intéressant. En effet, notre professeur ne savait pas lui-même ce que donnerait notre travail à la fin de ce projet. Ainsi sur ce point-là nous étions presque au même niveau, mais M. Yon nous a tout de même indiqué de nombreuses pistes concrètes. Nous devons réaliser le tomogramme d'une particule de suie à l'aide d'un logiciel puis l'interpréter au niveau physique et mathématique. Il nous fallait également définir et nous documenter sur le principe de la tomographie et ses différentes applications dans le monde actuel.

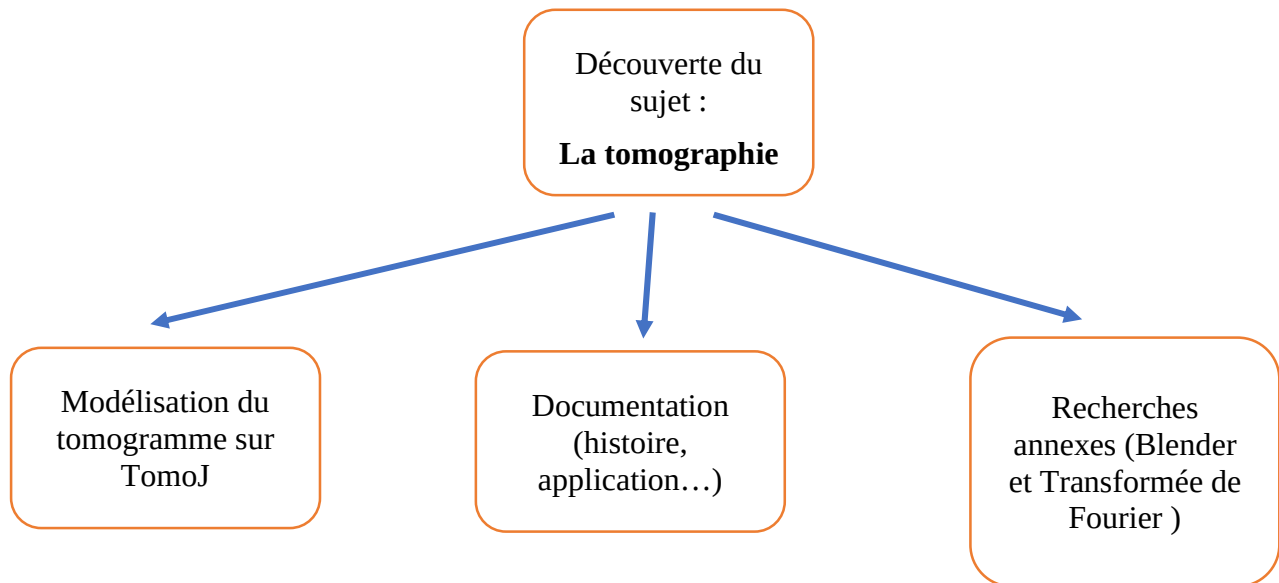
Nous avons également pris contact avec Monsieur Daniel Ferry, chercheur au CNRS et à l'Université d'Aix-Marseille, qui a travaillé sur les agrégats de suies observés par notre professeur. Il nous a fourni des données ainsi que des conseils pour que nous puissions mener notre projet à bien.

Nous nous sommes donc divisés en plusieurs binômes pour se répartir les tâches. Un groupe, avec un ordinateur assez puissant pour faire fonctionner le logiciel, s'est orienté dans la découverte et le parcours du logiciel TomoJ, pour observer dans un premier temps les stacks d'images virtuelles puis celles des suies réelles. Le groupe a également approfondi d'autres moyens de reconstruction des particules. Un deuxième binôme s'est quant à lui penché sur l'approche mathématique à travers l'interprétation du tomogramme. Finalement, le dernier groupe s'est chargé de se documenter plus profondément sur l'apparition de la tomographie au niveau historique mais également au niveau des avancées que cette technique a apporté dans divers domaines, par exemple, le médical.

On remarque donc que même si nous avons choisi de répartir le travail en binôme, notre avancée dépendait le plus souvent des autres groupes. Cela a créé une forte solidarité et entraide car nous découvrons tous ensemble le concept de la tomographie et chacun pouvait, à chaque séance, exprimer son interprétation et sa compréhension du sujet abordé. Lors de la période de confinement, nous avons gardé contact en correspondant ensemble de manière régulière sur les plateformes Zoom et Skype et nous avons continué à nous rassembler de

façon hebdomadaire via l'intermédiaire de réunions virtuelles. Nous avons cependant eu un certain mal à entrer en contact avec un membre du groupe durant cette période particulière.

Nous nous retrouvions, une partie de la réunion, pour faire le bilan avec notre référent de projet et lui demander de l'aide sur certains points plus compliqués, et l'autre partie, tous les six, pour mettre nos avancées en communs et s'organiser pour la suite du projet.



3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

3.1. Domaines d'applications

Au cours de nos recherches, nous avons découvert que la tomographie a un large panel d'applications. En effet, elle est utilisée majoritairement dans l'imagerie médicale, mais aussi en mécanique des matériaux pour comprendre le comportement de certains matériaux, ainsi qu'en paléontologie pour l'étude des structures internes des fossiles, ou même en géophysique pour la prospection pétrolière. En biologie, elle permet de comprendre le fonctionnement des micro-organismes par exemple. La tomographie informatisée (TI) sert également au contrôle des bagages dans les aéroports grâce à la mise en place de tomodensitomètres (scanner CT). D'autre part, la tomographie permet d'observer des particules, ce qui nous a aidé dans l'étude des agrégats de suies présents dans notre projet.

3.1.1. Imagerie médicale

À l'origine de la production d'images médicales, on retrouve plusieurs phénomènes physiques. En réalité, il existe quatre modalités de méthodes d'imagerie médicale : la radiologie, l'échographie, l'IRM et la médecine nucléaire. Ces modalités reposent sur l'interaction d'ondes, de natures différentes, avec les tissus biologiques. Deux types d'ondes sont utilisés : les ondes électromagnétiques (rayons X pour la radiologie, rayonnement gamma pour la médecine nucléaire, et ondes radio pour l'IRM), et les ondes mécaniques (ultrasons) pour l'échographie. Ces techniques d'imagerie se regroupent elles aussi en diverses catégories : l'imagerie par transmission, celle par rayons X ou encore par émission pour la médecine nucléaire, ainsi que l'IRM et enfin l'échographie.

