APPORT DE LA CINÉRADIOGRAPHIE DANS L'ÉTUDE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES MATÉRIAUX

A. Hauducœur, P. Nicolas

► To cite this version:

A. Hauducœur, P. Nicolas. APPORT DE LA CINÉRADIOGRAPHIE DANS L'ÉTUDE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES MATÉRIAUX. Journal de Physique IV Proceedings, 1991, 01 (C3), pp.C3-387-C3-394. 10.1051/jp4:1991355 . jpa-00250499

HAL Id: jpa-00250499

<https://hal.science/jpa-00250499>

Submitted on 1 Jan 1991

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.

APPORT DE LA CINÉRADIOGRAPHIE DANS L'ÉTUDE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES MATÉRIAUX

A. HAUDUCOEUR et P. NICOLAS

*C.E.A., Centre d'Études de Vaujours-Moronvilliers, BP. 7,
F-77181 Courtry, France*

ABSTRACT

X-Ray cineradiography is often used in the study of materials under shocks and high pressure, commonly induced by explosives. A linear electron accelerator used as an X-Ray source, delivering a train of fast pulses spaced by 1 μ s during 15 μ s is well adapted.

X-Ray images acquisition is made by opto-electronic cameras, after converting them in visible wavelength through an ultra-fast scintillator. Both application examples given in this paper show the contribution of X-Ray cineradiography in the range of dynamic behavior of materials.

RESUME

La cinéradiographie est un moyen de mesure adapté à l'étude des matériaux soumis à des chocs intenses et brefs, généralement induits par de la matière explosive. Le choix d'un accélérateur linéaire d'électrons, comme source X, permet de disposer d'un train d'impulsions de photons X au pas de 1 μ s pendant une durée maximale de 15 μ s.

L'acquisition des images radiantes de l'objet observé s'effectue par l'intermédiaire de caméras opto-électroniques après leur conversion en images visibles par un scintillateur de grande rapidité. Les deux exemples d'application présentés montrent le rôle que peut jouer la cinéradiographie X dans le domaine du comportement dynamique des matériaux.

1. INTRODUCTION

L'étude des matériaux sollicités par des chocs intenses et brefs, généralement induits par de la matière explosive, nécessite la mise en oeuvre de moyens de mesure spécifiques à l'échelle de la microseconde. Un de ces moyens de mesure est la cinéradiographie X qui offre la possibilité de suivre l'évolution spatio-temporelle des effets de l'explosif sur un milieu connexe.

L'installation de cinéradiographie ARTEMIS ⁽¹⁾ du Centre d'Etudes de VAUJOURS-MORONVILLIERS [1] présente la particularité de visualiser l'évolution spatiale d'un phénomène physique à 3 instants choisis dans une fenêtre temporelle de 15 μ s.

(1) ARTEMIS : Accélérateur de Radiographie Trois Expositions Multi-Images

Le nombre maximal, égal à 15, des impulsions d'électrons est imposé par la durée effective de la puissance HF délivrée par les klystrons (18 μ s) et par le temps de remplissage des sections accélératrices (1 μ s).

La figure 1 présente un schéma d'ensemble de l'installation de cinéradiographie ARTEMIS. L'accélérateur linéaire d'électrons est implanté dans un bâtiment contigu à l'aire d'expérimentation qui le protège des effets destructeurs de l'explosif. Une vue de l'accélérateur est reproduite à la figure 2.

FIGURE 2 : VUE DE LA SALLE ACCELERATEUR ARTEMIS

Cette installation comprend trois sous-ensembles distincts :

- la source radiographique, un accélérateur linéaire d'électrons qui délivre, à la demande, 1 à 15 impulsions X de durée égale à 50 ns pendant 15 μ s,
- le système d'acquisition des images constitué de caméras opto-électroniques couplées à un scintillateur qui réalise la conversion "photons X - photons visibles",
- l'électronique de synchronisation qui assure la simultanéité du fonctionnement de la source X et de la réception opto-électronique avec le phénomène à radiographier.

Les deux exemples présentés dans cette communication, l'étude du développement d'instabilités de Rayleigh-Taylor et la visualisation d'un projectile illustrent l'apport de la cinéradiographie dans l'étude du comportement dynamique des matériaux.

2. L'INSTALLATION DE CINERADIOGRAPHIE

2.1 La source X

Seul un accélérateur linéaire d'électrons, utilisé comme source X, est capable de fournir un train d'impulsions de photons X de durée très brève.

Les constituants essentiels de l'accélérateur linéaire d'électrons (énergie moyenne $e^- \sim 45$ MeV) à ondes progressives en bande L (~ 1300 MHz), sont les suivants :

- un canon à électrons du type triode à cathode interchangeable, commandé par un modulateur d'injection,
- quatre sections accélératrices à champ constant de 10 MV/m constituées chacune de 25 cellules ou cavités couplées au mode $2\pi/3$,
- quatre klystrons amplificateurs qui alimentent les quatre sections en énergie hyperfréquence. Le temps de remplissage des sections est de l'ordre de 1 μ s. Ces klystrons délivrent un train hyperfréquence d'une durée de 18 μ s à la fréquence de répétition de 1 Hz,
- une optique électronique constituée de bobines de focalisation au niveau du canon, de solénoïdes sur les premières sections, de triplets placés en fin des quatre sections et avant la cible, qui assurent le centrage et la focalisation du faisceau d'électrons,
- une cible en tungstène, d'épaisseur 2 mm, qui convertit les électrons en photons X.

