

LA FABRICATION ADDITIVE AU COEUR DU MOTEUR PROMETHEUS

#RocketMakers

Déborah FAUCON, Kakmol NONG

09.09.2025

AGENDA

- 1 ARIANEGROUP ET LE PROGRAMME PROMETHEUS**
- 2 LA FABRICATION ADDITIVE L-PBF : DEFECTOLOGIE**
- 3 PROBABILITE DE DETECTION**
- 4 TOMOGRAPHIE**
- 5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

01

ARIANEGROUP ET LE PROGRAMME PROMETHEUS

L'ESSENTIEL

LEADER MONDIAL DE L'ACCÈS À L'ESPACE

8 300

EMPLOYES
EN FRANCE ET
EN ALLEMAGNE

8

FILIALES
& PARTICIPATIONS
MAJEURES

50/50

CO-ENTREPRISE
ENTRE
AIRBUS & SAFRAN

**2,5
MILLIARDS
D'EUROS**

CHIFFRE D'AFFAIRES



TRANSPORT SPATIAL



- Ariane 6
- Services de lancement (Arianespace)
- Lanceurs futurs



DEFENSE



- Dissuasion
- Défense spatiale
- Remédiation
- Sécurité navale



EQUIPEMENTS & SERVICES



- Solutions pour engins spatiaux
- Solutions pour lanceurs
- Solutions pour l'industrie

#ROCKETMAKERS

Ariane 62 – 64 (moteurs Vulcain 2.1 et Vinci)

Optimisations avec la Fabrication Additive (FA)

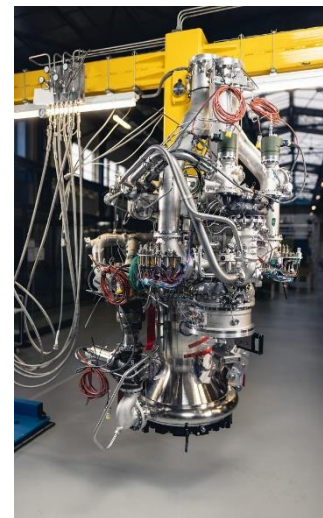


~ 100 kg FA /
lanceur

~ 800 tonnes de poussée au décollage

THEMIS (moteur Prometheus)

Ultra low-cost en Fabrication Additive et réutilisable



~ 1000 kg FA /
lanceur

~ 100 tonnes de poussée au décollage

02

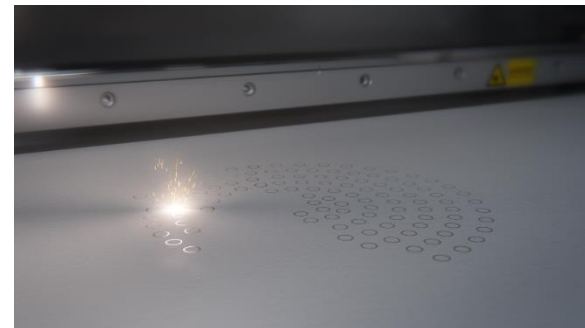
LA FABRICATION ADDITIVE L-PBF

DEFECTOLOGIE

DEFAUTS GENERES PAR LE PROCEDE L-PBF

3 GROUPEs PRINCIPAUX ^[2]

- DIFFÉRENTES LOCALISATIONS
- DIFFÉRENTES CAUSES



- FISSURES
 - Interface pièce / support – pièce / plateau – support / plateau – coeur de la pièce
 - Contraintes résiduelles, géométrie
- POROSITES
 - Pas de localisation privilégiée
 - Gaz emprisonné pendant la solidification
- MANQUE DE FUSION
 - Plan horizontal par rapport au sens de fabrication / ponctuel
 - Remise en couche / amas de poudre / projection / balling

