

# *LIL et LMJ vers la Fusion par Confinement Inertiel*

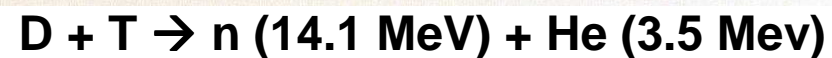
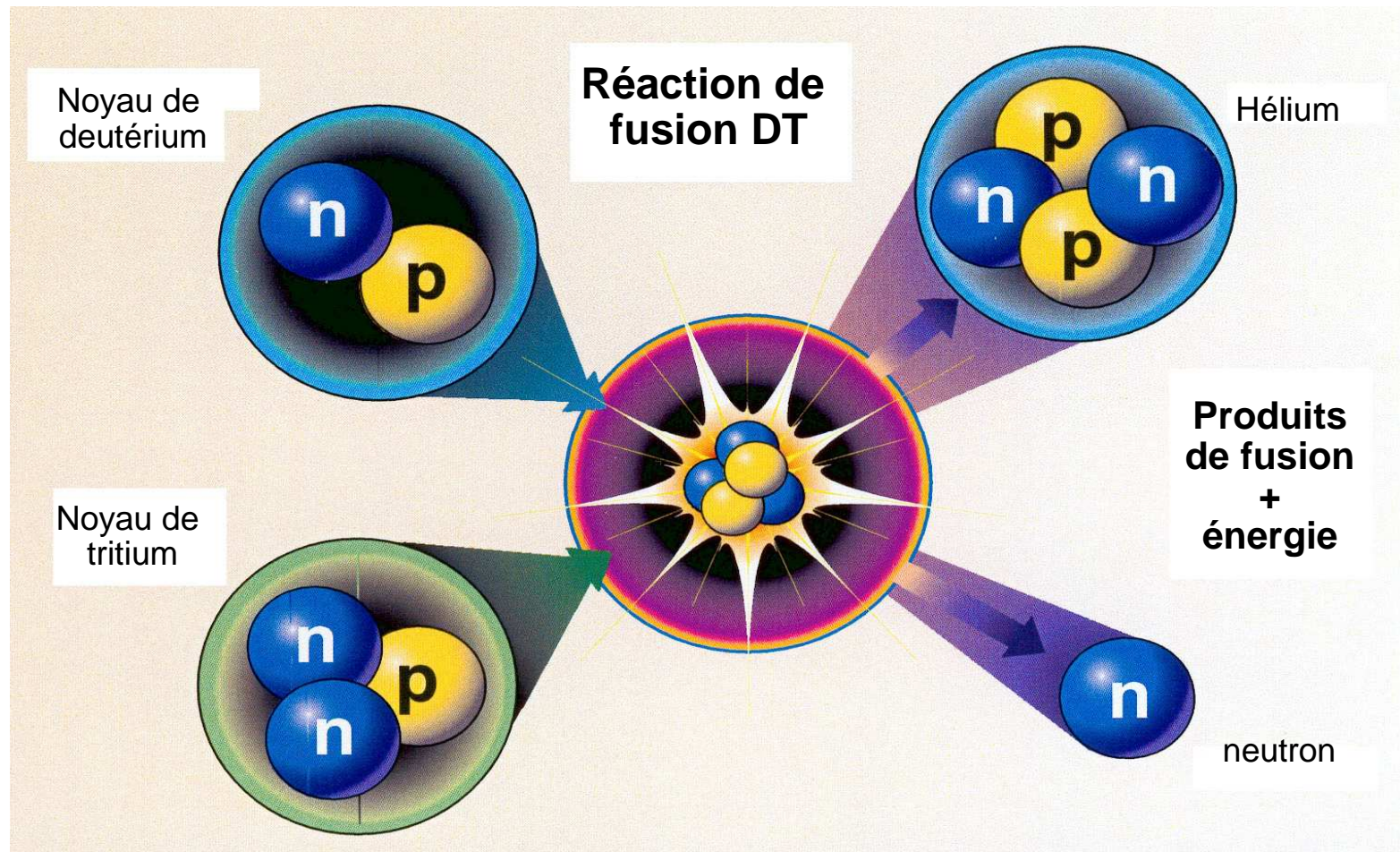
*Bruno LE GARREC  
Directeur de Recherche  
CEA-CESTA  
Département Lasers de Puissance  
33114 LE BARP*

- La Fusion : notions de principe
- Le LASER : schéma de base, LIL, LMJ
- La Ligne d'Intégration Laser
- Le LMJ : état actuel
- Aspects industriels
- Quelques expériences

## *La physique des hautes densités d'énergie et de l'ignition avec le LMJ*

- L'objectif des expériences de physique des plasmas menées auprès des lasers, et en particulier avec la réalisation du National Ignition Facility (NIF) aux États-Unis et du Laser MégaJoule (LMJ) en France, est d'étudier la fusion par confinement inertiel (FCI). L'objectif principal des expériences auprès du Laser MégaJoule est la combustion d'un mélange fusible constitué d'atomes de deutérium et de tritium (DT) libérant 10 fois plus d'énergie en fusionnant que l'énergie apportée à la cible par le laser.
- Étude de la matière sous des conditions de température et de pression extrêmes pour la validation des modèles physiques dans le domaine thermonucléaire.
- Produire en laboratoire des phénomènes physiques tels que ceux observés dans les systèmes stellaires - jets de matière hyper véloce, instabilités hydrodynamiques...

Le principe de la FCI consiste à comprimer un mélange DT contenu dans une capsule à une densité suffisante pour qu'il puisse s'enflammer et brûler plus vite qu'il ne se détend





## Quelques ordres de grandeur

Les conditions de fusion :



Le confinement est tel que l'énergie cinétique des noyaux  
contrebalance l'énergie de répulsion électrostatique

Température  $T \sim 10^8 \text{ K}$

Produit densité x temps de confinement :  $n\tau \sim 10^{14} \text{ s/cm}^3$

Cas Magnétique :

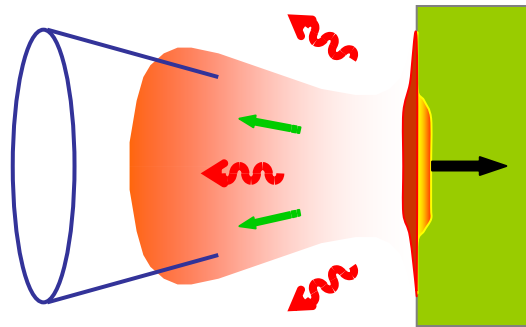
- $n \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

- $\tau \sim 1 \text{ s}$

Cas Inertiel :

- $n \sim 10^{23} \text{ cm}^{-3}$

- $\tau \sim 10^{-9} \text{ s}$

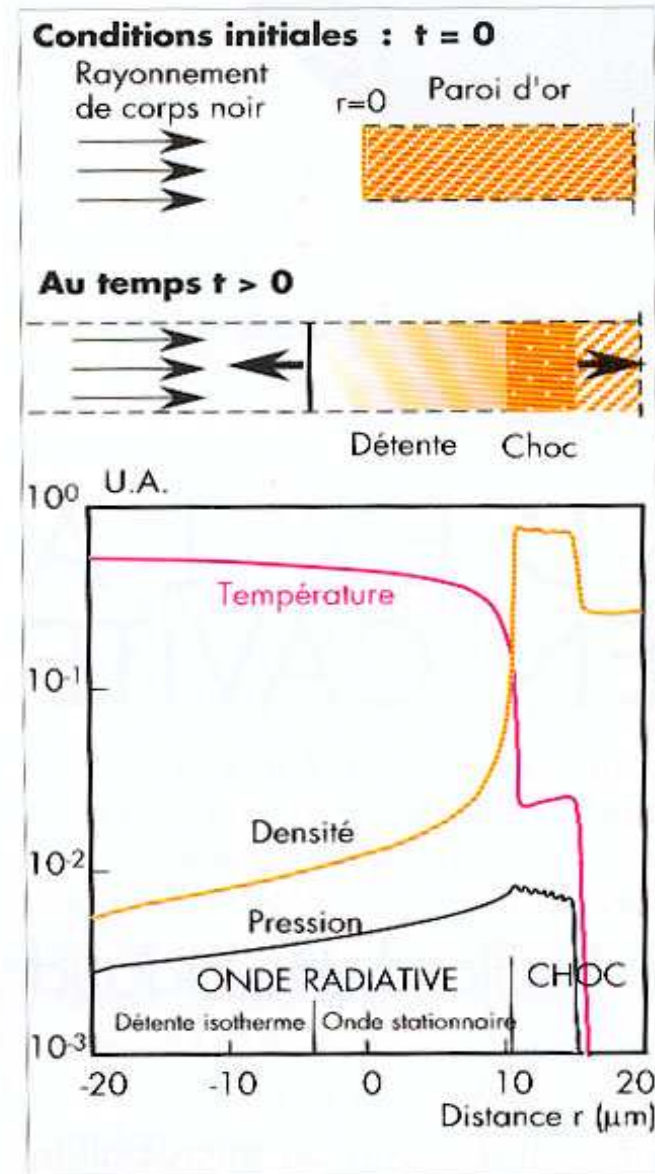


Définition de la densité critique:

$$\omega_L = 2\pi c/\lambda$$

$$\omega_e = (4\pi n_e c^2/m)^{1/2}$$

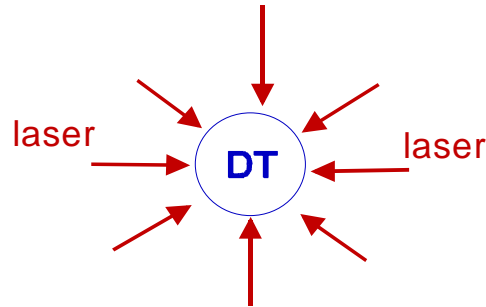
$$n_c = (m\pi c^2/e^2)/\lambda^2$$



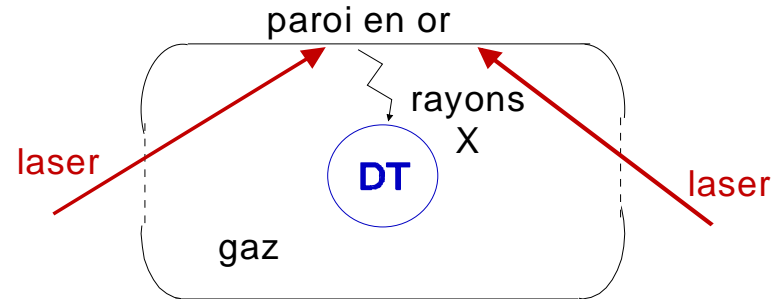


## 3 voies possibles pour la fusion par confinement inertiel

### 1 - Attaque directe

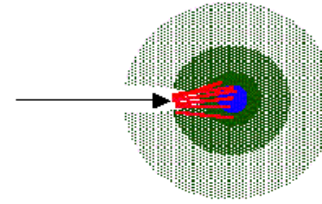
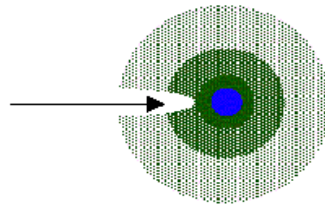


### 2 - Attaque indirecte (LMJ/ NIF)



### 3 - Allumage rapide

1 : formation d'un canal



2: électrons/protons relativistes et chauffage du DT

Impulsions courtes et intenses ( $10-100$  ps,  $> 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> )

- Nécessité d'un éclaircissement « uniforme » et de « grande » dimension ( mm<sup>2</sup> )
- Limiter les sur-intensités qui développent des effets non-linéaires

# La Fusion par Confinement Inertiel

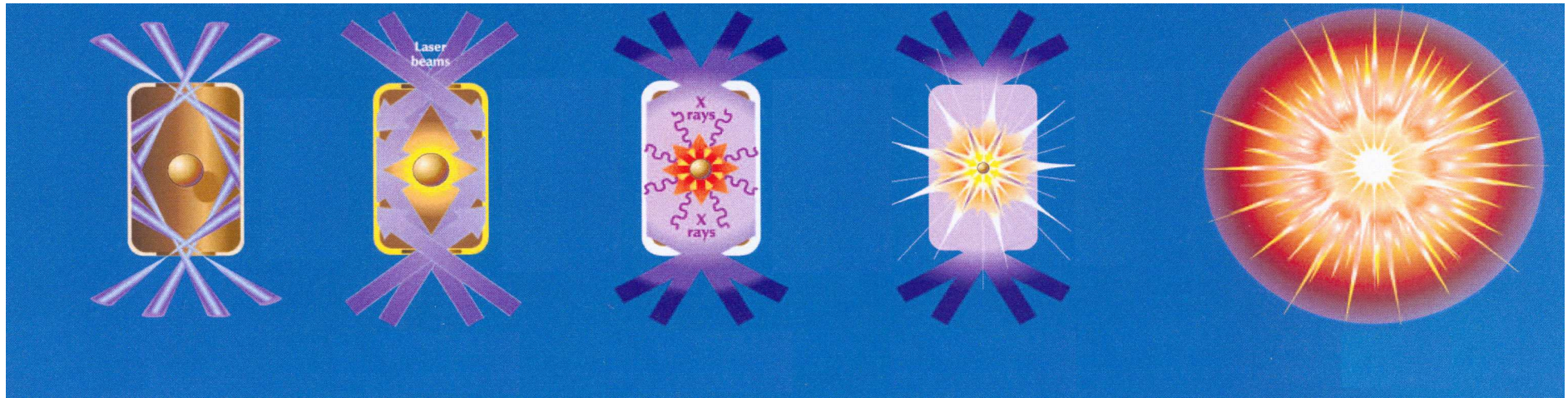


Schéma de l'attaque indirecte

Les faisceaux laser chauffent la paroi interne de la cavité (création d'un plasma qui exerce une pression sur la cible de 100 Mbar)

Le rayonnement X ablate la capsule et par effet fusée comprime la partie interne de la capsule (vitesse atteinte de 400 km/s)

L'ignition se produit quand la zone centrale atteint 70 MK et 0.3 g/cm<sup>2</sup>

Une onde de combustion thermonucléaire est générée: La température des ions est de 500MK



---

# *Le LASER : schéma de base, LIL, LMJ*

Répondre au besoin en terme de performances

Les concepts fondamentaux :

Amplification,

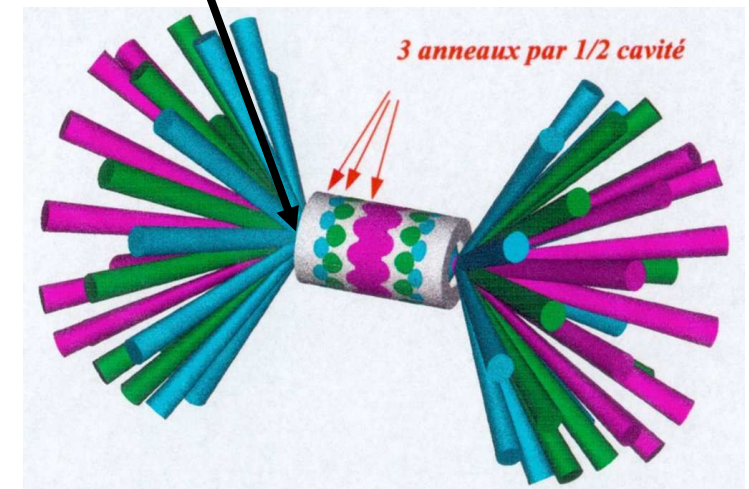
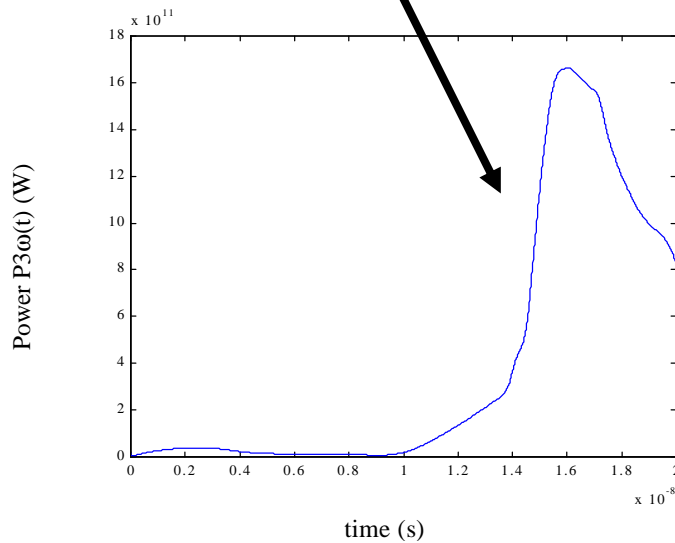
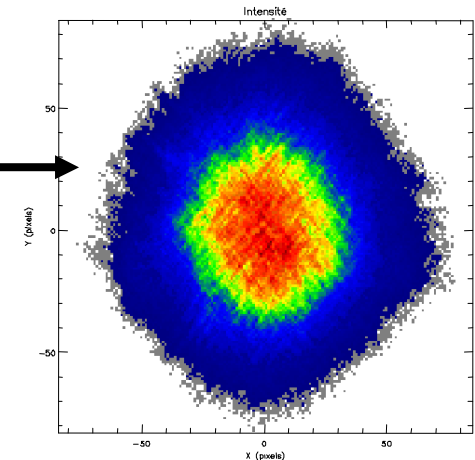
Conversion de fréquence