Dans le domaine de l'imagerie médicale, on retrouve la tomographie par émission de positons (TEP). C'est une méthode utilisée principalement en médecine nucléaire puisqu'elle est produite par les positons issus d'un produit radioactif préalablement injecté au corps ou patient observé. Son principe est de mesurer en trois dimensions une activité métabolique ou moléculaire afin de diagnostiquer les extensions de cancers.

Dans un premier temps, un radiotracteur est administré par voie intraveineuse au patient. Ce radiotracteur va s'accumuler dans les cellules qui le consomment. Le plus souvent le radiotracteur utilisé est le 18-F-Fluorodésoxyglucose marqué par l'isotope radioactif du fluor 18-F. Il comporte une cible à sa sortie sur laquelle sont projetées les particules accélérées. Une fois qu'il est produit, l'isotope va servir de balise dans l'organisme puis va être incorporé dans une molécule afin de former le radiotracteur. Par la suite, le patient est allongé puis placé dans le tube détecteur de la TEP. Lorsque l'atome radioactif revient à un état stable, il émet un positon. Ce dernier parcourt alors un court trajet dans l'organisme avant de fusionner avec un électron. La rencontre entre le positon et l'électron donne naissance à deux photons émis simultanément qui partent en ligne droite dans deux directions diamétralement opposées. Ils sont alors recueillis par la couronne de détecteurs de la caméra située autour du patient. L'ordinateur, qui récolte les très nombreux photons émis lors de la

séance, détermine des lieux d'annihilation des positons. Cette reconstitution permet de créer une image représentant la distribution des molécules radioactives dans le corps du patient. On peut ainsi observer les anomalies de fixation du radiotracer, qui peuvent être signe d'un potentiel cancer. Autrement dit, les zones les plus intenses de l'image correspondent à une forte consommation de glucose et permettent donc de détecter les foyers cancéreux.

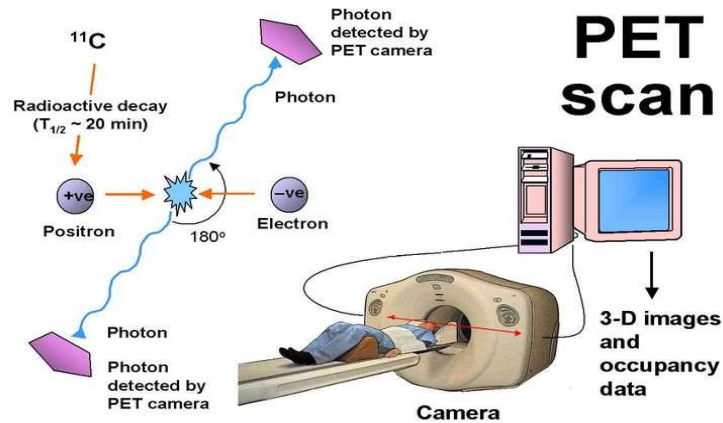


Figure 1: Principe de la tomographie à émission de photon (scanner)

La TEP est donc un puissant outil, également utilisé en cardiologie, neurologie ou encore psychiatrie.

Aujourd'hui, lors de la plupart des TEP, des scanners X sont utilisés en complément, afin de superposer l'image fonctionnelle issue de la TEP à sa localisation anatomique précise dans le corps (image du scanner X). Cela permet d'obtenir une image plus précise.

3.1.2. Mécanique des matériaux

En science des matériaux, la tomographie permet l'étude de leur comportement. Dans un premier temps, il est possible de connaître les matériaux ainsi que leur microstructure 3D et la distribution des éléments qui les composent. Cette technique d'imagerie permet d'analyser des microstructures sans être intrusive ou destructive (Contrôle Non Destructif, CND) car elle ne dénature pas l'objet étudié. On peut ainsi se focaliser sur les données spatiales, la morphologie, la topologie (propriétés géométriques) et la taille des structures étudiées. En utilisant cette technique tout en sollicitant (de manière thermique, mécanique, etc.) un matériau, on peut étudier l'évolution de ses paramètres au cours de la sollicitation. On peut ainsi appréhender des phénomènes se produisant au sein même de la matière.

La tomographie à rayons X est un exemple de tomographie fréquent dans l'étude des matériaux. Elle est utilisée en tomographie industrielle, ou CT Scan (Computed Tomography), technologie non destructive qui a pour but le contrôle de pièces mécaniques dans l'industrie. Elle permet de reconstruire en 3D des pièces d'une grande complexité géométrique en se focalisant sur leurs propriétés internes et externes. Ces techniques sont très utiles, tant en Recherche et Développement qu'en production lors du test d'échantillons.

La tomographie à rayons X utilisée dans l'industrie dérive et s'inspire des technologies que l'on peut voir dans le domaine médical comme dans les scanners et les IRM. Elle se base sur l'absorption des rayons X qui diffère selon le type de matériau et sa quantité. On envoie ainsi des rayons X sur l'objet que l'on souhaite étudier et on le fait tourner autour d'un axe de rotation. Lorsque le rayon est envoyé sur la pièce mécanique, une interaction entre le rayon X et la matière a lieu. Cette interaction peut être de nature différente : absorption photoélectrique, diffusion cohérente (photon qui réagit avec un électron avant d'être réémis avec la même énergie), etc. On obtient ainsi un grand nombre d'images (radiographies 2D) représentant les rayons absorbés ou non, résultants de l'interaction entre la matière et le rayon émis. Les images possèdent des niveaux de gris différents selon l'absorption et selon les différents angles de vue réalisés. Ensuite, grâce à un logiciel de calcul et de traitement de données tomographiques on peut reconstruire une image 3D de l'objet traduisant ses propriétés en fonction des matériaux utilisés. En effet, après avoir obtenu de nombreuses images prises avec des angles de vue différents, on peut expliquer la reconstruction tridimensionnelle de l'échantillon grâce à la transformée de Radon qui permet de trouver le champ d'absorption ayant donné lieu aux radiographies. Puisque ces images caractérisent le rayonnement ayant traversé la matière, l'ordinateur se sert de la transformée de Radon inverse pour obtenir l'objet à partir des images. Lors de ces calculs, l'utilisation de l'espace de Fourier simplifie et augmente donc la rapidité des opérations mathématiques.