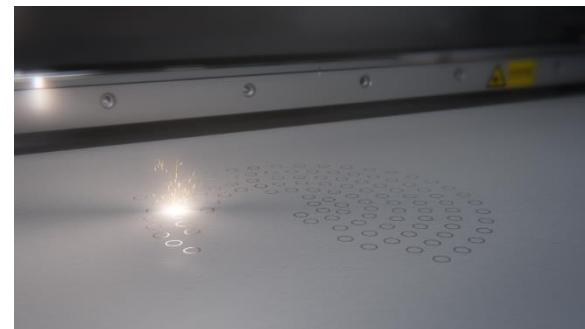
DEFAUTS GENERES PAR LE PROCEDE L-PBF

3 GROUPEs PRINCIPAUX [2]

- DIFFÉRENTES LOCALISATIONS
- DIFFÉRENTES CAUSES

Ultrasons

Le monitoring in process



[3]

- FISSURES

- Interface pièce / support – pièce / plateau – support / plateau – coeur de la pièce
- Contraintes résiduelles, géométrie

Visuel, Ressuage

Radiographie,
Tomographie

- POROSITES

- Pas de localisation privilégiée
- Gaz emprisonné pendant la solidification

Ressuage

Radiographie,
Tomographie

- MANQUE DE FUSION

- Plan horizontal par rapport au sens de fabrication / ponctuel
- Remise en couche / amas de poudre / projection / balling

Visuel, Ressuage

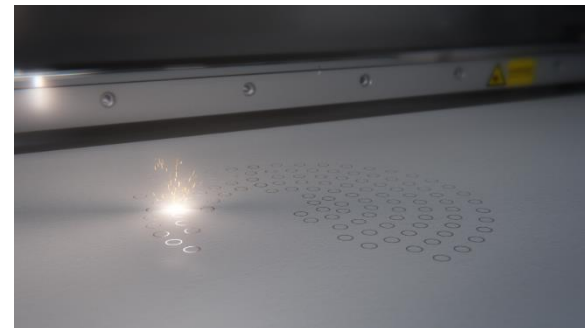
Radiographie,
Tomographie

DEFAUTS GENERES PAR LE PROCEDE L-PBF

3 GROUPES PRINCIPAUX ^[2]

→ DIFFÉRENTES LOCALISATIONS

→ DIFFÉRENTES CAUSES



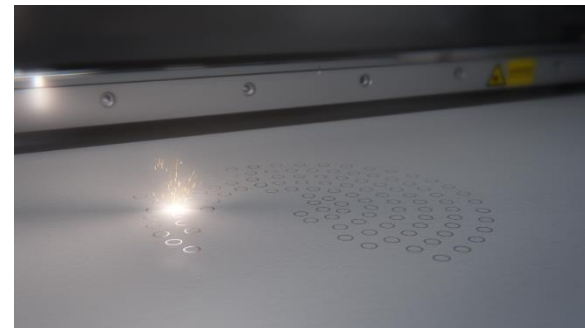
DETECTION COMPLEXE CAR :

DEFAUTS GENERES PAR LE PROCEDE L-PBF

3 GROUPEs PRINCIPAUX [2]

→ DIFFÉRENTES LOCALISATIONS

→ DIFFÉRENTES CAUSES



DETECTION COMPLEXE CAR :

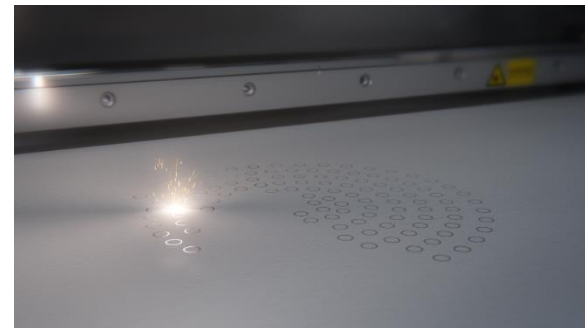
Géométries complexes et souvent inaccessibles, surfaces rugueuses, pièces de plus en plus grandes et épaisses, matériaux denses,

