
LIL et LMJ vers la Fusion par Confinement Inertiel

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

Séminaire DAPNIA du 4 septembre 2007



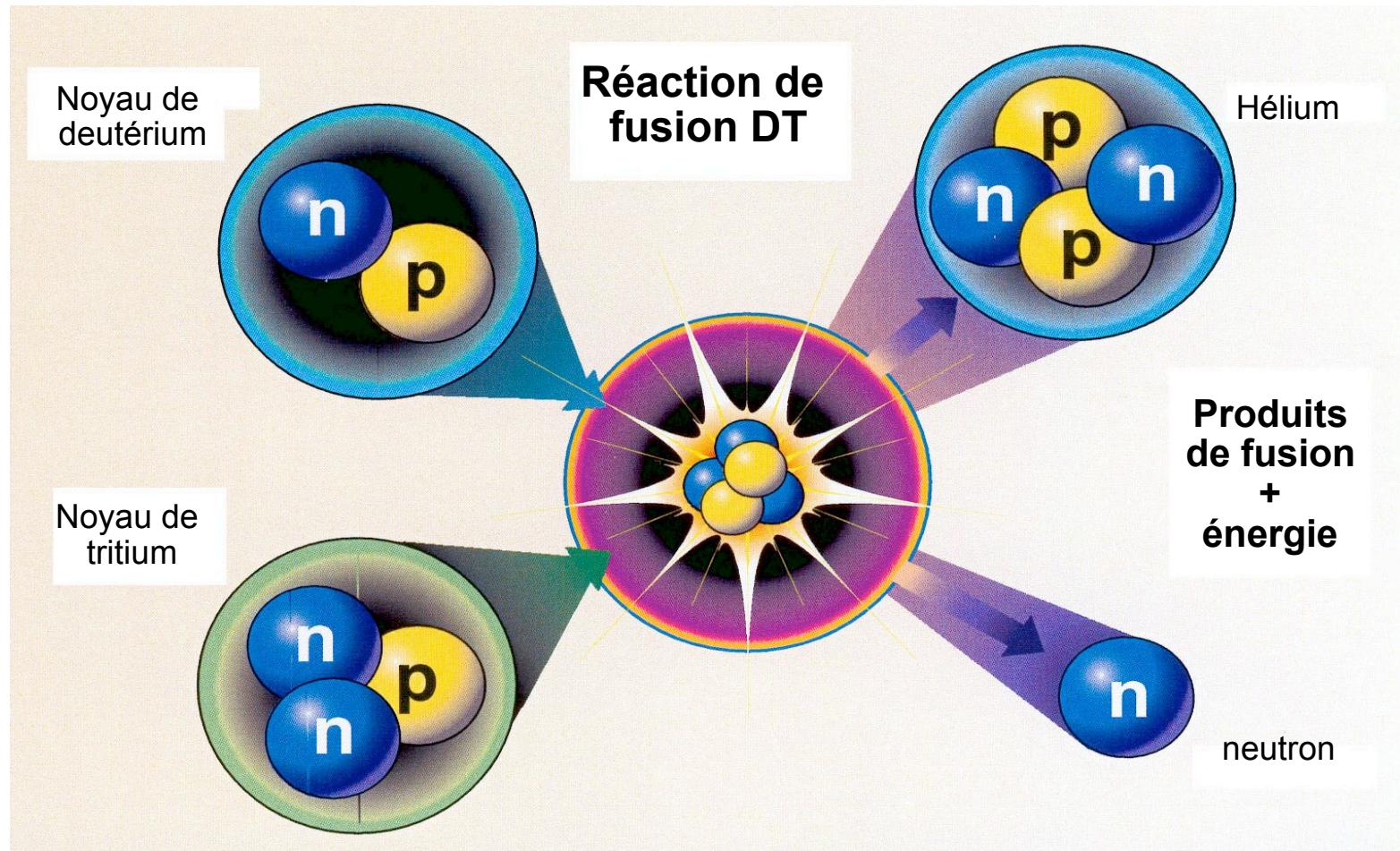
-
- La Fusion : notions de principe en images
 - Le LASER : schéma de base, LIL, LMJ
 - La LIL coté hall d'expérience
 - Le LMJ : état actuel
 - Quelques expériences
 - Coté industriel
 - NIF et LMJ

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

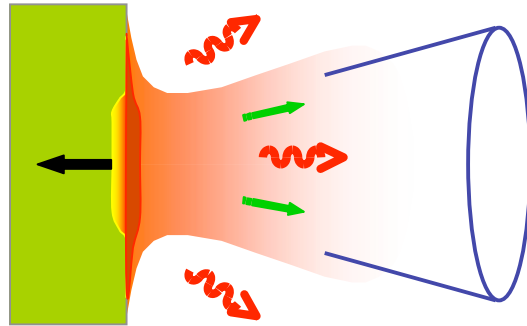


Quelques ordres de grandeur



- Les conditions de fusion :
- $D + T \rightarrow n (14,1 \text{ MeV}) + \alpha (3,5 \text{ MeV})$
- 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 :
 - $n \sim 10^{14} \text{ s/cm}^3$
 - $\tau \sim 1 \text{ s}$
- Cas Inertiel :
 - $n \sim 10^{23} \text{ s/cm}^3$
 - $\tau \sim 10^{-9} \text{ s}$

Physique des plasmas : interaction laser-matière

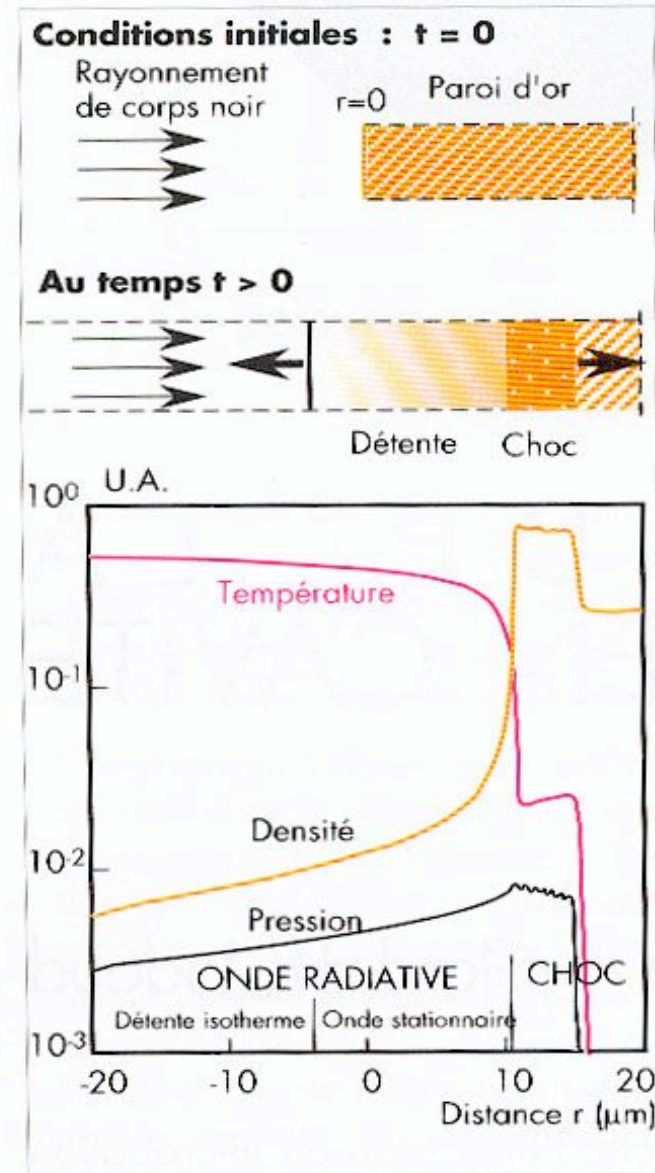


Définition de la densité critique:

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

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

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



Combustion nucléaire



- $D + T \rightarrow n (14,1 \text{ MeV}) + \alpha (3,5 \text{ MeV})$

- $$G_{\text{cible}} = \frac{E_{\text{TN}}}{E_{\text{laser}}}$$

- $$G_{\text{cible}} = \frac{E_{\text{TN}}}{E_{\text{DT}}} \cdot \frac{E_{\text{DT}}}{E_{\text{Xabs}}} \cdot \frac{E_{\text{Xabs}}}{E_{\text{Xcrée}}} \cdot \frac{E_{\text{Xcrée}}}{E_{\text{laser}}}$$

- $$G_{\text{cible}} = G_{\text{DT}} \cdot \eta_h \cdot \eta_c \cdot \tau_x = G_{\text{DT}} \cdot \eta \rightarrow \sim 1 \%$$

Gain du DT

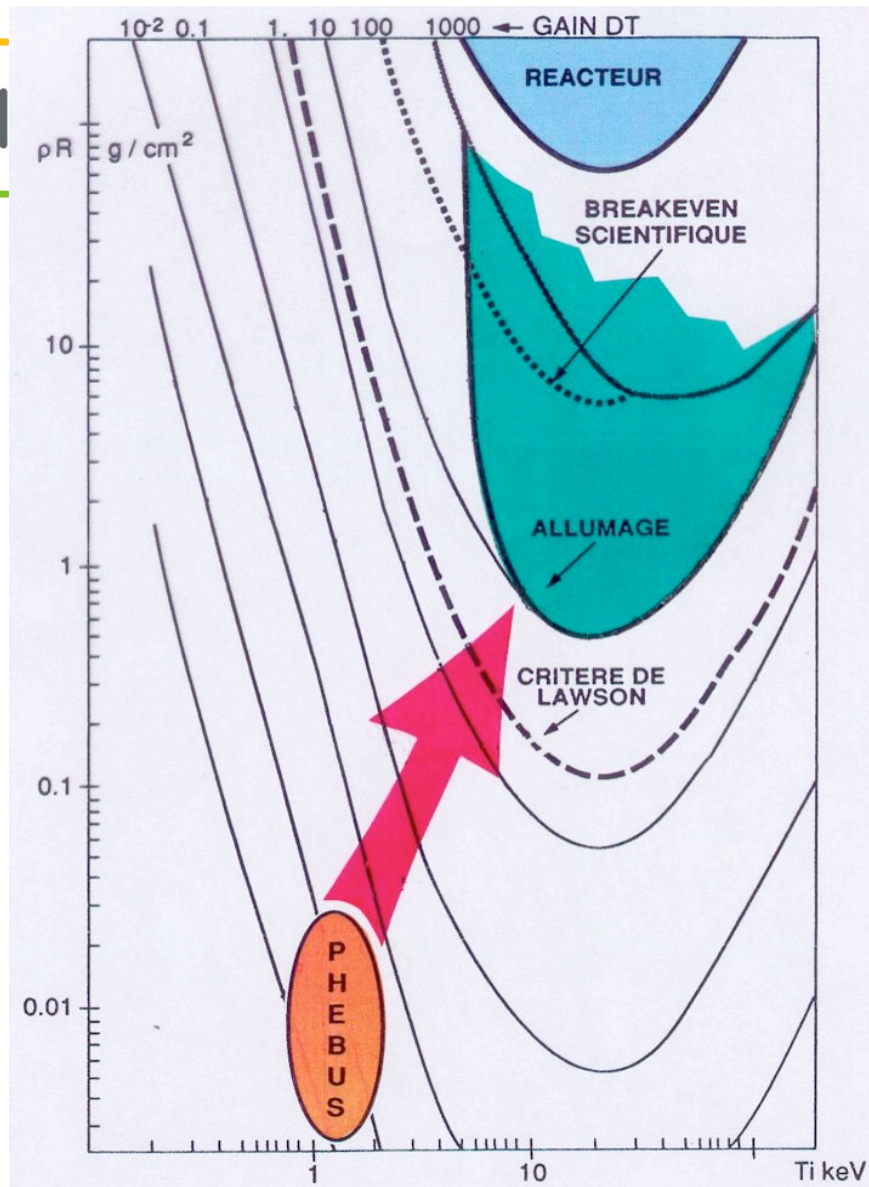
Rendement hydrodynamique $\sim 15 \%$

Taux de conversion X $\sim 60 \%$

Rendement de cavité $\sim 10 \%$

Condition d'allumage sur ρR et Tionique du point chaud

cea



Critère de Lawson: $G_{DT} = 2$

(l'énergie de fusion est de l'ordre de 2 x l'énergie thermique fournie au DT)