Finalement, l'interprétation de ce résultat peut notamment permettre de trouver des anomalies internes ou des discontinuités au sein de la pièce ainsi que de déterminer des taux de porosité, d'étanchéité ou des défauts de géométrie ou de métrologie, d'épaisseur, etc.

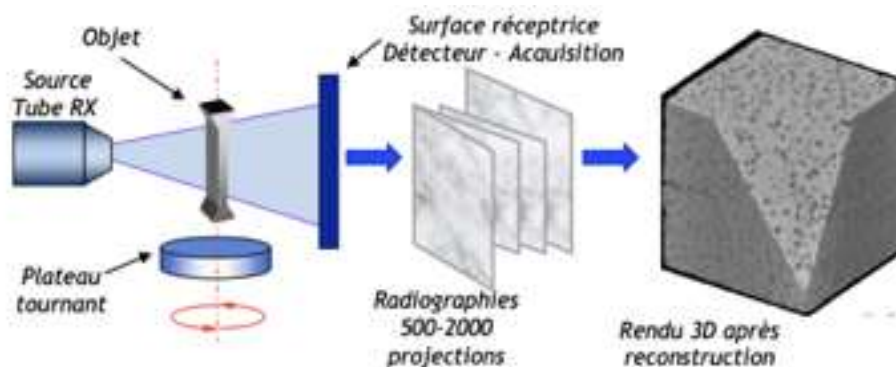


Figure 2: Principe de fonctionnement de l'acquisition des données

D'autre part, pour obtenir plus de précisions sur les microstructures de certains matériaux composites ou alliages de métaux, on peut utiliser la micro-tomographie ou pour plus de précisions encore, la nano-tomographie. Celles-ci permettent une étude en profondeur de leurs propriétés mécaniques.

Ainsi, la tomographie a un rôle très important dans de nombreux domaines industriels comme l'automobile et l'aéronautique, qui sont toujours à la recherche de matériaux performants possédant des propriétés innovantes et répondant aux cahiers des charges de leurs

pièces. On peut aussi retrouver facilement des défauts de fabrication non apparents mais constituant une faille dans les propriétés des matériaux en question. On est donc en mesure de vérifier la santé interne des pièces fabriquées en réalisant par exemple des études de structures lattices : étude de porosité, d'étanchéité ou des contrôles dimensionnels, car la tomographie fournit des données très précises et des images très nettes, comme le montre ci-dessous, la coupe tomographique d'un échantillon de plâtre ou l'endommagement de l'acier.

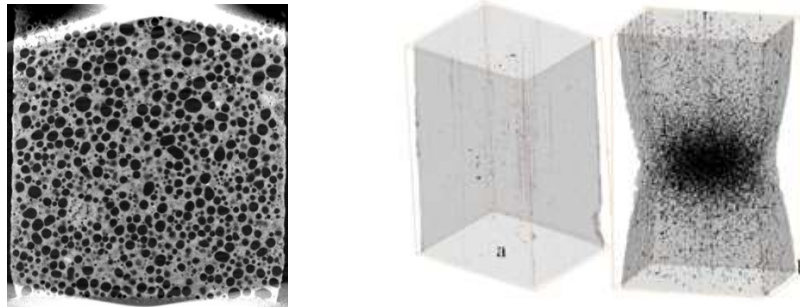


Figure 3: Endommagement ductile de l'acier et croissance interne

Ainsi, nous pouvons dire que la tomographie présente d'énormes avantages sur la connaissance des matériaux et permet d'affiner les modèles numériques en réalisant de nombreuses expériences de simulation de déformations par exemple. On peut ainsi approfondir la connaissance des propriétés d'un matériau de façon précise.

Ces techniques, la tomographie à rayons X et le contraste de phase, sont aussi utilisées en paléontologie et en archéologie pour l'étude des structures internes des organismes fossilisés. D'autre part, l'examen des contraintes mécaniques sur un os d'un pied d'éléphant peut, par exemple, aider à reconstruire la morphologie des dinosaures grâce à l'étude de la génétique et de l'évolution.

De plus, en soumettant les fossiles à la microtomographie à rayons X et au rayonnement synchrotron, qui est une source extrêmement puissante de rayon X produisant un flux très énergétique et très focalisé, on obtient des détails extraordinaires sur le vivant.

3.1.3. Notre projet : l'étude des suies

Un autre domaine d'application de la tomographie est l'étude de particules de suies dans le cadre des recherches de notre professeur. Ainsi, notre projet consiste à utiliser le principe de la tomographie au service d'une étude concrète d'un agrégat de particules de suies.

Les suies sont de fines particules composées de carbone dont la taille varie de quelques nanomètres à quelques micromètres. Présentes dans l'atmosphère, ces dernières peuvent être facilement inhalées par les personnes en contact avec. Le thème de travail de M. Yon et ses collègues expose les suies comme un sujet majeur de la pollution environnementale. Leurs recherches sont donc centrées sur la création de particules de suies

lors de la combustion du kérosène dans le domaine aéronautique. L'étude des suies permet donc d'en savoir plus sur leurs propriétés et leurs caractéristiques physiques.

Pour observer ces particules, il faut créer une combustion entre différents produits dans des conditions de pression et de température définies. Les suies se forment donc dans une flamme dont la température est très élevée. Pour récolter les particules de suies sur une plaque pour l'observer, il faut placer cette plaque dans la flamme. Un fois les suies déposées, elles peuvent être observées plus précisément.

Pour pouvoir étudier ces suies, notre professeur encadrant nous a expliqué qu'il a utilisé un microscope électronique à transmission (MET). Cette technique de microscopie consiste à envoyer un faisceau d'électron sur ce que l'on veut observer. Ce faisceau se transmet à travers l'échantillon et interagit avec la matière. Il produit donc différents rayonnements en traversant la matière mais ce sont les électrons transmis qui sont analysés par le détecteur pour traduire le signal en une image contrastée.

Ainsi, notre professeur a obtenu des images d'agrégats de suies qu'il nous a fourni pour que nous puissions en faire une reconstruction en trois dimensions. Notre tâche résidait donc dans l'étude précise des piles d'images de suie, appelées stack d'image, à fin d'en tirer le plus d'informations physiques et mathématiques possibles.