DEFAUTS GENERES PAR LE PROCEDE L-PBF

3 GROUPES PRINCIPAUX ^[2]

→ DIFFÉRENTES LOCALISATIONS

→ DIFFÉRENTES CAUSES



DETECTION COMPLEXE CAR :

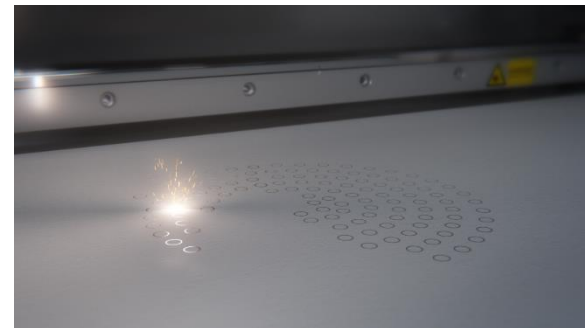
Géométries complexes et souvent inaccessibles, surfaces rugueuses, pièces de plus en plus grandes et épaisses, matériaux denses, **DÉFAUTS SONT FINS**

DEFAUTS GENERES PAR LE PROCEDE L-PBF

3 GROUPEs PRINCIPAUX [2]

→ DIFFÉRENTES LOCALISATIONS

→ DIFFÉRENTES CAUSES



DETECTION COMPLEXE CAR :

Géométries complexes et souvent inaccessibles, surfaces rugueuses, pièces de plus en plus grandes et épaisses, matériaux denses, **DÉFAUTS SONT FINS**

DEFINIR LES PROBABILITES DE DETECTIONS DANS LES METHODES ET TECHNIQUES CONCERNEES

03

PROBABILITE DE DETECTION

INTERET DES POD a90/95

PROBABILITE DE DETECTION (POD)

- **PLUSIEURS METHODES STATISTIQUES DE TRAITEMENTS : HIT/ MISS**
- **PERMET DE DETERMINER :**
 - La taille de la plus petite anomalie détectée
 - La taille de l'anomalie détectée avec une probabilité de 90% et un indice de confiance à 95
a90/95
- **DEFINIR LE SYSTEME A EVALUER**
 - géométrie, matériau, état de surface des pièces, et **types de défauts recherchés**
 - matériels et gamme de contrôle, niveau de qualifications des inspecteurs
- **IDENTIFIER LES VARIABLES DU SYSTEME**
 - inspecteurs, paramètres significatifs (émetteur, détecteur, ...), répétition du contrôle, positionnement de la pièce, calibration du système
- **DEFINIR ET REALISER LES EPROUVETTES REPRESENTATIVES DE TEST**

Nota : répartition des défauts

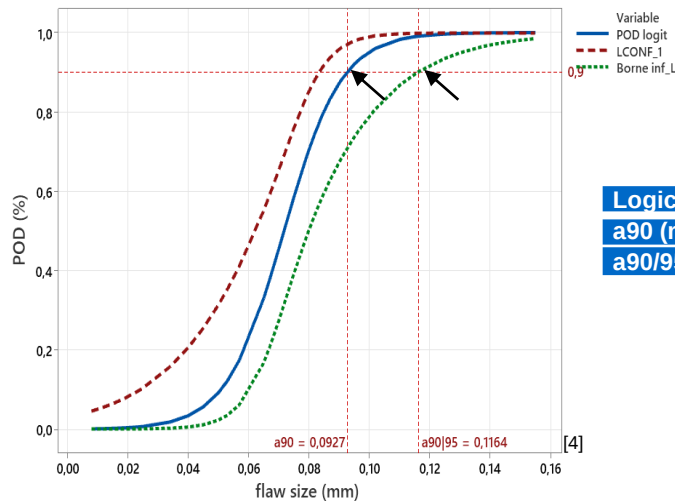
PROBABILITE DE DETECTION (POD)

- PLUSIEURS METHODES STATISTIQUES DE TRAITEMENTS : HIT/ MISS

- PERMET DE DETERMINER :