Allumage: $G_{DT} = 10$

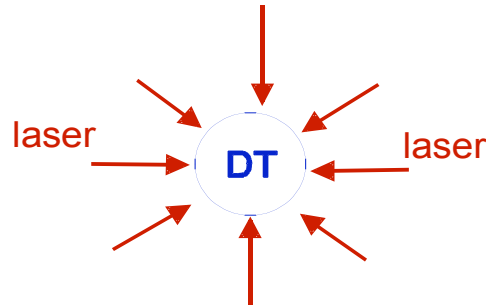
(l'énergie déposée localement par les α , diminuée des pertes radiatives, équilibre l'énergie interne fournie au DT)

Breakeven scientifique : $G_{DT} > 100$,
soit $G_{\text{Cible}} > 1$, objectif des expériences avec le LMJ

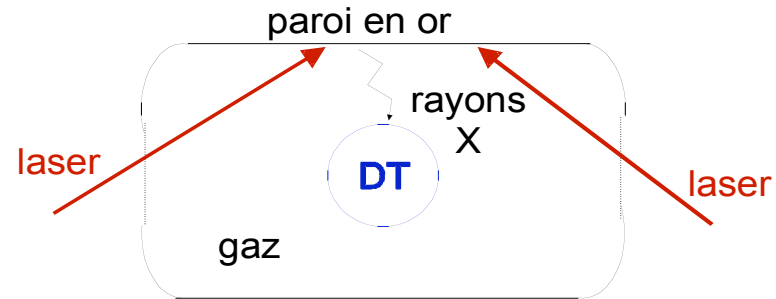
3 voies possibles pour la fusion par confinement inertiel



1 - Attaque directe

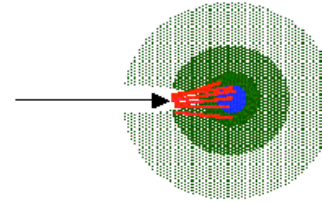
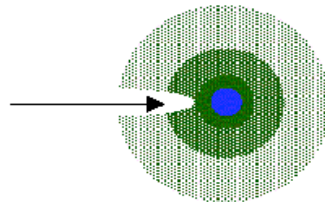


2 - Attaque indirecte (LMJ/ NIF)



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/cm²)

- Nécessité d'un éclairement « uniforme » et de « grande » dimension (mm²)
- Limiter les sur-intensités qui développent des effets non-linéaires

La Fusion par Confinement Inertiel

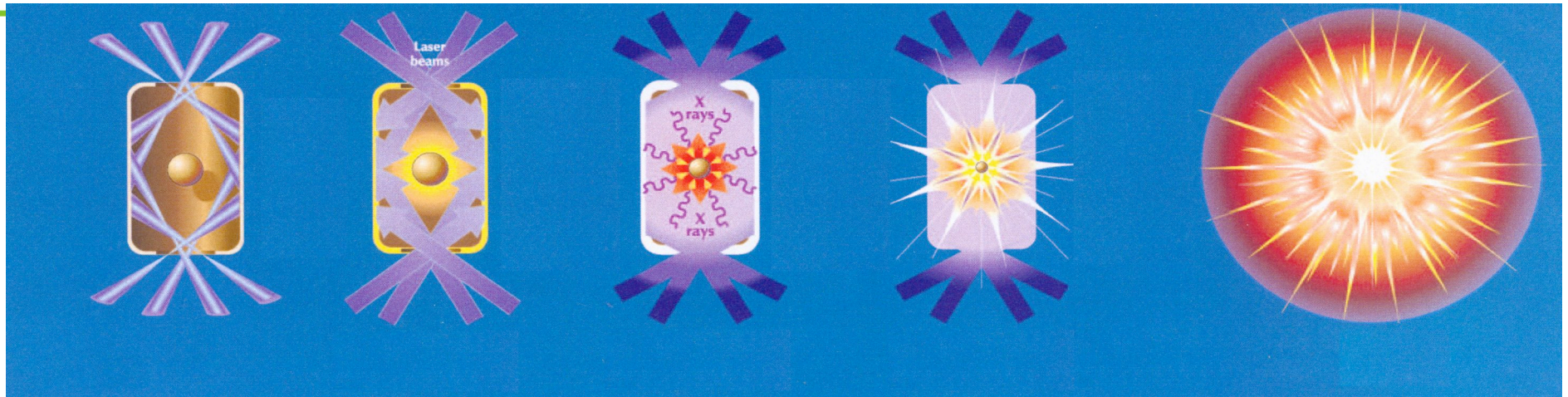


Schéma de l'attaque indirecte

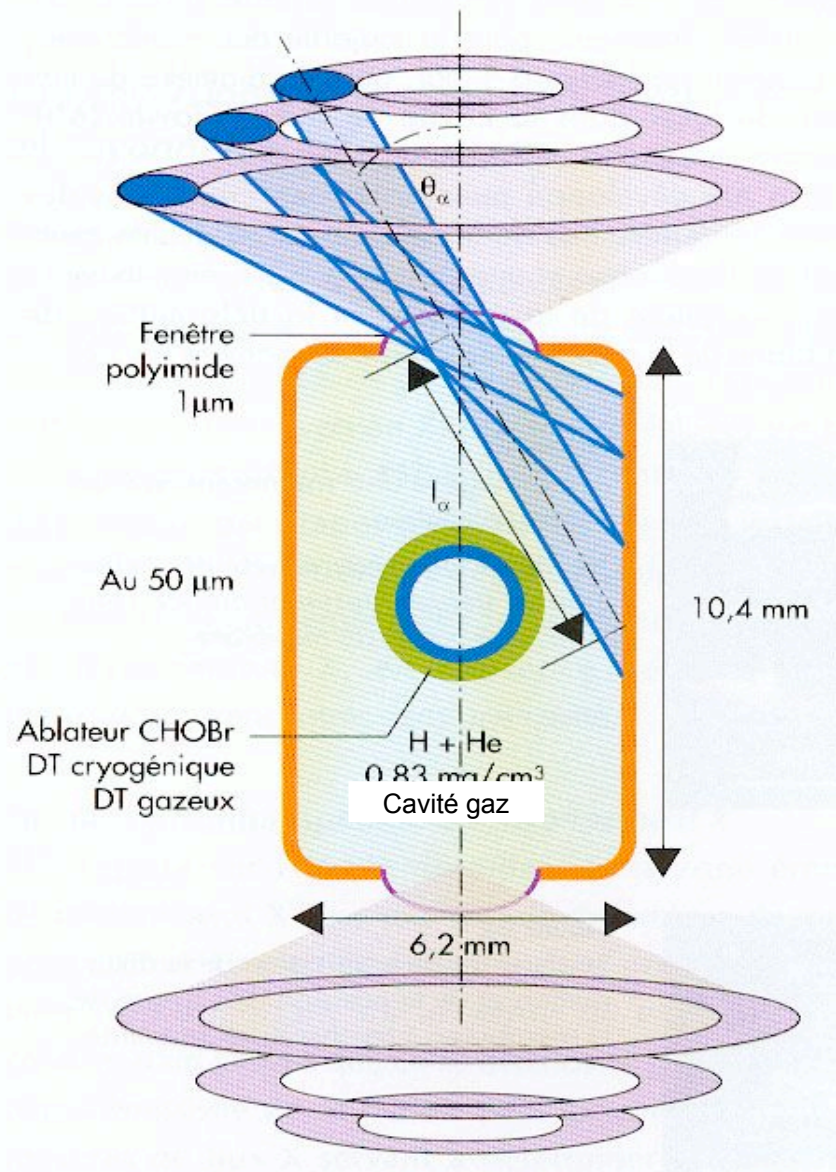
Les faisceaux laser chauffent la paroi interne de la cavité (création d'un plasma qui exerce une pression sur la cible de 100 Mbar)

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

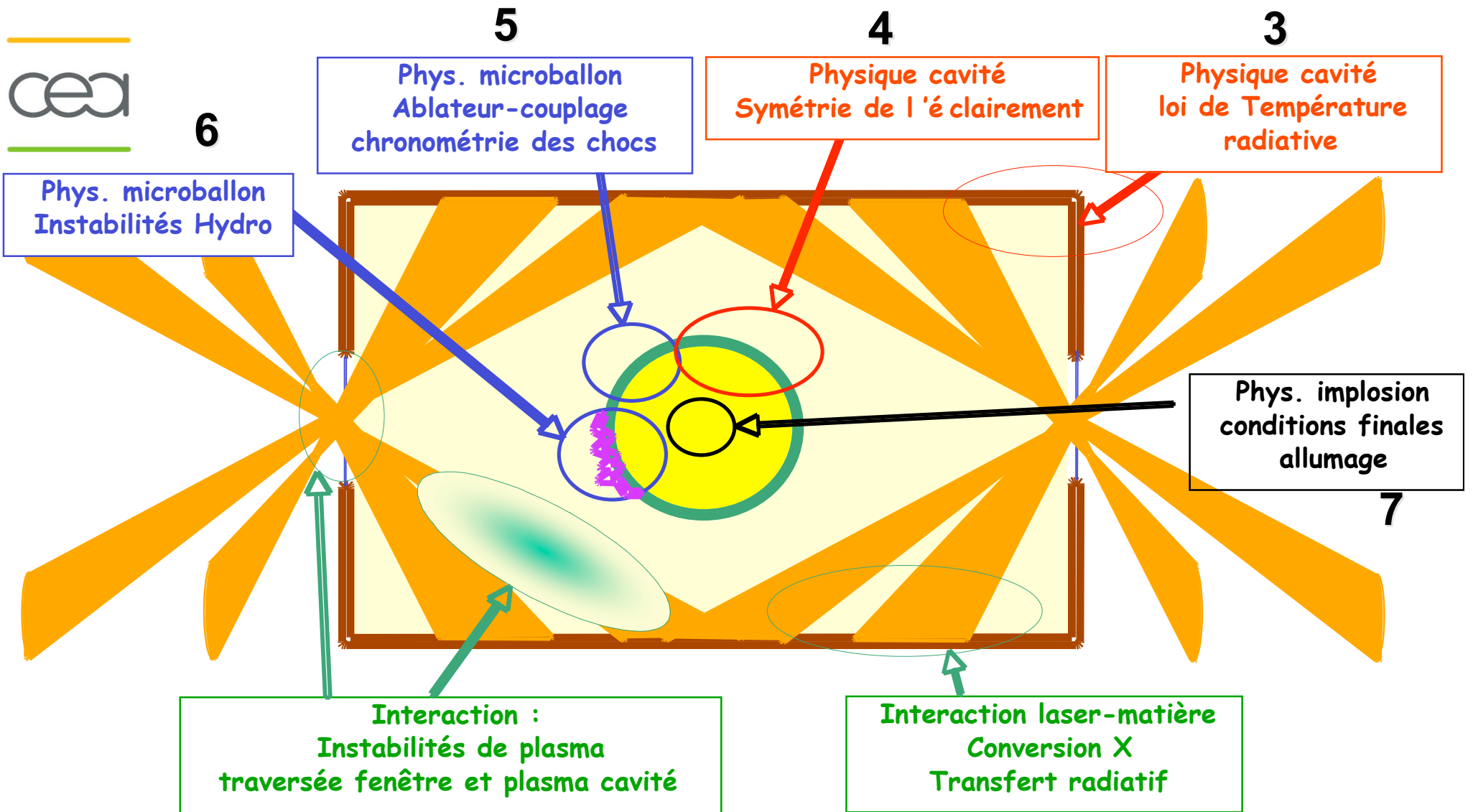
L'ignition se produit quand la zone centrale atteint 70 MK et 0.3 g/cm²