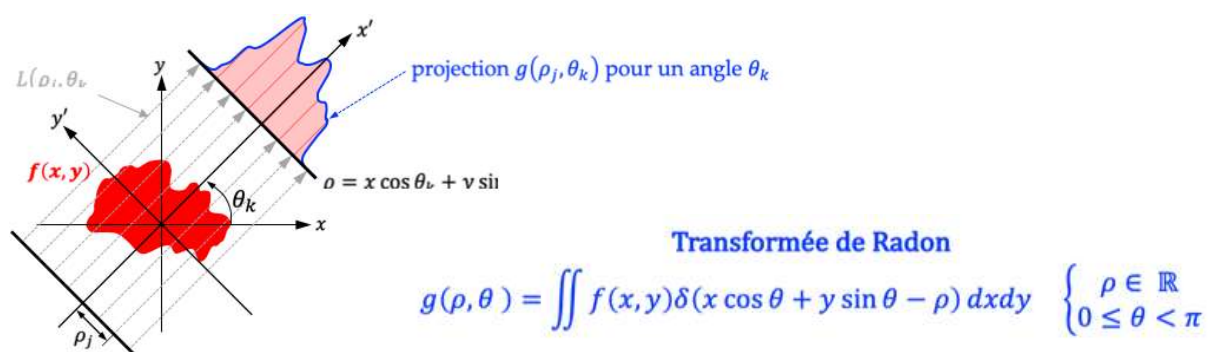
Nous avons donc commencé par tenter de reconstruire l'image 3D grâce au logiciel TomoJ. Nous avons consacré de longues semaines à cette étape car c'est de celle-ci que découlent toutes nos interprétations. Il a fallu s'approprier le logiciel et modifier les réglages à de nombreuses reprises. Nous avons fait les premiers tests avec un agrégat virtuel puis avec les suies réelles qui étaient plus compliquées à traiter.

Puis quand nous sommes parvenus à obtenir un résultat, nous avons pu l'analyser et notamment y appliquer la transformée de Fourier. Cela a été plutôt difficile à mettre en œuvre car il a fallu comprendre un aspect mathématique qui dépasse notre niveau actuel.

3.2. Fonctionnement et interprétation mathématique

3.2.1. Transformée de Radon et inversion

Le schéma ci-dessous représente la formule de la Transformée de Radon. Elle établit la possibilité de reconstituer en volume un objet au moyen de la totalité de ses projections.



La transformée de Radon permet, à partir d'un objet ou d'une fonction, de créer un sinogramme (les données brutes issues de la tomographie) grâce à de nombreuses projections. Elle se définit comme suit. Soit $f(x, y)$ une fonction continue et à support compact dans \mathbb{R}^2 . La transformation de Radon de $f(x, y)$ est définie par les intégrales curvilignes le long d'une droite L :

$$Rf = \int_L f(x, y) dl$$

dont la droite $L \equiv L(\theta, p)$ est établie par la formule:

$$p = x \cos \theta + y \sin \theta \quad \forall p \in \mathbb{R}, \theta \in [0, 2\pi)$$

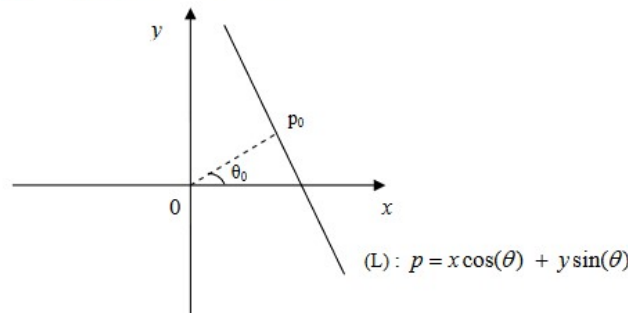


Figure 4: Droite L déterminée par 2 paramètres p_0 et θ

L'ensemble des mesures de la transformation de Radon (Rf) (θ, p) obtenues pour une valeur fixée de θ avec $p \in [-\infty; +\infty]$ est appelé projection de $f(x, y)$.

L'ensemble des mesures de Radon (Rf) (θ, p) obtenues pour $p \in [-\infty; +\infty]$ et $\theta \in [0; 2\pi)$ est quant à lui appelé sinogramme. On l'appelle ainsi car les données associées au point d'objet $f(x, y) = \delta(x - x_0) \delta(y - y_0)$ sont uniquement non nulles le long de la sinusoïde $p = x \cos(\theta) + y \sin(\theta)$ dans le domaine (p, θ) .

Par la suite, on suppose que les axes du système de coordonnées (Oxy) tournent d'un angle de θ .

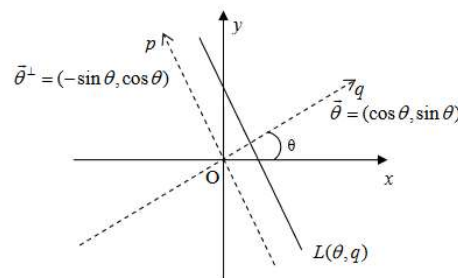


Figure 5: Représentation de la droite L dans l'espace (θ, q)

En pratique, on ne calcule que la transformation de Radon dans une région d'intérêt D . Soient q_1 et q_2 les deux points d'intersection de ligne $L(\theta, q)$ et courbe $f(x, y)$ dans le système de coordonnées (Opq) . On a,

$$(Rf)(\theta, p) = \int_{-\infty}^{q_1} f(p\bar{\theta}, q\bar{\theta}^\perp) dq + \int_{q_1}^{q_2} f(p\bar{\theta}, q\bar{\theta}^\perp) dq + \int_{q_2}^{+\infty} f(p\bar{\theta}, q\bar{\theta}^\perp) dq$$

On obtient alors le schéma complet présenté en début de paragraphe.

La transformée de Radon obéit à trois propriétés phares des mathématiques : la linéarité, la translation et la rotation. Ces propriétés permettent de réaliser la théorie de Radon, ce qui est plus efficace car elle diminue de moitié les données requises dans une période et accélère le temps de traitement simultanément.

Pour illustrer l'application de la transformation de Radon, nous pouvons prendre un exemple bien connu dans le domaine de la tomographie à rayons X. La transformation du spectre de Shepp-Logan. Cet exemple permet de vérifier la précision de l'algorithme de projection et ainsi de la reconstruction testée. En vue de faciliter le calcul, on désintègre la spectre en plusieurs ellipses de tailles différentes. Puis, nous effectuons le calcul que sur un disque d'unité. Enfin, en se basant sur le résultat obtenu et les propriétés de Radon, on déduit facilement la transformation des autres ellipses.