Imagerie, filtrage et correction de surface d'onde

Focalisation et mise en forme de la tache focale

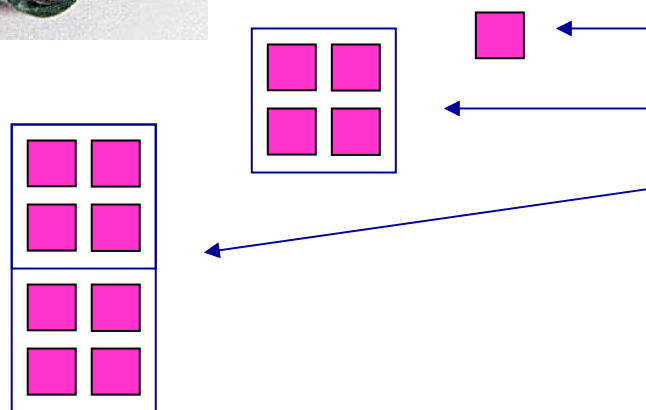
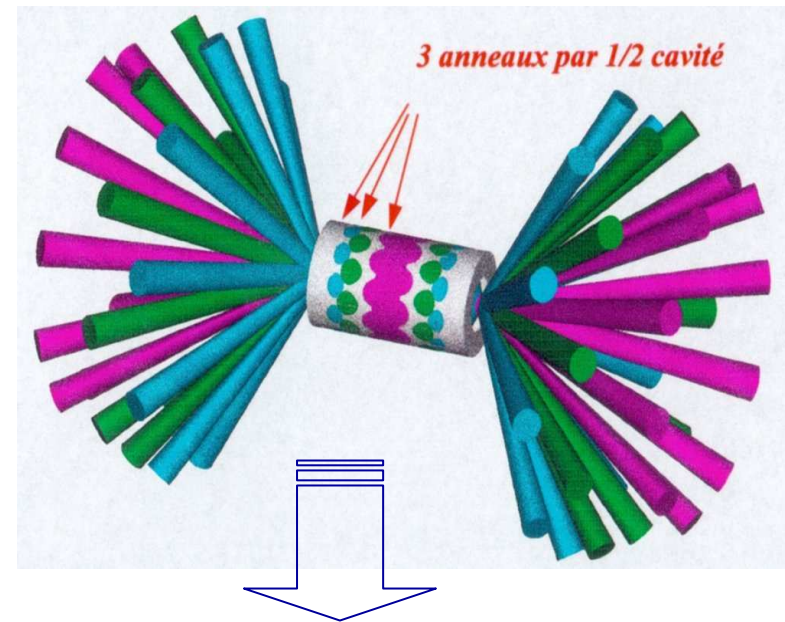
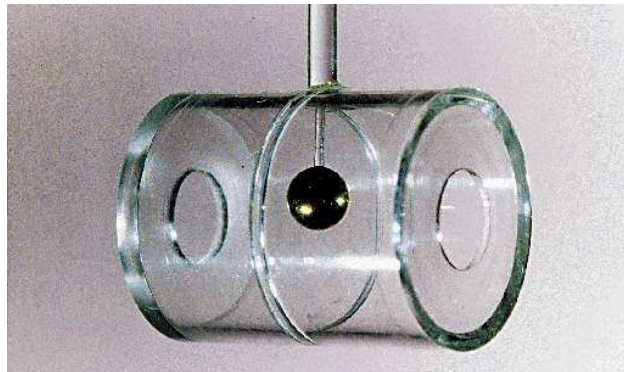
# Dimensionnement laser : répondre aux besoins

- Énergie, Puissance : schéma optimisé 550 TW, 2 MJ (cibles à gain)
- Mettre en forme la tache focale
- Quelle que soit la configuration (il y en a 25) :
  - Faire passer les taches focales des « n » quadruplets par le(s) trou(s) d'entrée du Hohlraum (la cavité)
  - Forme temporelle et synchronisation



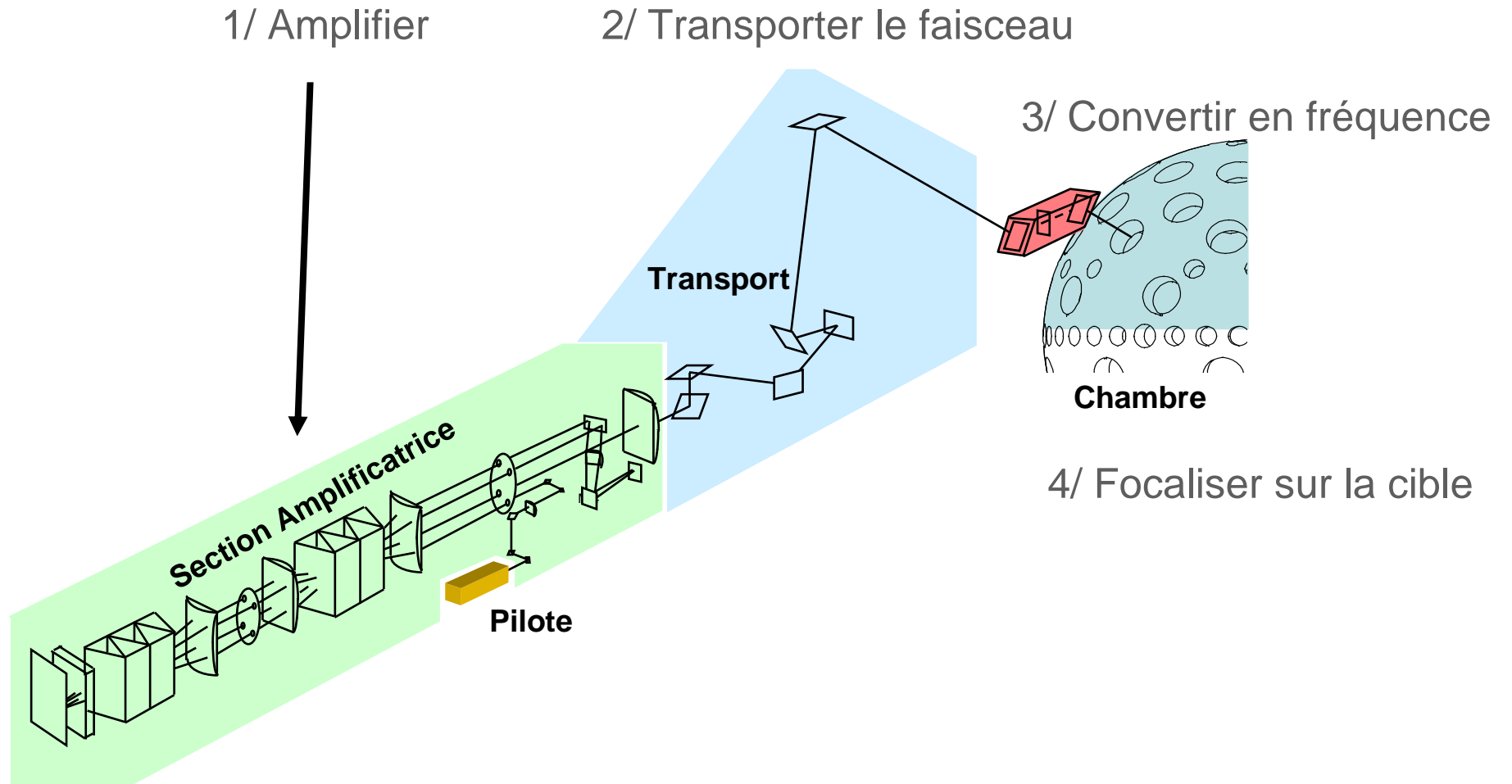
## Des spécifications au schéma de base

- 3 cônes à 33, 49 et 59 °
- 2 cotés
- 10 quadruplets par cônes
- 2 quadruplets par chaîne laser



- $3 \times 2 \times 10 \times 4 = 2^4 \times 3 \times 5 = 240$
- 240 est divisible par 2, 3, 4, 5, 6
- 240 faisceaux = 60 quadruplets
- 30 chaînes lasers

# Schéma d'un faisceau LMJ



Un laser de puissance c'est une source laser de faible énergie que l'on va amplifier pour atteindre l'énergie voulue en conservant au mieux sa forme spatiale et temporelle (gamme de 250 ps à 25 ns)

Pour obtenir l'énergie UV requise, le plus simple est d'amplifier une source infrarouge et d'opérer une conversion de fréquence juste avant la cible (IR,  $1\omega$  => UV,  $3\omega$ )

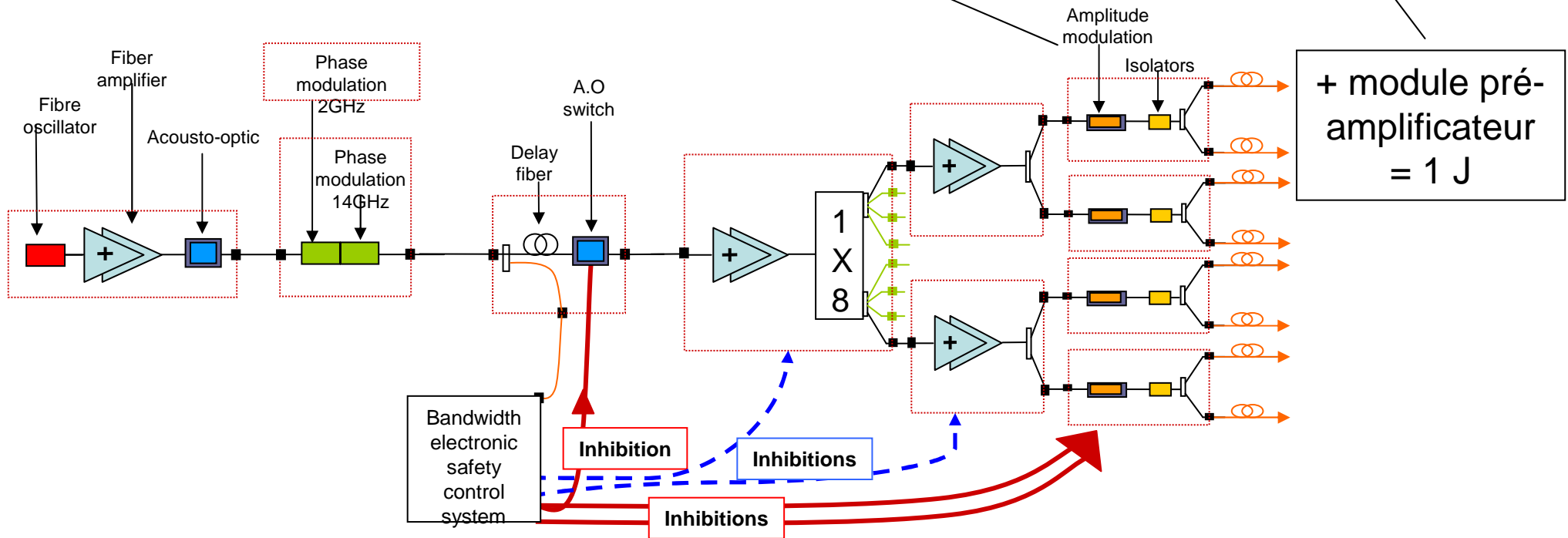
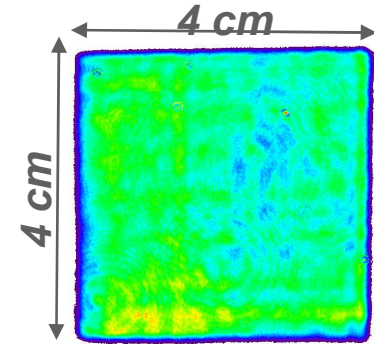
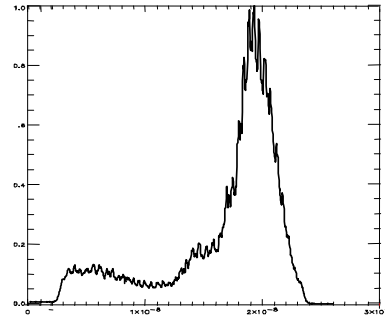




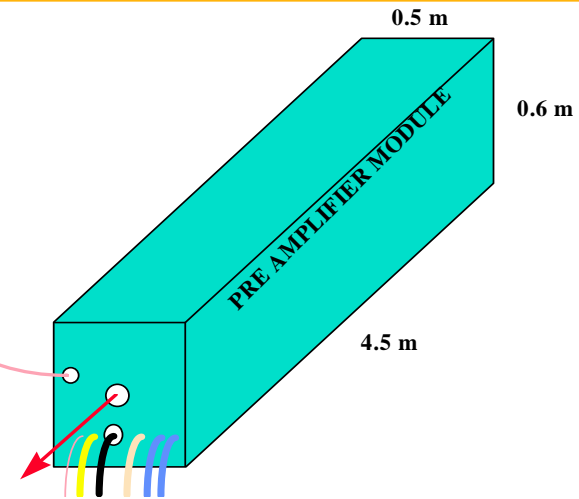
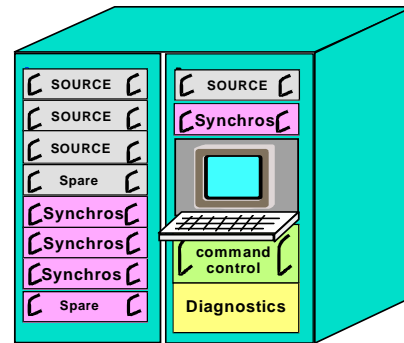
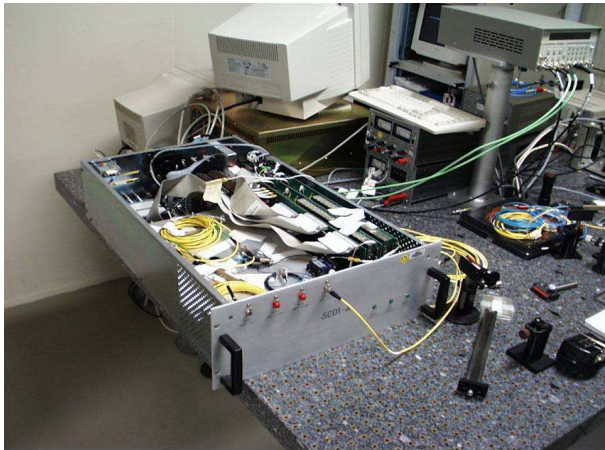
# Le Pilote = oscillateur + fonctions + pré-ampli

De 300 ps à 28 ns

Square beam, flat profile

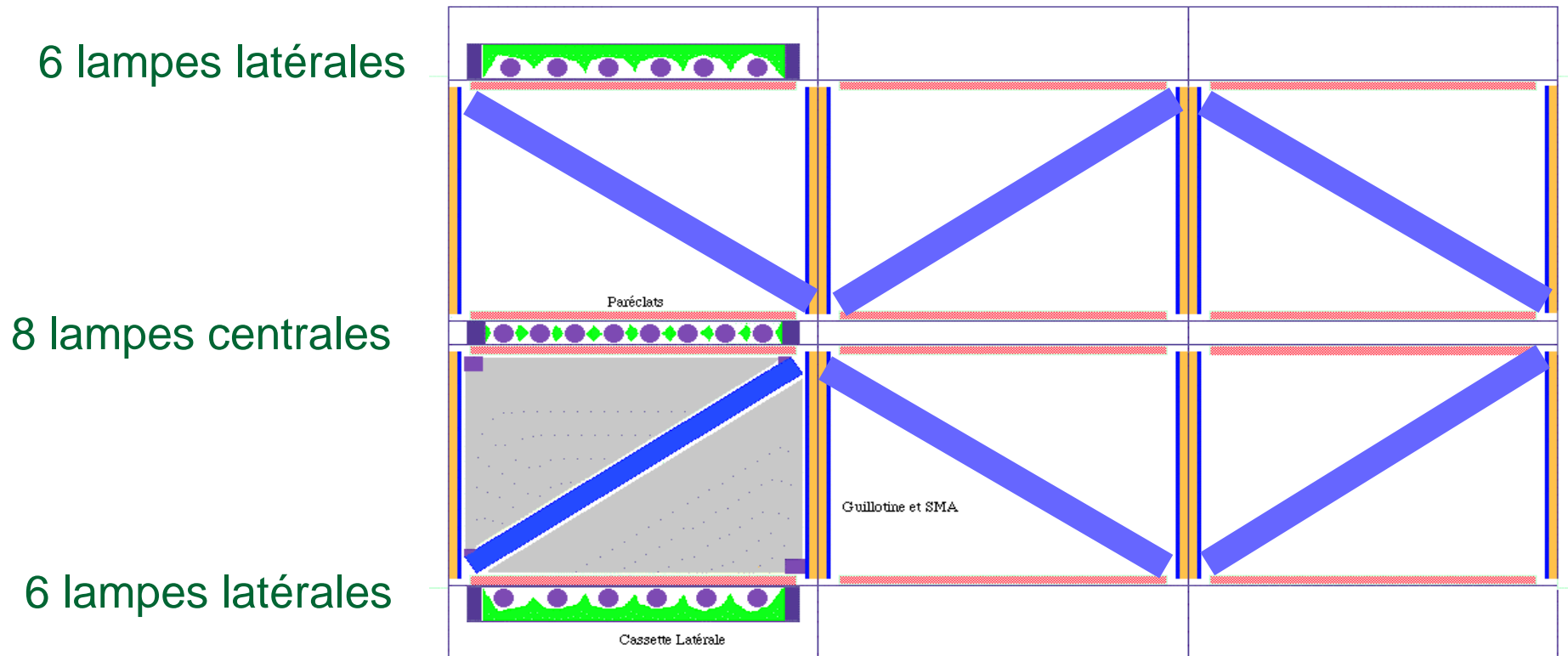


# Source + Module Pré Amplificateur



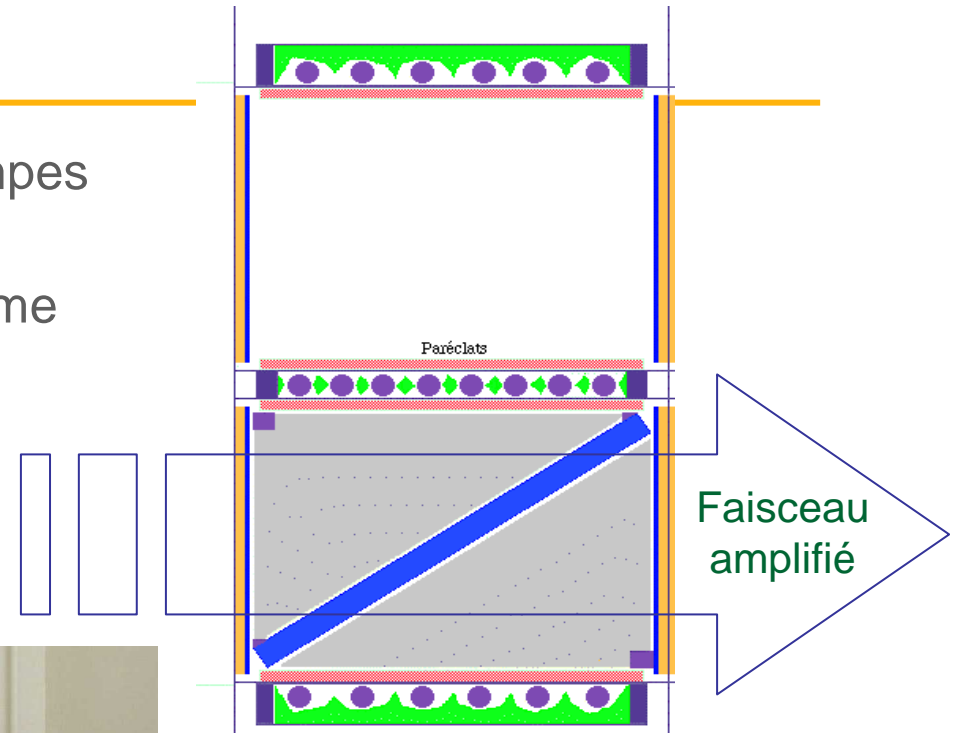
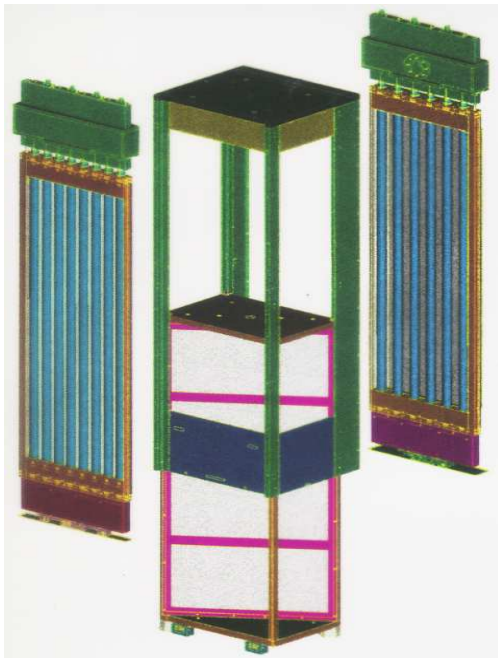
## Principe d'un amplificateur moderne