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

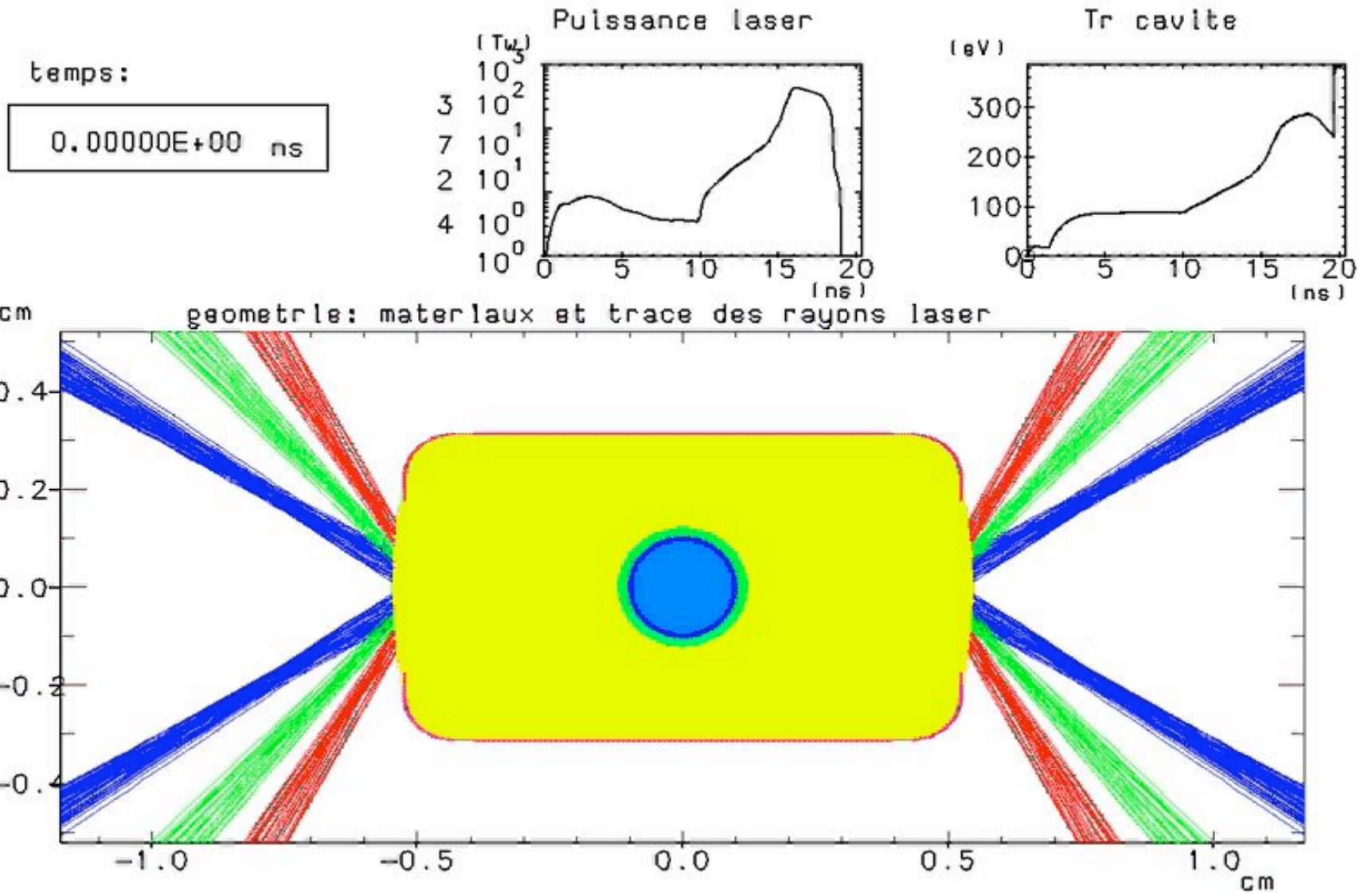
Modèle de cible LMJ et schéma d'irradiation



Problématique des cibles à gain en attaque indirecte



Simulation numérique de l'implosion



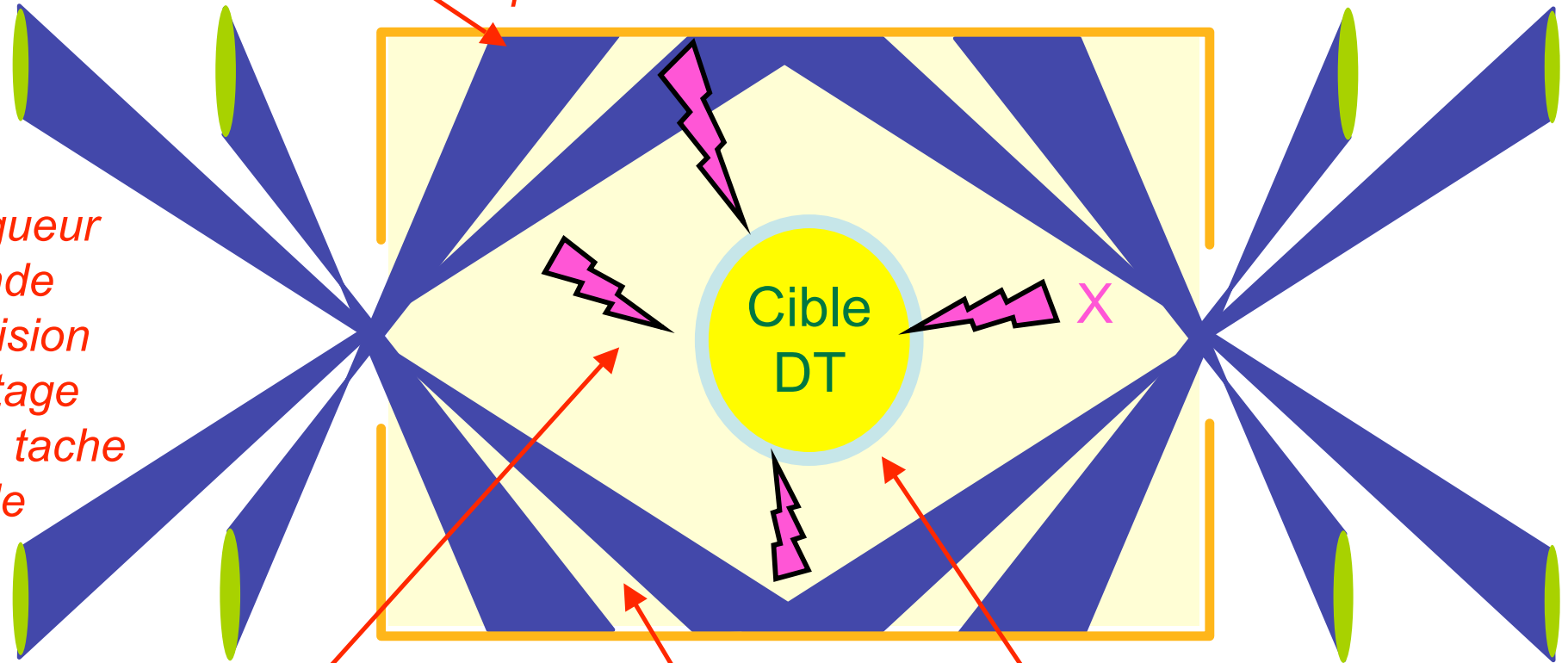
Les contraintes => spécifications



Interaction laser-matière
Conversion X
Transfert radiatif

- Nombre de faisceaux et uniformité d'éclairement
- 3 « cônes » X 10 « impacts » = 30 « faisceaux » par coté

- Longueur d'onde
- précision pointage
- taille tache focale



Symétrie et stabilité de l'implosion < 2%

Focalisation

Énergie-puissance liées au domaine de fonctionnement

Les missions du Laser Mégajoule (LMJ)



- **La physique de base**
 - Plasmas
 - Astrophysique
 - Hydrodynamique
 - Propriétés des matériaux
 - Sources de rayonnement
- **La Fusion par Confinement Inertiel**
 - Compression
 - Ignition
 - Combustion d'un mélange DT



Le LASER : schéma de base, LIL, LMJ

Répondre au besoin en terme de performances

Les concepts fondamentaux :

Amplification,

Conversion de fréquence

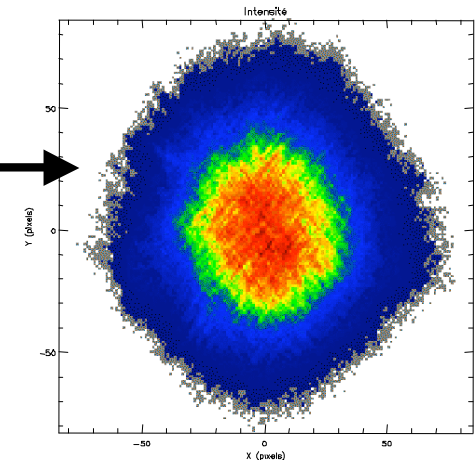
Imagerie, filtrage et correction de surface d'onde

Focalisation et mise en forme de la tache focale

Dimensionnement laser : répondre aux besoins

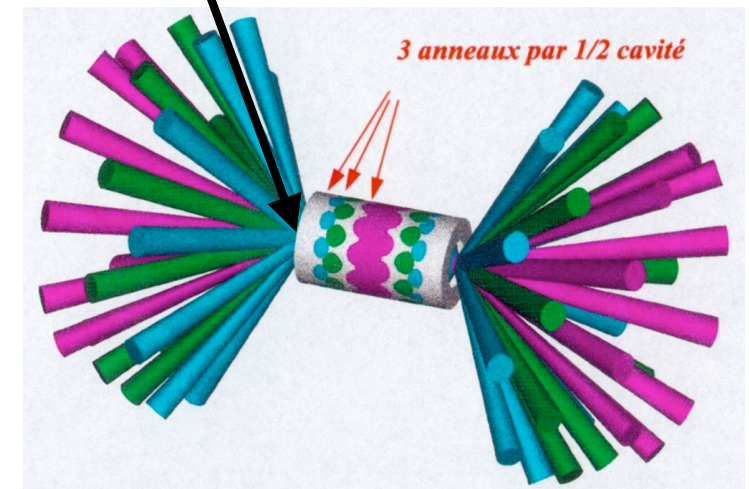


- Énergie, Puissance : schéma optimisé 550 TW, 2 MJ (point 5 des cibles à gain)
- Mettre en forme la tache focale
- Quelle que soit la configuration (il y en a 25) :
 - Faire passer les taches focales des « n » quadruplets par le(s) trou(s) d'entrée du Hohlraum (la cavité)
 - Forme temporelle et synchronisation

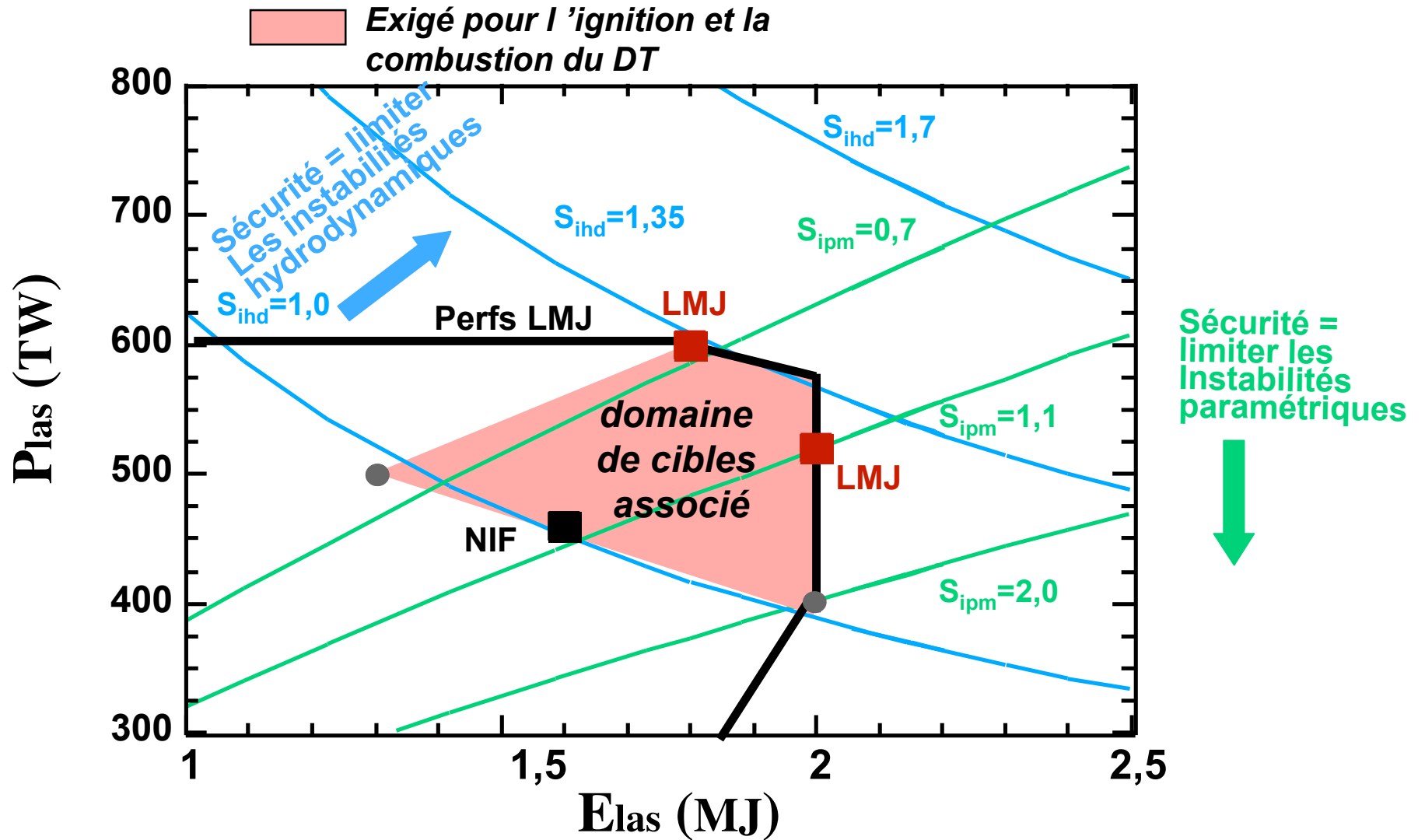


Power P30 (t) (W)

time (s)

