

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



## Le programme **CoSTARD au CEA/Irfu**



Optimisation structurelle  
et fabrication additive  
pour la physique des deux infinis



**Yannick Jan, François Nunio, Pierre Manil | CEA/DRF/Irfu**  
**Fernando LOMELLO | CEA/DEN/DPC**

13 décembre 2018

CoSTARD =

- Fabrication additive métallique
- + optimisation topologique
- pour la physique des deux infinis

→ **Méthodologie** de conception

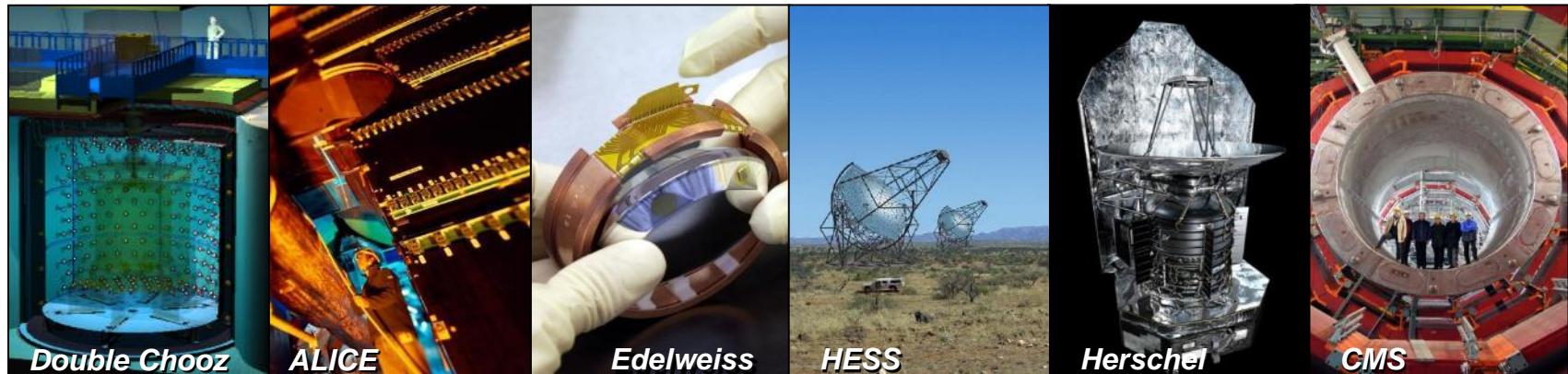
# CONTENU DE LA PRÉSENTATION

- Qui sont les **acteurs** du projet CoSTARD ?
- Comment intégrer la **fabrication additive** dans le cycle de conception ?
- Comment intégrer l'**optimisation topologique** dans le cycle de conception ?
- Comment exploiter ces outils pour la **physique des deux infinis** ?
- Comment faire évoluer nos méthodes de **bureau d'étude** ?

# CONTENU DE LA PRÉSENTATION

- Qui sont les **acteurs** du projet CoSTARD ?
- Comment intégrer la **fabrication additive** dans le cycle de conception ?
- Comment intégrer l'**optimisation topologique** dans le cycle de conception ?
- Comment exploiter ces outils pour la **physique des deux infinis** ?
- Comment faire évoluer nos méthodes de **bureau d'étude** ?

# L'IRFU, EXPLORATEUR DES DEUX INFINIS...



*Double Chooz*

*ALICE*

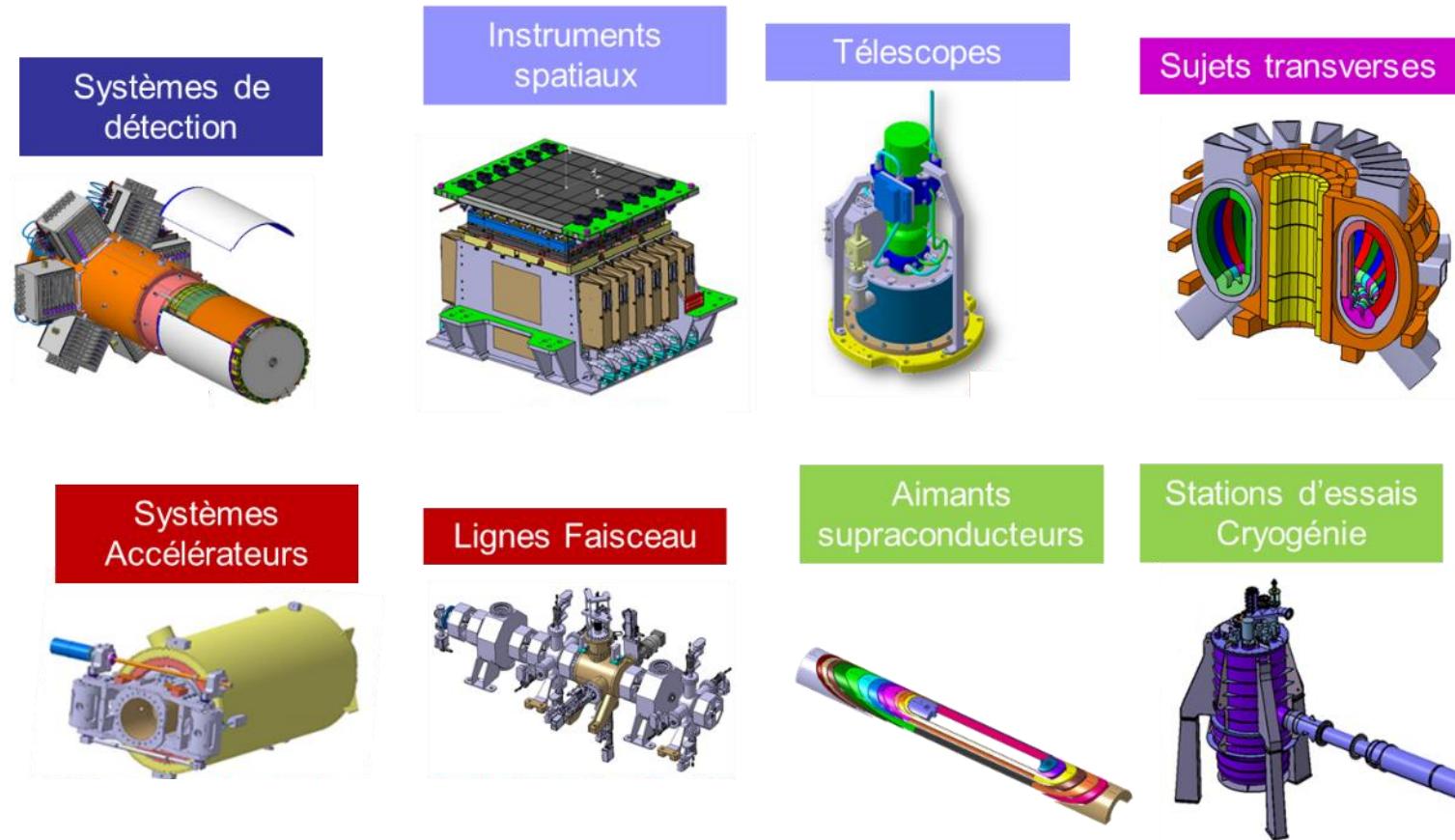
*Edelweiss*

*HESS*

*Herschel*

*CMS*

# LES SAVOIR-FAIRE TECHNOLOGIQUES DE L'IRFU



- La mission du bureau d'études mécaniques de l'Irfu (LCAP) est d'assurer la conception mécanique et thermique de ces équipements...
- ... dont les **contraintes** sont souvent **antagonistes**