- N Plaques fines à incidence de Brewster
- Éviter les oscillations parasites dues à l'amplification de l'émission spontanée (ASE)
- Profil de gain le plus homogène possible



## Structure ampli LIL & LMJ

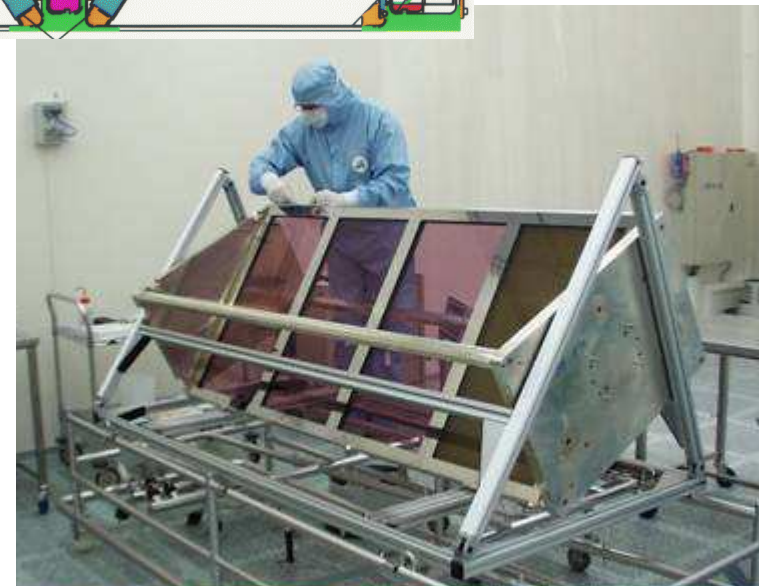
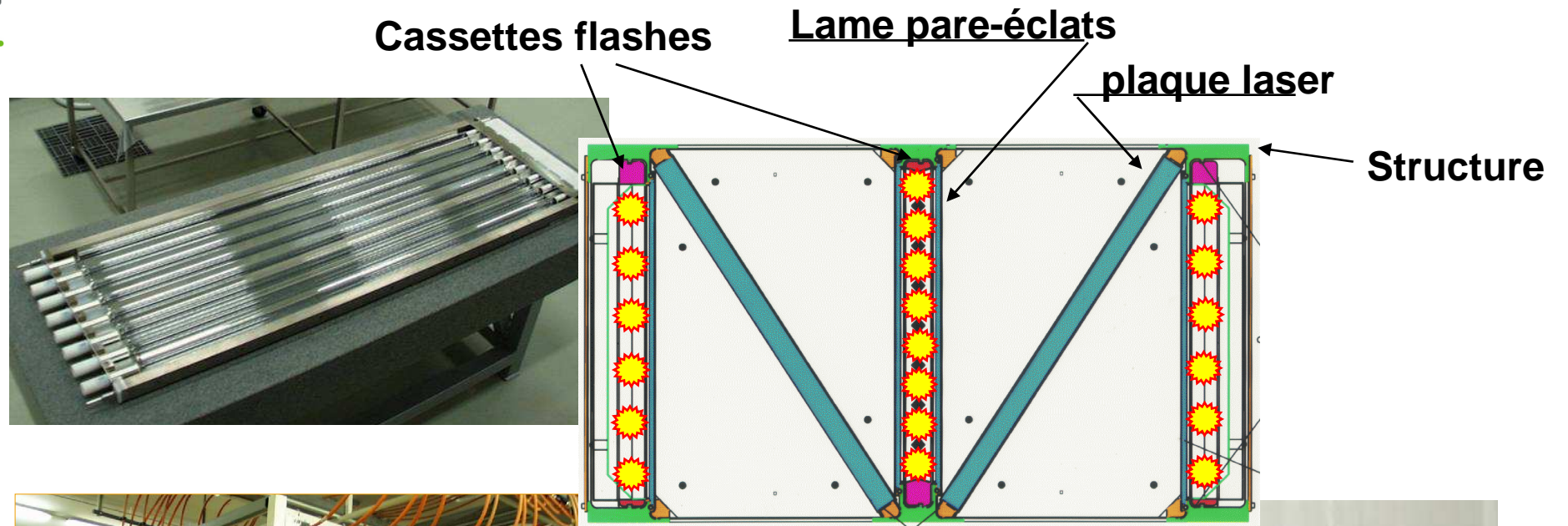
- Structure plaque pompée par lampes
- 8 faisceaux (4x2) par module
- Verre phosphate dopé au Néodyme
- Schott LG770, Hoya LHG8



Une plaque = 440 x 880 x 41 mm<sup>3</sup>  
 Énergie de pompe 85 kJ/plaque  
 Énergie stockée = 4 kJ  
 Énergie extraite = 1,5 kJ  
 Gain par plaque : 1,28  
 $\lambda = 1053,000 \text{ nm}$



# L'amplificateur : lampes et banc d'énergie

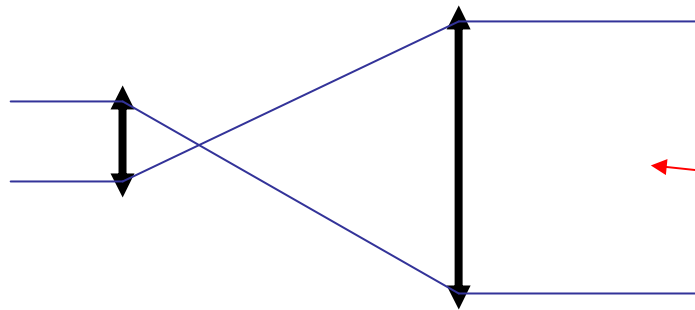
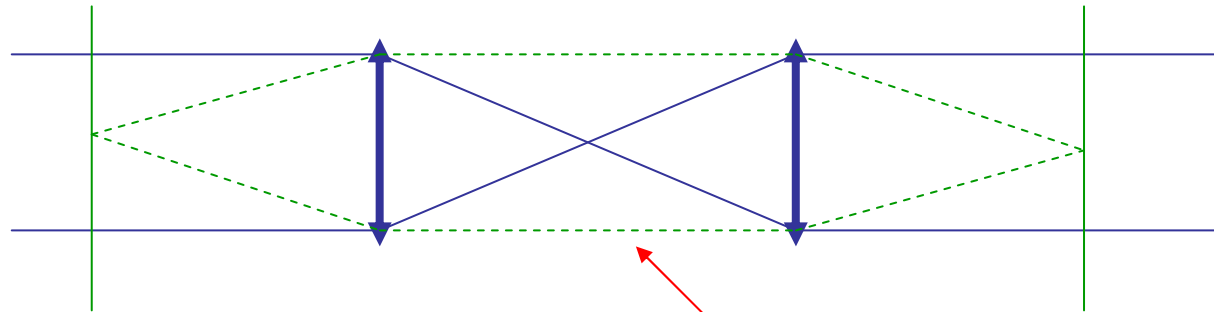




# Transporter le faisceau

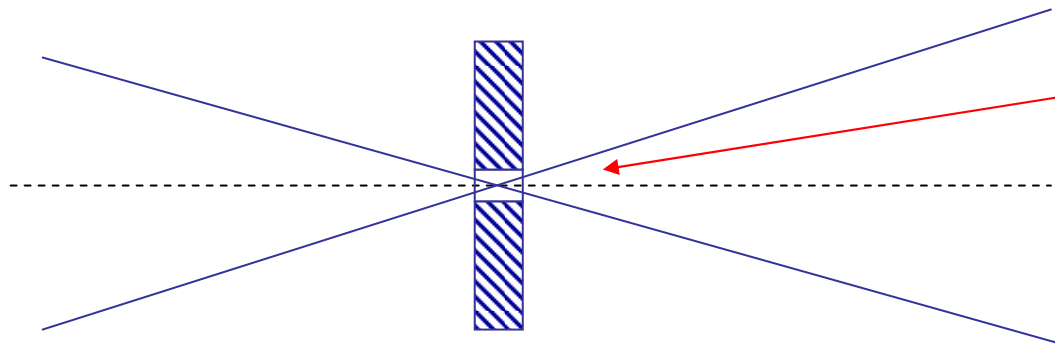
Plan objet

Plan image



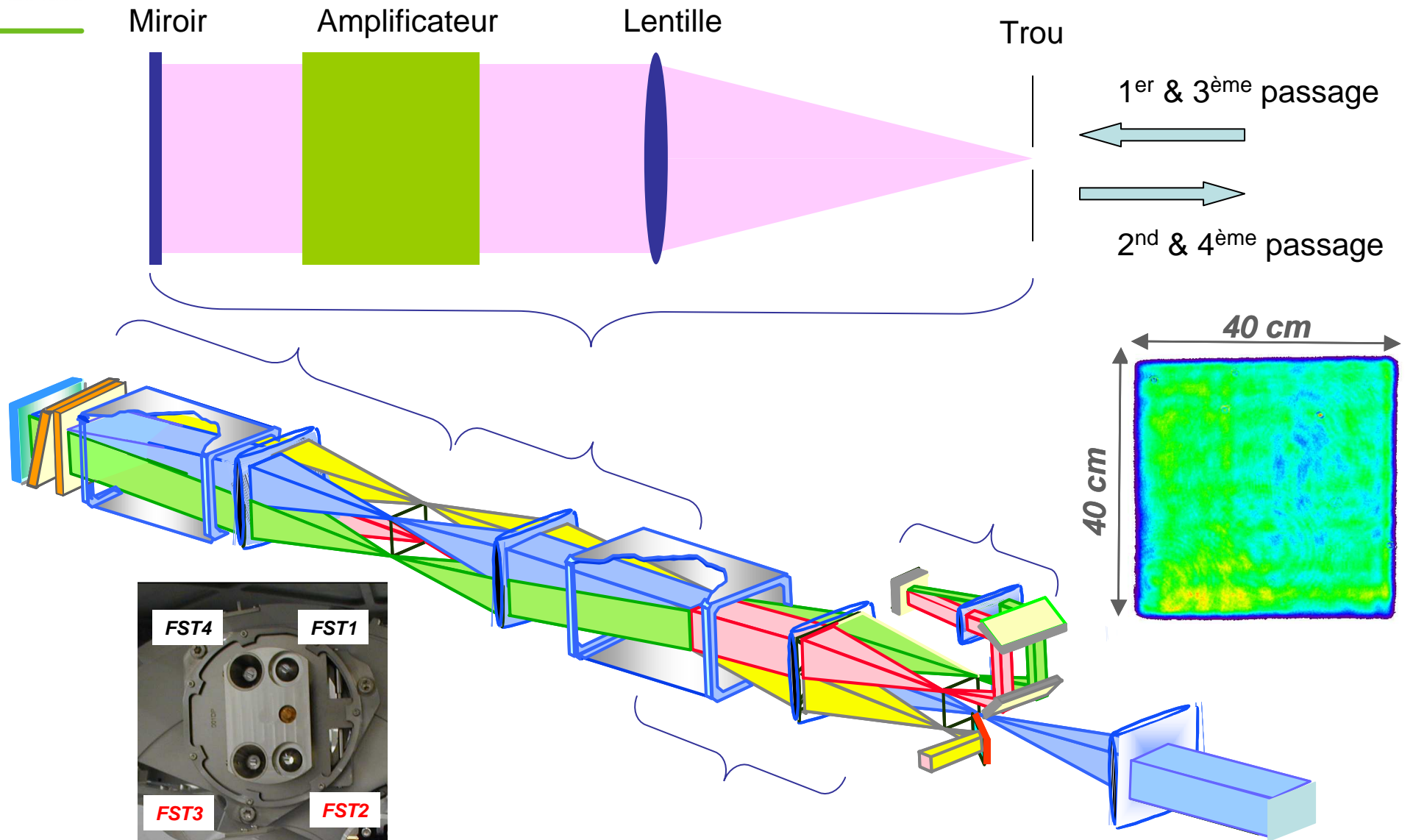
On peut transporter le faisceau avec des afocaux, ainsi que la pupille du faisceau, en gérant le grandissement.

On profite des foyers pour filtrer le faisceau dans un « trou dur »

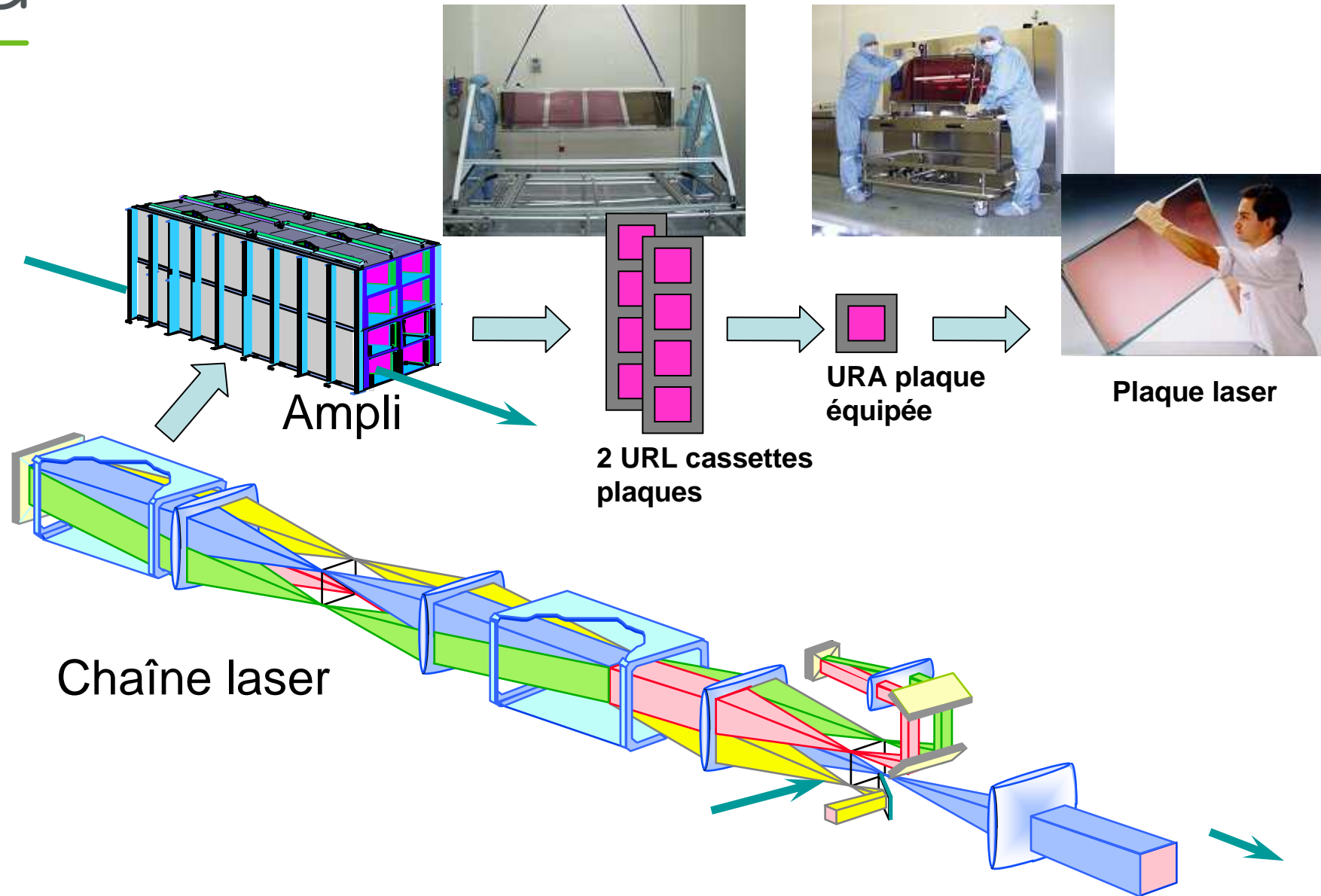


*Au foyer, on est dans l'espace de Fourier, on « voit » les fréquences spatiales*