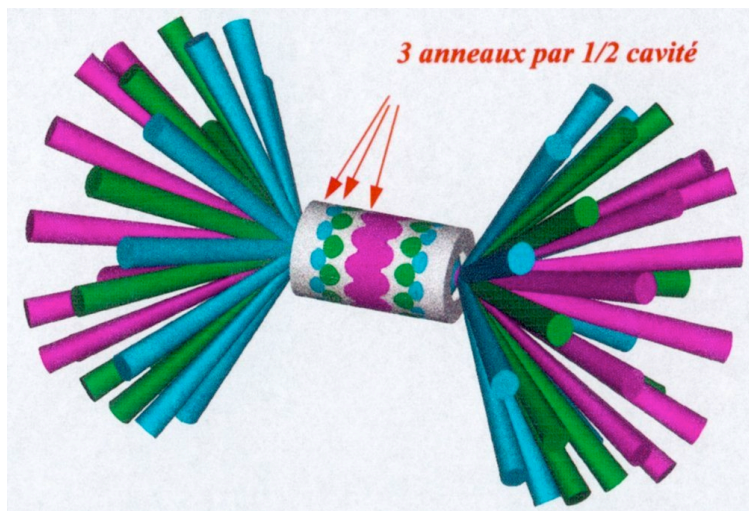


Domaine de fonctionnement ignition

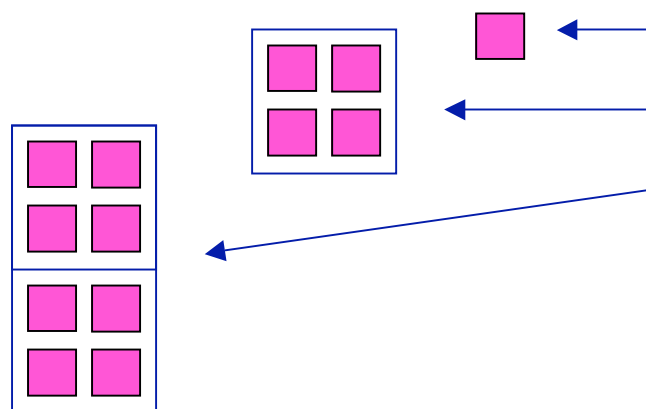
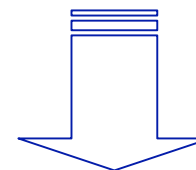


Des spécifications au schéma de base

cea

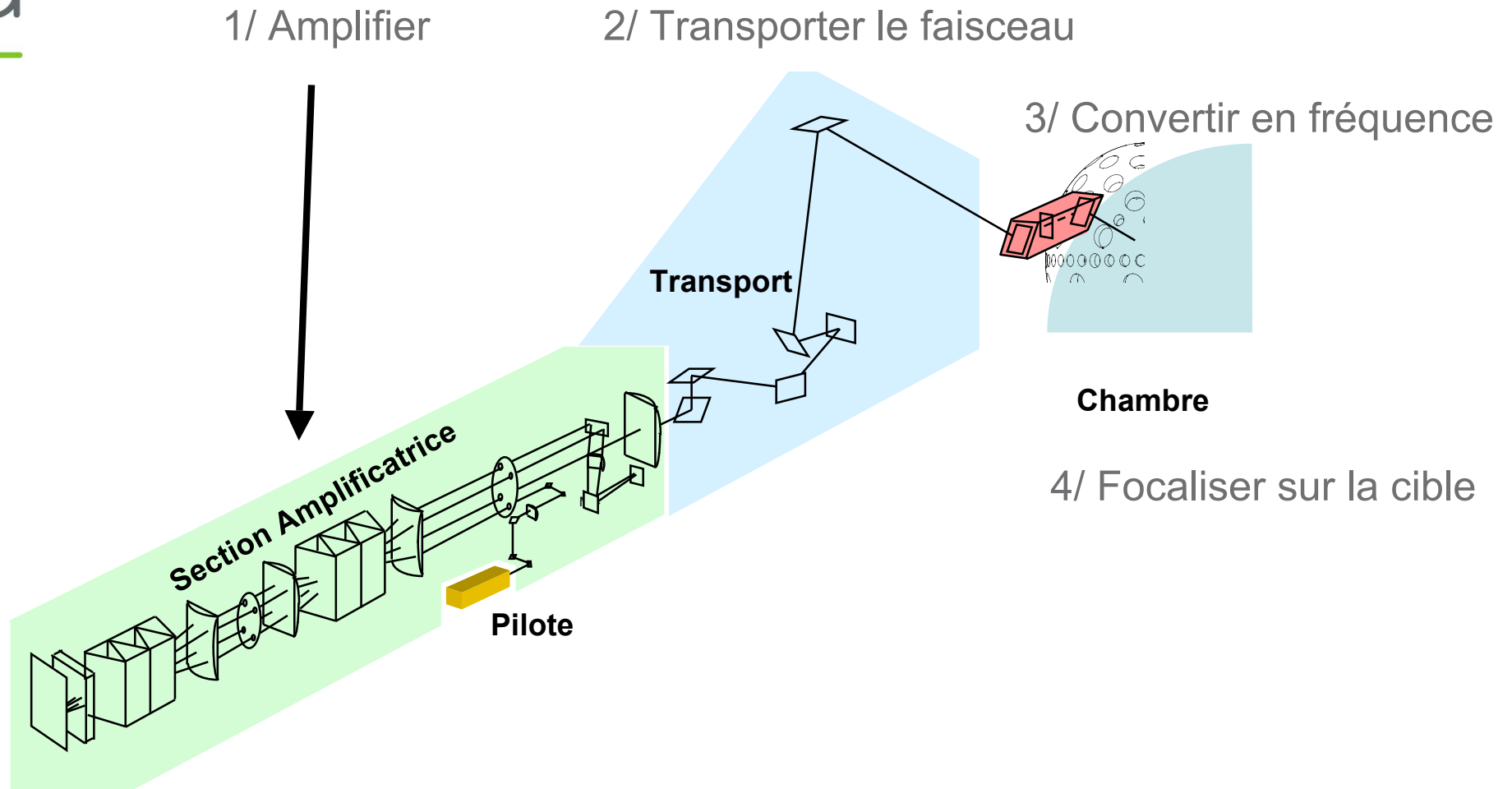


- 3 cônes à 33, 49 et 59 °
- 2 cotés
- 10 quadruplets par cônes
- 2 quadruplets par chaîne laser



- $3 \times 2 \times 10 \times 4 = 2^4 \times 3 \times 5 = 240$
- 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)

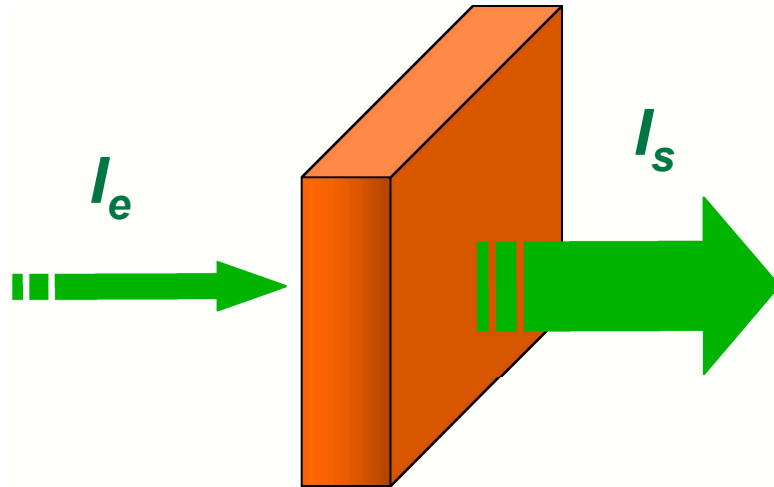
Pour obtenir l'énergie UV requise, le plus simple est d'amplifier une source infrarouge et d'opérer une conversion de fréquence juste avant la cible (IR, 1ω => UV, 3ω)



Amplifier : une histoire d'intensité ou de fluence



- Il y a du gain « $g = \sigma \Delta n$ »



Classiquement :

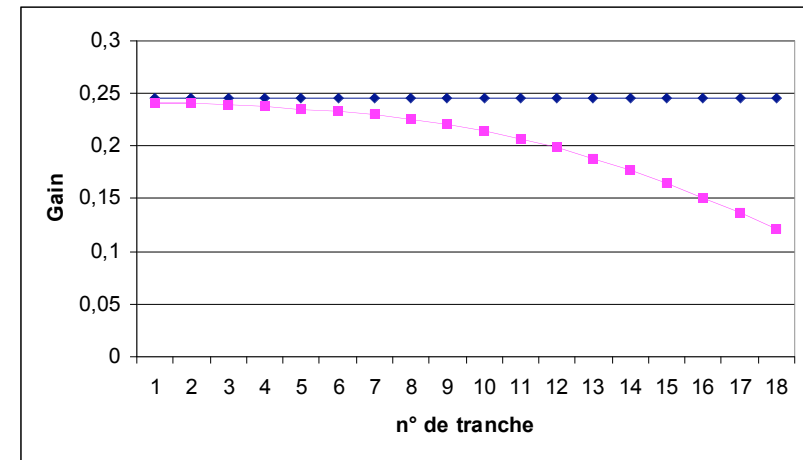
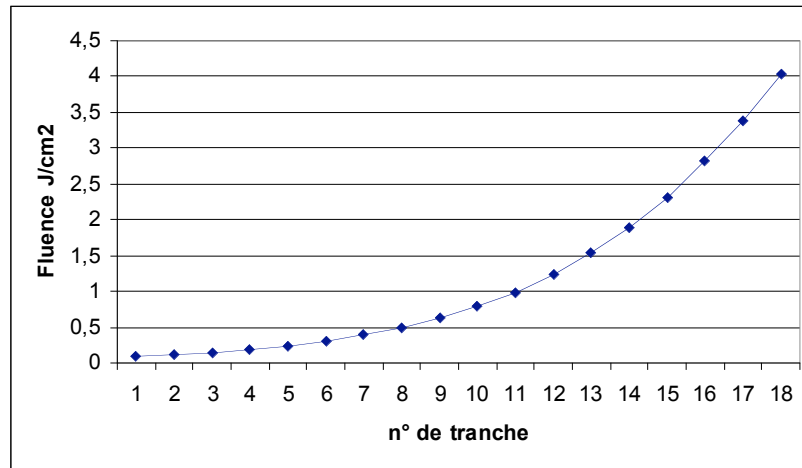
$$I_{\text{sortie}} = I_{\text{entrée}} \text{Exp}(g \cdot l)$$