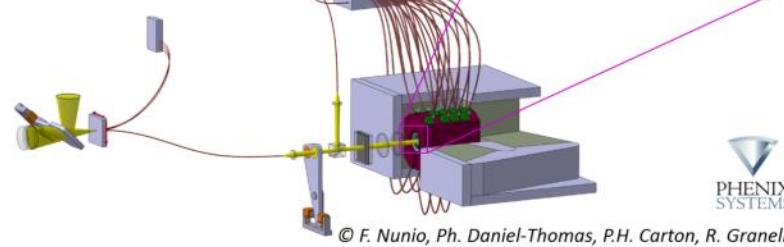
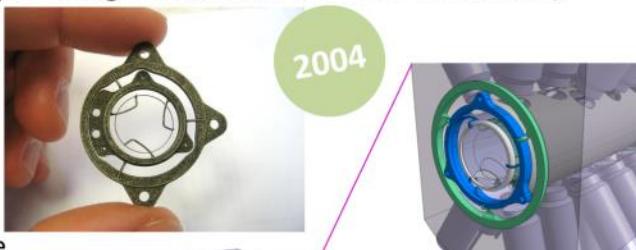
Dès les années 2000, l'Irfu s'intéresse à la fabrication additive :

### L'anneau-support de GOLF-NG

a été fabriqué chez un industriel par frittage de poudre métallique (superalliage médical à base de cobalt).

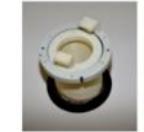
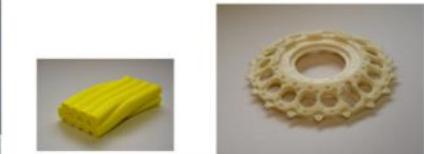
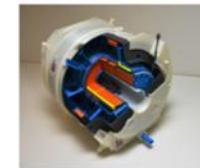
#### Objectif :

Limiter les échanges thermiques en garantissant la tenue mécanique



### L'imprimante 3D de l'Irfu

2014



8 000 h depuis 2014 !

Objectifs :

- 1) production de pièces fonctionnelles à haute performance
- 2) communication technique, prototypage
- 3) outillages à façon
- 4) acquisition de la culture « FabAdd »

Fin 2014, le potentiel de la fabrication additive s'éclaire. L'idée de l'exploiter dès la phase de conception fait son chemin...



Association Française de Prototypage Rapide  
& Fabrication Additive



## ETAT ET ENJEUX DE LA FABRICATION ADDITIVE

Alain BERNARD

Professeur des Universités à l'Ecole Centrale de Nantes  
Chercheur à l'IRCCyN UMR CNRS 6597  
Vice-Président, Association Française de Prototypage Rapide



Pierre MANIL

Chef du bureau d'études mécaniques de l'irfu (SIS/LCAP)



01/12/2014

Prof. Alain BERNARD – Journée IRFU-CEA – Fabrication additive

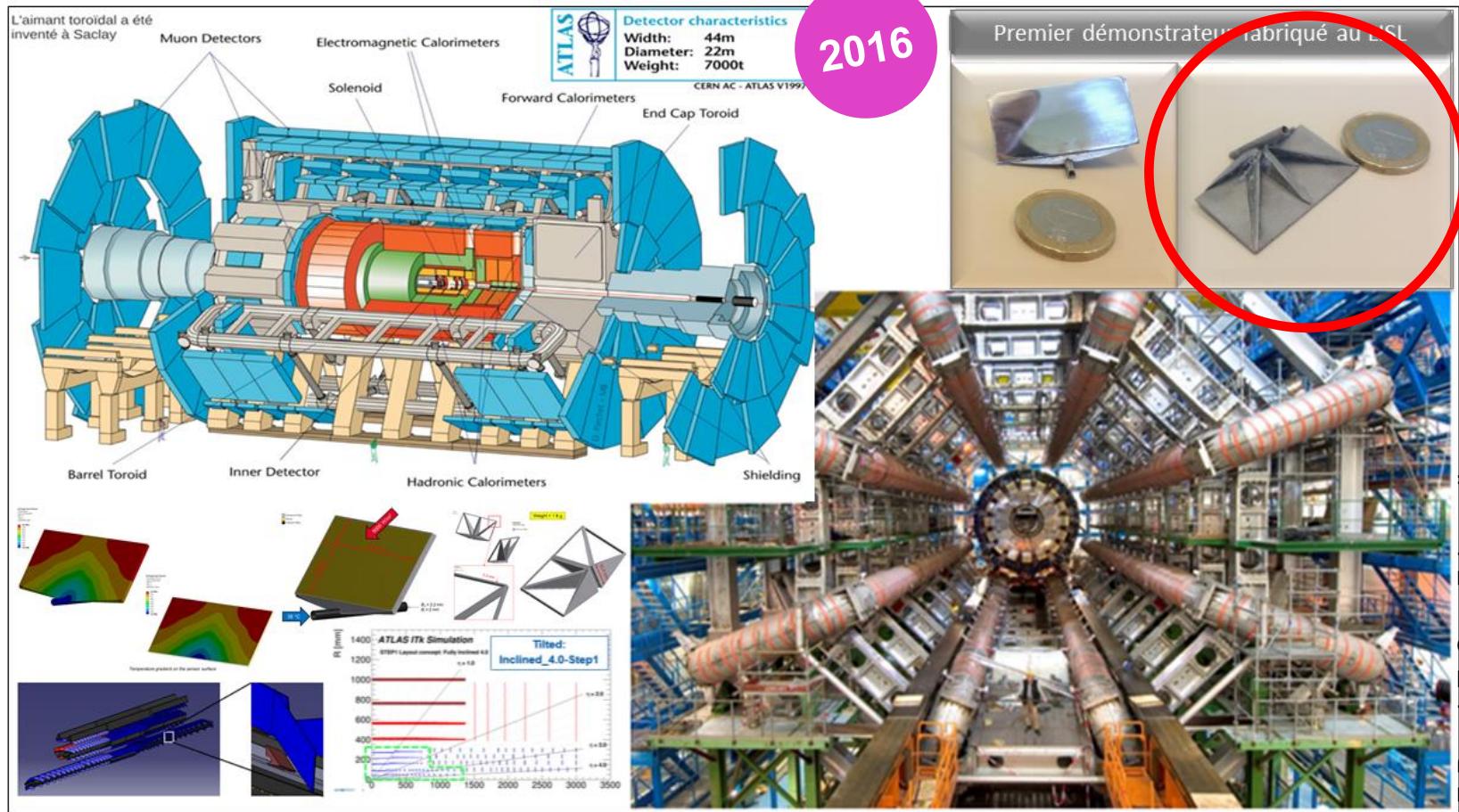
1

## Adapter nos méthodes de conception

2014

- De nouveaux horizons pour la conception...
  - ▶ Nouveaux modes d'assemblage
  - ▶ La notion de « pièce » revisitée...
  - ▶ Nouveaux matériaux (ou mélanges de matériaux)
- ...et la simulation !
  - ▶ Juste matière (optimisation topologique)
  - ▶ *Material-on-demand*
- Le retour du prototype ?