Finalement, cette théorie se révèle très utile pour la technique de tomographie à rayons X par le calcul de la transformation de Radon d'une image numérique, notamment dans la géométrie de projection en parallèle. Par exemple, dans un système de la tomographie à rayons X qui contient n source d'émissions et n détecteurs, on doit faire également n projections en géométrie parallèle. C'est une étape indispensable de la préparation des données pour le problème de reconstruction d'image.

En appliquant ensuite la transformée de Radon inverse, on obtient une reconstruction au moyen d'une image rétroprojetée (l'image de départ vaut l'intégrale de l'ensemble créé par le sinogramme). Elle permet de filtrer toutes les projections et de les propager sur toute l'image dans la même direction où ils avaient été projetés. On lui donne ainsi parfois le nom de "reconstruction par rétroprojection filtrée".

Voici donc la transformée de Radon inverse où F est la transformée de Fourier :

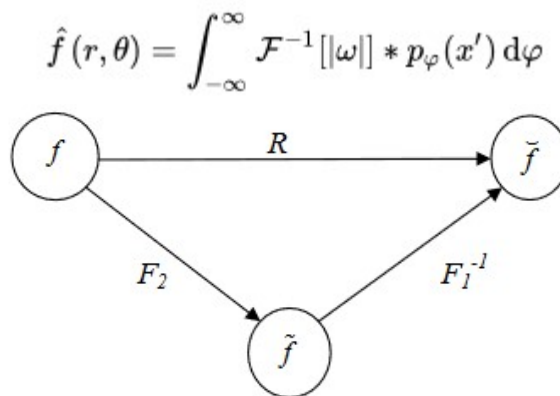


Figure 6: Démonstration de la relation entre la transformation de Radon et de Fourier dans un espace 2D

3.3. Reconstruction d'un tomogramme

3.3.1. Logiciel TomoJ

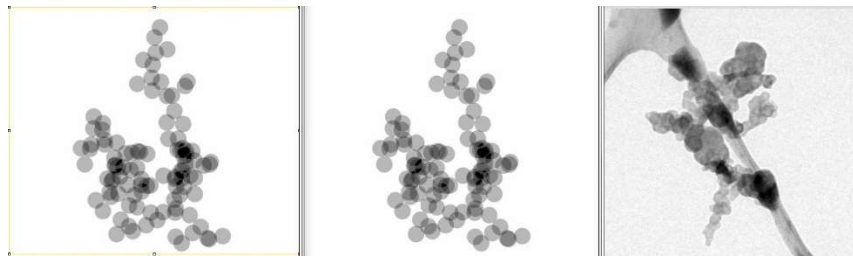


Figure 7: Une image de chaque stack de suies de base suie virtuelle 1 (stack de 121 images) , suie virtuelle 2 (stack de 361 images), suie réelle (stack de 121 images)

TomoJ est un plugin additionnel du logiciel ImageJ, il fournit des méthodes pour l'alignement automatique et manuel des séries tomographiques, le calcul d'axe d'inclinaison et trois méthodes de reconstruction dimensionnelle (WBP, ART, SIRT). Ce qui nous intéresse principalement dans ce plugin ce sont les méthodes d'alignement automatique et de reconstruction dimensionnelle.

Pour arriver à observer et reconstruire les particules virtuelles fournies par M. Yon ainsi que la particule réelle fournie par M. Ferry, il nous a fallu installer et comprendre le fonctionnement d'ImageJ et de TomoJ.

À l'aide d'une documentation primaire mais surtout après avoir fait de nombreux essais sur les images virtuelles et réelles fournies, nous avons finalement réussi à obtenir les tomogrammes attendus et à obtenir une vue 3D des particules de suies. Par ailleurs, si vous souhaitez reproduire cette méthode un mode d'emploi détaillé se situe en annexe mais vous aurez surtout besoin d'une machine très récente et très puissante.

ImageJ est un logiciel très difficile à prendre en main car la documentation dessus est extrêmement légère, le plug-in TomoJ a quant à lui aucune documentation. Nous avons donc dû tester toutes les fonctionnalités une par une et ce malgré le temps et les ressources nécessaires à une reconstruction. Sur l'ordinateur nous servant à faire tourner ce logiciel (composé d'un Intel I7 7700 HQ, d'une NVidia GTX 1060 et de 16 Go de ram) ImageJ utilisait en moyenne 100% du CPU (processeur), 80 % du GPU (carte graphique) et 100% de la mémoire de plus, sa température montait à environ 95°C. Enfin, nous avons dû autoriser ImageJ à utiliser 100% de la mémoire disponible de l'ordinateur sinon il nous était impossible de réaliser une transformée de Fourier. Au niveau du temps demandé pour les suies virtuelles environ 5 minutes par reconstruction étaient nécessaires. Mais pour la suie réelle, il a fallu 1h30 avant d'obtenir un résultat et pour effectuer la transformée de Fourier sur la plus légère des suies cela a nécessité 12h.

Les suies virtuelles n'ayant pas besoin d'un réalignement des images nous avons donc juste dû traiter les images afin que le plugin puisse les traiter facilement. Nous avons utilisé la méthode de reconstruction dimensionnelle WBP (Weighted Back Projection ou

rétroprojection pondérée) car elle est la plus adaptée d'après M. Ferry pour la reconstruction de suies. La méthode de rétroprojection pondérée est un algorithme de reconstruction tridimensionnelle (3D) actuellement bien connu utilisant une méthodologie qui attribue un niveau de signification statistique à une affirmation de supériorité relative d'un algorithme par rapport à un autre pour une tâche particulière.

Le stack d'images de la suie réelle avait lui besoin d'un réaligement, malheureusement nous n'avions pas d'ordinateurs suffisamment puissants à disposition pour pouvoir utiliser la méthode d'alignement automatique de TomoJ. M. Ferry a gracieusement accepté de nous envoyer le stack aligné par ses soins. À la suite de cela nous avons appliqué la même méthode que pour les suies virtuelles et avons obtenu un résultat plutôt satisfaisant même s'il reste encore du bruit autour.

