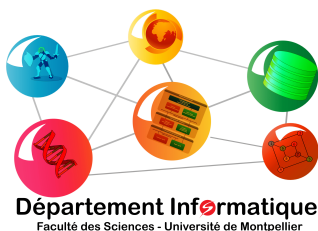




Université de Montpellier



Département Informatique –
IMAGINE



CEA – Commissariat à l'énergie
atomique et aux énergies
alternatives

Université de Montpellier

Faculté des Sciences

Master 2 Informatique – Parcours « IMAGINE »

Rapport de Stage

Exploitation d'images de caractérisation de chaîne radiographique

Stage réalisé au sein du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

du 3 février 2025 au 1 août 2025

Réalisé par :

COMBOT Evan

Année universitaire :

2024–2025

Tuteur en entreprise :

Nom Prénom

Encadrant pédagogique :

PUECH William

Adresse de l'entreprise :

CEA Gramat, 46500 Gramat, France

Date de rendu : 20 juin 2025

Remerciements

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui m'ont soutenu(e) et accompagné(e) tout au long de ce stage.

Je remercie tout particulièrement :

- M. Nom Prénom, mon tuteur de stage en entreprise, pour son accueil chaleureux, son encadrement attentif et sa grande disponibilité ;
- M. William Puech, mon encadrant pédagogique, pour son suivi rigoureux et sa bienveillance ;
- L'ensemble de l'équipe du CEA, pour leur soutien constant, leur convivialité, l'excellente ambiance de travail qu'ils ont su instaurer, ainsi que pour m'avoir intégré(e) très rapidement au sein de leur équipe.

Je tiens également à remercier l'ensemble des enseignants du Master 2 IMAGINE pour la qualité de l'enseignement et les compétences qu'ils m'ont permis d'acquérir.

Table des matières

Remerciements	1
1 Introduction	4
1.1 Contexte du stage	4
1.2 Objectifs du rapport	4
2 Présentation de l'entreprise	5
2.1 Le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives	5
2.1.1 Historique	5
2.1.2 Activités	5
2.1.3 Organisation	6
2.2 La Direction des Applications Militaires	6
2.2.1 Historique & activités	6
2.2.2 Le centre de Bruyères-le-Châtel	6
3 Présentation de la mission	7
3.1 Contexte de la mission	7
3.1.1 Le programme Simulation	7
3.2 Enjeux et objectifs	8
4 Environnement technique	9
4.1 Technologies utilisées	9
4.2 Outils de développement	9
4.3 Contraintes techniques	9
5 Veille technologique	10
5.1 Modélisation d'une chaîne radiographique	10
5.1.1 Présentation générale des techniques d'imagerie par rayonnements . .	10
5.1.2 Modélisation	11
5.2 Principe de fonctionnement de l'installation EPURE	12
5.2.1 Description de l'installation	12
5.2.2 Les trois axes radiographiques	12
5.2.3 Les trois axes radiographiques	12
5.2.4 Le déroulement d'une expérience à un axe radiographique	12
5.2.5 L'enregistrement d'images radiographiques	12

6 Missions réalisées	13
6.1 Tâches effectuées	13
6.1.1 1ère tâche	13
6.1.2 2ème tâche	13
6.1.3 3ème tâche	13
6.1.4 Finalité	13
6.2 Méthodologie	13
6.3 Difficultés rencontrées	13
6.3.1 Voir Gantt pour faire les autres sous chapitres	13
6.4 Améliorations possibles	13
7 Conclusion	14
7.1 Bilan du stage	14
7.2 Perspectives sur mon avenir	14
8 Glossaire	15
A Annexes	16
B Bibliographie	17

Chapitre 1

Introduction

Ce chapitre présente le stage ainsi que les objectifs du rapport.

1.1 Contexte du stage

Mon stage se déroule au sein du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA), un organisme public de recherche reconnu dans les domaines de l'énergie, de la défense, des technologies de l'information et de la santé.

Ce stage s'inscrit dans le cadre du Master IMAGINE, un parcours dédié au traitement d'images, à la 3D et à l'intelligence artificielle. L'objectif global était d'appliquer les connaissances acquises durant la formation à un projet de recherche et développement en lien avec l'imagerie radiographique.