## 2016 : Un premier démonstrateur de support de détecteur



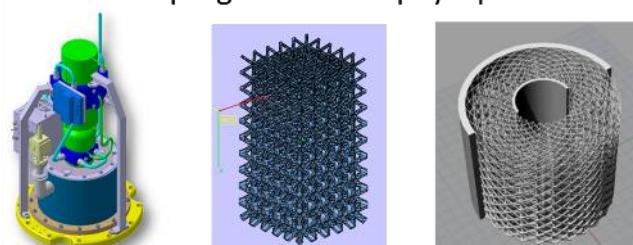
- Programme transversal « matériaux et procédés » du CEA
  - CoSTARD = Conception structurelle pour technologie de fabrication additive appliquée à la recherche et au développement
- **optimisation structurelle pour la fabrication additive métal**  
appliquée à la physique des **deux infinis**

Frédéric Schuster,  
jeudi 10h



DRF/IRFU/DIS  
LCAP

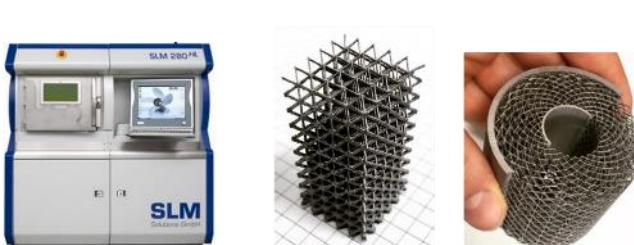
**Conception** sous contraintes spécifiques des programmes de physique



Le bureau d'études mécanique et thermique de l'Irfu

DEN/DANS/DPC/SEARS  
LISL

**Fabrication** avec expertise dans les procédés de fabrication additive



Plateforme SAMANTA

- Développer (réfléchir à...) une méthodologie d'optimisation structurelle de pièces métalliques pour les instruments de l'Irfu,  
**sous l'angle bureau d'études**
  - Etablir une **cartographie** des besoins de l'Irfu
  - Revoir les méthodes de conception et formaliser les contraintes liées au procédé
  - Identifier des **cas d'étude** représentatifs
  - Fabriquer ces pièces et les tester en situation réaliste
  - Diffuser la **culture fabrication additive**

# CONTENU DE LA PRÉSENTATION

- Qui sont les **acteurs** du projet CoSTARD ?
- Comment intégrer la **fabrication additive** dans le cycle de conception ?
- Comment intégrer l'**optimisation topologique** dans le cycle de conception ?
- Comment exploiter ces outils pour la **physique des deux infinis** ?
- Comment faire évoluer nos méthodes de **bureau d'étude** ?

# DES TECHNOLOGIES EN PLEINE EFFERVESCENCE



Romain Gérard,  
vendredi 14h30



© Romain Gérard @ CERN

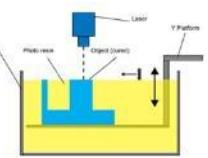


# LES PROCÉDÉS DE FABRICATION ADDITIVE

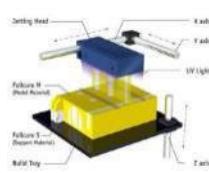
Basse énergie

Haute énergie

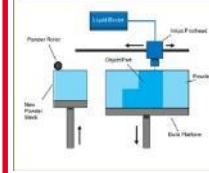
Photopolymérisation  
en cuve  
(Stereolithography)



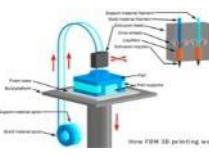
Material jetting



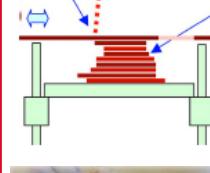
Jet de liant



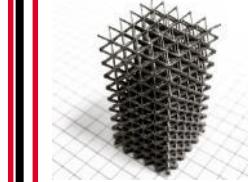
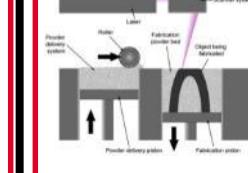
Dépot de matière  
fondue



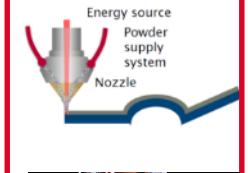
Lamination de feuilles



Fusion sur lit de  
poudre



Dépot direct de métal



CoSTARD



- De nombreuses poudres spécifiques sont déjà disponibles



- ✓ Aciers maraging
- ✓ Aciers inoxydables : 316L, 15-5PH, 17-4PH
- ✓ Superalliages Nickel : Inconel 718, Hastelloy X
- ✓ Alliage de Titane Ti6Al4V
- ✓ Alliage en Cobalt-Chrome
- ✓ Aluminium AlSi10Mg
- ✓ Bronze, alliage de Cuivre : CuCrZr...
- ✓ Or
- ✓ Niobium

Thierry Baffie,  
vendredi 11h



Romain Gérard,  
vendredi 14h30



- Les performances sont très prometteuses

- Des qualifications spécifiques sont nécessaires

(environnement spatial, environnement cryogénique, susceptibilité magnétique, vide poussé, tenue au rayonnement, orthotropie, ...)