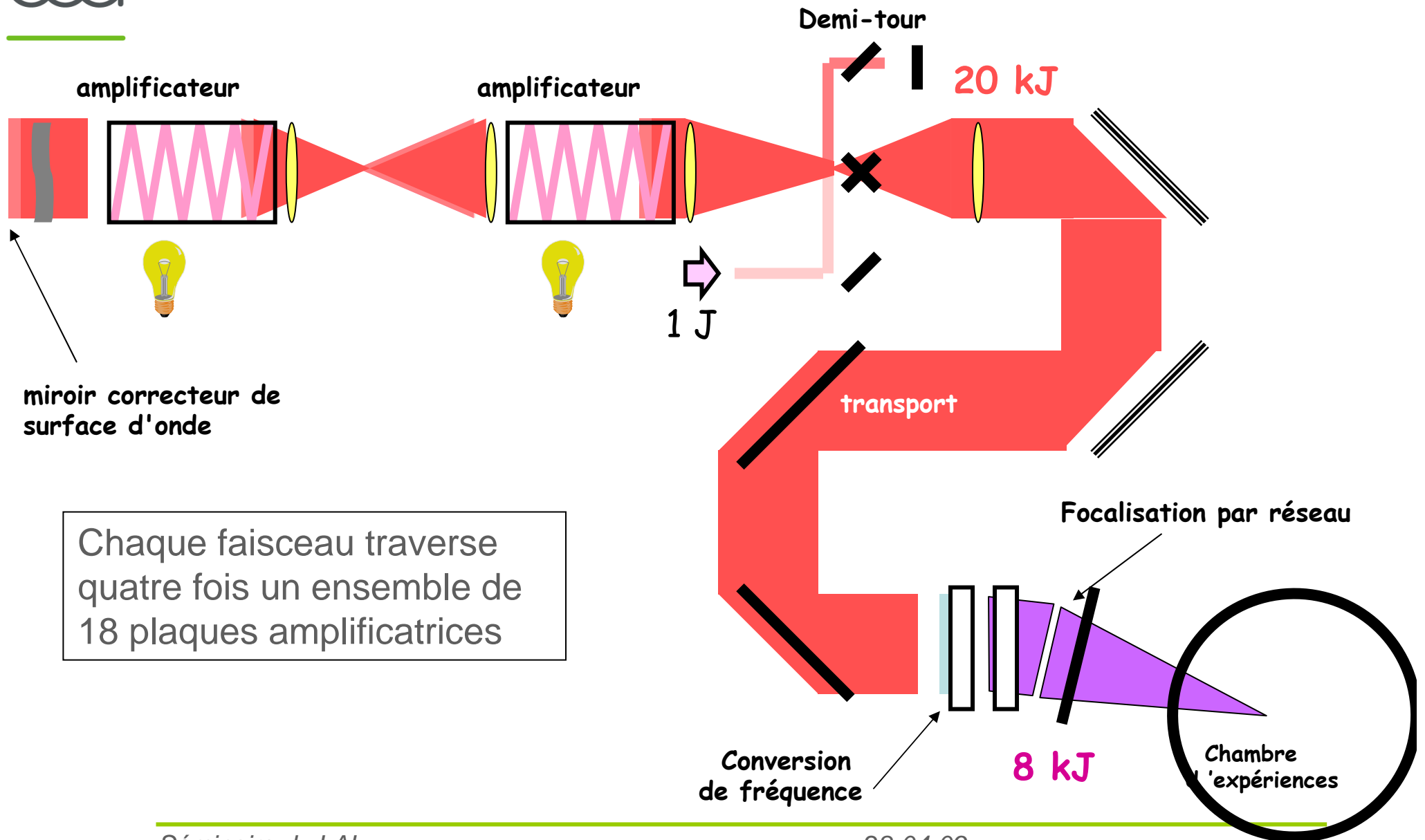
# On associe les différents principes



# Amplificateurs : communs à 8 faisceaux

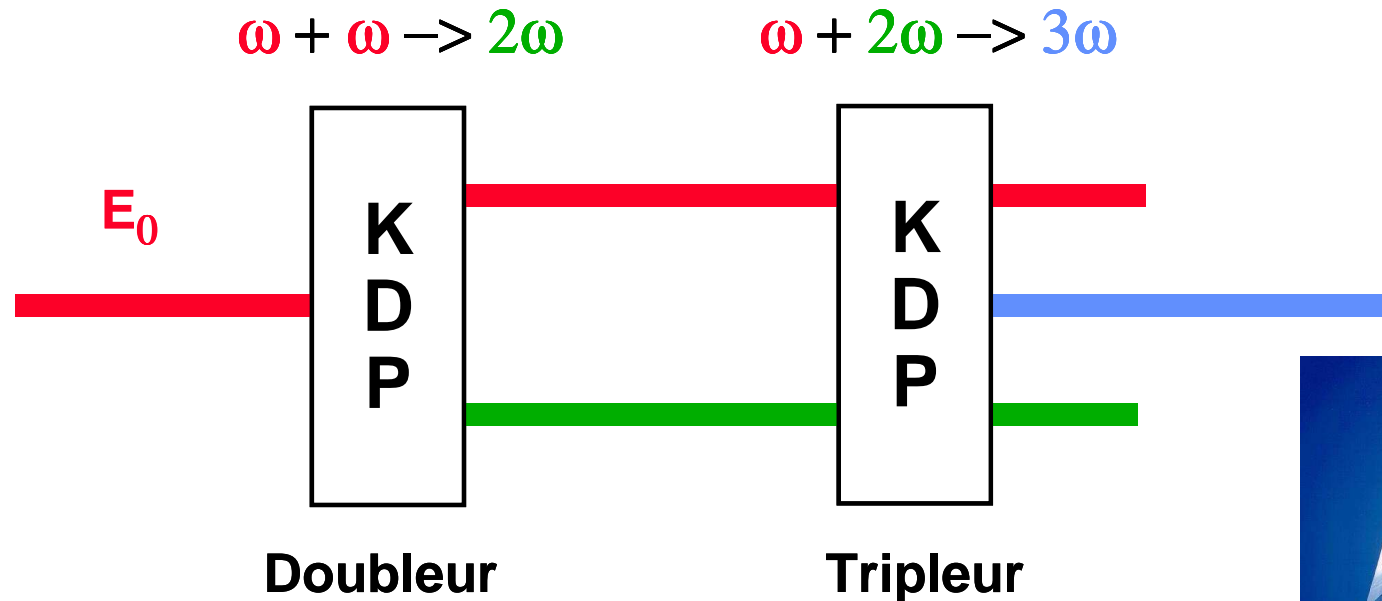


# Schéma de principe d'une chaîne laser LIL/LMJ



Chaque faisceau traverse quatre fois un ensemble de 18 plaques amplificatrices

## Convertir en fréquence : cristal de KDP ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )



$$D = \epsilon E + P \text{ et } P = d_{123} E_1 E_2$$

Un champ en  $\exp(i\omega t)$  faire apparaître

des termes en  $\exp(i\omega t + i\omega t)$  si on est à l'accord de phase

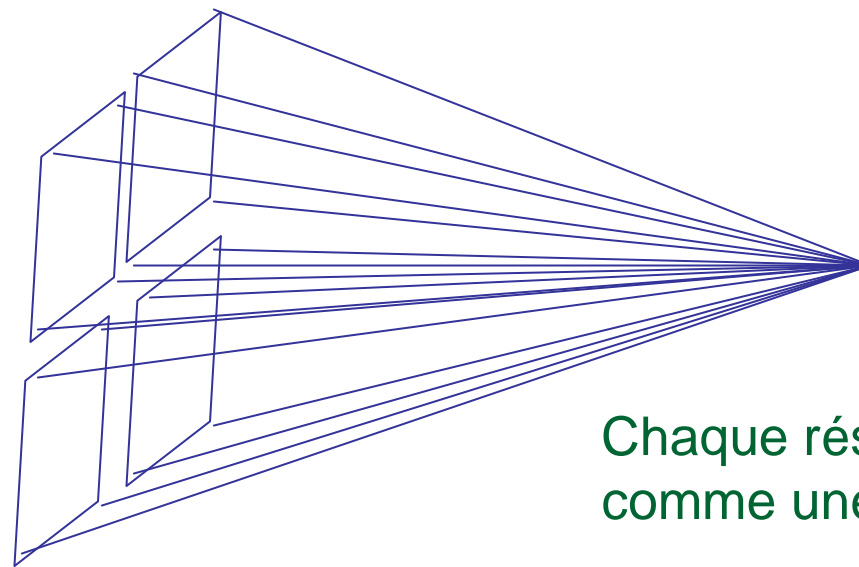
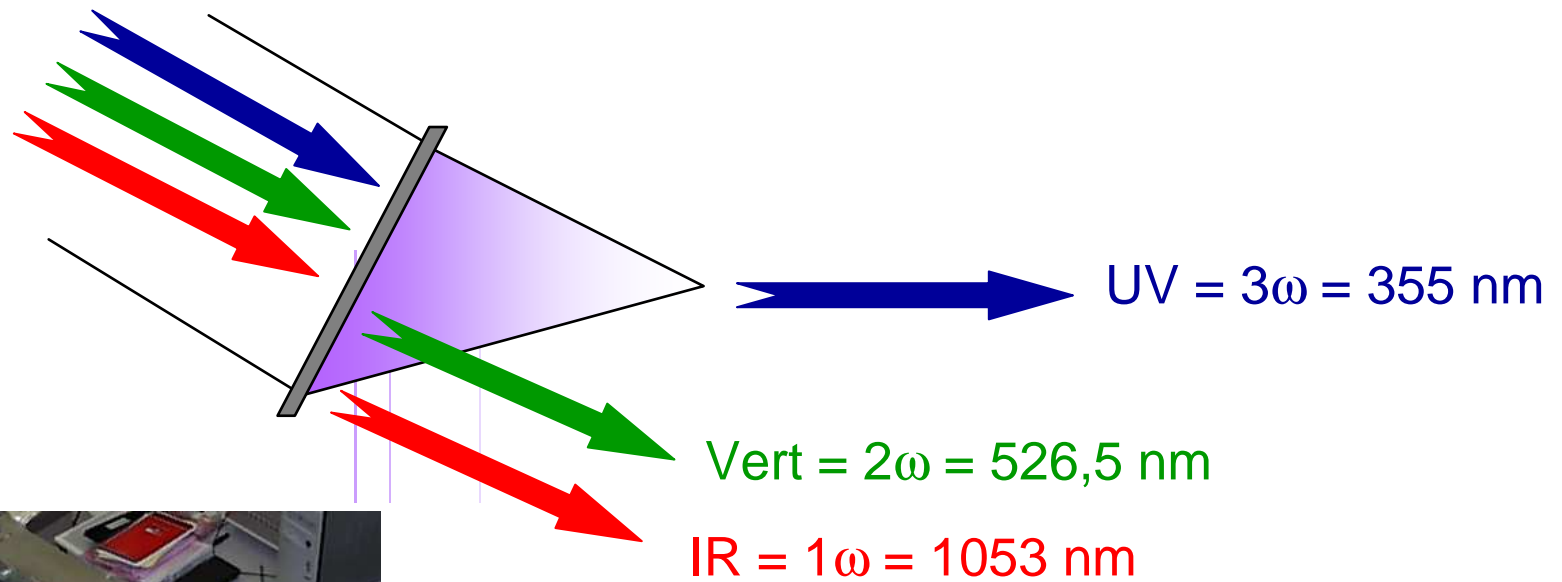
$k_{2\omega} = k_{\omega} + k_{\omega}$  dans le doubleur

Idem dans le tripleur avec  $\exp(2i\omega t + i\omega t)$  et  $k_{3\omega} = k_{2\omega} + k_{\omega}$

Réviser sa trigo pour s'en convaincre :  $\cos^2 = ?$



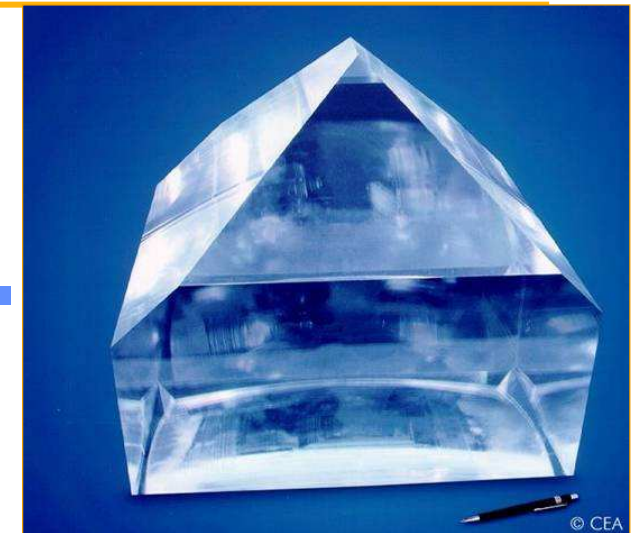
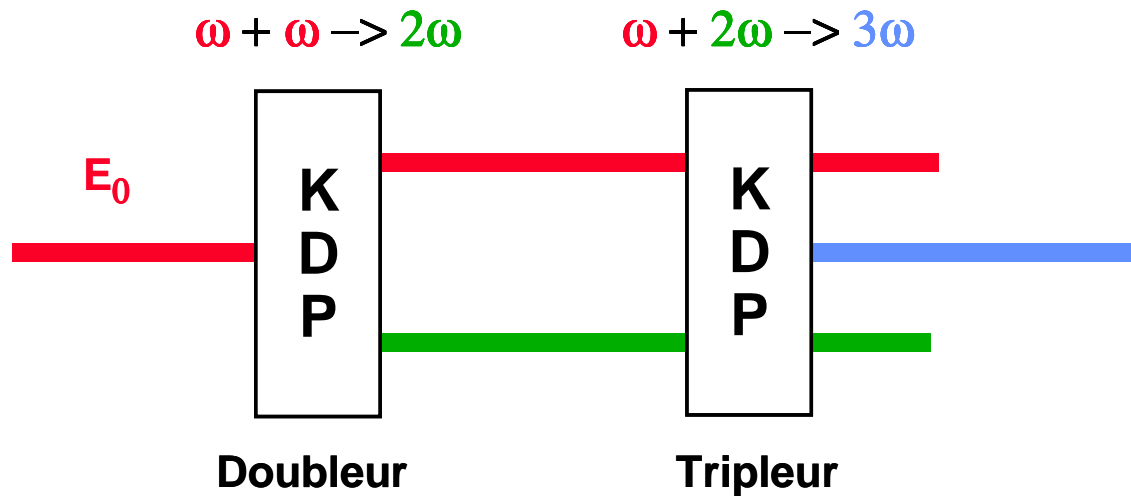
# Focalisons avec un réseau : l'UV seulement !