1.2 Objectifs du rapport

Ce rapport a pour objectif de présenter le déroulement de mon stage. Plus précisément, ce document a pour buts :

- Expliquer le cadre général du stage et les objectifs fixés en début de mission
- Décrire les différentes tâches réalisées et les méthodologies employées
- Mettre en évidence les outils et technologies utilisés dans le contexte professionnel
- Présenter les tâches effectués et les difficultés rencontrés
- Faire un bilan personnel et professionnel sur les acquis du stage

L'ensemble de ce rapport permet également la mise en pratique des connaissances théoriques acquises tout au long de la formation tout en intégrant les acquis du stage dans le développement de nouvelles compétences.

...

Chapitre 2

Présentation de l'entreprise

Ce chapitre présente le contexte de la mission de stage ainsi que ses enjeux et objectifs.

2.1 Le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

2.1.1 Historique

L'origine du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) s'inscrit dans une série de découvertes scientifiques majeures entamées à la fin du XIX^e siècle. En novembre 1895, le physicien allemand Wilhelm Conrad Röntgen découvre un rayonnement invisible et inconnu, qu'il nomme *rayons X*. En 1896, le physicien français Henri Becquerel met en évidence le phénomène de la radioactivité naturelle en observant l'émission spontanée de rayons analogues aux rayons X par des composés d'uranium. Deux ans plus tard, Pierre et Marie Curie montrent que certains minerais naturels émettent davantage de rayonnements et découvrent deux éléments particulièrement radioactifs : le polonium et le radium. En 1934, Irène et Frédéric Joliot-Curie réalisent la première création de nouveaux éléments radioactifs par l'homme, en produisant du phosphore-30, découvrant ainsi la radioactivité artificielle. Ils envisagent alors que la fission des atomes puisse entraîner des réactions en chaîne libérant d'immenses quantités d'énergie. Après la Seconde Guerre mondiale, conscient des enjeux scientifiques et stratégiques liés à l'énergie nucléaire, le général de Gaulle décide de créer un organisme national dédié à ce domaine. Par ordonnance du 18 octobre 1945, le *Commissariat à l'énergie atomique (CEA)* est officiellement fondé. En 2009, afin de refléter l'élargissement de ses missions aux nouvelles formes d'énergie, il devient le *Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)*.

2.1.2 Activités

Actuellement, le *Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)* est structuré autour de quatre grandes directions opérationnelles, chacune spécialisée dans un domaine spécifique :

- **La Direction des énergies (DES)** : mène des recherches sur l'énergie nucléaire civile, les systèmes énergétiques innovants et la transition énergétique.
- **La Direction des applications militaires (DAM)** : assure les missions de défense nationale, notamment la dissuasion nucléaire et la sécurité des installations.

- **La Direction de la recherche technologique (DRT)** : développe des innovations technologiques et des partenariats industriels, notamment dans la microélectronique, les systèmes intelligents et les énergies renouvelables.
- **La Direction de la recherche fondamentale (DRF)** : explore les sciences fondamentales, telles que la physique nucléaire, la biologie, la climatologie et les sciences de l'univers.

2.1.3 Organisation

Aujourd'hui, le CEA est composé de neuf centres de recherche, dont certains sont placés sous la responsabilité de la *Direction des applications militaires (DAM)* pour des missions de défense, tandis que d'autres sont dédiés aux applications civiles. Il regroupe également cinquante-deux unités mixtes de recherche (UMR), a déposé 725 brevets prioritaires, dispose de vingt-six équipements d'excellence (Équipex) et de seize laboratoires d'excellence (Labex). En 2023, le CEA comptait un effectif total de 16 564 employés.

2.2 La Direction des Applications Militaires

2.2.1 Historique & activités

La Direction des applications militaires (DAM) a été créée secrètement en 1955 sous le nom de *Bureau d'études générales (BEG)*. Ce n'est qu'en 1958 que le général de Gaulle officialise la création de la DAM au sein du Commissariat à l'énergie atomique (CEA). Les armes nucléaires, les réacteurs nucléaires pour la propulsion navale et les matières nucléaires stratégiques constituent le cœur de sa mission, centrée sur la dissuasion nucléaire française. Aujourd'hui, la DAM contribue à l'excellence de la recherche, renforce la compétitivité industrielle, assure la surveillance, l'analyse et l'intervention pour la défense et la sécurité nationale, tout en répondant aux enjeux liés à la dissuasion nucléaire. En 2023, elle comptait près de 4 802 employés.