Eric Mistretta,  
jeudi 16h



Fernando Lomello,  
jeudi 15h10

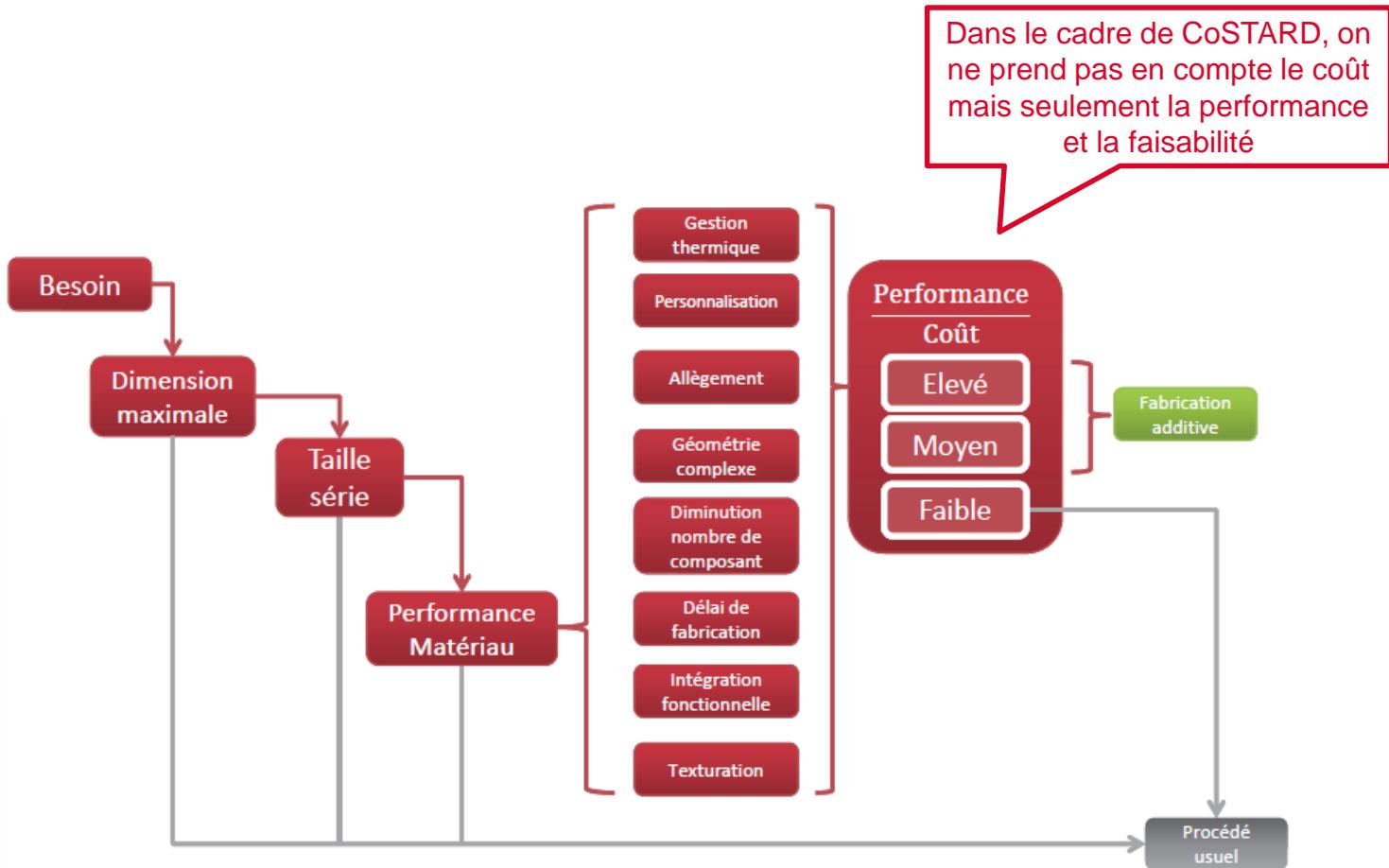


# FABRICATION ADDITIVE OU CONVENTIONNELLE ?

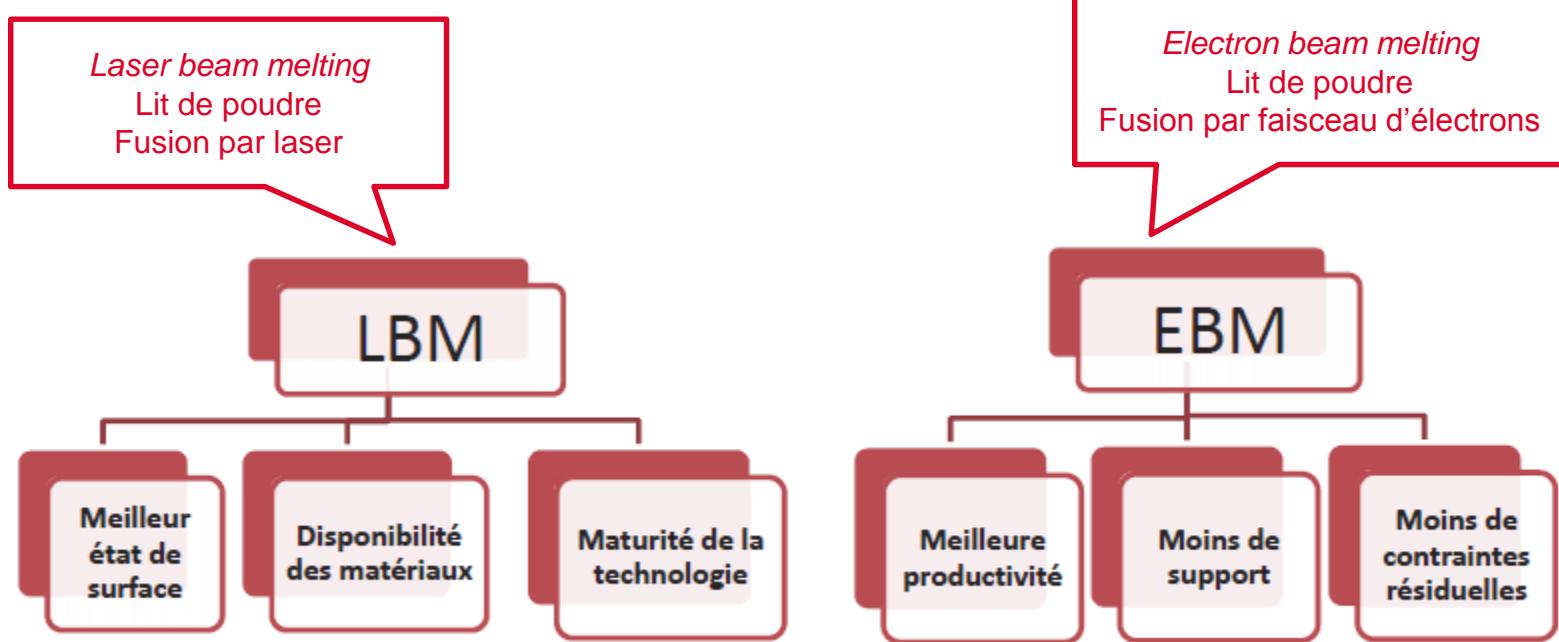


Procédé	Dimension de fab	Taille de série	Etat de surface	Matériau	Géométrie complexe	Avantages	Inconvénients
<b>Usinage</b>	Très Petit --> Très grand	Unitaire --> Très grande	+++	+++	+	Precision, répétabilité, état de surface, délais courts	Difficile de fabriquer des pièces complexes Coût des équipements élevé Perte matière importante
<b>Forge</b>	Petit --> Grand	Moyenne --> Très grande	++	+++	-	Très bonne caractéristiques mécaniques	Géométries limitées, outillage spécifique et très onéreux
<b>Fonderie</b>	Petit --> Très grand	Unitaire --> Très grande	+	+	++	Grande quantité Forme extérieure complexe	outillage spécifique et onéreux
<b>FA</b>	Très petit --> Moyenne	Unitaire --> Petite	-	-	+++	Forme très complexe Personnalisation Délai de prototypage	Coût élevé Productivité faible

# PERTINENCE DE LA FABRICATION ADDITIVE

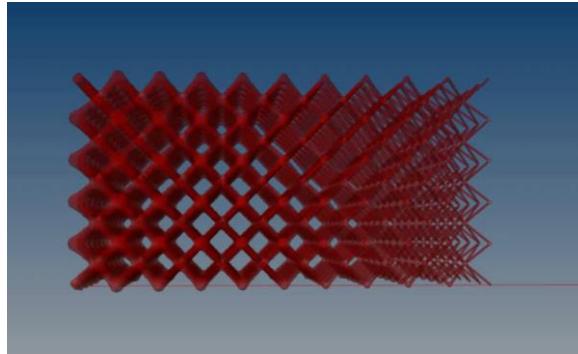


# PRISE EN COMPTE DU PROCÉDÉ ?

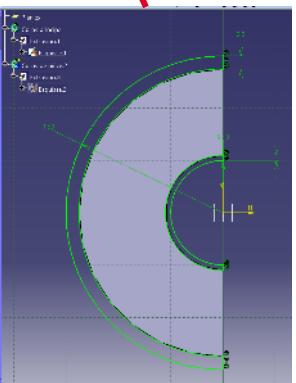


- Interdépendance matériau / procédé / post-traitement
- Les concepteurs doivent être sensibilisés aux techniques de fabrication additive

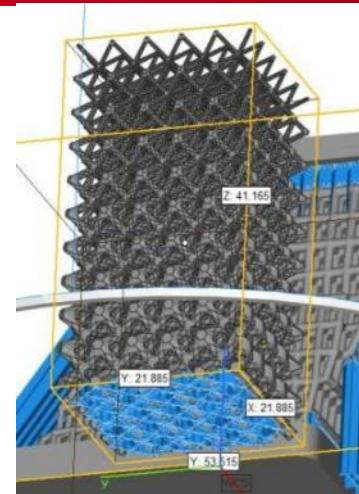
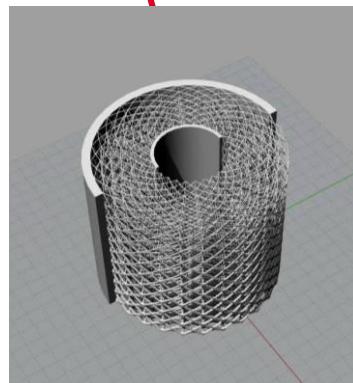
# CYCLE DE CONCEPTION/FABRICATION