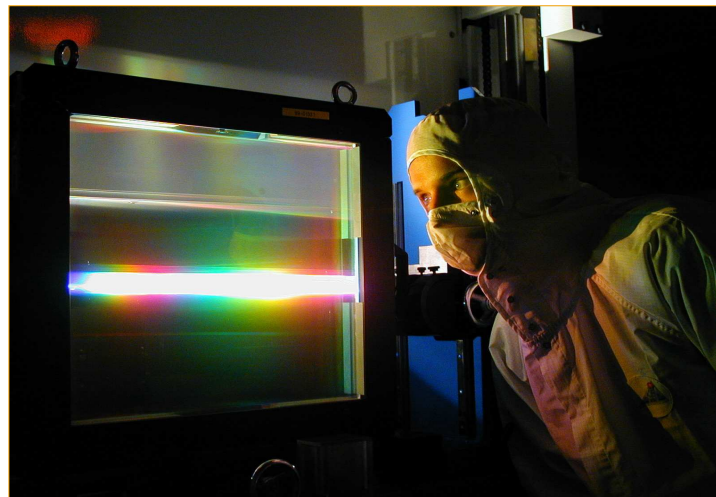
Avec 4 faisceaux, on arrive à ce schéma

Chaque réseau travaille comme une sous-pupille

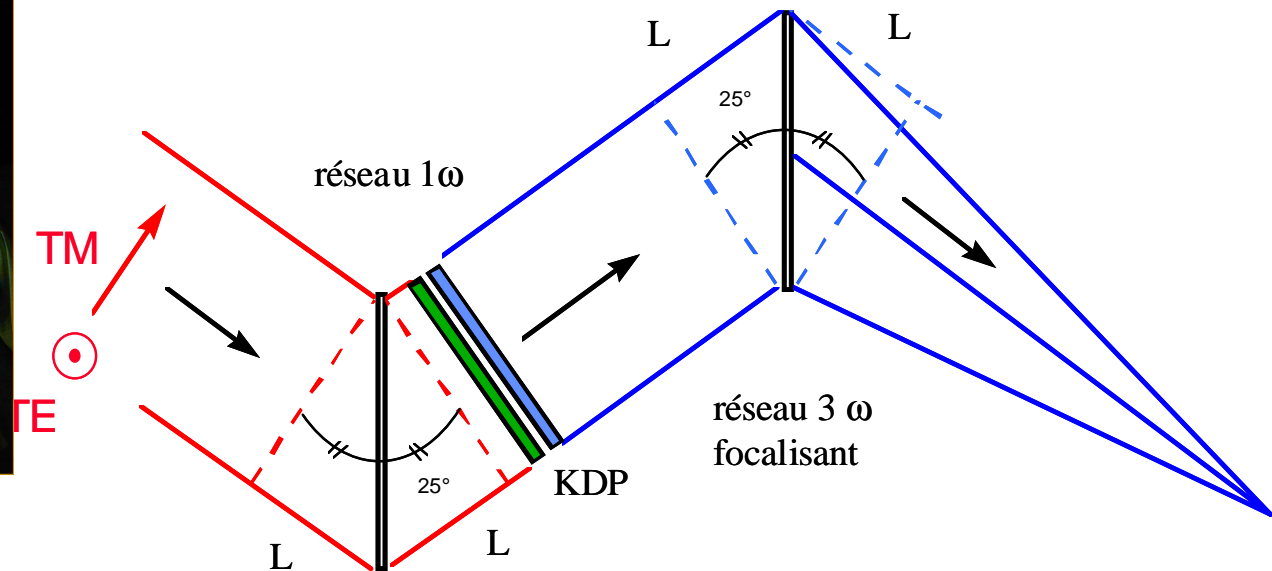
# Conversion de fréquence et de focalisation



Cristal de KDP ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )

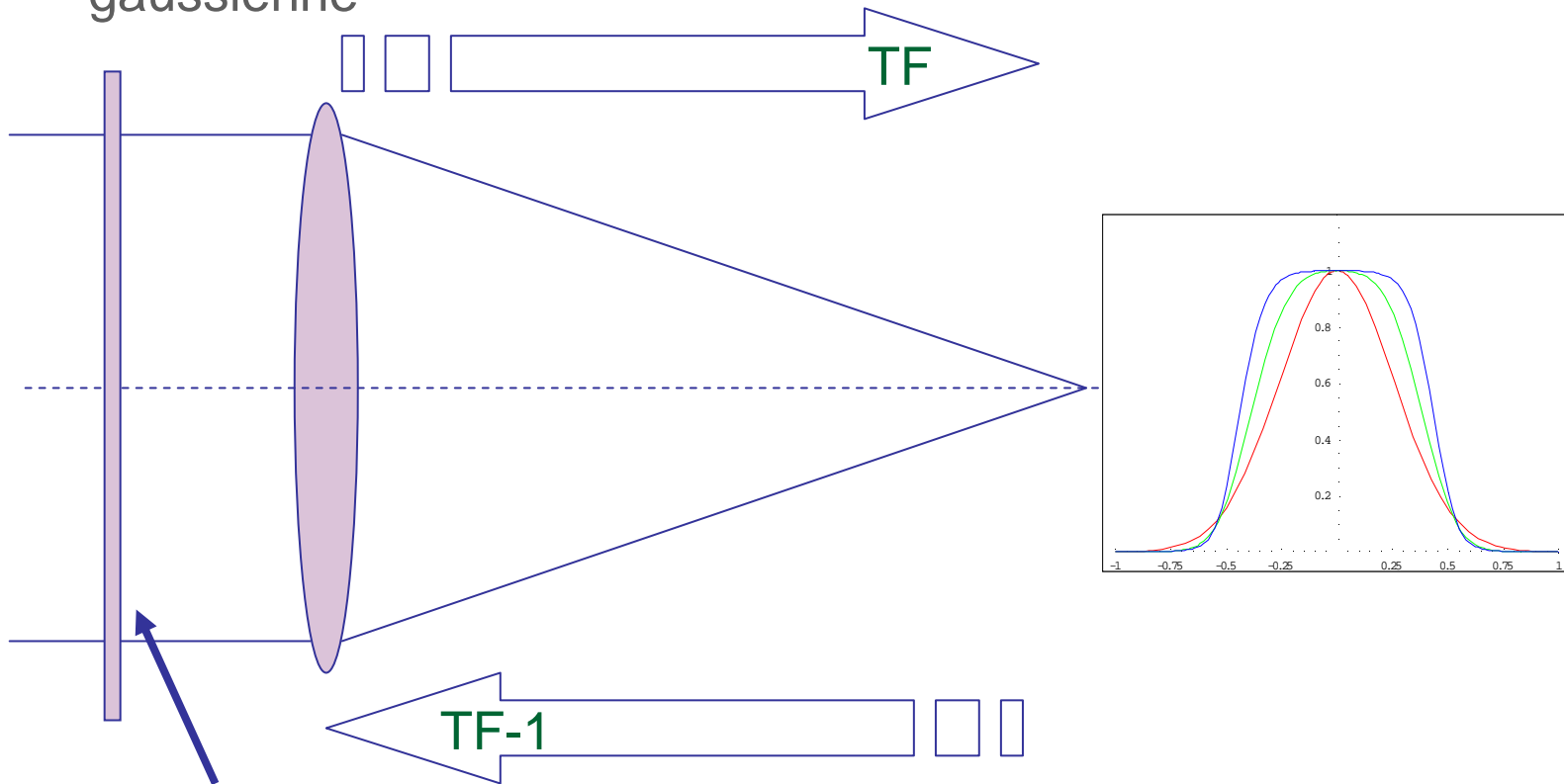


Réseau focalisant



## Encore plus fort !

- Au foyer, je veux une tache focale dont l'enveloppe est une super gaussienne



Je calcule une lame de phase dont le profil est tel qu'il me donne cela au foyer  
Il « suffit » de faire quelques aller-retours de Transformée de Fourier  
entre la position de la lame et le foyer

# Et ça marche

Sur la LIL on a calculé ça : →

On a fait réaliser ça aussi →

Et

on

a

obtenu

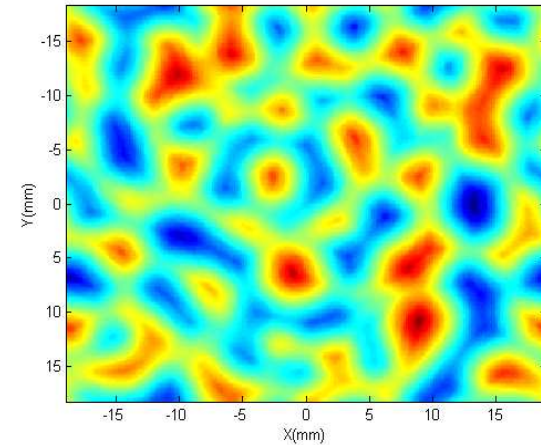
Ça. →

A 3% du sommet

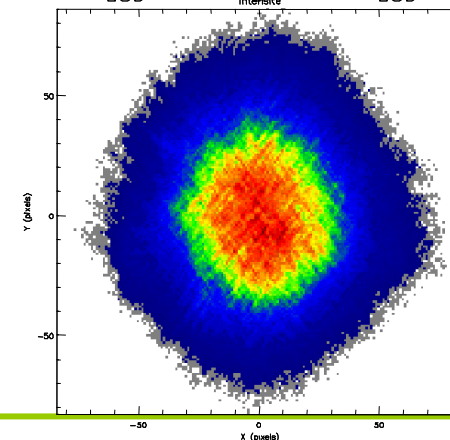
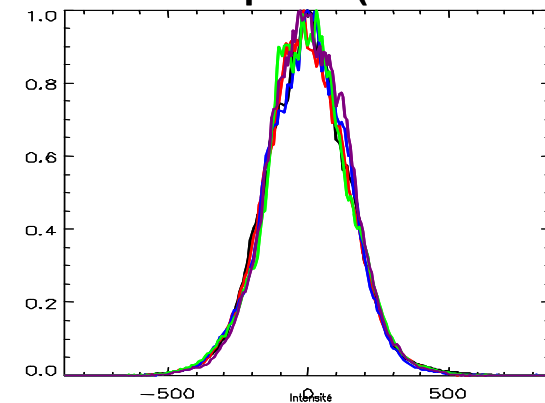
La dimension est de 800  $\mu\text{m}$

Au sommet

On a  $I=10^{+15}$  W/cm<sup>2</sup>



Profil de phase (PV = 24.7 rad)



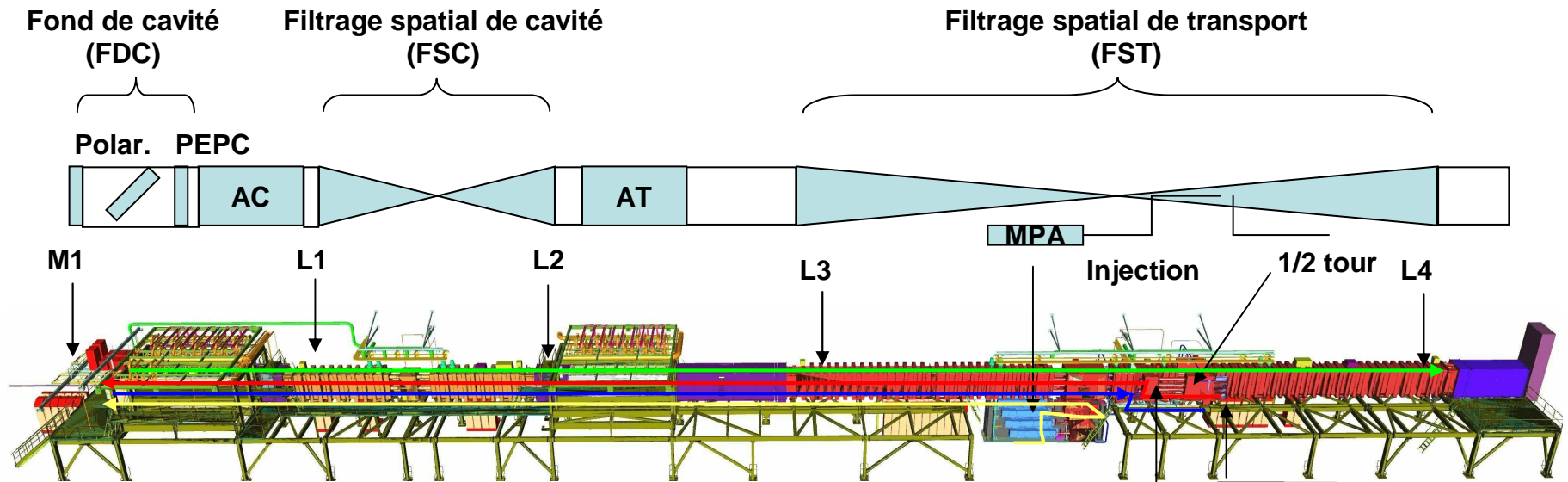
*La Ligne d'Intégration Laser (LIL) :  
le prototype à l'échelle 1 d'une  
chaîne du LMJ*



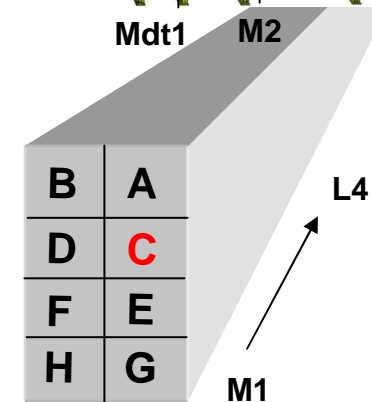
# CEA : LIL and LMJ



# Le prototype LIL : sous-système amplificateur



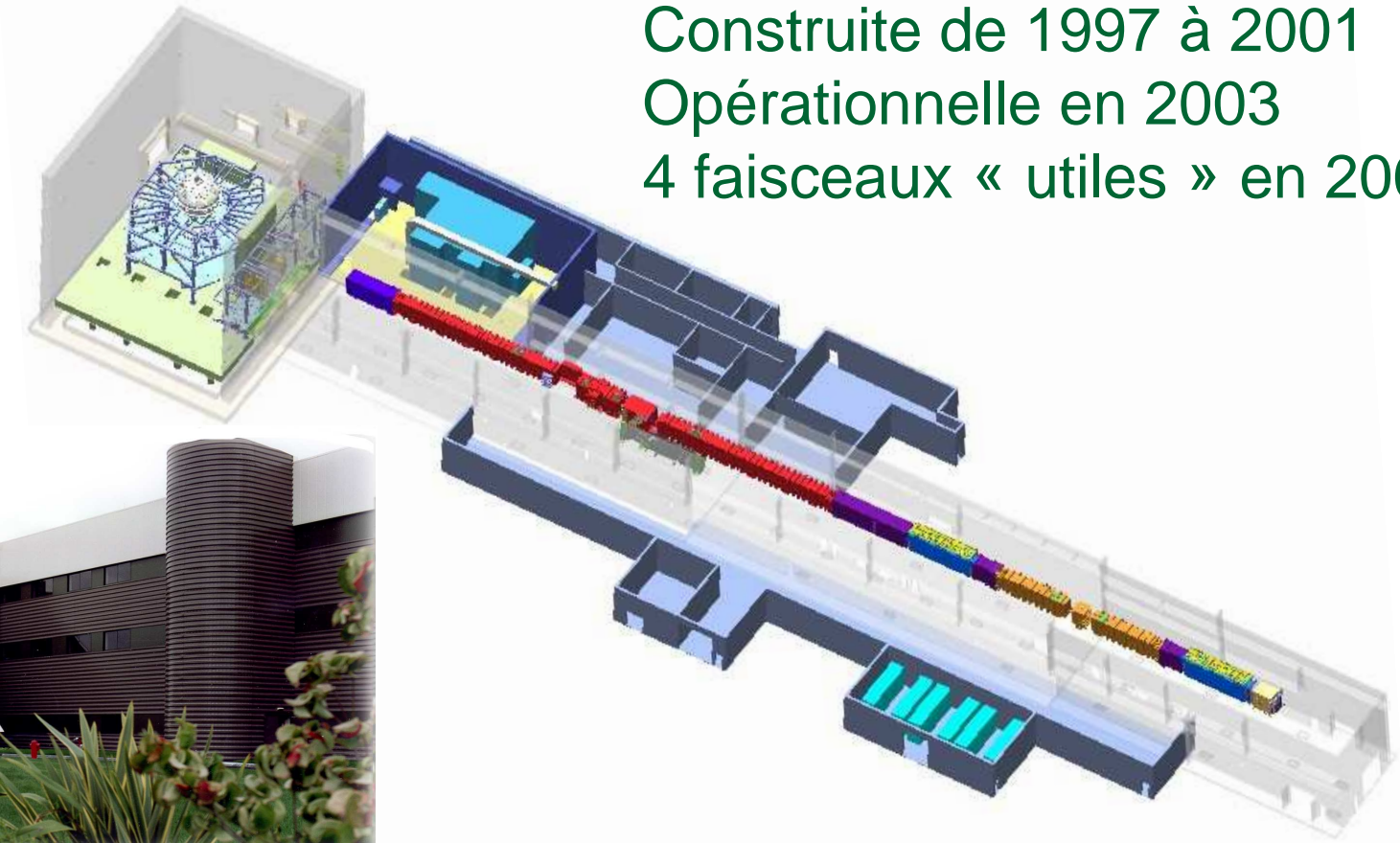
**Concept faisceaux par fagots :**  
**4 faisceaux = 1 quadruplet**



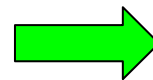
Appellation  
des 8 faisceaux

# La Ligne d'Intégration Laser

Construite de 1997 à 2001  
 Opérationnelle en 2003  
 4 faisceaux « utiles » en 2004



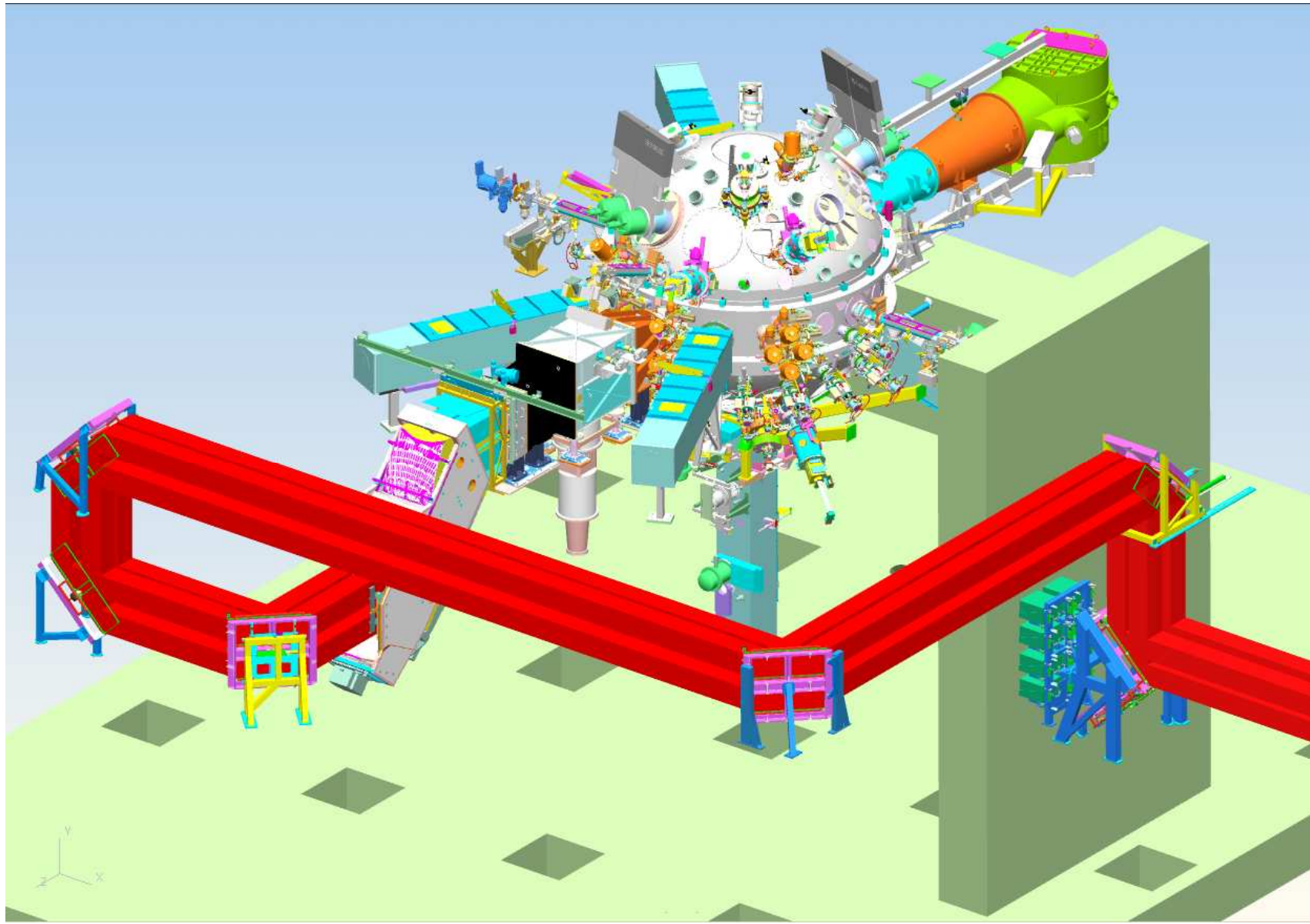
 (11/04/2003)	Objectif	7,5 kJ
	Réalisé	9,5 kJ