3.3.2. Résultats obtenus

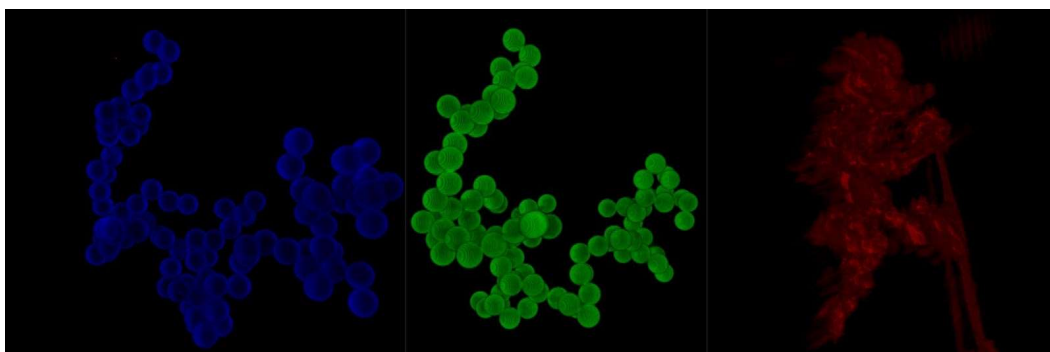


Figure 8: Suies reconstruites grâce à TomoJ, *suie virtuelle 1 (stack de 121 images)*, *suie virtuelle 2 (stack de 361 images, suie réelle (stack de 121 images))*

Comme montré ci-dessus les résultats obtenus pour les suies virtuelles sont sans défauts les stacks d'images étant au départ "parfaits". Pour la suie réelle malgré un pré-traitement et un traitement post-reconstruction le résultat comporte encore du bruit mais cela reste très satisfaisant étant donné que nous n'avions pas d'ordinateurs réellement conçus pour la reconstruction et que nous n'avions aucune base sur ImageJ et TomoJ avant ce projet.

Nous pouvons maintenant nous demander si ces résultats sont réellement exploitables : est-ce que la reconstruction garde les propriétés des particules ? Conserve-t-elle leur surface et leur volume ?

Nous vous invitons à cliquer sur ce lien afin de voir en temps direct l'image 3D reconstruite :

<https://www.youtube.com/watch?v=UjNjTf6Y6YI&feature=youtu.be&fbclid=IwAR2XQGU-GBl8l69vW8l3EBPAdJEj41KIjvx00ikB4n1Gmkpl0E6jDqaw3GU>

3.3.3. Recherches complémentaires

Après avoir reconstruit les tomogrammes des suies, nous avons essayé de générer nous-même des stacks d'images pour en reconstruire les tomogrammes par la suite. Pour cela, nous nous sommes servis du logiciel Blender, qui est très utilisé dans les domaines de la modélisation et de l'animation 3D.

Nous avons tout d'abord tenté de générer le stack d'un cube, car c'est la forme de base dans Blender. Pour obtenir les images nécessaires à la création du stack, il faut paramétrer la caméra de Blender de manière à ce qu'elle tourne autour de l'objet. On entre ensuite le nombre d'images souhaité dans l'animation ainsi que le nombre de tours que doit effectuer la caméra (ici 180 images, une par degré de rotation). Pour générer les images, on lance le rendu de l'animation, ce qui peut prendre du temps selon la taille et le nombre d'images. Une fois ces images enregistrées dans l'ordinateur, il suffit de les ouvrir dans le logiciel ImageJ qui permet d'en faire un stack très facilement. Nos premiers stacks étant inutilisables par TomoJ, nous avons appris qu'il fallait aussi modifier les propriétés du cube pour en obtenir un tomogramme propre. Nous avons donc modifié son matériau pour le remplacer par "Volume Absorption" : plus la couleur de l'image est foncée et plus il y a de matière.



Figure 9: Image tirée du stack d'un cube en absorption

Nous n'avons pas réussi à exploiter ces stacks non plus, soit parce que les images étaient trop petites, soit trop grandes et donc trop lourdes ou soit inutilisables pour avoir un résultat propre. Nous avons ensuite décidé de changer la géométrie de notre volume en changeant le cube par deux sphères collées, mais les résultats étaient tout aussi inexploitable.

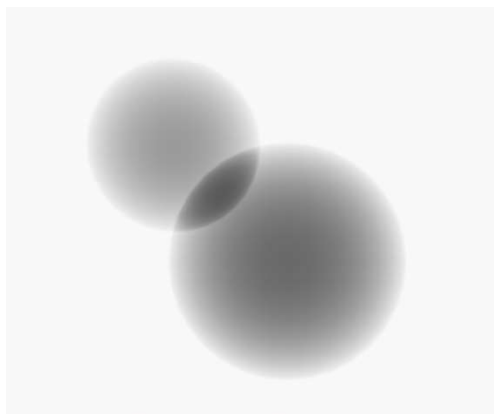


Figure 10: Image tirée du stack des deux sphères en absorption

Les autres paramètres que nous avons essayé de modifier sont la couleur du fond qui n'est pas parfaitement blanc et la qualité du rendu sur Blender, mais aucun n'a abouti sur un tomogramme.

Nous sommes un peu déçus de ne pas avoir réussi à reconstruire un tomogramme à partir d'un volume que nous avons nous même créé, d'une part parce que nous y avons passé beaucoup de temps et que nous aurions pu nous amuser à reconstruire des volumes plus originaux, et d'autre part parce qu'il aurait été plus facile de les exploiter que les tomogrammes de suies, notamment pour y effectuer des calculs de volume.

3.3.4. *Exploitation du tomogramme*

Après la génération de notre tomogramme, venait l'exploitation et l'interprétation de celui-ci. Nous nous demandions quel pouvait être son devenir et de quelle manière nous pouvions l'exploiter.

Ainsi, en premier lieu, la transformée de Fourier était une première solution d'interprétation de notre tomogramme.

La transformée de Fourier d'une fonction spatiale ou temporelle est une transformation mathématique qui décompose toute fonction en une somme infinie de fonctions sinusoïdales.

Les valeurs de cette transformée sont des nombres complexes ayant un module et un argument. Si l'interprétation physique de la transformée de Fourier est facile, lorsque l'on utilise des fonctions à une seule variable, en effet c'est une fonction du temps qui nous permet d'obtenir des fréquences. Lorsque l'on traite d'une fonction à plusieurs variables tel un tomogramme, (ici c'est une fonction de l'espace) il est plus difficile de visualiser ce que l'on obtient. En réalité, on obtient des valeurs complexes de domaine de fréquence.