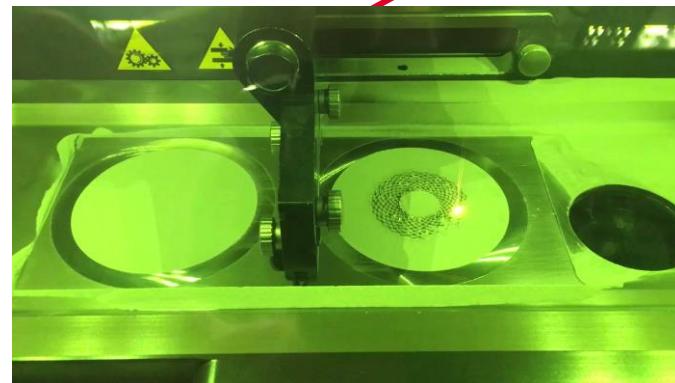
Avant-projet CAO



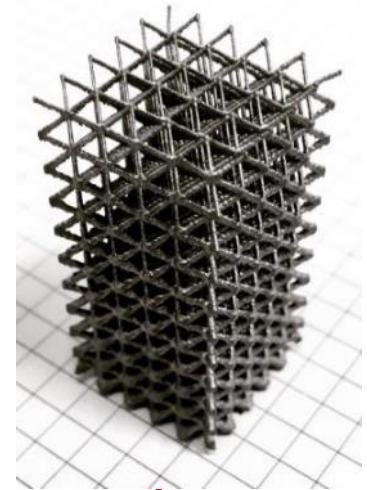
Géométrie complexe



Pré-traitement machine



Technologie de fabrication



Post-traitement « avec un 's' »

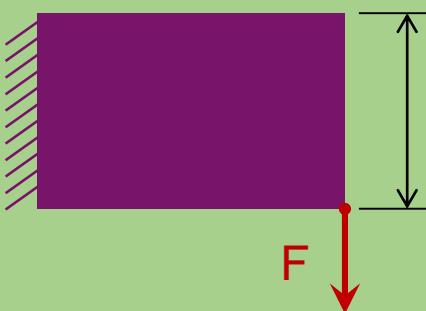


# CONTENU DE LA PRÉSENTATION

- Qui sont les **acteurs** du projet CoSTARD ?
- Comment intégrer la **fabrication additive** dans le cycle de conception ?
- Comment intégrer l'**optimisation topologique** dans le cycle de conception ?
- Comment exploiter ces outils pour la **physique des deux infinis** ?
- Comment faire évoluer nos méthodes de **bureau d'étude** ?

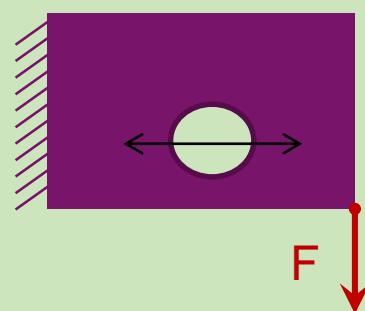
...ou comment « mettre de la matière uniquement là où il y en a besoin »

optimisation dimensionnelle



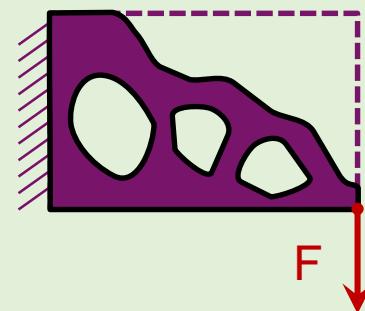
ex :  
épaisseur poutre  
ou de section

optimisation de forme

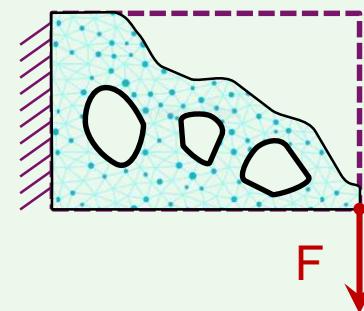


ex :  
position d'un trou

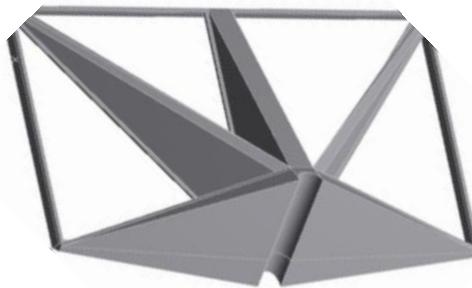
optimisation topologique



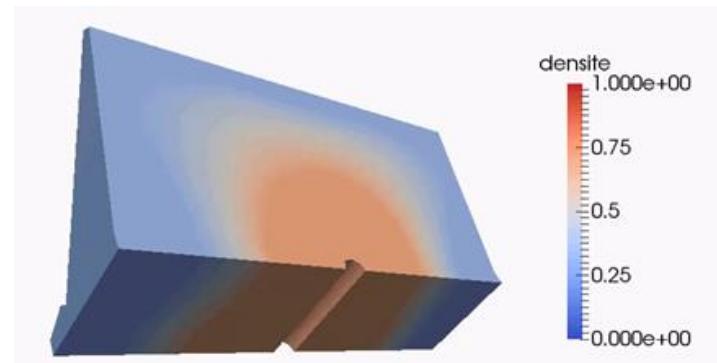
optimisation “lattice”



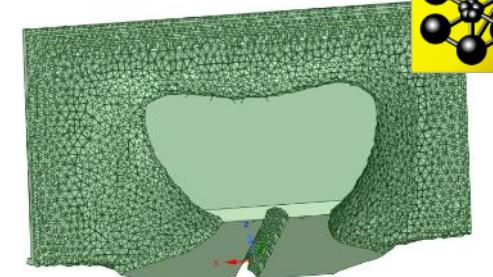
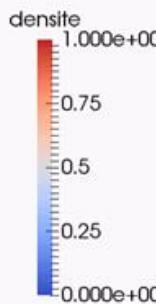
- La fabrication additive augmente les possibilités d'optimisation
- Elle permet de réduire les marges et/ou d'améliorer les performances



Optimisation intuitive



Optimisation topologique Optistruct



Optimisation topologique Cast3m

- L'optimisation topologique a des limites
- Attention aux marges implicites !

Yannick Jan,  
vendredi 14h



# CONTENU DE LA PRÉSENTATION

- Qui sont les **acteurs** du projet CoSTARD ?
- Comment intégrer la **fabrication additive** dans le cycle de conception ?
- Comment intégrer l'**optimisation topologique** dans le cycle de conception ?
- **Comment exploiter ces outils pour la physique des deux infinis ?**
- Comment faire évoluer nos méthodes de **bureau d'étude** ?

Département d'Ingénierie des Systèmes de l'Irfu

Pourquoi et comment utiliser la **Fabrication Additive Métallique** pour nos projets au **DIS** ?

Par François Nunio, Yannick Jan, Pierre Manil

Séminaire • Appel à idées  
Venez avec vos questions et vos propositions !

Mardi 6 février 2018  
Bât. 472 • p.115  
14h • 1h + discussion libre  
Café offert par la maison

En partenariat avec la DEN, qui dispose de machines d'**impression 3D métallique**, le LCAP s'approprie les méthodologies d'**optimisation structurelle**, permettant de concevoir différemment les composants mécaniques. C'est le projet **CoSTARD**, dont nous allons vous présenter le contexte et les motivations. **Mais surtout, nous sommes à l'écoute de vos idées et vos besoins** pour identifier les futurs cas d'étude du projet ou proposer une alternative à une pièce existante.

contact : [yannick.jan@cea.fr](mailto:yannick.jan@cea.fr)