**Retour d'expérience  
 pour le LMJ**



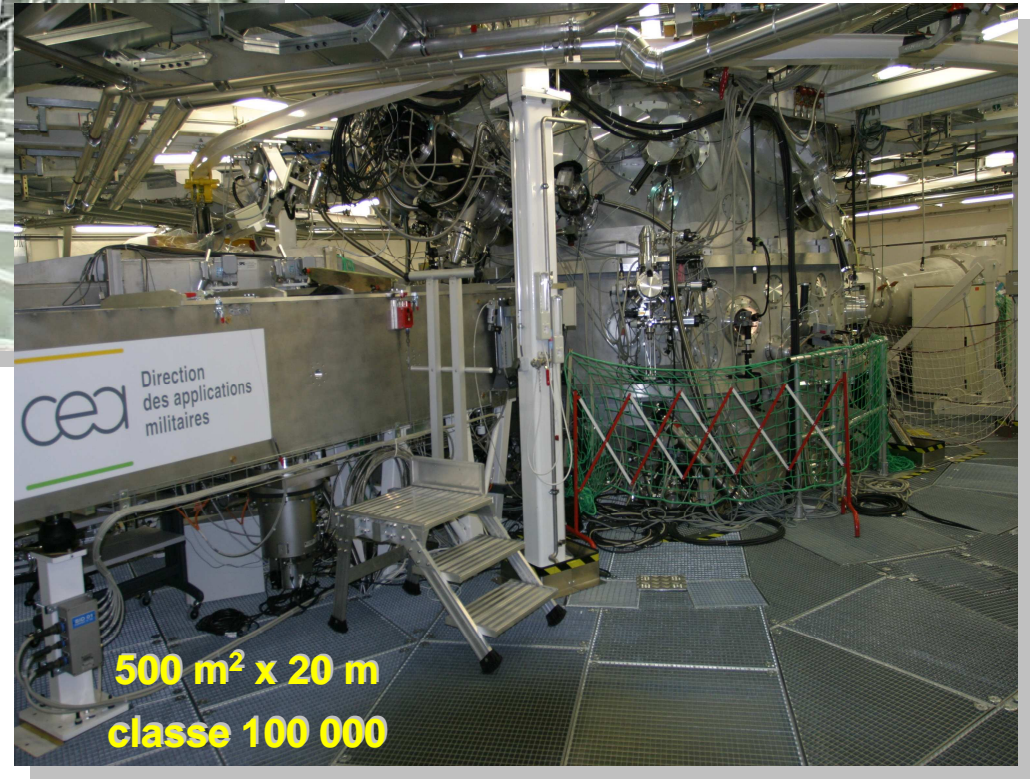
# Situation actuelle : QUADRUPLLET



# Halls laser et d'expériences LIL



**130 m x 7,5 m x 12 m**  
**classe 100 000**

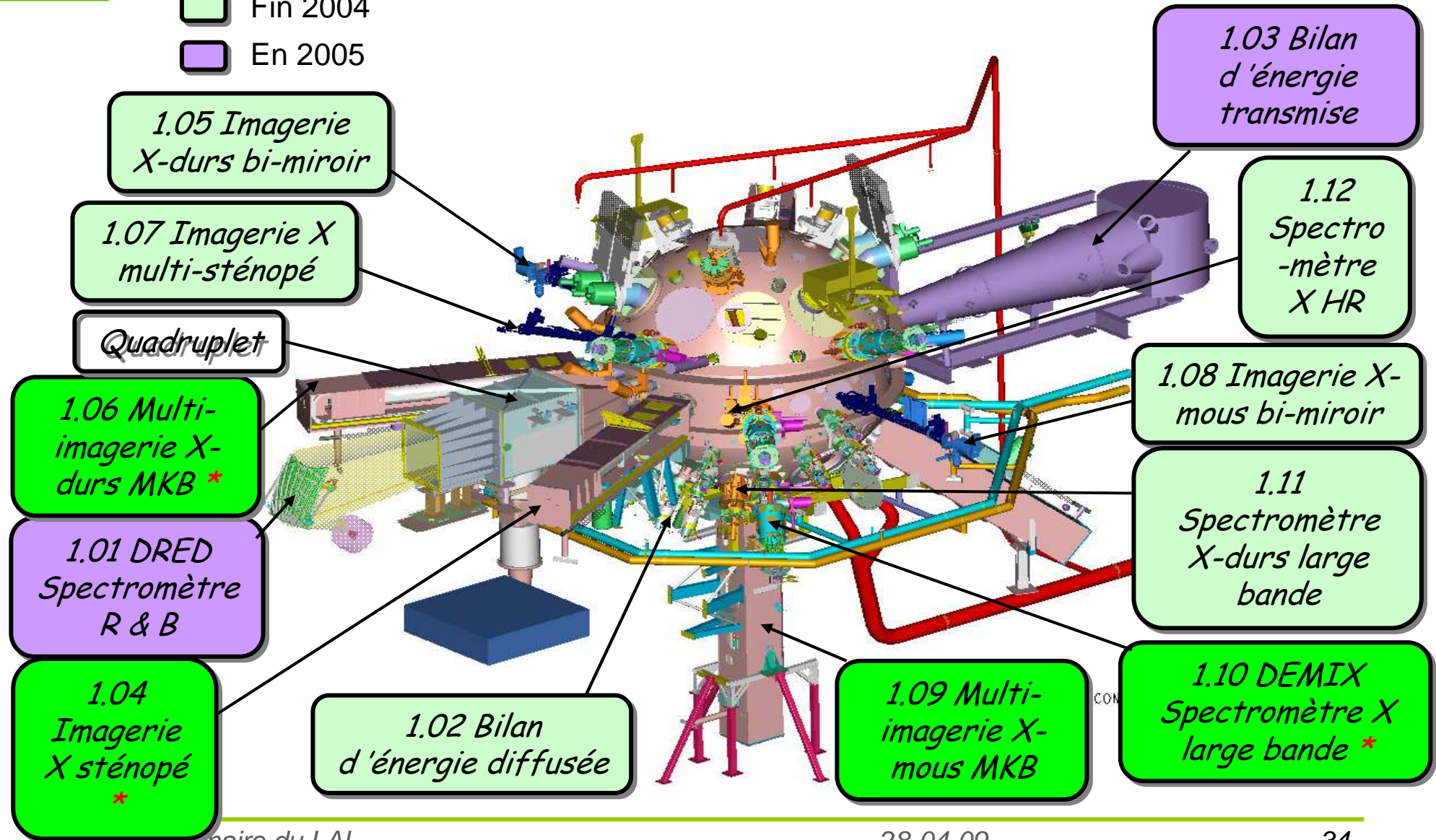


**500 m<sup>2</sup> x 20 m**  
**classe 100 000**



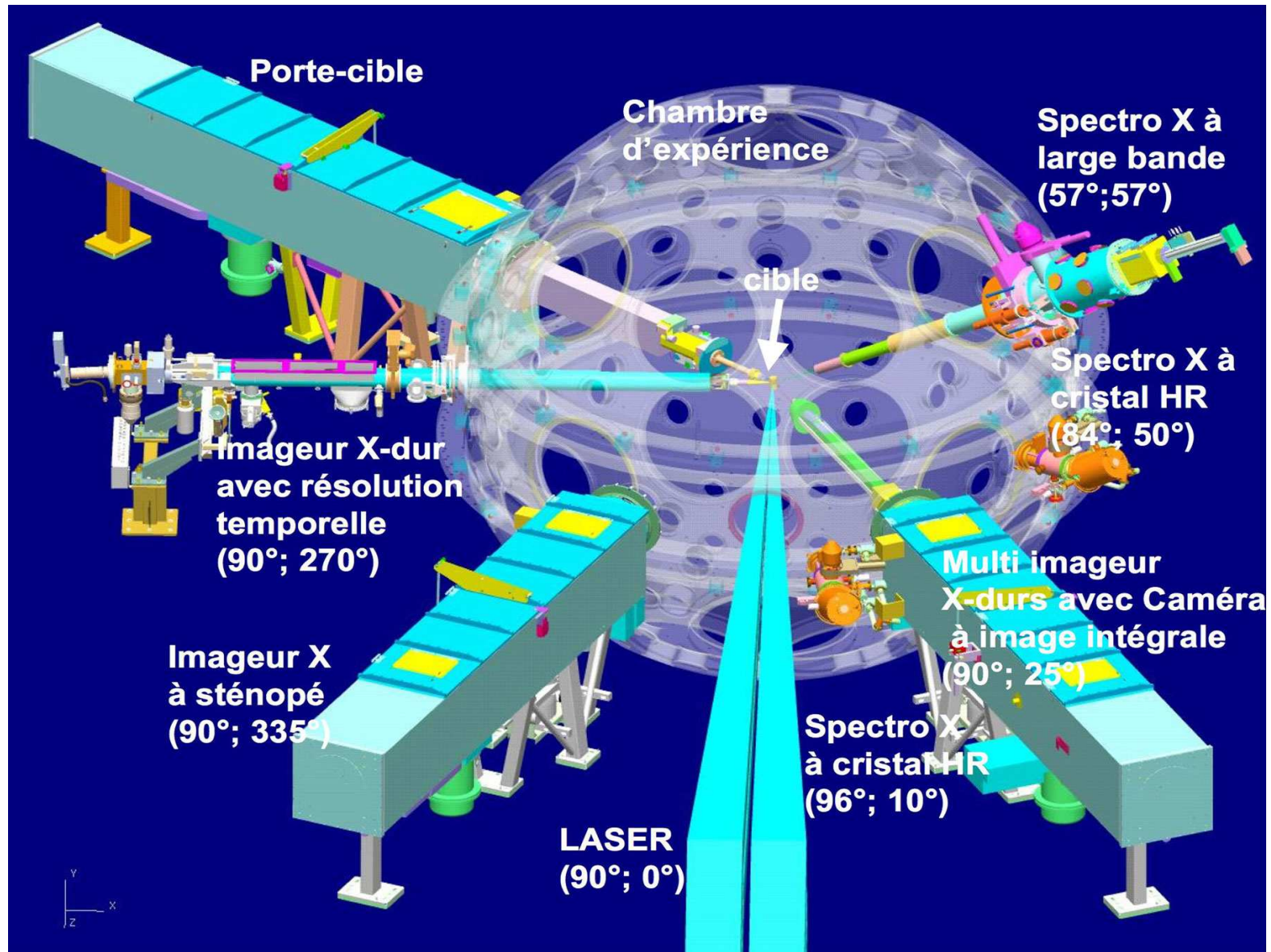
# Diagnosics Plasma sur la LIL

- Pour exp 2004
- Fin 2004
- En 2005





# Systeme d'experience LIL

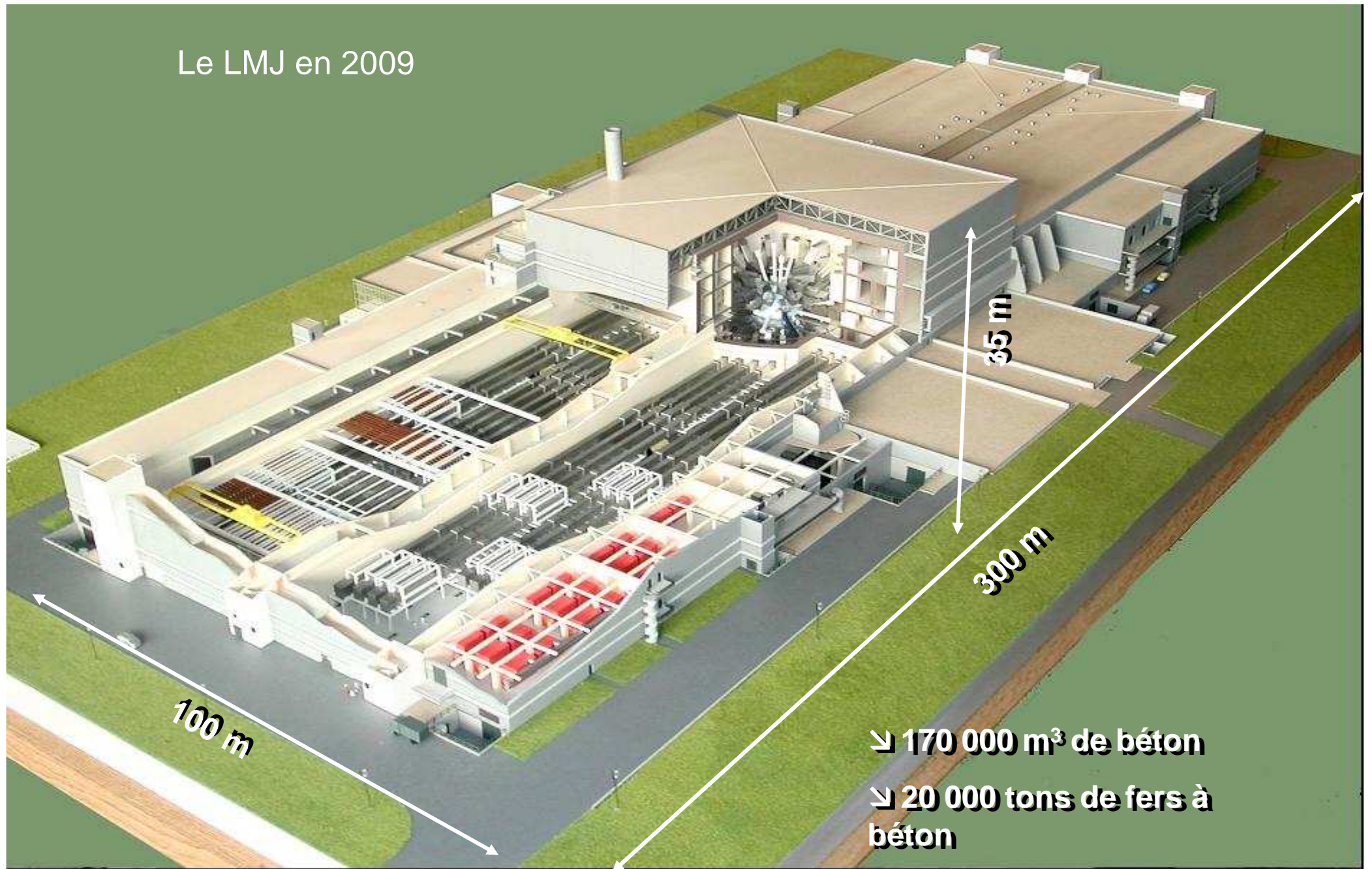


*Le Laser Mégajoule (LMJ) :*

- début chantier en 2003*
- fin du chantier en 2008*
- début « laser » en 2010*
- ignition 2012-2015*