2.2.2 Le centre de Bruyères-le-Châtel

Le centre de Bruyères-le-Châtel, connu sous le nom de *CEA-DIF* ou par son nom de code *BIII* (B3), regroupe près de 2 000 ingénieurs, chercheurs et techniciens. Ils conçoivent les réacteurs nucléaires des sous-marins français et du porte-avions *Charles de Gaulle*, ainsi que les armes nucléaires françaises, en s'appuyant notamment sur le programme *Simulation*. Le centre participe également à la lutte contre la prolifération et le terrorisme nucléaire. Premier site officiel de la *Direction des applications militaires (DAM)*, sous le code *BIII*, c'est sur ce site qu'a été conçue la première bombe atomique française, *Gerboise Bleue*. Le centre aurait par ailleurs fabriqué plus de 90 % des armes nucléaires testées lors des essais français au Sahara et dans le Pacifique.

Chapitre 3

Présentation de la mission

Ce chapitre présente le contexte du stage ainsi que les enjeux et les objectifs.

3.1 Contexte de la mission

Dans un contexte d'amélioration et de refactorisation de codes précédents, l'objectif principal de ma stage a été de Cette modélisation permettra de ...

Exemple! : Au CEA, mon travail s'est inscrit dans une démarche d'innovation visant à modéliser une chaîne radiographique complète. Cette modélisation a pour ambition de mieux comprendre le comportement du système d'imagerie, d'optimiser ses performances et d'améliorer la qualité des images obtenues, tout en respectant les contraintes liées à la radioprotection.

Le stage a ainsi offert un cadre idéal pour mettre en pratique des compétences en physique médicale, traitement du signal et programmation, au service d'une problématique appliquée et concrète.

Contexte professionnel de ta mission, ce que tu devais faire, les enjeux, la méthodologie, les objectifs pratiques.

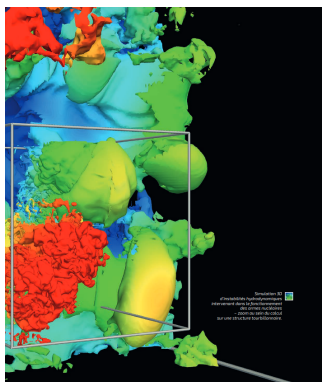
qui s'inscrit dans le programme Simulation

3.1.1 Le programme Simulation

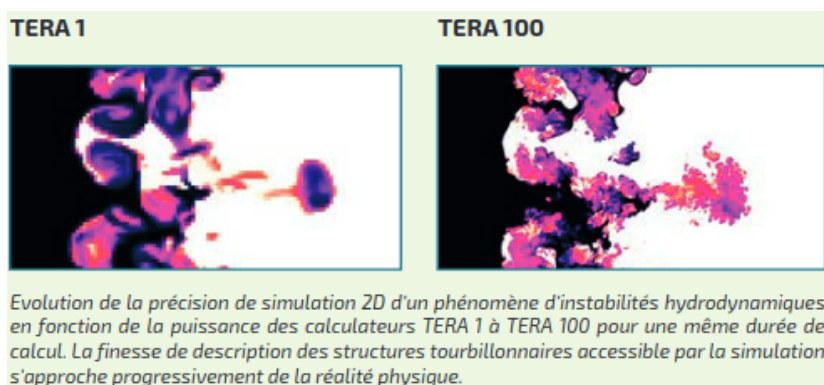
Lancé en 1995, ce programme a pour objectif de pérenniser la dissuasion française après l'arrêt définitif des essais nucléaires. Il a été bâti pour permettre le renouvellement et la garantie sur le long terme des armes qui équipent les deux composantes de la dissuasion nucléaire française. Il a également comme objectif de permettre de former les experts dans le domaine extrêmement « pointu » et spécifique du fonctionnement des armes nucléaires. Le programme Simulation n'est autre que la démarche scientifique appliquée aux armes et s'articule autour de trois axes :

- **La physique des armes** : définissant la modélisation de tous les phénomènes physiques intervenant dans leur fonctionnement. Cela consiste à élaborer et sélectionner les modèles physiques destinés à reproduire par le calcul les trois phases de fonctionnement d'une arme nucléaire : pyrotechnique, fission et fusion. Ces modèles sont enchaînés de façon à obtenir un système d'équations mathématiques reproduisant le plus fidèlement possible le fonctionnement d'une arme nucléaire. La mécanique des fluides, le calcul des flux de neutrons (la neutronique) mais aussi l'évolution de la

matière et des photons sont des éléments importants.