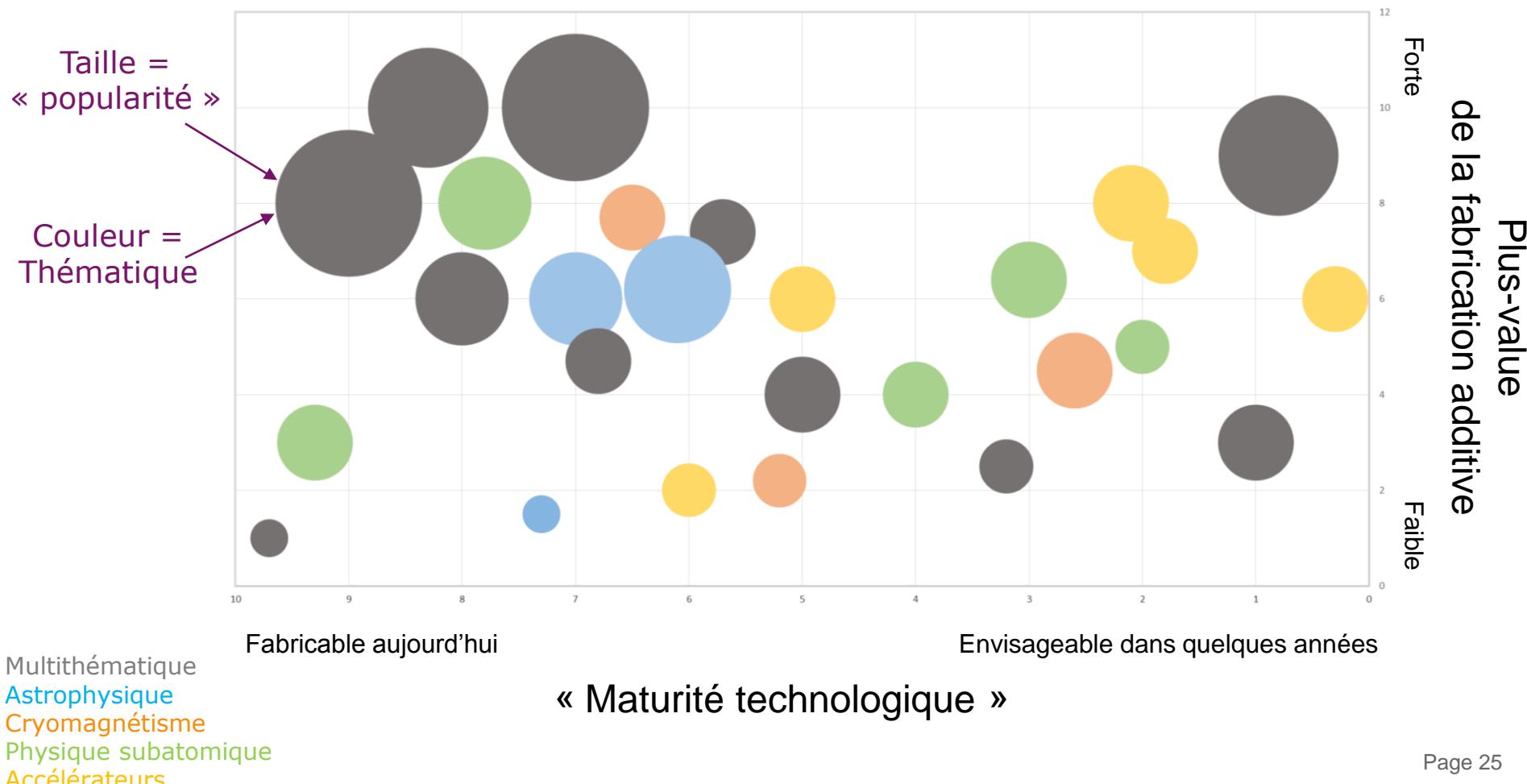
- 9 séminaires d'une demi-journée
- Appel à idées « sans filtre »