Les principales caractéristiques cinéradiographiques d'ARTEMIS figurent dans le tableau I.

TABLEAU I

Nombre d'impulsions	Durée de l'impulsion	Dose par impulsion à 1 m de la cible	Dimension de la tache focale	Energie moyenne des électrons sur la cible
Variable de 1 à 15	Variable de 30 à 100 ns	0,3 Gy sur 50 ns	$\varnothing$ 3 mm	45 MeV

2.2 La réception cinéradiographique

2.2.1 Le convertisseur de photons X

La conversion de l'image radiante en une image visible, de longueur d'onde adaptée aux caméras opto-électroniques, est assurée par un scintillateur. Les caractéristiques de décroissance de la lumière sont en accord avec le temps minimal entre chaque impulsion X. La constante de temps de décroissance est inférieure à 8 ns et la longueur d'onde d'émission maximale est centrée dans le bleu. La forme géométrique est un cylindre d'épaisseur constante. La face de sortie est polie optiquement. Les autres faces sont recouvertes d'un revêtement opaque noir.

2.2.2 Formation et transport de l'image

L'image visible, résultant de la conversion de l'image radiante modulée par l'objet radiographié, présente en chaque point une intensité lumineuse proportionnelle au flux des photons X ayant traversé l'objet.

Les systèmes de reprise optique sont constitués d'objectifs de longue focale et de grande ouverture afin de recueillir le maximum de lumière. L'image incidente est vue sous trois angles différents par 3 objectifs (2).

2.2.3 Amplification et enregistrement

Le dispositif de réception permet une observation dite à image intégrale. Trois images sont réalisées au cours d'une expérience de tir. Chacune des 3 images transmises par les objectifs est sélectionnée et amplifiée par un tube intensificateur à obturation électronique rapide. L'image fournie par l'écran de sortie d'un tube est enregistrée sur un plan film négatif.

Le tableau II résume les principales caractéristiques de la chaîne de réception cinéradiographique.

TABLEAU II

ELEMENT DE LA CHAINE	CARACTERISTIQUES
Convertisseur de Photons X	Scintillateur plastique ALTUSTIPE BLEU émission = 430 nm
Optique de reprise	Objectif Focale = 600 mm Ouverture = F/4
Amplificateur	Intensificateur d'image ITT F4113 Photocathode S20, $\Phi=40$ mm Ecran de sortie : P11 Gain max : 1000 à 1500 Limite de résolution : 25 pl mm ⁻¹ Temps d'ouverture : 500 ns
Récepteur	Film panchromatique KODAK TRI-X 400 ASA - 4 x 5 inches

( ) Le coût et l'encombrement d'une caméra opto-électronique (1 par impulsion) nous limitent à 3 impulsions.

Nous donnons en figure 3 le schéma du dispositif de réception cinéradiographique.

2.2.4 Le film radiographique

L'imageur X le plus connu et le plus utilisé, surtout dans le milieu médical, est le film radiographique associé à un écran renforçateur. Les écrans renforçateurs placés contre les 2 couches d'émulsion ont pour rôle d'accroître la détectivité (ou le rendement) du film radiographique. Il existe 2 types principaux d'écrans renforçateurs : les écrans métalliques, généralement du plomb, et les écrans fluorescents, le plus connu est le CaWO_4 .

Le couple film/écran métallique donne des résolutions spatiales bien supérieures à celles obtenues avec un récepteur opto-électronique, qui présente en plus l'inconvénient de réduire les dimensions de l'enregistrement photographique dans des proportions importantes.

En contrepartie, le film radiographique intègre toutes les informations qu'il reçoit et donc, ne peut, sauf cas particuliers, être utilisé comme imageur X en cinéradiographie. Tel a été le cas pour certains résultats expérimentaux que nous présentons dans ce qui suit.

La cassette contenant le film radiographique doit se situer aussi près que possible de l'objet à radiographier (flou géométrique). Dans une expérience de détonique il convient de ne pas trop réduire cette distance, ceci nécessite de placer des protections pour s'affranchir des effets destructeurs de l'explosif ; ces protections réduisent l'intensité du faisceau X et nuisent à la qualité de l'image radiographique.

La figure 3 montre le croquis d'implantation d'une expérience.

2.3 Electronique de synchronisation

Une électronique de commande assure la simultanéité du fonctionnement de l'accélérateur linéaire d'électrons et de la réception opto-électronique. Les différentes fonctions dévolues à cette électronique sont, d'une part la génération des impulsions de commande des klystrons et du canon et, d'autre part le déclenchement des caméras opto-électroniques et de l'instrumentation associée (chronomètres, oscilloscopes, etc... au moment de l'expérience.