- **La simulation numérique** : reproduisant leur fonctionnement à l'aide de calculs et de modèles informatiques. Simuler une arme nucléaire nécessite d'un centaine à des centaines de millions de mailles ce qui implique que les systèmes d'équations associés ont alors des milliards d'inconnues. Cela nécessite alors de disposer d'ordinateurs très puissants pour conserver une durée de calcul acceptable. Trois générations de supercalculateurs ont été définies et réalisées pour mettre en œuvre les standards de garantie : TERA 1, en 2001, avec 5 teraflops / TERA 10, en 2005, avec 50 teraflops / TERA 100, en 2010, avec 1,3 petaflops



(a) Liaisons entre les classes du moteur



(b) Supercalculateur utilisé pour les simulations

FIGURE 3.1 – Illustrations du fonctionnement du programme Simulation

- **La validation expérimentale** : vérifiant expérimentalement les résultats des simulations et des modélisations à l'aide de deux grandes installations, l'installation EPURE qui est une installation de radiographie dédiée à la phase non nucléaire du fonctionnement de l'arme et l'installation du Laser Mégajoule qui est un "laser de puissance" permettant de reproduire à toute petite échelle les conditions physiques dans lesquelles se trouve la matière lors du fonctionnement nucléaire de l'arme.

3.2 Enjeux et objectifs

...

Chapitre 4

Environnement technique

Ce chapitre présente l'environnement numérique dans lequel j'ai évolué au CEA, les technologies que j'ai utilisées tout au long du stage ainsi que les contraintes associées à cet environnement.

4.1 Technologies utilisées

4.2 Outils de développement

4.3 Contraintes techniques

...

Chapitre 5

Veille technologique

Ce que tu as appris ou approfondi pour comprendre les bases scientifiques ou techniques liées à l'outil/la machine/le principe physique utilisé dans ta mission.

Explications machine + physique théorique sur les onde Imagerie par Rayons X et par neutrons ...

5.1 Modélisation d'une chaîne radiographique

5.1.1 Présentation générale des techniques d'imagerie par rayonnements

5.1.1.1 Imagerie par rayons X

L'imagerie par rayons X est la technique principale utilisée dans une chaîne radiographique. Les rayons X constituent une forme de rayonnement électromagnétique, au même titre que la lumière visible, l'ultraviolet, l'infrarouge, les micro-ondes, les ondes radio ou les rayons gamma. Une onde électromagnétique résulte de l'oscillation en phase d'un champ électrique et d'un champ magnétique perpendiculaires entre eux (voir figure ??). Elle se propage dans le vide à la vitesse de la lumière, soit $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$. Dans le cas d'une onde sinusoïdale ou monochromatique, la fréquence ν et la période T sont reliées par $T = 1/\nu$. La longueur d'onde λ correspond à la distance parcourue par l'onde en une période, soit $\lambda = cT = c/\nu$. Les rayons X sont des ondes électromagnétiques dont les fréquences sont comprises entre 10^{16} Hz et 10^{20} Hz .



FIGURE 5.1 – Exemple d'une image obtenue à partir de rayons X

5.1.1.2 Imagerie neutronique

L'imagerie neutronique repose sur les mêmes principes que l'imagerie par rayons X, mais les neutrons interagissent avec les noyaux des atomes plutôt qu'avec leurs électrons. Comme les rayons X, les neutrons sont atténués par certains éléments tels que l'hydrogène, le carbone, le bore ou le lithium, tout en étant capables de traverser de nombreux matériaux lourds. Cela confère à l'imagerie neutronique un avantage par rapport à l'imagerie par rayons X pour la visualisation en deux ou trois dimensions. En revanche, un inconvénient majeur de cette technique est qu'elle nécessite un flux élevé de neutrons pour obtenir des informations exploitables, ce qui impose l'utilisation de réacteurs nucléaires expérimentaux capables de produire un tel flux. Cette méthode est principalement utilisée dans l'industrie.