→ **75 idées** recensées à l'Irfu

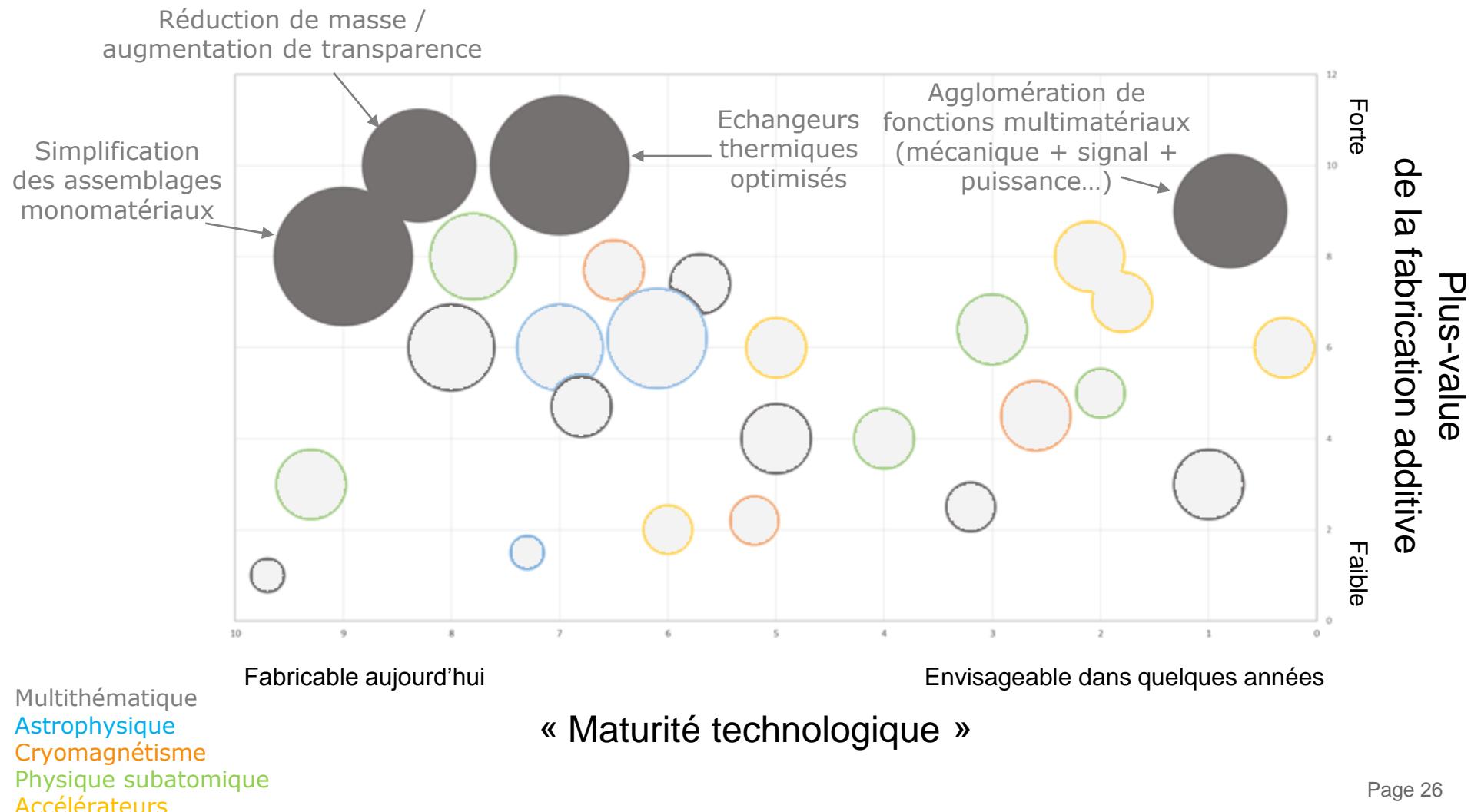
→ **Cartographie** des besoins

## Cartographie des besoins de l'Irfu en fabrication additive

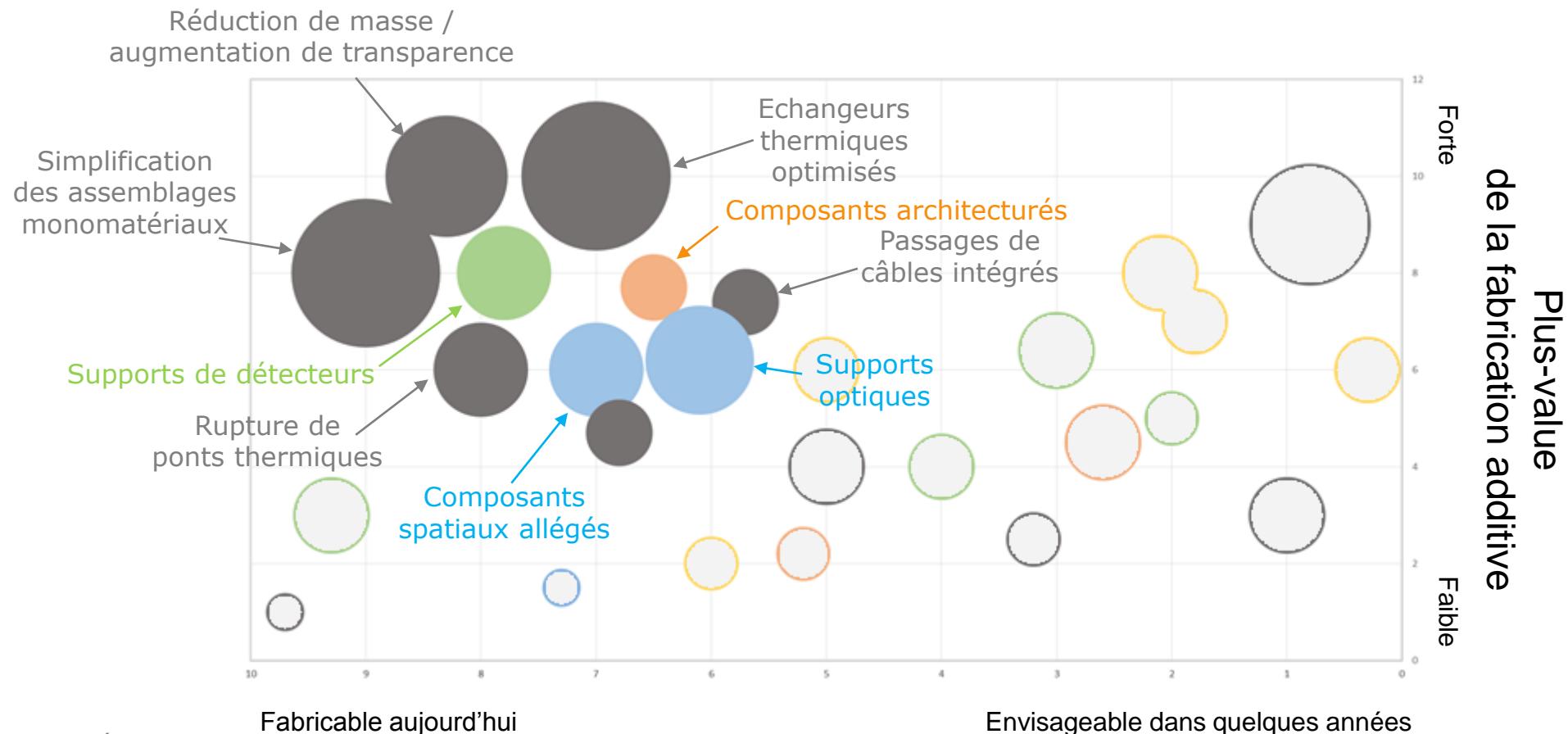
1 bulle = 1 groupe d'idées similaires



## Idées les plus populaires



## Idées fabricables à court terme



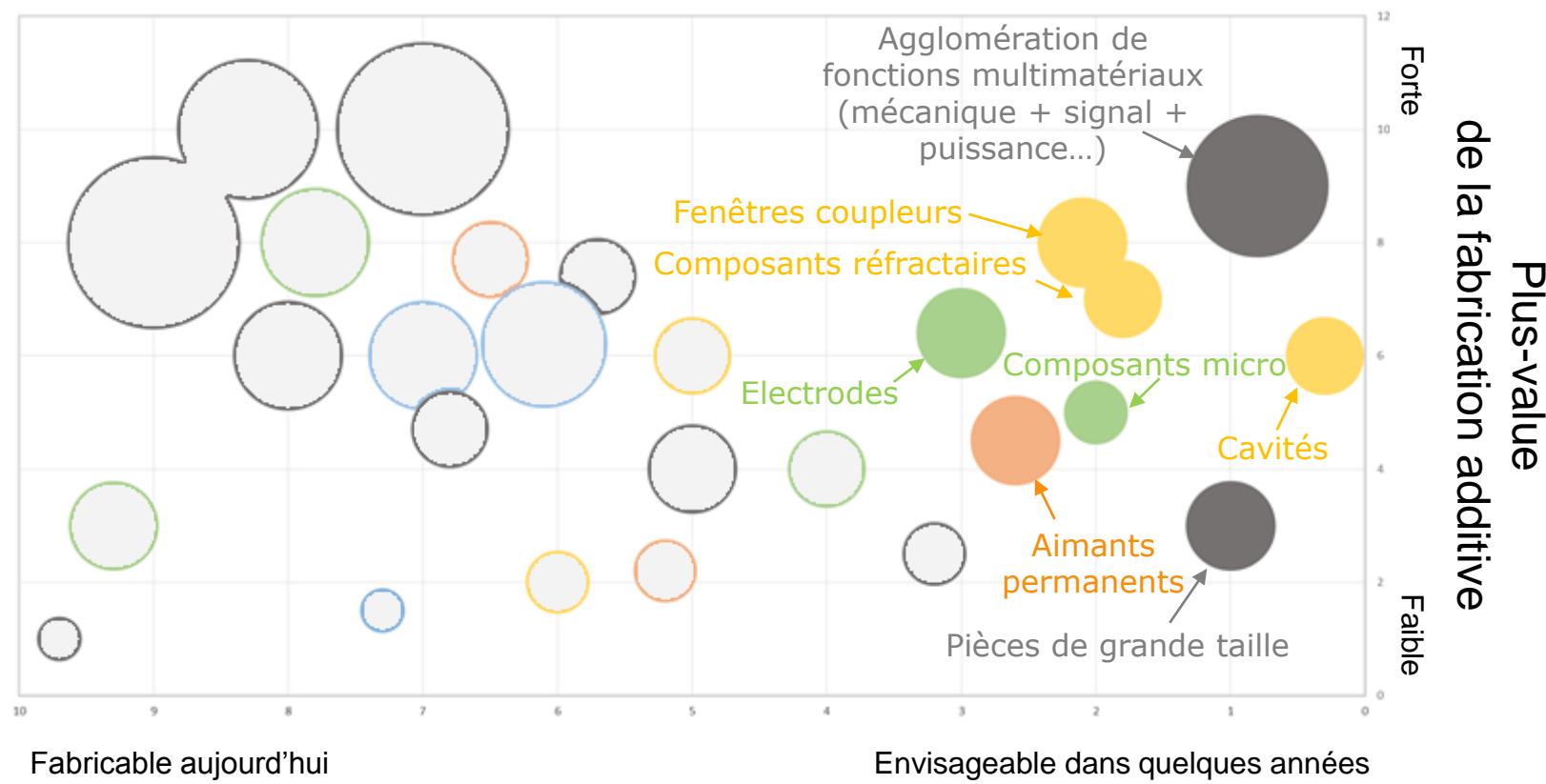
Fabricable aujourd'hui

Envisageable dans quelques années

**« Maturité technologique »**

Multithématique  
Astrophysique  
Cryomagnétisme  
Physique subatomique  
Accélérateurs

## Idées envisageables sur le long terme



Fabricable aujourd'hui

Envisageable dans quelques années

« Maturité technologique »

- Problématiques récurrentes :  
Optimisation pour améliorer les performances,  
multimatériaux, canaux de refroidissement, transport  
de signal...
- Mise en place d'un *newsletter*
- Choix de **cas d'étude** représentatifs des besoins