mais le gain sature

$$g(z) = g(0) / (1 + I(z) / I_{\text{sat}})$$

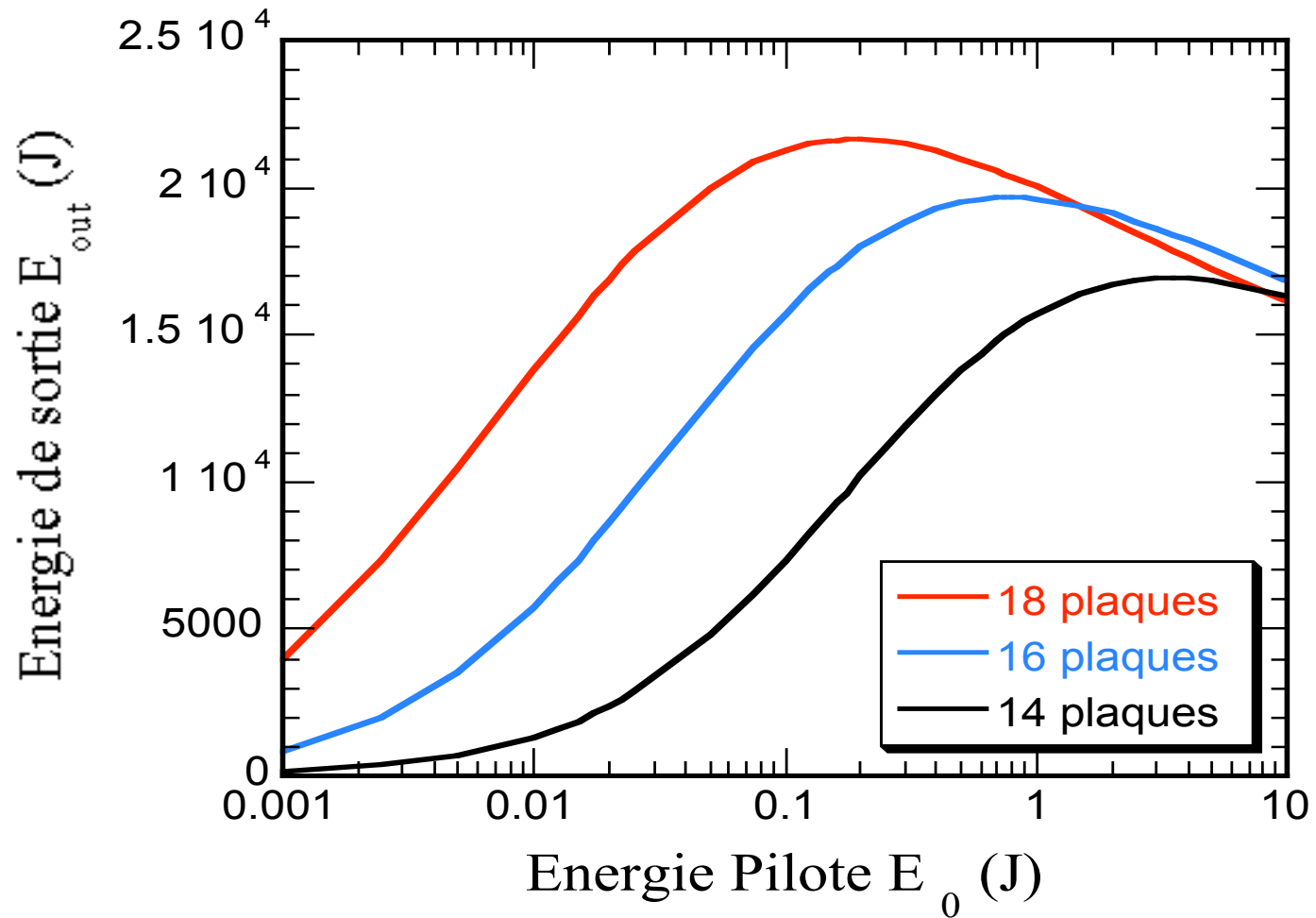
Et dépend du temps !

**On préfère la fluence =
énergie/surface**



L. Frantz & J. Nodvik : « Theory of pulse propagation in a laser amplifier », J. Appl. Phys. 34,8, 2346 (1963)

Énergie de sortie à 1ω en fonction du pilote et du nombre de plaques



Géométrie plaque laser

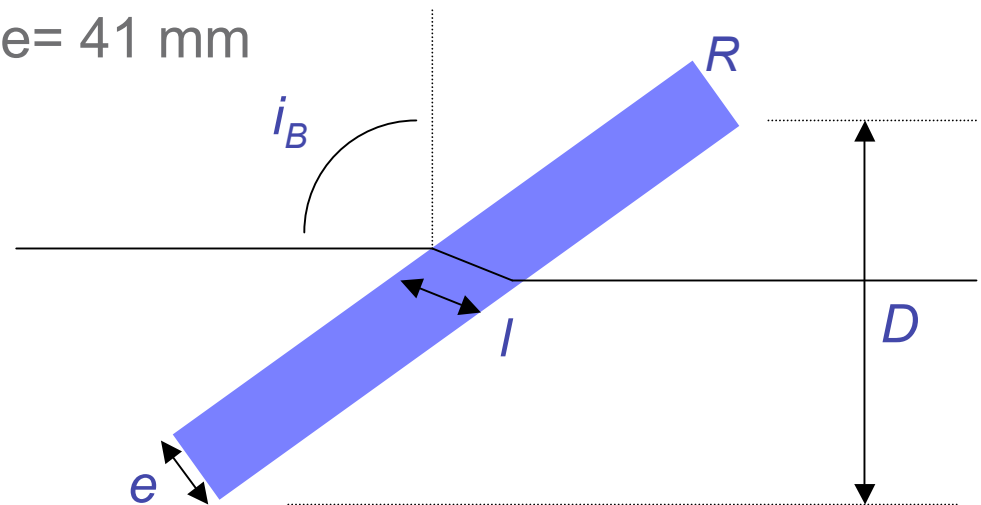


- Incidence de Brewster : $\tan i_B = n$
- $\lambda = 1053,000 \text{ nm}$

verre	n	i
Hoya LHG8	1,52005	56,66
Schott LG770	1,49908	56,29

- Seuil d'auto-oscillation : $R^2 \text{Exp}(2gl) = 1$
- $l = e\sqrt{(1+n^2)}/n = 49\text{mm}$ pour $e = 41 \text{ mm}$
- $D = \text{Ln}(1/R)/g/(n\sqrt{(1+n^2)})$
 – = 40 cm si $R \approx 1,5 \%$

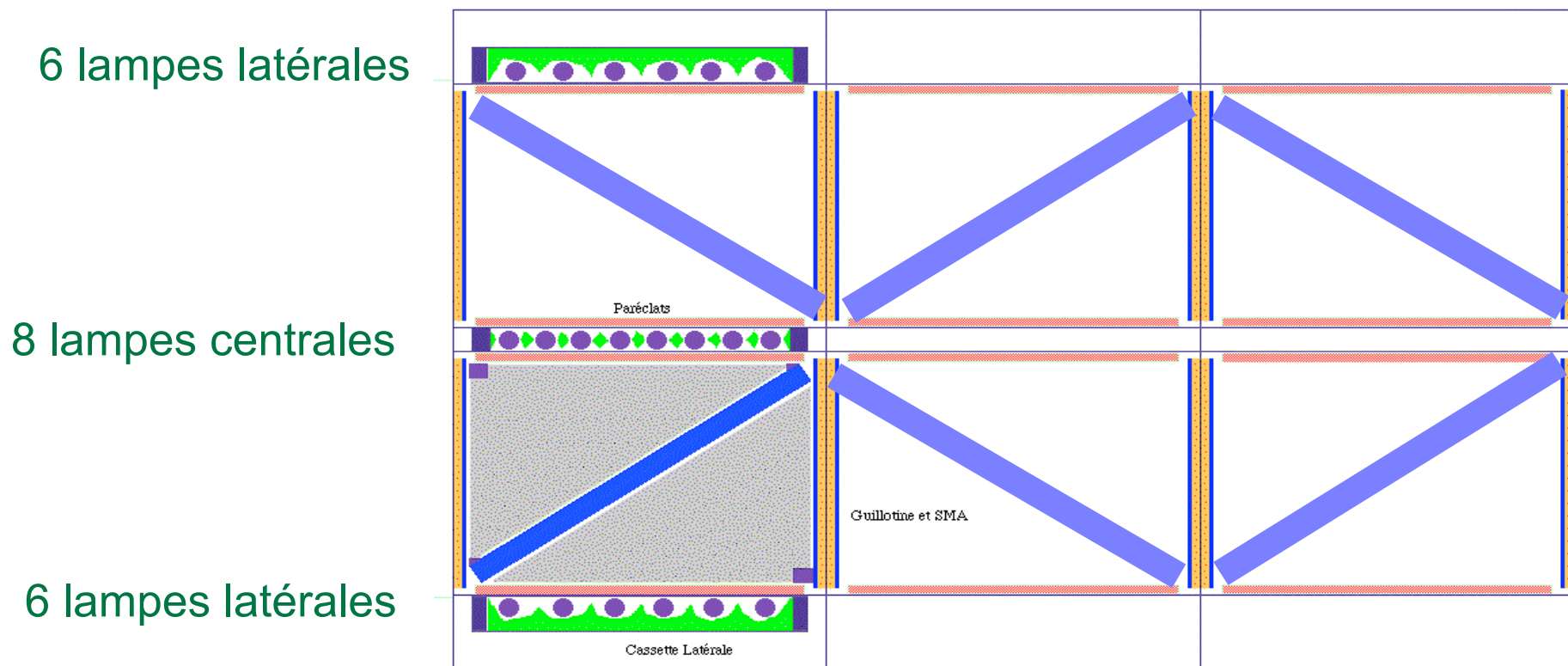
- $g_{\text{laser}} \approx 0,05 \text{ cm}^{-1}$
- $G = \text{Exp}[g_{\text{laser}} l] \approx 1,28$



Principe d'un amplificateur moderne



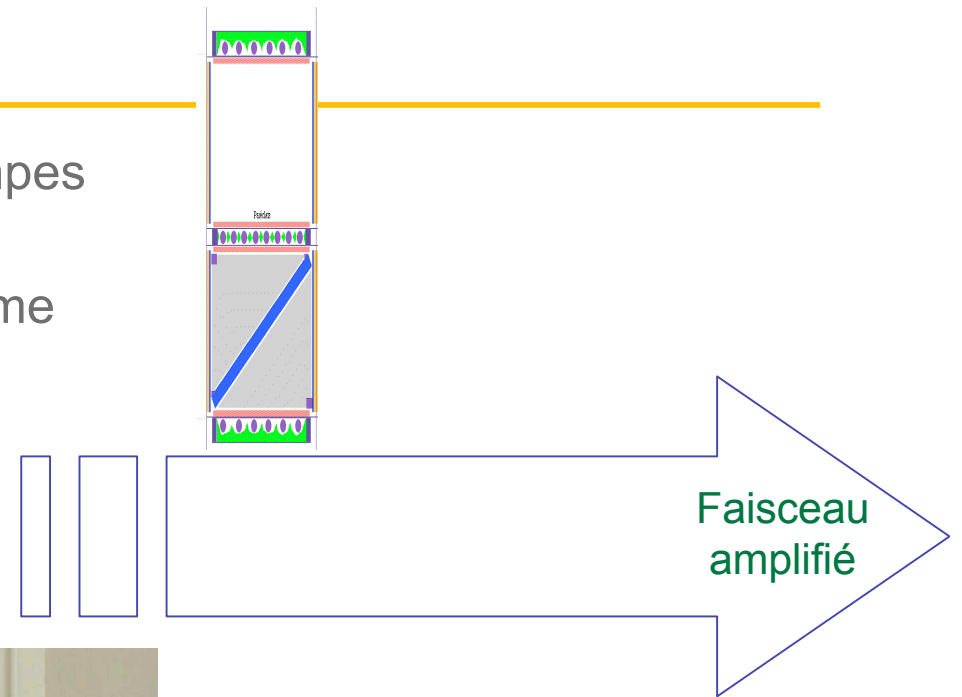
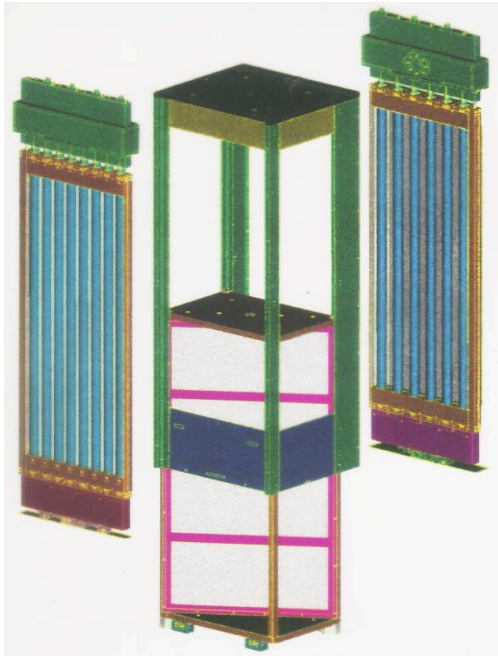
- N Plaques fines à incidence de Brewster
- Éviter les oscillations parasites dues à l'amplification de l'émission spontanée (ASE)
- Profil de gain le plus homogène possible