→ La taille de la plus petite anomalie détectée

→ La taille de l'anomalie détectée avec une probabilité de 90% et un indice de confiance à 95
a90/95



Logiciels utilisés	ASTM	PoD 2.0
a90 (mm)	0.0914	0,0927
a90/95 (mm)	0.1116	0.1164

Résultats PoD obtenus sur un set de data normé

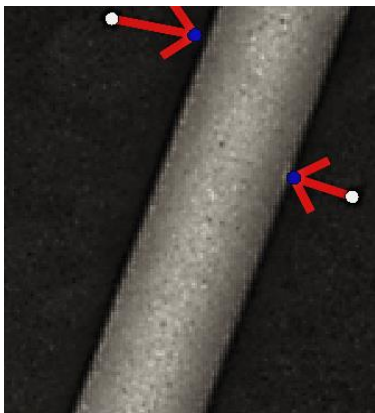
04

TOMOGRAPHIE

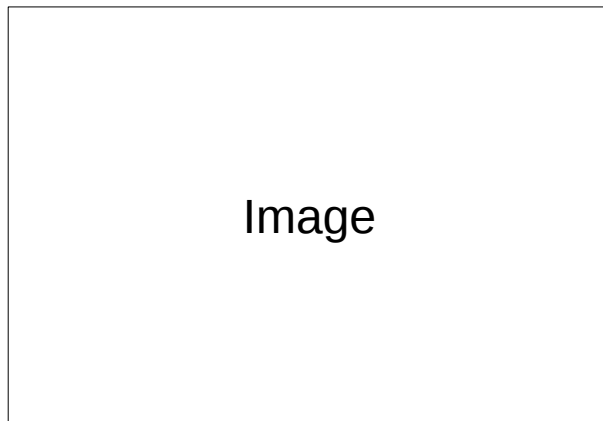
MOYENNE ET HAUTE ENERGIE

VERS LA TOMOGRAPHIE MOYENNE ET HAUTE ENERGIE

- LA RADIOGRAPHIE SUR FILMS NE SUFFIT PLUS A REpondre AU BESOIN SANTE MATIERE DES PIECES A GEOMETRIE COMPLEXE EN FA
- LA TOMOGRAPHIE MOYENNE ET HAUTE ENERGIE : DES AXES D'AMELIORATIONS



Extrait de manques de fusion observés en radiographie numérique (non film)



Flou important car :
flou interne + géométrique principalement

Extrait d'une coupe tomographie Haute énergie 6 MeV.
base Ni en L-PBF – panneau plat 400 x 400 mm² à 200 µm de résolution.
Grandissement 1.3

Illustration de défauts :

- 1 : disque de 0,9 mm
- 2 : épaisseur de 1,2 mm
- 3 : disque de 0,5 mm

05

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

- LE MONITORING IN PROCESS N'EST PAS SUFFISAMMENT MATURE POUR CONTROLER TOUS LES DEFAUTS (A CHAQUE NATURE DE DEFAUT, UN SYSTEME EST REQUIS)
- LA TOMOGRAPHIE MOYENNE ET HAUTE ENERGIE EST POLYVALENTE POUR LES PIECES EN FA (PROTOTYPES, EXPERTISES) VS LE MONITORING
- LA TOMOGRAPHIE MOYENNE ET HAUTE ENERGIE : DES AXES D'AMELIORATIONS
- NÉCESSITER D'AMÉLIORER LA DÉTECTION :
 - FILTRATION SOURCE ET/OU DÉTECTEUR
 - CONTREFORME POUR PIÈCE CREUSE

**PIÈCES À DÉFAUTS CALBRÉS INDISPENSABLES POUR ÉVALUER LES MINI
DÉTECTABLES ET PROBABILITÉS DE DÉTECTION →
PLANS D'EXPÉRIENCES**

#RocketMakers

Déborah Faucon
Ingénieure Contrôle Non Destructif
ArianeGroup, 33185 Le Haillan
France

deborah.faucon@ariane.group
+33 6 38 82 78 19