## Le LMJ en 2009





**BATIMENT LMJ - RdC**  
Zones Est/West

**HALLS LASER**  
classe 100 000

2 halls indépendants

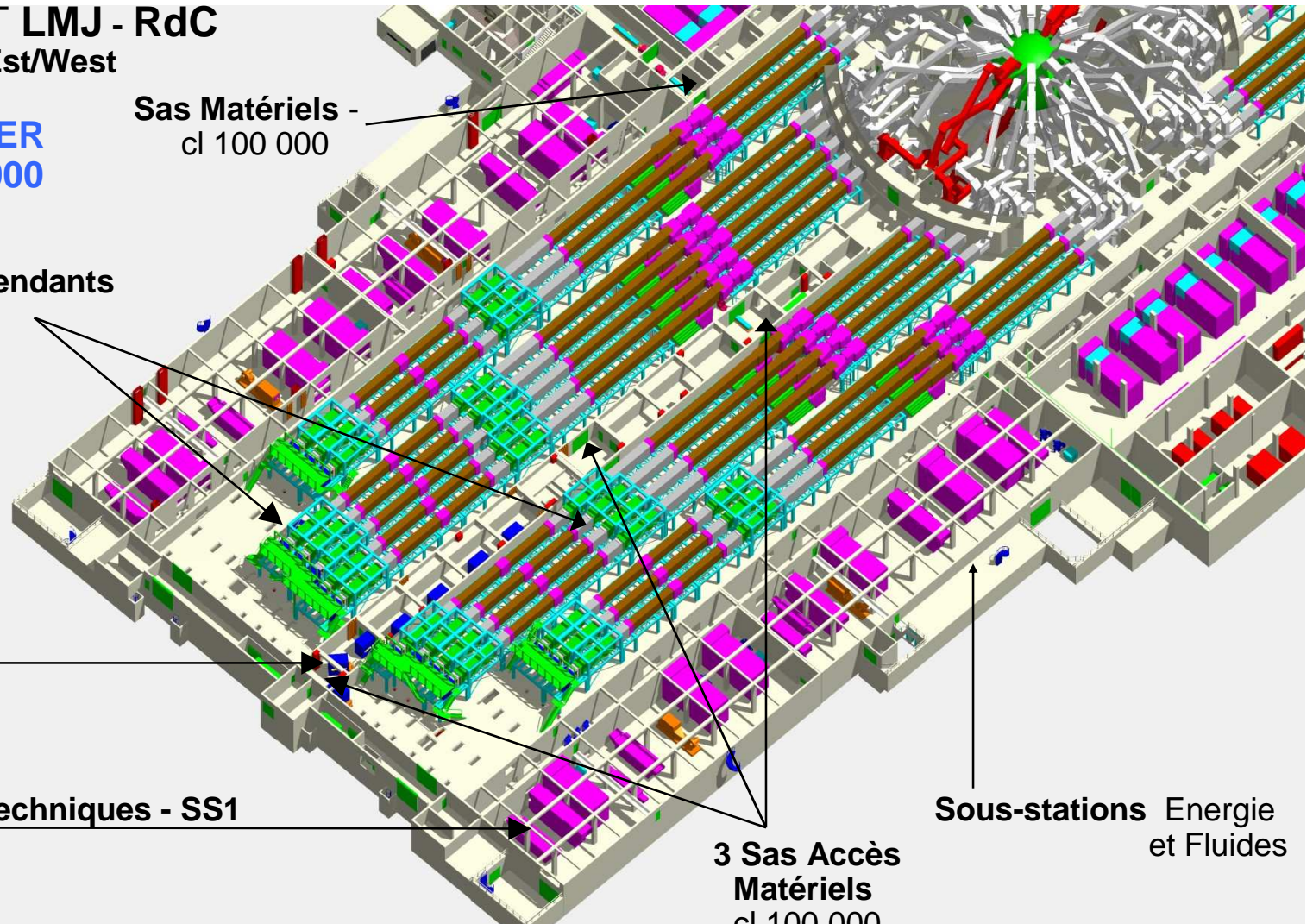
Sas Matériels -  
cl 100 000

Galerie Centrale

Les locaux techniques - SS1

3 Sas Accès  
Matériels  
cl 100 000

Sous-stations Energie  
et Fluides





# *Le chantier LMJ en Mars 2006*

► Début Mai 2003





## *Vue du bâtiment février 2008*



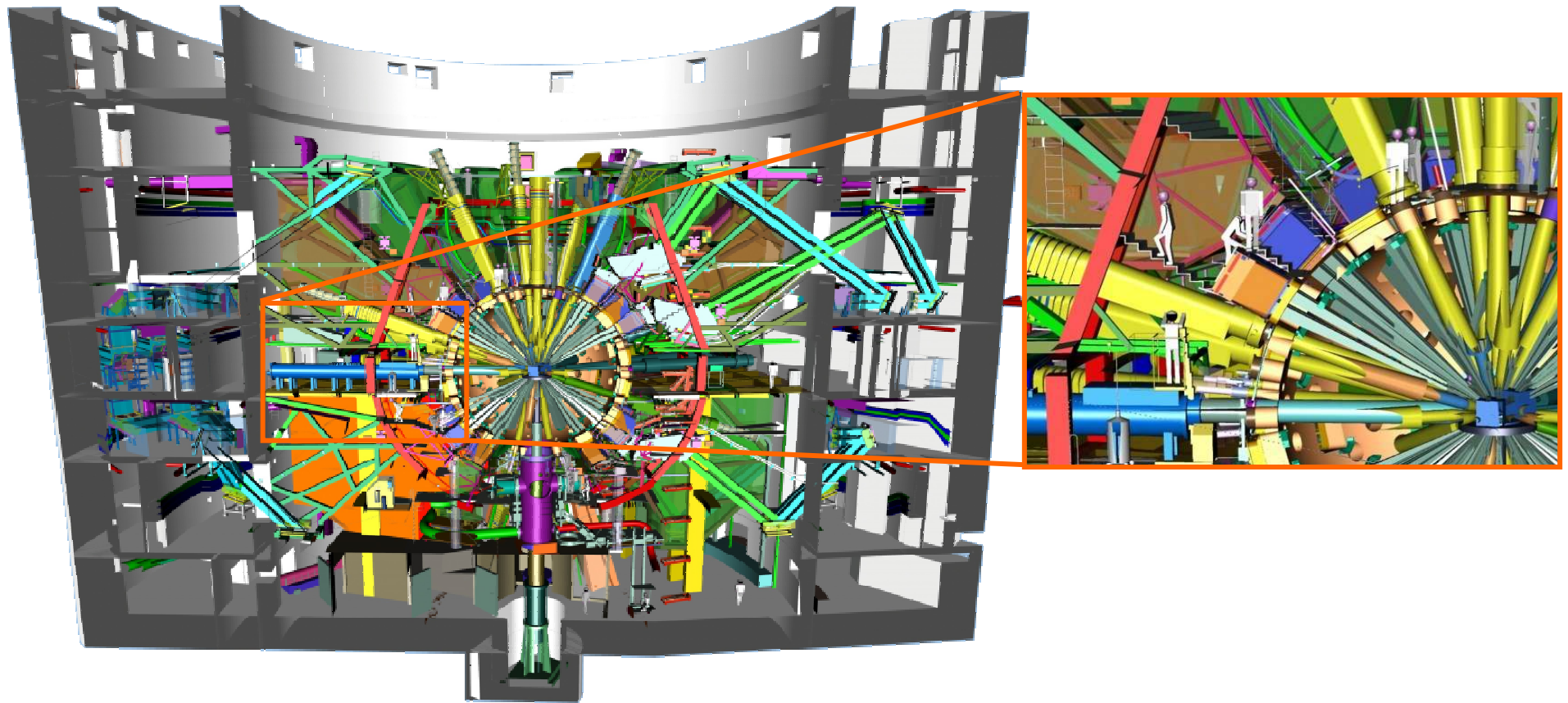


## Introduction de la chambre du LMJ (nov 2006)



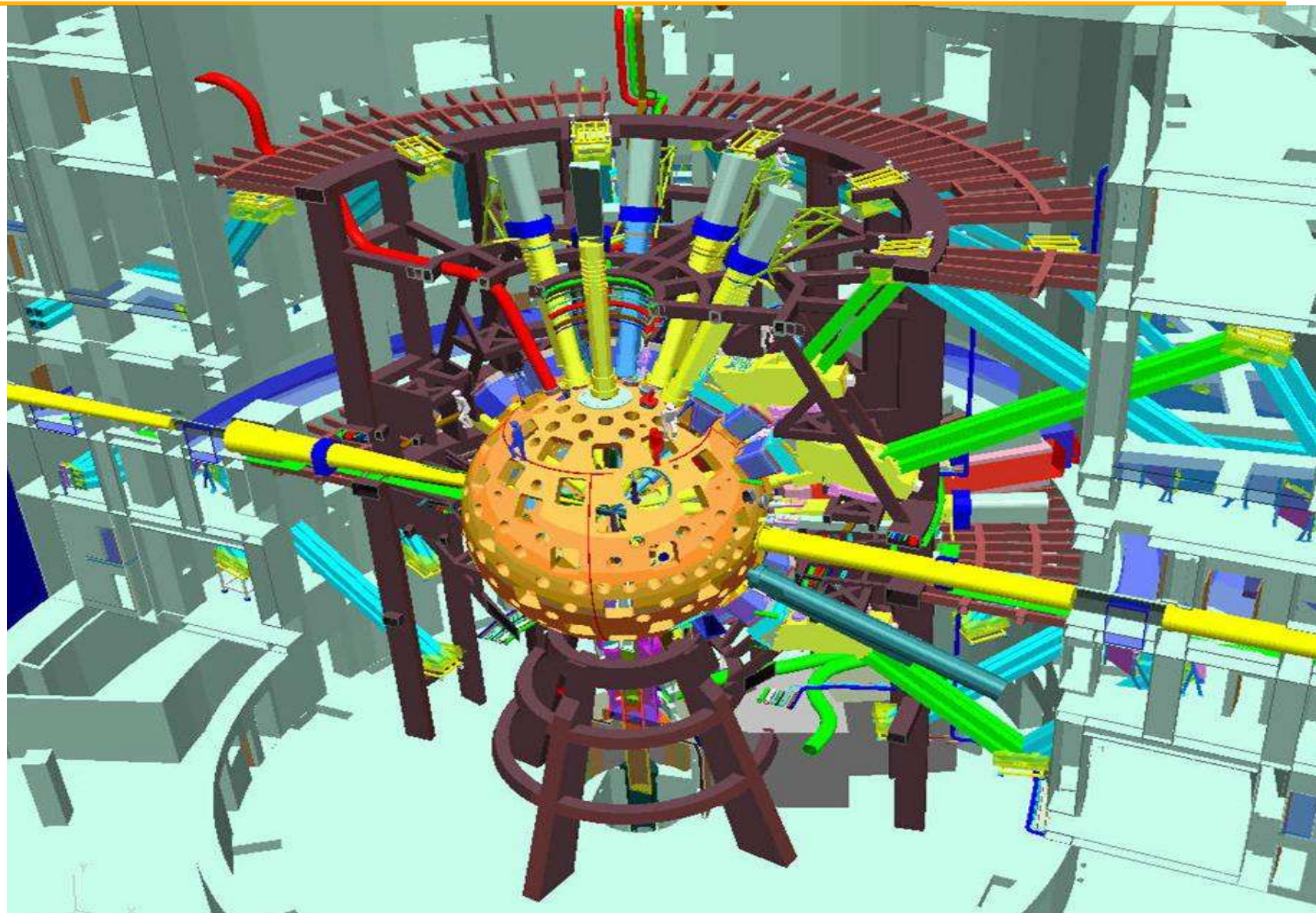
« Crédits photo: Philippe LABEGUERIE »

*La salle d'expériences est dimensionnée pour recevoir l'ensemble des équipements dans des conditions de sécurité absolues (zone activée par les neutrons)*





— *Vue de la chambre et du sous-système expériences*



## *Quelques aspects industriels*

# 17 sous-ensembles industriels

en vert : marché conclu LMJ  
 en noir : marché conclu LIL

Miroir M1



Amplificateurs



Section amplificatrice



Synchronisation



Cellule PEPC



Banc d'énergie  
**THALES**

Diagnostics laser



Pilote

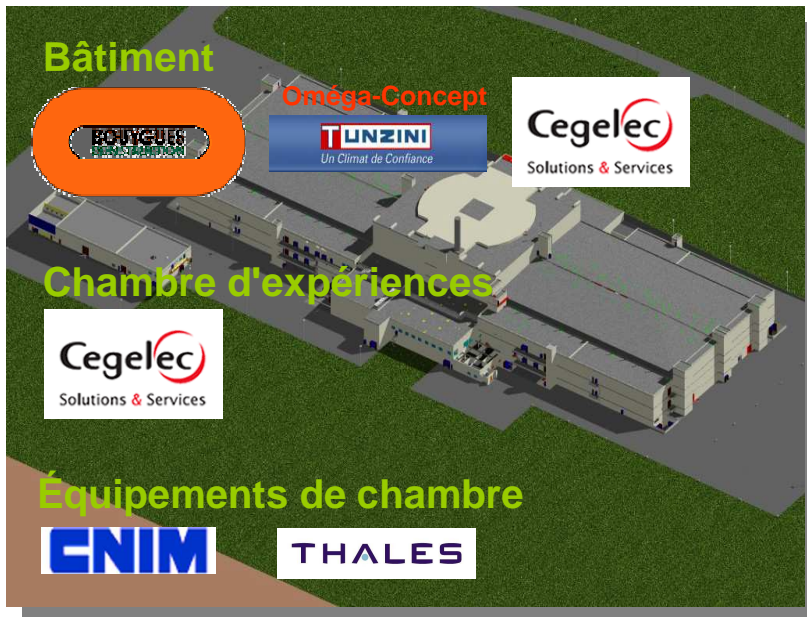


Supervision



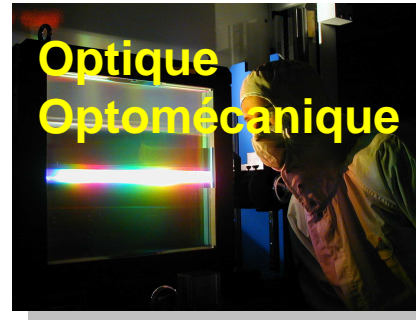
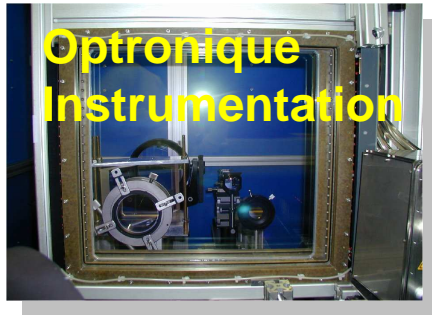
Transport faisceaux  
**THALES**

Focalisation, SCF  
**THALES**

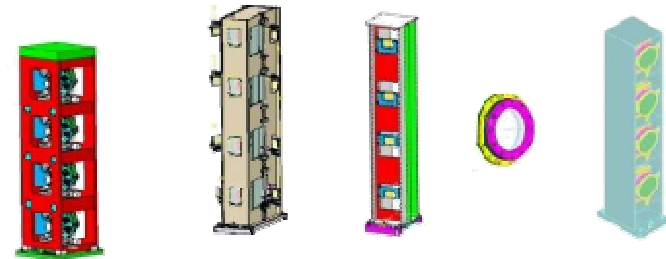
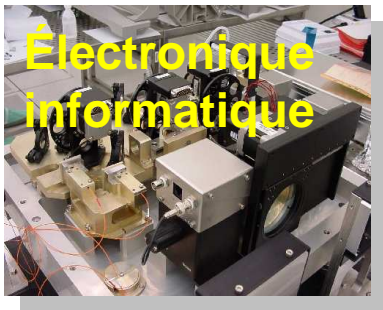




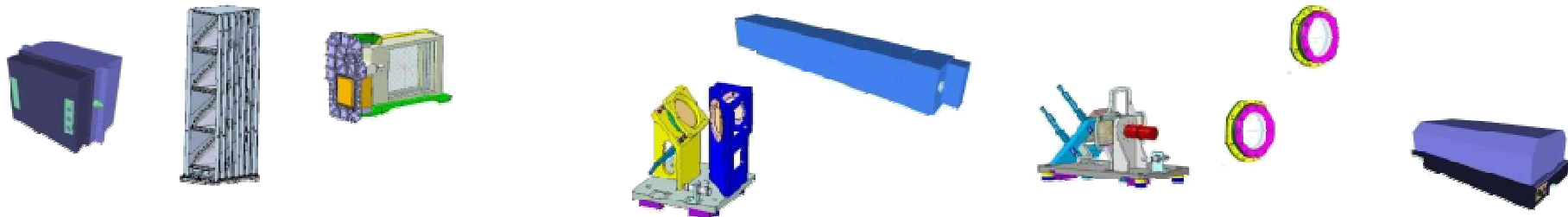
# Les principaux besoins industriels liés au LMJ