Cas LIL



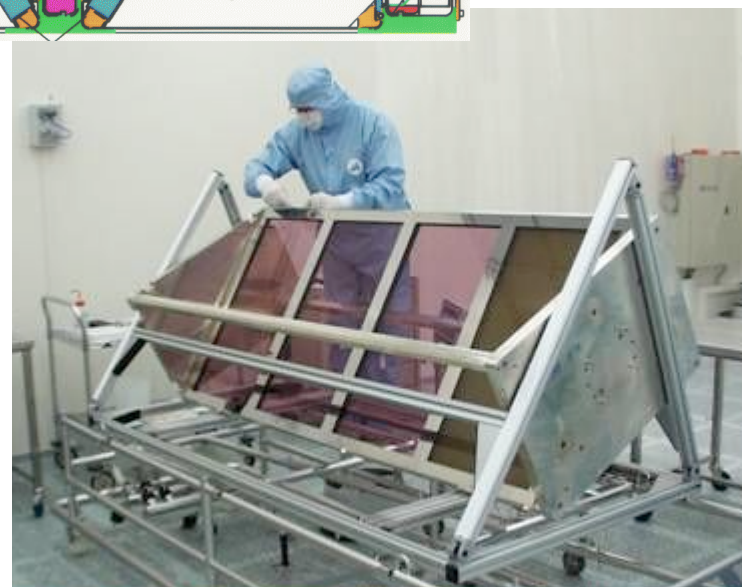
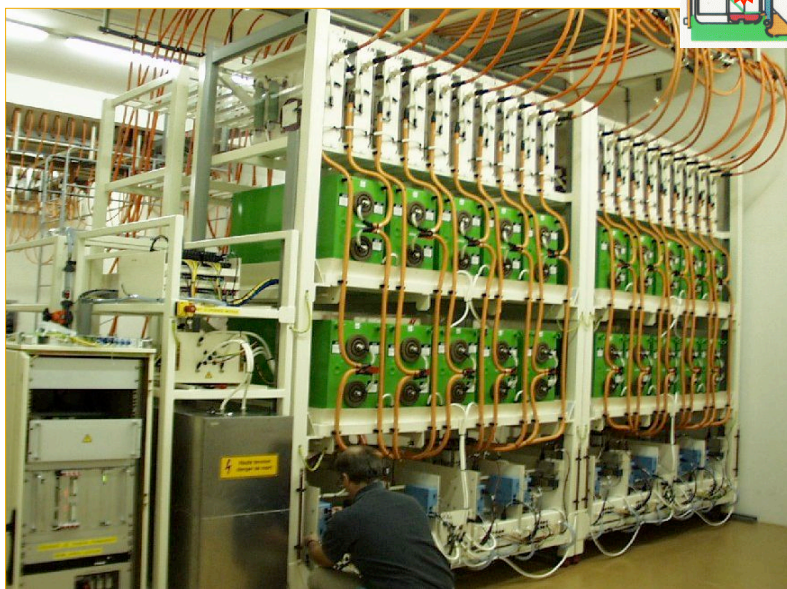
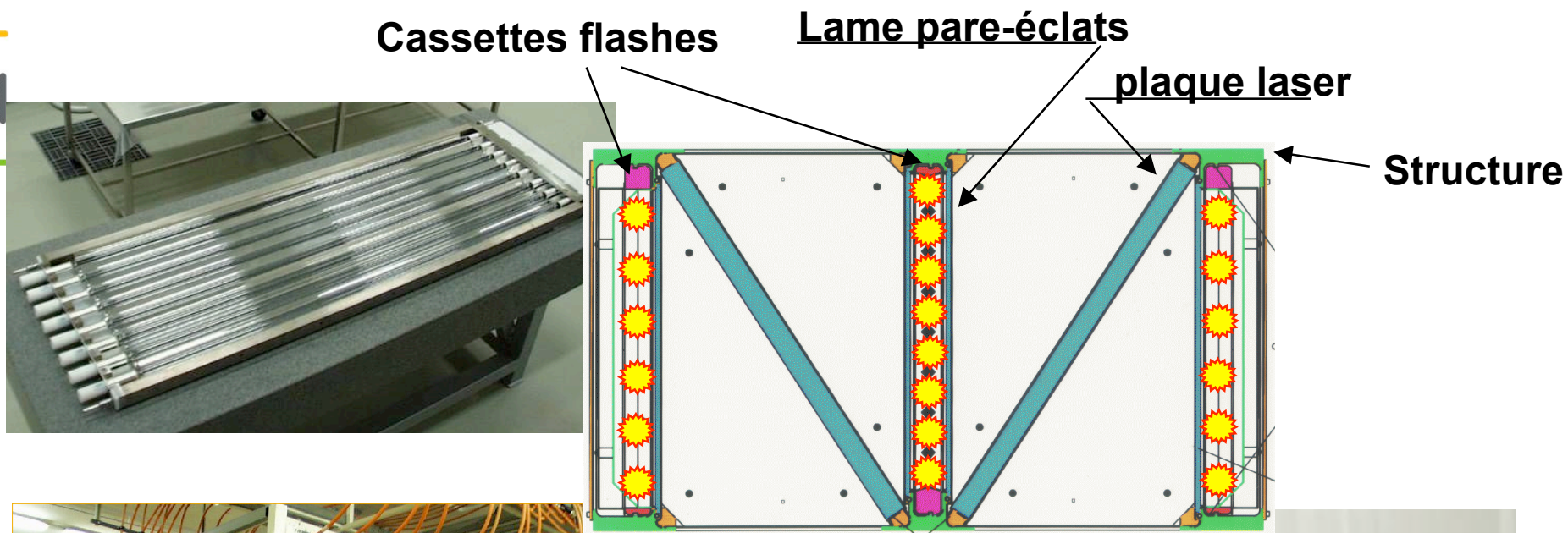
- Structure plaque pompée par lampes
- 8 faisceaux (4x2) par module
- Verre phosphate dopé au Néodyme



Une plaque = $440 \times 880 \times 41 \text{ mm}^3$
Énergie de pompe 85 kJ/plaque
Énergie stockée = 4 kJ
Énergie extraite = 1,5 kJ

L'amplificateur : lampes et banc d'énergie

cea

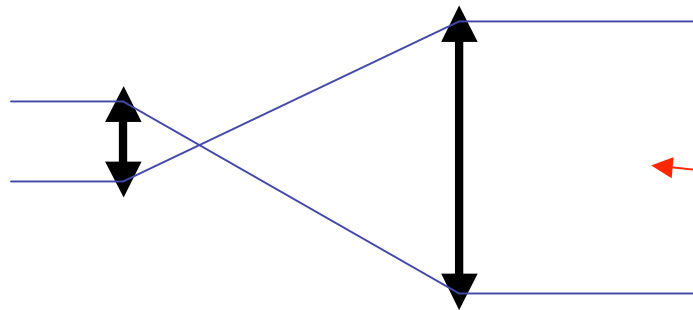
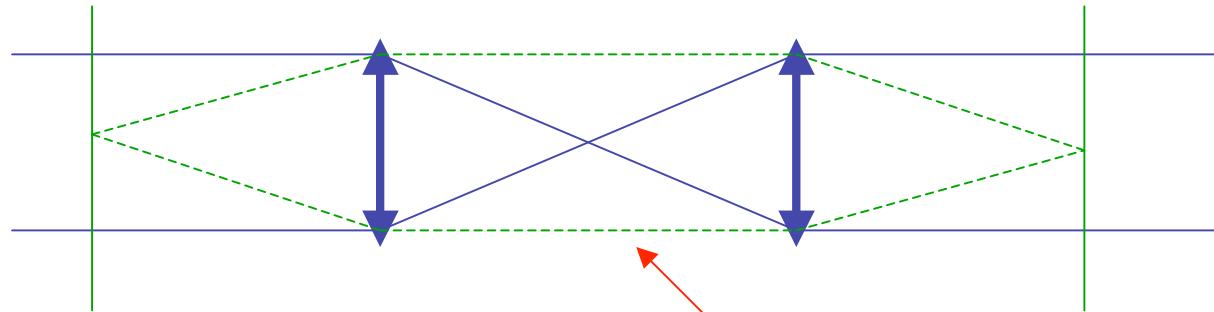