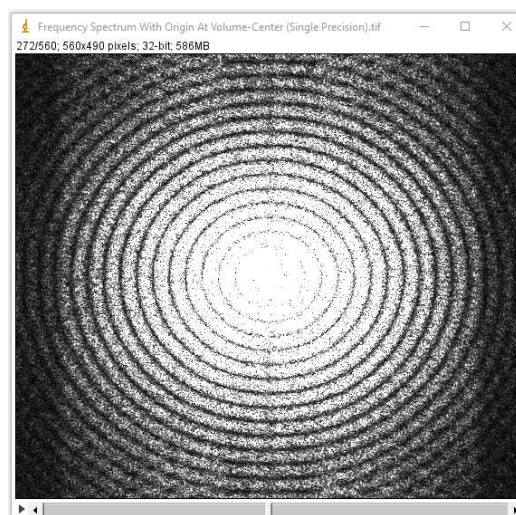


Figure 11: Coupe selon z de la transformée de Fourier: centre de l'agrégat

Dans notre cas nous avons utilisé un module d'expansion d'ImageJ afin de réaliser la transformée d'un objet en trois dimensions. L'intérêt derrière la transformée de Fourier réside

dans le traitement des spectres de phase obtenus. Pour cela on peut utiliser des filtres afin de supprimer les fréquences parasites de la transformée de Fourier de notre objet réel.

Ensuite, grâce à la transformée de Fourier inverse, on pourrait obtenir un tomogramme de meilleure qualité. Dans le cadre de notre projet, le logiciel utilisé ne permet pas d'effectuer l'inverse de la transformée pour des fonctions à trois dimensions, il en va de même pour les différents modules d'extension que nous avons pu utiliser au cours du projet, nous avons donc été contraints d'utiliser d'autres moyens pour analyser notre tomogramme. Il est important de préciser qu'il est nécessaire de posséder une puissance de calcul conséquente lorsqu'on manipule des algorithmes FFT (Fast Fourier Transform), d'autant plus lorsqu'il s'agit d'objets en trois dimensions.

D'autre part, notre professeur encadrant nous avait parlé de son souhait de se servir du tomogramme pour une fonction d'autocorrélation de paire.

En mathématiques, l'autocorrélation correspond à un outil servant dans le traitement du signal. Cet outil permet d'étudier des spectres optiques ou des signaux aléatoires. Il détecte les répétitions et les régularités d'un signal et permet d'obtenir un spectre d'autocorrélation du signal pour le traitement des données. On peut s'en servir pour de nombreux calculs comme le calcul de densité spectrale.

Lorsque l'on veut étudier un signal, son exploitation requiert l'utilisation de la transformée de Fourier et son inversion pour obtenir sa fonction d'autocorrélation.

Ici, dans le cas de l'étude de particules de suies, on peut se servir de la fonction de corrélation de paire aussi appelée fonction de distribution radiale. Cette dernière permet de décrire la variation de la densité de particules par rapport à la distance. Elle détaille aussi la distribution et les distances entre les paires de particules d'un volume donné. Il est nécessaire également d'étudier les propriétés des particules (homogénéité, isotropie).

Cette fonction mathématique est importante car elle permet de faire le lien entre les détails microscopiques et les propriétés macroscopiques des particules.

Finalement, l'exploitation du tomogramme peut également être importante quand il s'agit de faire du dimensionnement.

En effet, le logiciel TomoJ présente une routine permettant d'exploiter le nombre de pixels des images en volume. Ainsi dans un objet 3D, on appelle voxel ce qu'est un pixel dans une représentation 2D. L'interprétation du nombre de voxel aide au dimensionnement des particules de l'agrégat pour faire des études plus poussées. Malheureusement, par manque de temps et de moyens dû aux conditions sanitaires de cette année, nous n'avons pu mener à bien cette interprétation.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Pour conclure, nous pouvons affirmer que ce projet a été très enrichissant pour nous et nous a permis de découvrir un domaine d'étude et une méthode d'imagerie que nous ne connaissions pas très bien.

En effet, nous avons trouvé très intéressant de connaître le thème des recherches de M. Yon et en quoi notre projet pourrait lui servir. Nous avons également appris une certaine indépendance et cohésion de groupe pour mener notre projet à bien malgré la distance.

Aujourd'hui nous avons appris énormément d'informations et nous pouvons dire que la technologie de la tomographie est très complexe et ne cesse d'évoluer. Elle conduit au développement des méthodes d'analyse de volumes dans de nombreux domaines. Ainsi derrière des logiciels comme ImageJ se cachent des développeurs travaillant sur la rédaction d'algorithmes toujours plus précis pour des détails et des résultats plus poussés.

Par exemple, nous avons choisi d'utiliser le logiciel TomoJ codé en Java et fonctionnant sur tous les systèmes d'exploitation, mais il existe d'autres logiciels comme TomoPy pour Linux et OS X, codé en Python et en C. Ce logiciel permet tout autant le traitement des données tomographiques et la reconstruction d'images.

Ainsi, notre tomogramme peut donner de nombreuses perspectives en termes d'interprétations et de recherches, notamment dans l'étude de volume et de propriétés intrinsèques des particules de l'agrégat de suies.

5. BIBLIOGRAPHIE

Principe de la tomographie

- [Principe de la tomographie \(1\)](#)
- [Imagerie 3D en mécanique des matériaux, 2014, éditions Lavoisier](#)

Thèse de Lucian Roiban sur la tomographie électronique

- [Tomographie électronique analytique: développement de la cartographie chimique 3D à l'échelle du nanomètre et applicati](#)

Tomographie informatisée

- [Tomographie informatisée](#)
- [American Airlines : un scanner 3D pour les bagages](#)

Imagerie médicale

- [De la tomographie au scanner - Regards sur l'histoire de l'imagerie médicale - Dossiers - Ressources en ligne - Chercher, trouver - Bibliothèque - Lieux ressources - Au programme](#)
- [Titre du diaporama](#)
- [Présentation de l'IRM : principe et fonctionnement de l'IRM sur chimie sup](#)
- [Traitement et Analyse en Imagerie Multimodale | FLI](#)
- <https://urlz.fr/cPBR>

Etude de suies

- [Etude des particules de suie dans les flammes de kérosène et de diester](#)
- [Etude des particules de suie dans les flammes de kérosène et de diester](#)
- https://tel.archives-ouvertes.fr/tel/01619364/file/Thèse_Louis_Decoster_Dépôt_de_suie.pdf