Montage 5 ans  
Maintenance > 30 ans

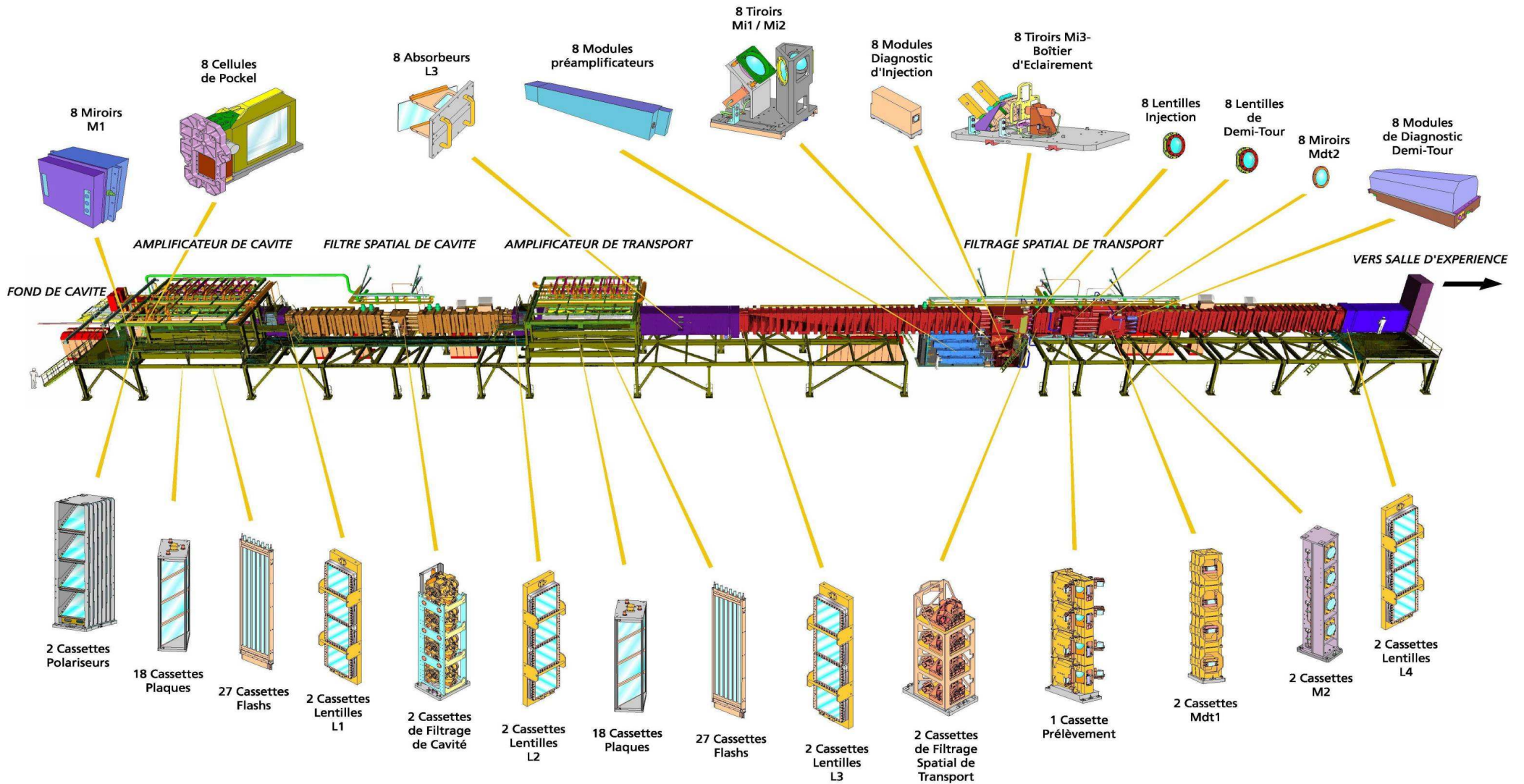


85 000 **U**nités **R**emplaçables en **L**igne





# Unités Remplaçables en Ligne de la Section Amplificatrice

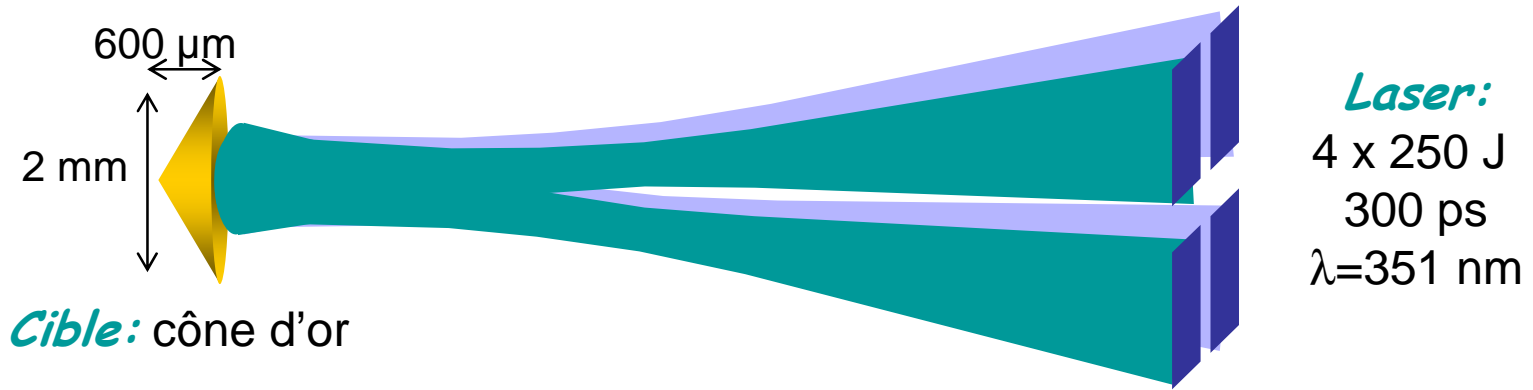


# Véhicule de transfert pour la maintenance des URL



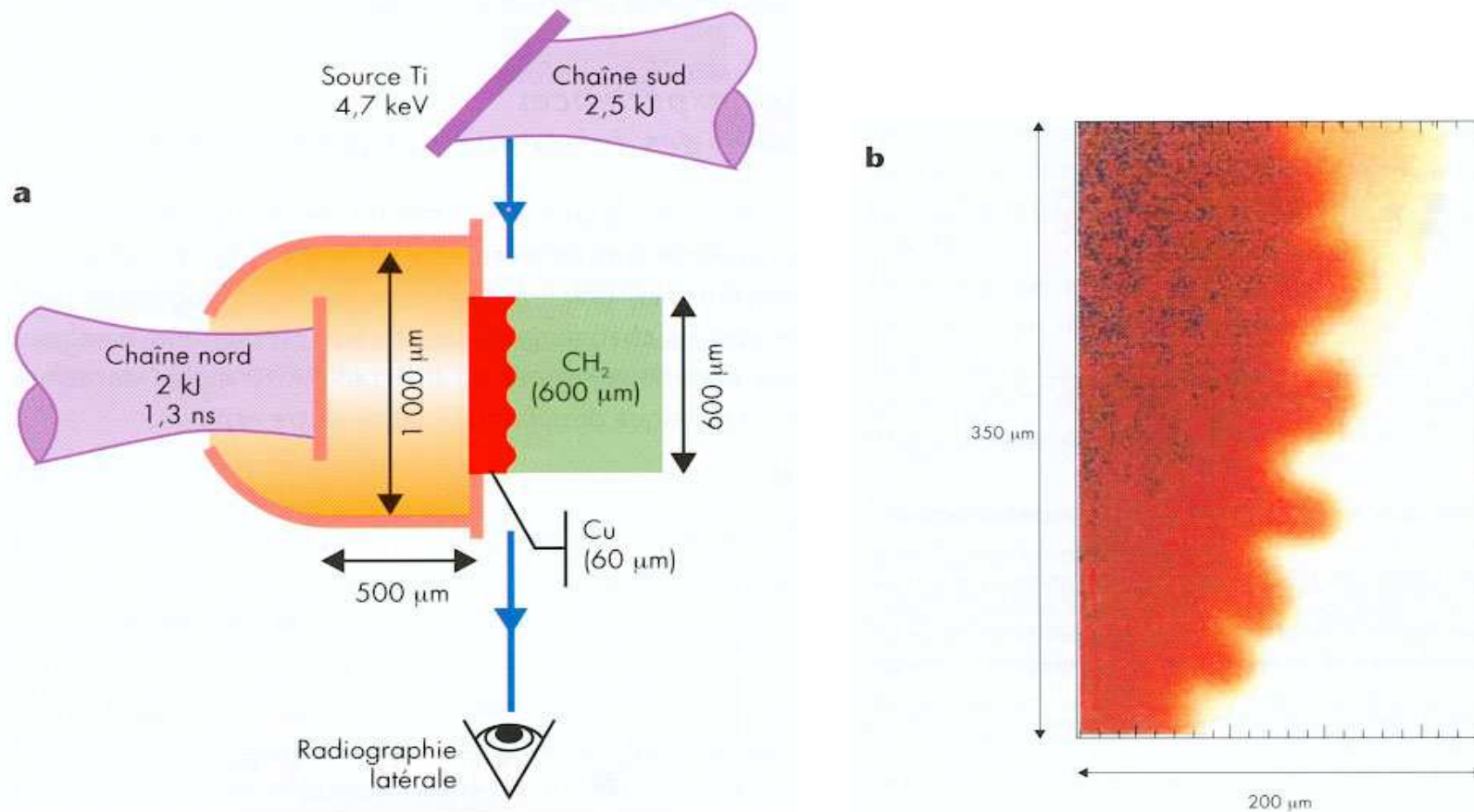
## *Quelques expériences*

# LIL: Validation Concept Expérimental JET (1 seul Tir)



	<i>Attendu</i>	<i>Observé</i>
<b>IMAGERIE X mou à 90°</b>	<p>Cône</p> <p>Jet de plasma</p>	<p>Cône</p> <p>Jet de plasma</p> <p>obturation (défaut d'alignement du diagnostic)</p>
<b>IMAGERIE X dur face avant</b>	<p>Cône</p> <p>Grille d'obturation pas 100 μm</p> <p>impact laser sur cible</p>	<p>ombre de la grille</p> <p>Bon centrage de l'énergie sur la cible</p>

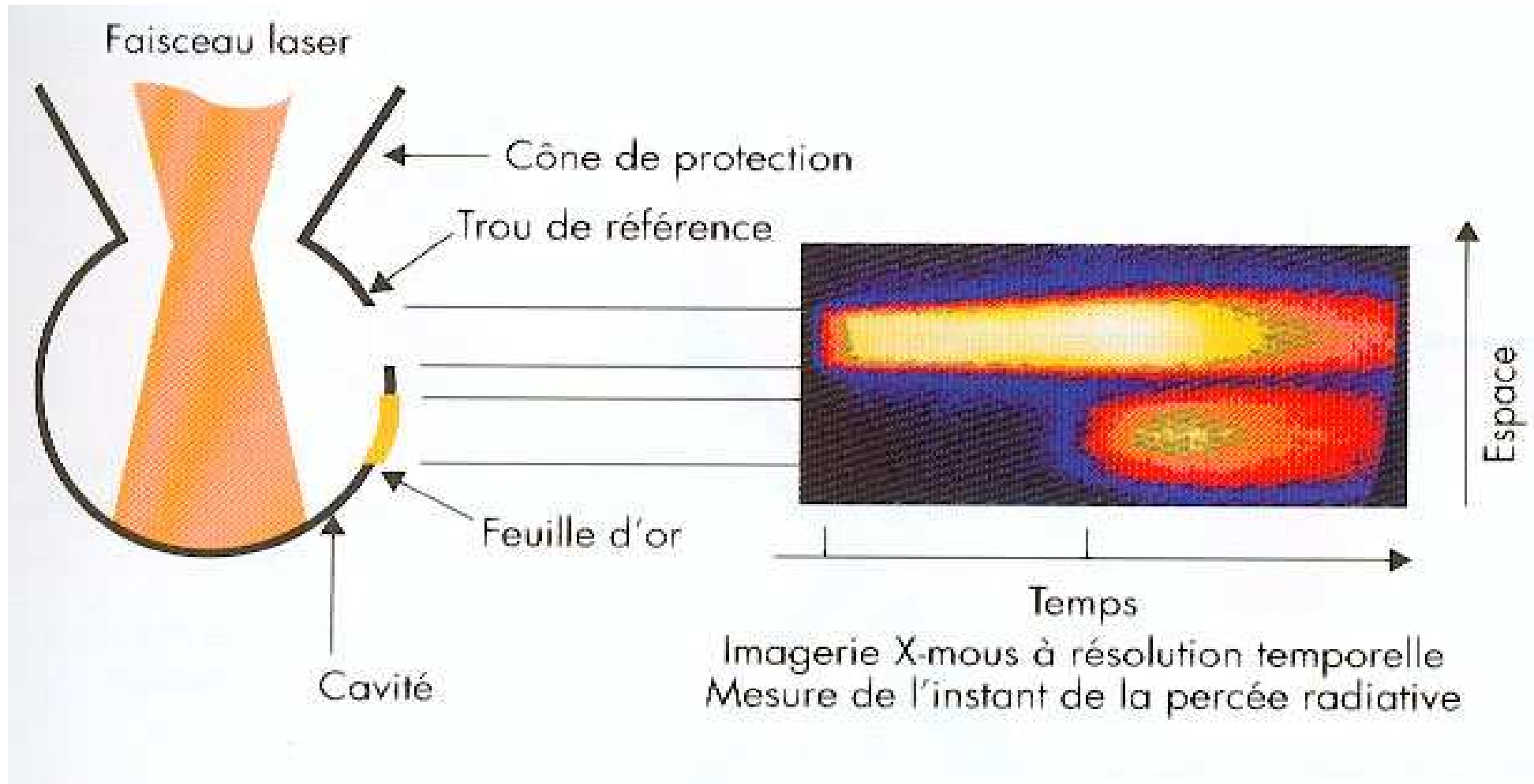
# Mesures d'instabilités hydrodynamiques en astrophysique



Le nombre d'Atwood du couple Cu/CH<sub>2</sub> est voisin de celui du couple He/H d'une Supernova  
 L'image de radiographie montre que l'amplitude de la perturbation initiale (3 μm) a été multipliée par 10 au bout de 30 ns

The ASTROLABE Experiment, P. Baclet et al.; IFSA99, Elsevier, 1083, (2000)



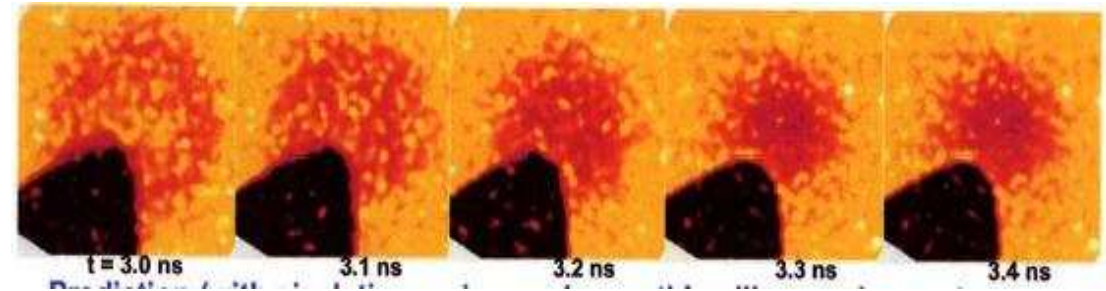
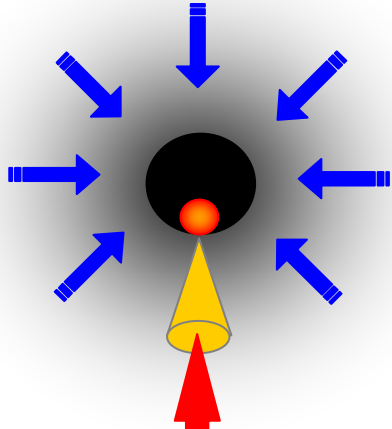


# FCl par attaque directe et allumeur rapide



## All. Rapide (cône)

Concept testé au Japon (Gekko XII) et aux USA ( $\Omega$ )



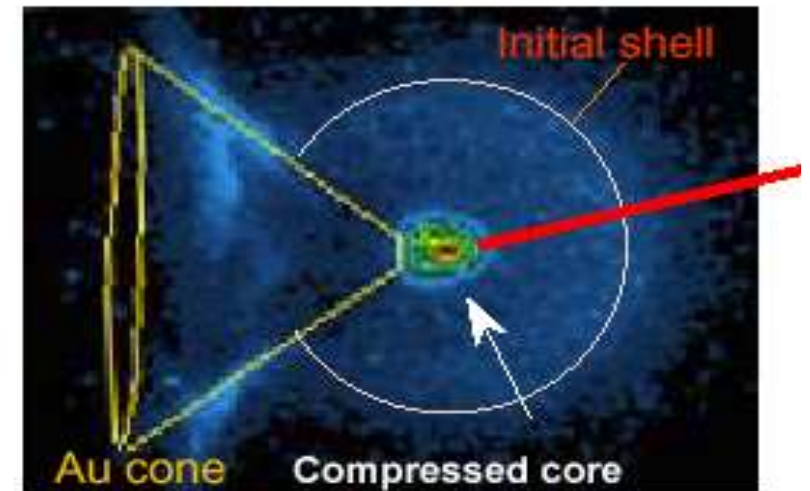
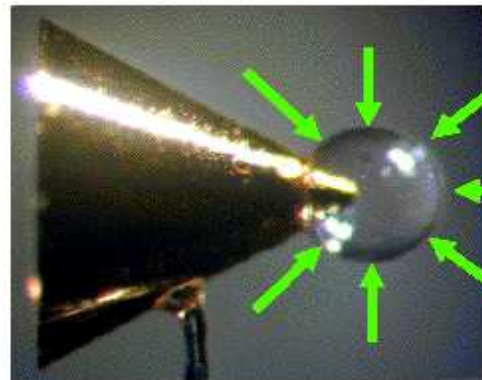
Utilisation d'un cône pour le passage du PW.

## Émission X

### Effets du cône?

Glissement & symétrie d'implosion

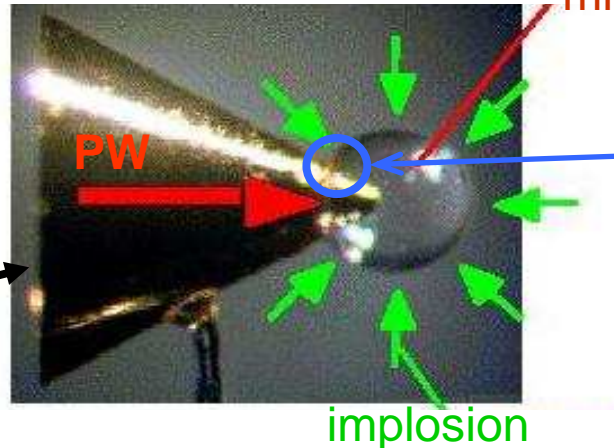
- / vitesse
- / matériaux
- / état de surface



# ALISE: PREMIERES CAMPAGNES OUVERTES CESTA (UMR-CELIA + CEA)



**OBJECTIF** Fusion par Confinement Inertiel: Allumage rapide (PW)

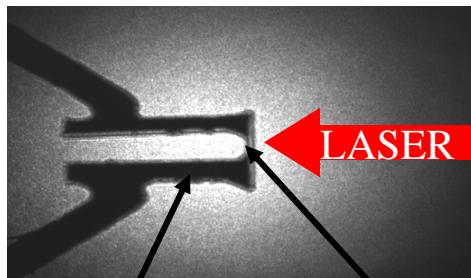


Cône d'or pour guider le PW

Question: Comment se déforme le micro-ballon sur la parois d'or lors de la compression ?

=  
Evolution de la vitesse d'une feuille de CH frottant sur une parois d'or

**EXPERIENCE** (65 tir sur cible en 2004)  
accélérer une feuille de CH entre 2 plaques d'or

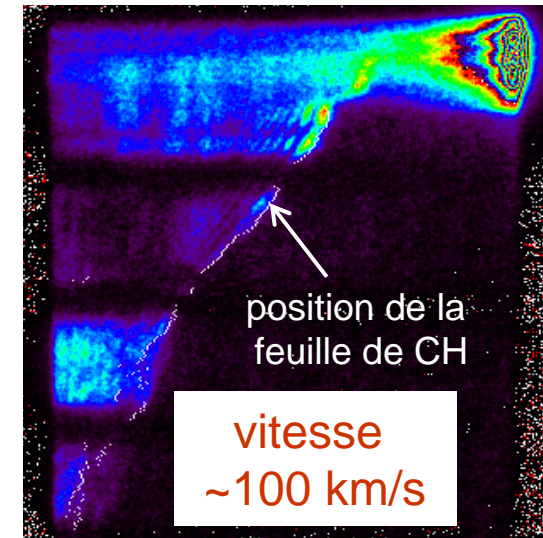


plaque d'or (idem cône)

feuille de CH (idem micro-ballon)

100 J  
1 ns  
1054 nm

espace



temps

*Merci de votre attention*