Transporter le faisceau



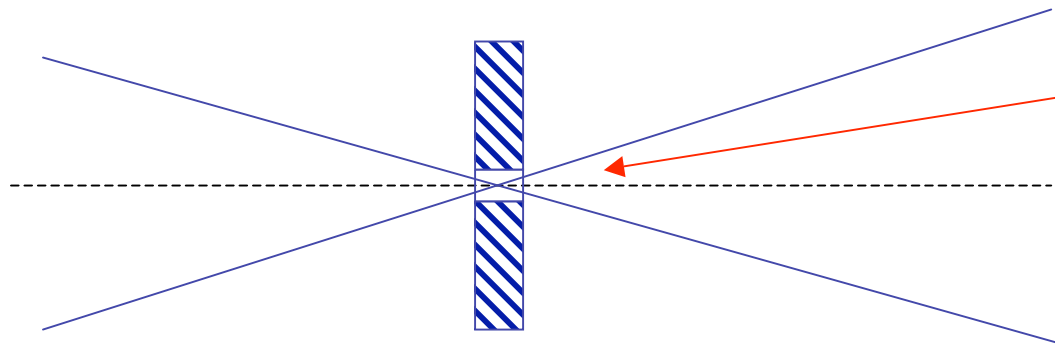
Plan objet

Plan image



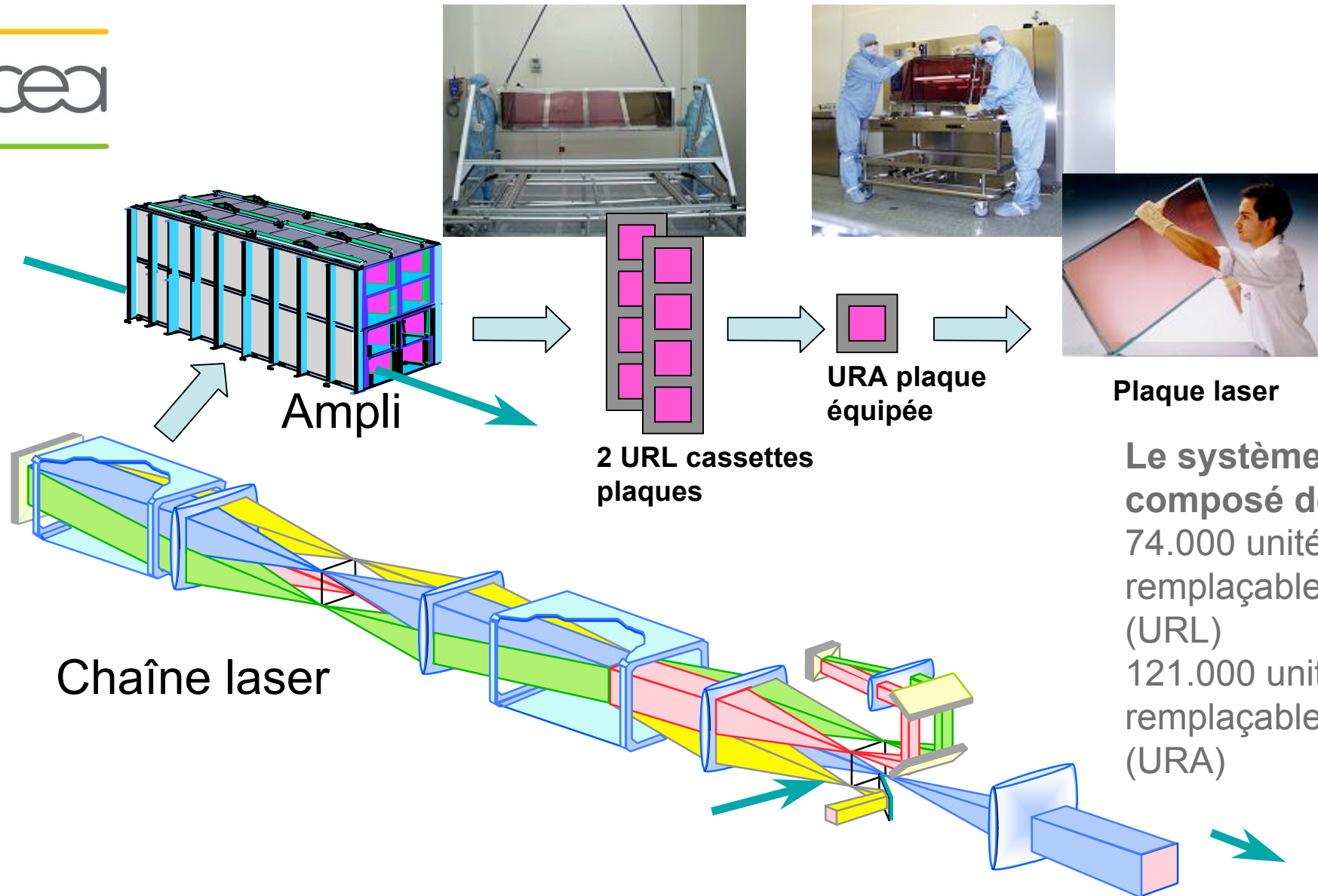
On peut transporter le faisceau avec des afocaux, ainsi que la pupille du faisceau, en gérant le grandissement.

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



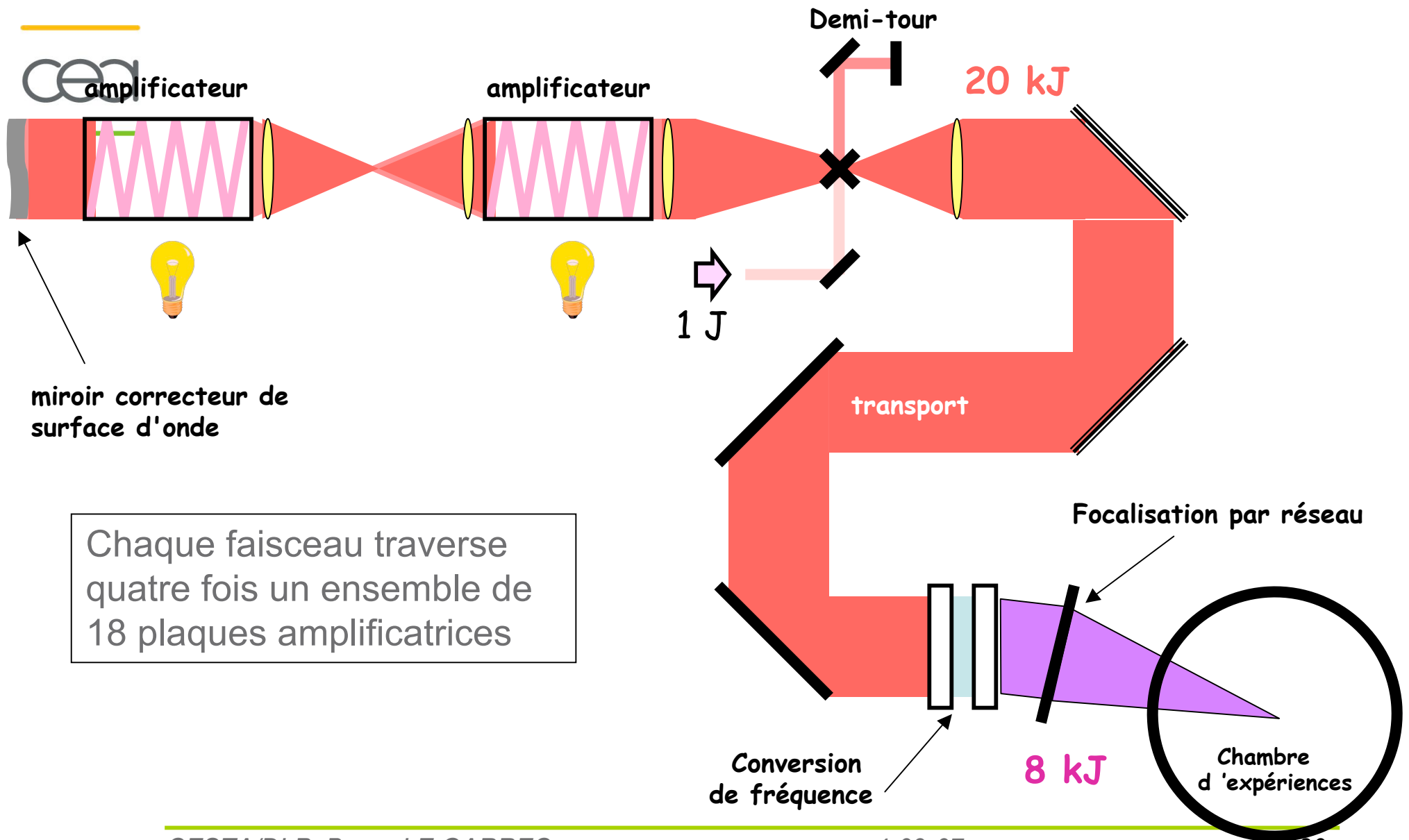
Au foyer, on est dans l'espace de Fourier, on « voit » les fréquences spatiales

Maintenance des amplificateurs



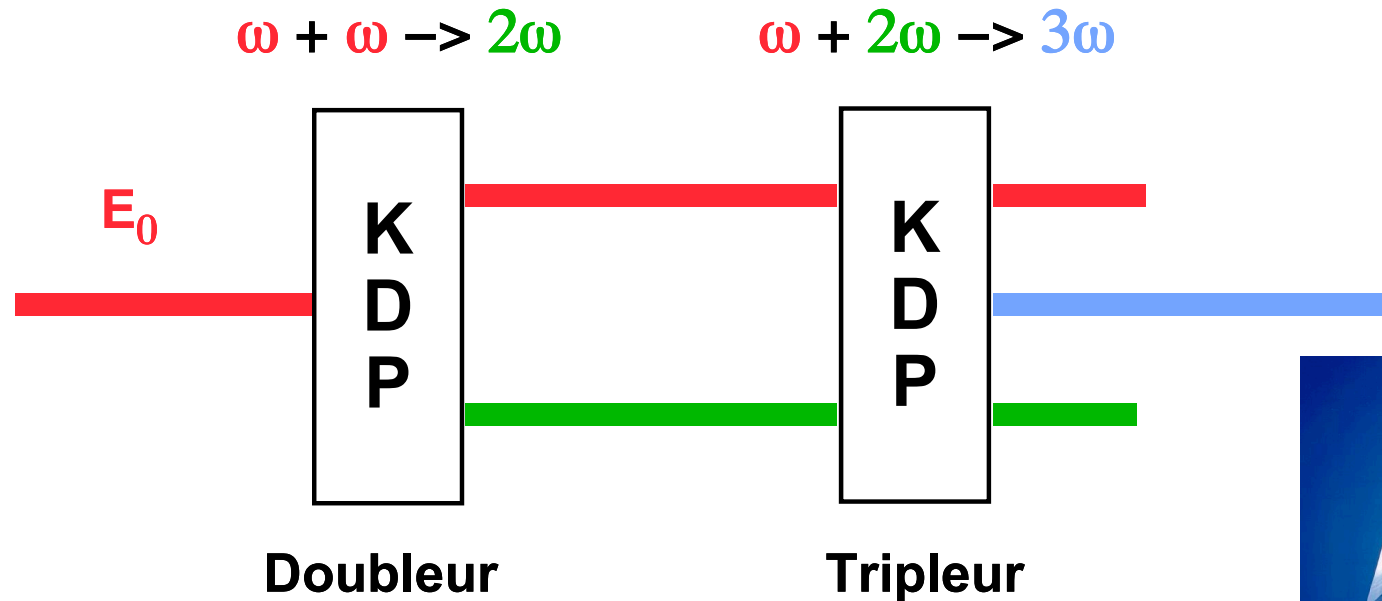
Le système est composé de :
74.000 unités remplaçable en ligne (URL)
121.000 unités remplaçable en atelier (URA)

Schéma de principe d'une chaîne laser LIL/LMJ



Convertir en fréquence : cristal de KDP (KH_2PO_4)

cea



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

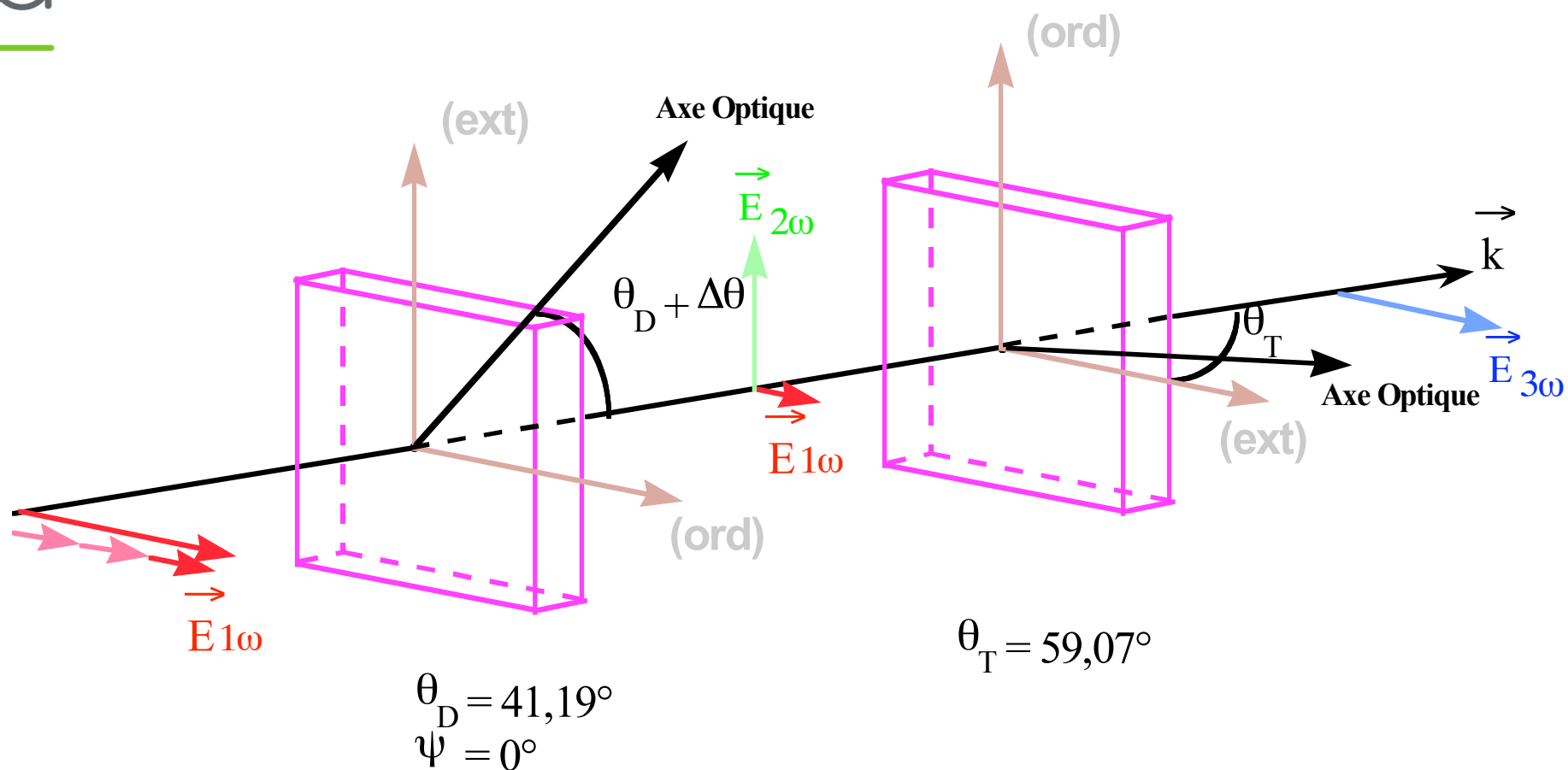
Un champ en $\exp(i\omega t)$ fait apparaître des termes en $\exp(i\omega t + i\omega t)$ si on est à l'accord de phase