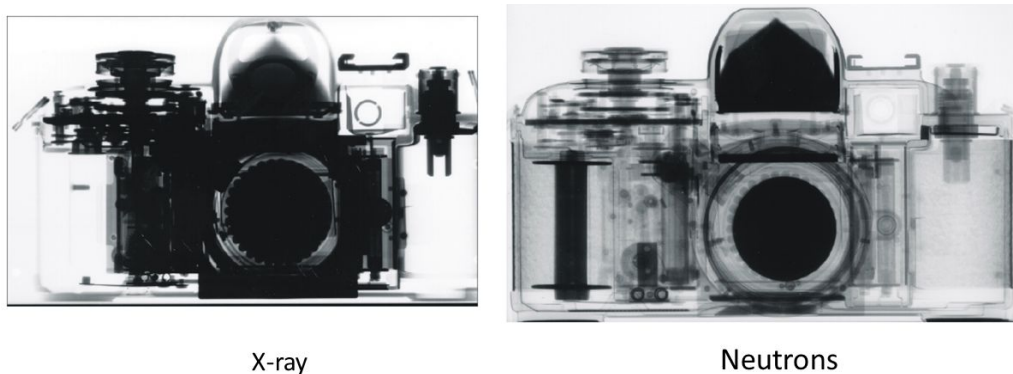


FIGURE 5.2 – Comparaison entre l'imagerie rayons X et l'imagerie neutronique

5.1.2 Modélisation

Les différentes méthodes d'imagerie ayant été exposées, il est maintenant important de comprendre comment fonctionne une chaîne radiographique de manière générale.

5.1.2.0.1 Production de rayons X

5.1.2.0.2 Interactions rayons X / matière

5.1.2.0.3 Détection

- Le processus de conversion des rayons X en signal électronique (ex : scintillateurs, photodiodes, détecteurs plans).
- Le modèle de réponse du détecteur (efficacité quantique, bruit de détection, résolution spatiale).
- L'influence des caractéristiques du détecteur sur la qualité de l'image finale (SNR, MTF).

5.1.2.0.4 Acquisition

La phase d'acquisition regroupe le traitement du signal issu du détecteur pour former l'image numérique finale. Cette étape inclut :

- La numérisation du signal (quantification, échantillonnage) ;
- L'application éventuelle de pré-traitements (correction du gain, réduction du bruit) ;
- Le formatage et l'optimisation des données pour l'affichage et l'analyse.

5.2 Principe de fonctionnement de l'installation EPURE

Le principe général d'une chaîne radiographique ayant été exposé, il est important de comprendre de manière plus précise comment fonctionne l'installation EPURE.

5.2.1 Description de l'installation

5.2.2 Les trois axes radiographiques

5.2.2.1 Le 1er axe radiographique : Airix

5.2.2.2 Le 2ème axe radiographique : Merlin

5.2.2.3 Le 3ème axe radiographique : Regrouper tous les sous parties en 1

5.2.3 Les trois axes radiographiques

5.2.4 Le déroulement d'une expérience à un axe radiographique

5.2.5 L'enregistrement d'images radiographiques

5.2.5.1 Gamma caméra

5.2.5.1.1 Principe

5.2.5.1.2 Détection

5.2.5.1.3 Acquisition

Chapitre 6

Missions réalisées

6.1 Tâches effectuées

6.1.1 1ère tâche

6.1.2 2ème tâche

6.1.3 3ème tâche

6.1.4 Finalité

6.2 Méthodologie

6.3 Difficultés rencontrées

...

6.3.1 Voir Gantt pour faire les autres sous chapitres

6.4 Améliorations possibles

Chapitre 7

Conclusion

Cette conclusion clôture ce rapport en dressant un bilan du travail réalisé, en évoquant les pistes d'amélioration, et en ouvrant sur mes perspectives professionnelles.

7.1 Bilan du stage

physique + traitement d'images = C'est cool + faire un bilan global de ce qui a été fait + sur ce qui pourrait être fait

7.2 Perspectives sur mon avenir

Ce stage m'a conforté dans mon souhait de poursuivre dans un domaine mêlant le traitement d'images et la physique. Je souhaite continuer à développer mes compétences dans cette double spécialité, en travaillant sur des projets alliant aspects théoriques et applications pratiques. Concernant la poursuite d'études, je me projette vers une éventuelle thèse, mais pas immédiatement. En effet, après trois années très intensives en Licence 3 et en Master, je préfère prendre une année pour approfondir mes choix, trouver un emploi afin de me reposer et identifier un sujet de doctorat qui corresponde pleinement à mes aspirations.

Chapitre 8

Glossaire

Chapitre A

Annexes

Cette section rassemble les éléments complémentaires et techniques relatifs au stage."

Chapitre B

Bibliographie