Microscope électronique à transmission

- [Définition | Microscope électronique en transmission - MET - TEM | Futura Santé](#)

Tomographie à rayons X

- <https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/res/pdf/encyclopedia/42585210-p950.pdf>
- https://www6.inrae.fr/rmui/content/download/3132/31406/version/1/file/M_2012+TomographieRXRLLebrun.pdf

Science des matériaux

- <https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/res/pdf/encyclopedia/42532210-m4398.pdf>

- <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/techniques/5469/5469-la-tomographie-en-sm-et-mm-ens.pdf>
- [Le contrôle des pièces par tomographie aux rayons X - MetalBlog](#)
- [La tomographie : Voyage au centre de la matière | ENS-PARIS-SACLAY](#)
- [Imagerie multi-résolution par tomographie aux rayons X: application à la tomographie locale en science des matériaux](#)

Caméra gamma et imagerie nucléaire

- [Radioactivité : Examens gamma caméra](#)
- [Imagerie Nucléaire](#)

Tomographie à contraste de phase

- [Principe expérimental de la tomographie par contraste de phase basée... | DownloadScientific Diagram](#)
- [TOMOGRAPHIE PAR CONTRASTE DE PHASE](#)
- [Une très ancienne relation symbiotique révélée par tomographie en contraste de phase sur PSICHÉ | Centre de rayonnement synchrotron français](#)

Archéologie/Paléontologie

- [Paléontologie : l'invisible, voire l'inaccessible dévoilés par l'imagerie 3D](#)
- [Sous le scanner, ces vieux fossiles se transforment en trésor](#)
- [Le synchrotron pour sonder météorites et fossiles](#)

Synchrotron

- [Qu'est-ce qu'un synchrotron ?](#)

Doc TomoJ

- [TomoJ](#)
- http://u759.sfbophys.org/software/update/20091112/tutorial_2.01.pdf
- [FFTJ and DeconvolutionJ](#)

Transformée de Radon

- [LA TRANSFORMATION DE RADON](#)

Autocorrélation

- [Autocorrélation d'un signal](#)
- [–Chapitre IV – Outils mathématiques : fonction de distribution de paires](#)
- [Fonction de distribution radiale — Wikipédia](#)

6. ANNEXE

6.1. Guide de prise en main du logiciel TomoJ

Ceci est juste un exemple dont on pourra s'inspirer en faisant varier les paramètres et les fichiers d'entrée.

Tout d'abord, il faut installer le logiciel ImageJ et en complément l'extension TomoJ.

En préambule, il est nécessaire de vérifier si la dernière version de Java est bien installée. Si ImageJ et TomoJ sont déjà installés, on peut déjà les supprimer de l'ordinateur. Il faut aller sur la page : <https://imagej.net/Downloads> et télécharger la distribution Fiji d'ImageJ sur la page <https://imagej.net/Fiji/Downloads> en fonction de l'OS. Télécharger TomoJ si ce n'est déjà fait et placer le fichier `TomoJ_x.x_jar-with-dependencies.jar` dans le répertoire plugins ou est installé ImageJ. Une fois que cela est fait, créer un raccourci du fichier ImageJ.exe sur le bureau. Enfin, il faut lancer ImageJ et on aura l'interface ImageJ par Fiji.

Ensuite, voici une méthode de traitement des fichiers Tomo virtuels.

Il faut commencer par ouvrir le fichier. Il contient un nombre x d'images que l'on peut faire défiler avec un curseur. Puis, appuyer sur "Plugins" / "TomoJ" / "TomoJ". Une fenêtre s'ouvre : réglez "Start angle" à la plus petite valeur d'angle et l'incrément à 1.00. Choisissez ensuite le dossier où sera réalisée la reconstruction.

La fenêtre TomoJ s'ouvre alors. Cliquer sur "Set tilt angle" puis "Vérifier" et "Ok". Si le fichier utilisé est virtuel il n'a pas de défauts et on peut directement faire la reconstruction. Mais cela est différent lorsque l'on travaille avec un agrégat réel.

Dans la fenêtre "Reconstruction" se placer sur "Weighted Back Projection" et cocher "Weighting". Dans la fenêtre informations la valeur de "Thickness" doit être égale à la valeur de "width". Ceci permettra d'avoir en 3D une base carrée, sinon l'image risque d'être tronquée. Cocher "KeepResolution". On peut aussi faire des essais avec "Rescale". Pour les "Parameters test", laisser les valeurs par défaut. Il faut alors cliquer sur "Reconstruction" en bas de la fenêtre.

Après quelques minutes, on obtient une série d'images plus ou moins de bonne qualité représentant les tranches de l'image en 3D. Il faut ensuite inverser les couleurs de l'image. Et pour cela, il faut sélectionner l'image en cliquant sur le bandeau du haut de l'image, puis cliquer sur "Edit / Invert." et répondre "Yes" dans la fenêtre qui s'ouvre. On obtient une image d'encore moins bonne qualité. Pour améliorer cette image il faut aller dans "Process/Subtract Background" en cochant "Preview" on peut voir le résultat final au fur et à mesure des réglages, on ajuste le rayon petit à petit jusqu'à obtenir la prévisualisation souhaitée. On lance alors le "Process" et on obtient une image avec un fond bien noir et encore un peu de bruit numérique de l'image (ce qui parasite la netteté de l'image numérique lors de son acquisition). Ainsi, pour enlever le bruit restant, on sélectionne "Image/ Adjust/ Color Balance", on choisit "All" en couleurs puis on augmente le minimum afin de supprimer un maximum de bruit.

Pour pouvoir visualiser en 3D le stack d'images ainsi obtenu il faut cliquer sur "Plugins" / "3D viewer". Là, il faut choisir une couleur puis vérifier "Display" et "Volume" ainsi que "8 bits" ou "RGB convert". En cliquant sur l'image, on peut faire apparaître l'espace occupé par notre image 3D. Dans "View", on peut démarrer ou arrêter l'animation et aussi enregistrer une rotation ("Record"). On peut alors ajouter aussi une couleur de fond etc.

Si on enregistre une rotation on peut enregistrer le film en le sélectionnant et dans la fenêtre "ImageJ File" / "Save as" / "AVI".

On obtient ainsi une image reconstruite de notre agrégat de suies réelles.