3. APPLICATIONS

Pour illustrer l'apport de la cinéradiographie dans les études expérimentales de détonique, nous avons choisi 2 exemples très différents l'un de l'autre : le suivi du développement d'instabilités de Rayleigh-Taylor [2] et la visualisation d'un projectile formé.

3.1 Développement des instabilités de Rayleigh-Taylor

Le recalage des modèles numériques simulant le développement de perturbations dans une géométrie présentant une phase de concentration nécessite de disposer d'images expérimentales. L'intérêt de la cinéradiographie, dans ce cas précis, réside dans la possibilité d'observer le développement des perturbations sur le même objet afin d'éliminer les incertitudes dues aux défauts technologiques, non reproductibles d'un objet à un autre, d'une part, et d'autre part au positionnement de plusieurs objets identiques par rapport à l'axe d'observation.

Le choix de la géométrie et de la dimension des défauts initiaux tient compte des performances de l'installation ARTEMIS et, surtout, de la résolution spatiale du dispositif de conversion des images radiantes.

L'objet à observer est un cylindre métallique (figure 3). Sur ce cylindre, le défaut introduit se présente sous la forme d'un écart ($R = R_0 + a_0 \cos n\theta$) au profil de la face interne.

L'implosion du cylindre métallique résulte de l'action d'une onde choc cylindrique centripète générée par de l'explosif. L'introduction d'un milieu en élastomère ($d \approx 1$) à l'intérieur du cylindre métallique freine celui-ci peu après sa mise en vitesse par l'explosif. Pendant cette phase de freinage, principalement due à la contre pression venant du milieu léger, les instabilités de Rayleigh-Taylor peuvent se développer.

Rappelons que l'objectif de ces expériences, couplées aux simulations numériques correspondantes, est de valider les codes qui calculent le développement de grande longueur d'onde de défauts en phase linéaire et non linéaire. L'utilisation de matériaux projetés devenant fluide sous choc, tel que le Pb, permet la validation des codes en hydrodynamique pure, tandis que la mise en oeuvre de l'acier fournit, par comparaison, une bonne évaluation du rôle de l'élastoplasticité.

Les résultats expérimentaux présentés en figures 4 et 5 concernent une étude différentielle du développement d'instabilités provoquées par un défaut d'amplitude initiale $a_0 = 0,5$ mm, usiné sur la face avant d'un cylindre en Pb, en fonction de sa périodicité. Périodicités retenues : $n = 8$ et $n = 16$.

FIGURE 4 : DEVELOPPEMENT D'INSTABILITES CYLINDRIQUES $n = 8$

FIGURE 5 : DEVELOPPEMENT D'INSTABILITES CYLINDRIQUES $n = 16$

Les résultats expérimentaux acquis avec l'installation ARTEMIS confirment les évaluations bidimensionnelles effectuées avec un code eulérien (figure 6).

FIGURE 6 : RESULTATS NUMERIQUES DE L'ECOULEMENT D'UN CYLINDRE DE PLOMB

3.2 Visualisation d'un projectile en vol

Le comportement mécanique d'un projectile en vol peut être analysé par la cinéradiographie, en particulier visualiser ses déformations et ses fracturations éventuelles. En outre, cette technique de mesure donne la vitesse instantanée des différents points du projectile.

La figure 7 présente les 2 images d'un projectile formé enregistrées sur un seul film radiographique à deux instants de sa phase balistique. L'examen des images met en évidence l'évolution de la forme et des fracturations de ce projectile.

L'emploi du film radiographique, dans ce cas particulier, fournit 2 images du projectile avec une résolution spatiale supérieure à celle que l'on obtiendrait avec une réception opto-électronique.

FIGURE 7 : VISUALISATION D'UN PROJECTILE FORME

Notons que l'utilisation de cette technique d'enregistrement nécessite un déplacement suffisant de l'objet entre les 2 prises de vue consécutives.

4. CONCLUSION

Les 2 exemples cités montrent l'apport de la cinéradiographie dans le suivi de l'évolution spatio-temporelle d'un phénomène physique ultra-rapide au cours de la même expérience de détonique.

Les défauts de résolution spatiale introduits par la réception opto-électronique peuvent être minimisés par un choix approprié de la géométrie et des dimensions de l'objet, tel est le cas des instabilités de Rayleigh-Taylor en configuration cylindrique.

En revanche, le film radiographique restitue des images de résolution spatiale plus élevée, mais implique que ces images soient séparées. L'observation d'un petit projectile répond à cette exigence.

REFERENCES

- [1] Installation de cinéradiographie à haute énergie
A. HAUDUCOEUR - J. BUCHET - CEA VAUJOURS, BP7, 77171 COUNTRY
- [2] Instabilités de RAYLEIGH-TAYLOR en configuration cylindrique
N WILKE, F. GELEZNIKOFF, R. GUIX, A. HAUDUCOEUR, M. LEGRAND
International workshop on the physics of turbulent compressible mixing.
(PRINCETON - Oct. 1988).