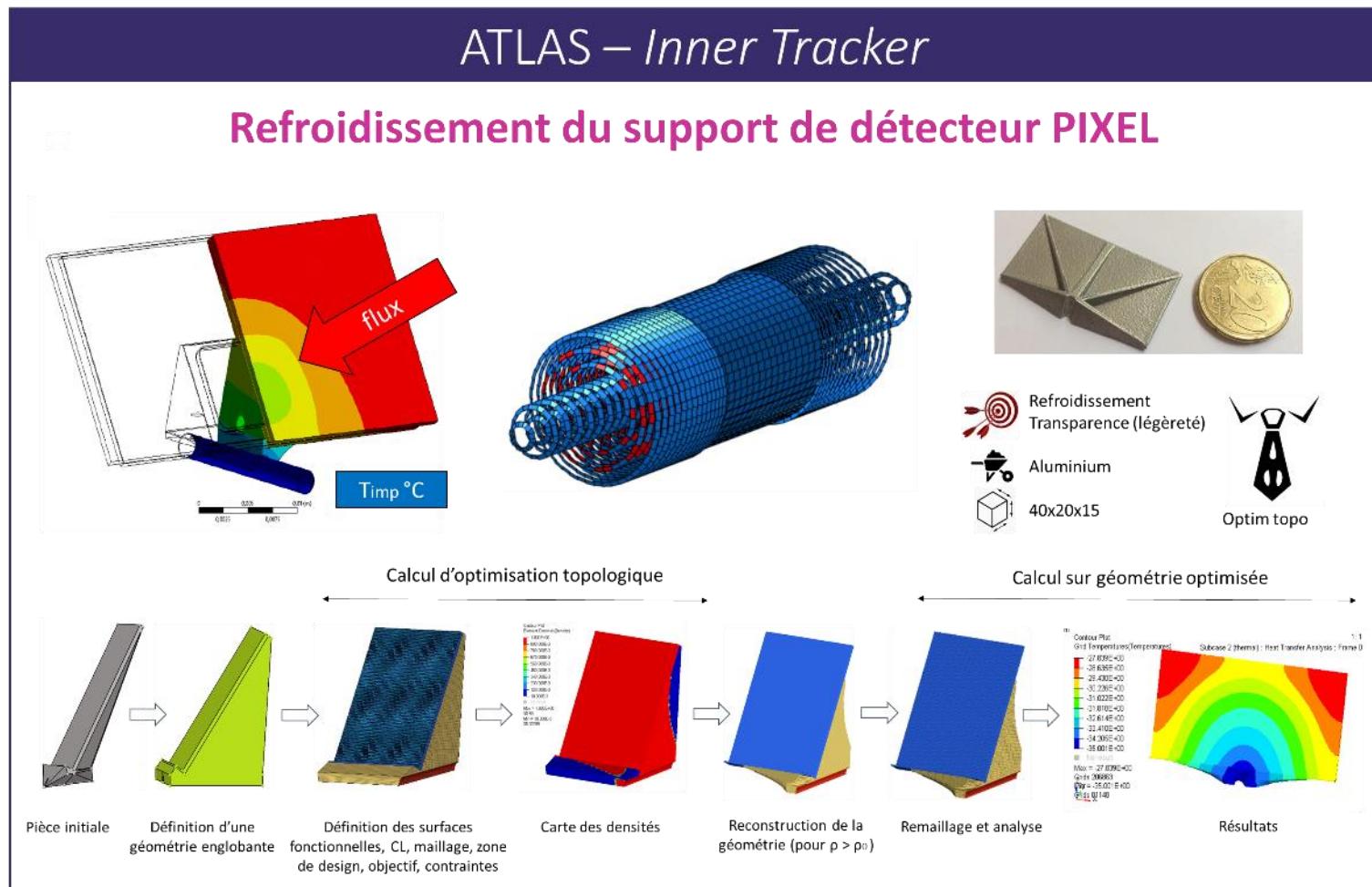
# CONTENU DE LA PRÉSENTATION

- Qui sont les **acteurs** du projet CoSTARD ?
- Comment intégrer la **fabrication additive** dans le cycle de conception ?
- Comment intégrer l'**optimisation topologique** dans le cycle de conception ?
- Comment exploiter ces outils pour la **physique des deux infinis** ?
- Comment faire évoluer nos méthodes de **bureau d'étude** ?

# CAS D'ÉTUDE : DÉTECTEUR DE PHYSIQUE

## ATLAS – Inner Tracker

### Refroidissement du support de détecteur PIXEL



# CAS D'ÉTUDE : FUSION MAGNÉTIQUE

**Roue de robot IRFM**

**Roue omnidirectionnelle d'un robot de maintenance dans un tokamak**

Création lattice

Calcul sur géométrie lattice

Dimensions: Ø 19.65, Ø 17, Ø 14.30, Ø 4, 21.50, 19.50, 0.25x45°, 2x45°, M14x1.5.

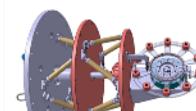
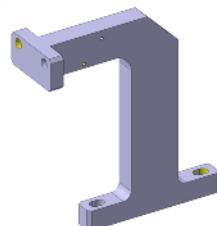
Alliage aluminium  
70x70x30  
Lattice

-50% de masse

# AUTRES CAS D'ÉTUDE...

## ELT-METIS

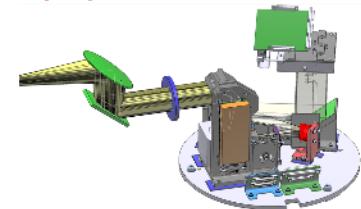
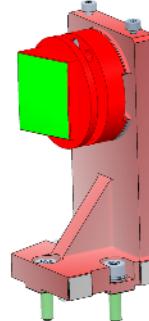
Support de résolveur  
avec rupture de pont thermique



- ☛ Rupture de pont thermique Agglomération de fonctions
- ☛ Titane / Aluminium / Inox 120x120x40
- ☛ Lattice

## QUANTIX

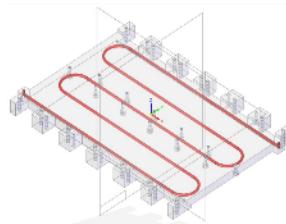
Support optique avec miroir



- ☛ Rupture de pont thermique Agglomération de fonction
- ☛ Alliage aluminium
- ☛ 120x120x40
- ☛ Pas d'optim

## ILC - TPC

Refroidissement d'un support de détecteur avec circulation de CO<sub>2</sub> intégrée



- ☛ Faisabilité (extraction poudre) Tenue en pression (50-100 bar)
- ☛ Aluminium
- ☛ Environ 150x100x15
- ☛ Pas d'optim

- La fabrication additive offre des possibilités nouvelles aux concepteurs
- L'optimisation topologique est un outil intéressant en particulier dans les cas de chargement multiples ou non-intuitifs
- L'optimisation par treillis (*lattice*) est une voie suffisante dans certains cas
- La lourdeur des fichiers CAO demande à revoir les procédures de bureau d'étude
- La nécessité d'intégrer les contraintes de fabrication demande de revoir le positionnement du bureau d'étude par rapport aux méthodes

- CoSTARD nous permet de diffuser la culture fabrication additive auprès des concepteurs et des projets
- Nécessaire évolution de nos méthodologies de conception
- Autres matériaux très attendus : cuivre et alliages, niobium, tungstène...
- À plus long terme : multi-matériaux, *material-by-design...*

**MERCI !**



Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives  
Centre de Saclay | 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

Etablissement public à caractère industriel et commercial | R.C.S Paris B 775 685 019

Direction de la Recherche Fondamentale  
Institut de recherche  
sur les lois fondamentales de l'Univers  
Département d'ingénierie des systèmes