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

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

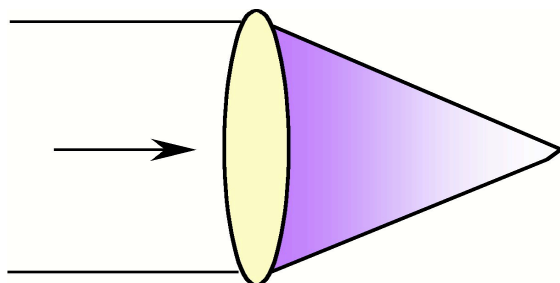
Réviser sa trigo pour s'en convaincre : $\cos^2 = ?$

Pour les très bons : la configuration Type I, Type II

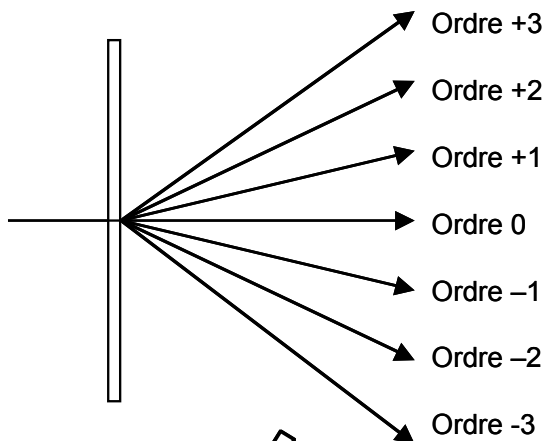


Il y en a d'autres !

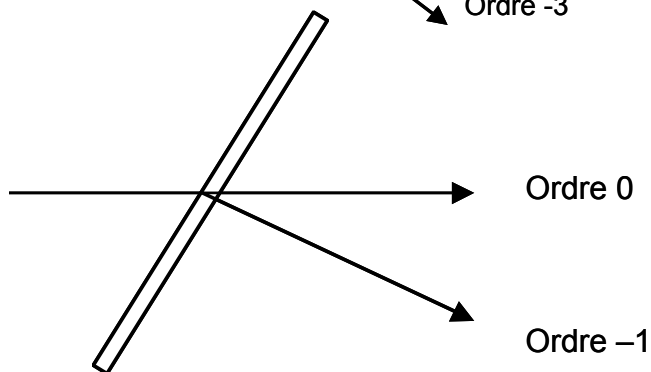
Focaliser : le bleu, mais on ne veut ni le vert, ni l'IR



Facile de focaliser avec une lentille

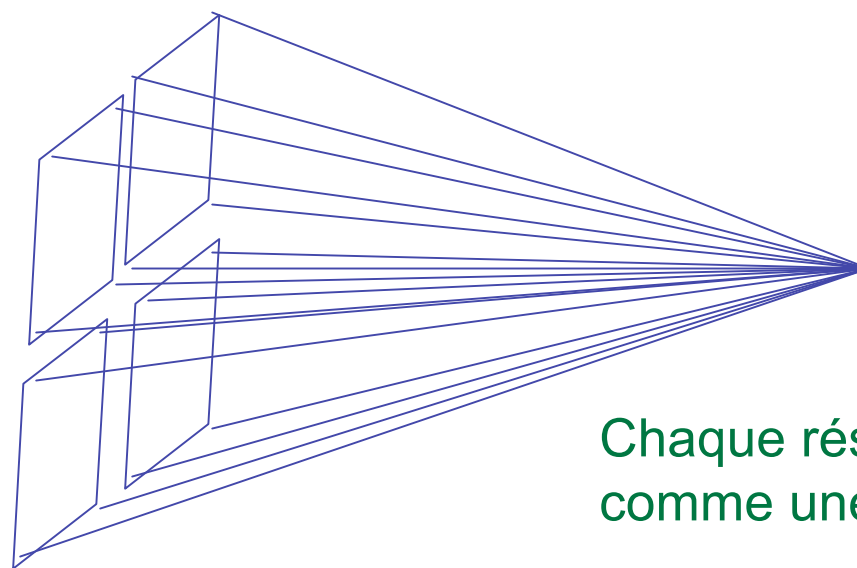
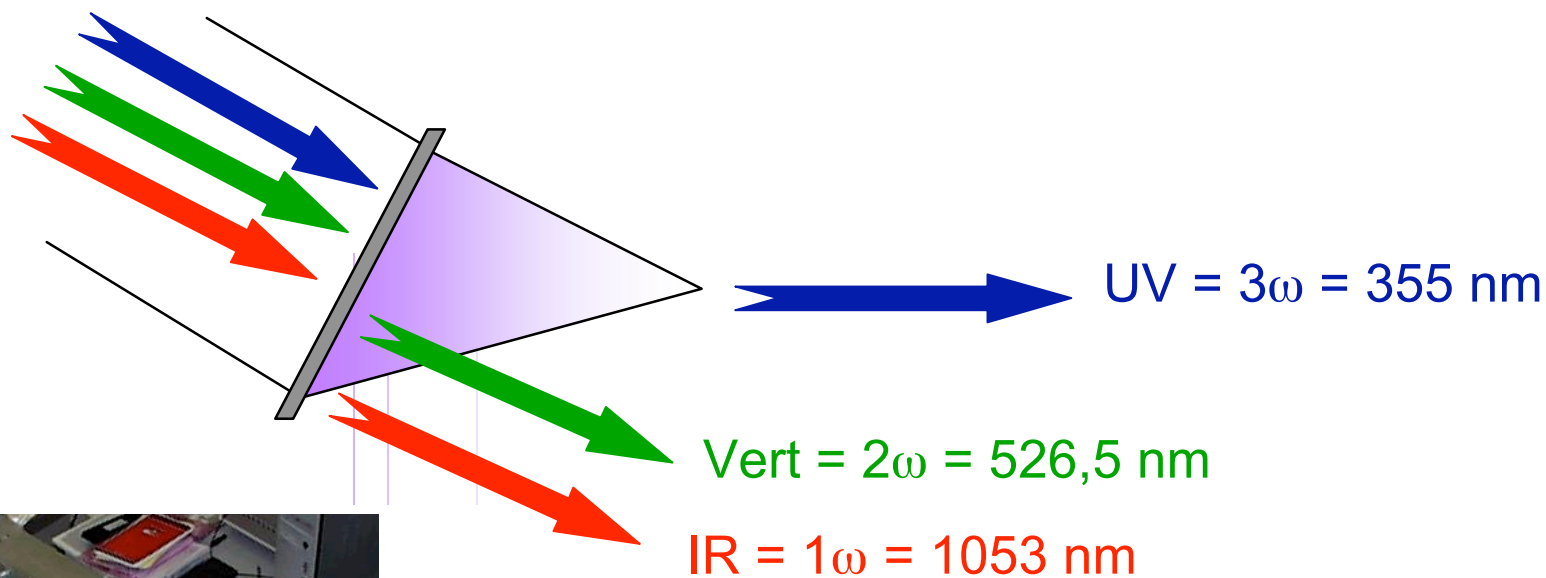


Avec un réseau, on sépare angulairement les longueurs d'onde



A l'incidence de Bragg, on optimise le rendement de diffraction pour avoir un seul ordre

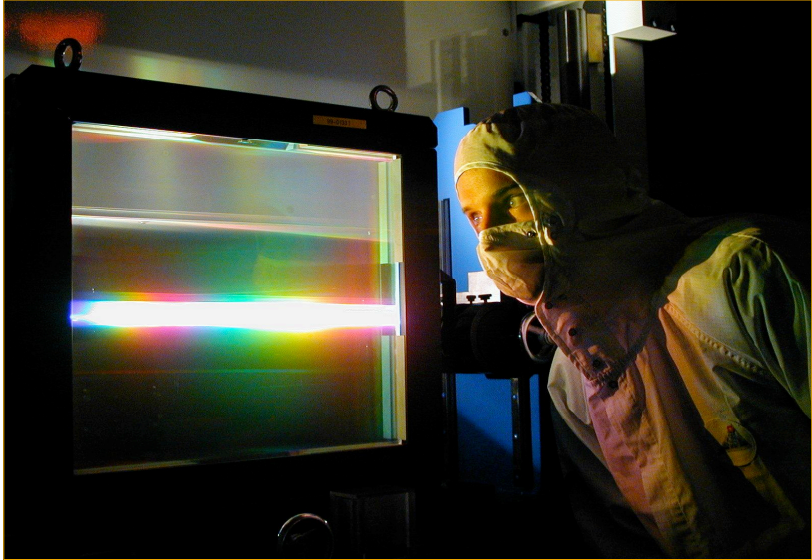
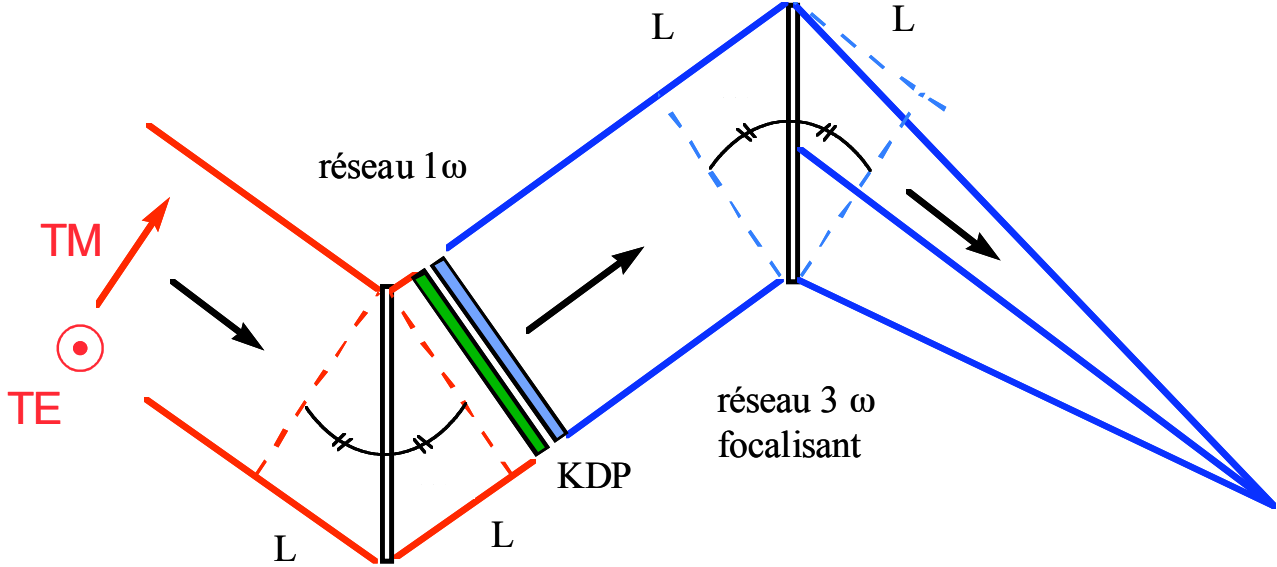
Focalisons avec un réseau : l'UV seulement !



Avec 4 faisceaux, on arrive à ce schéma

Chaque réseau travaille comme une sous-pupille

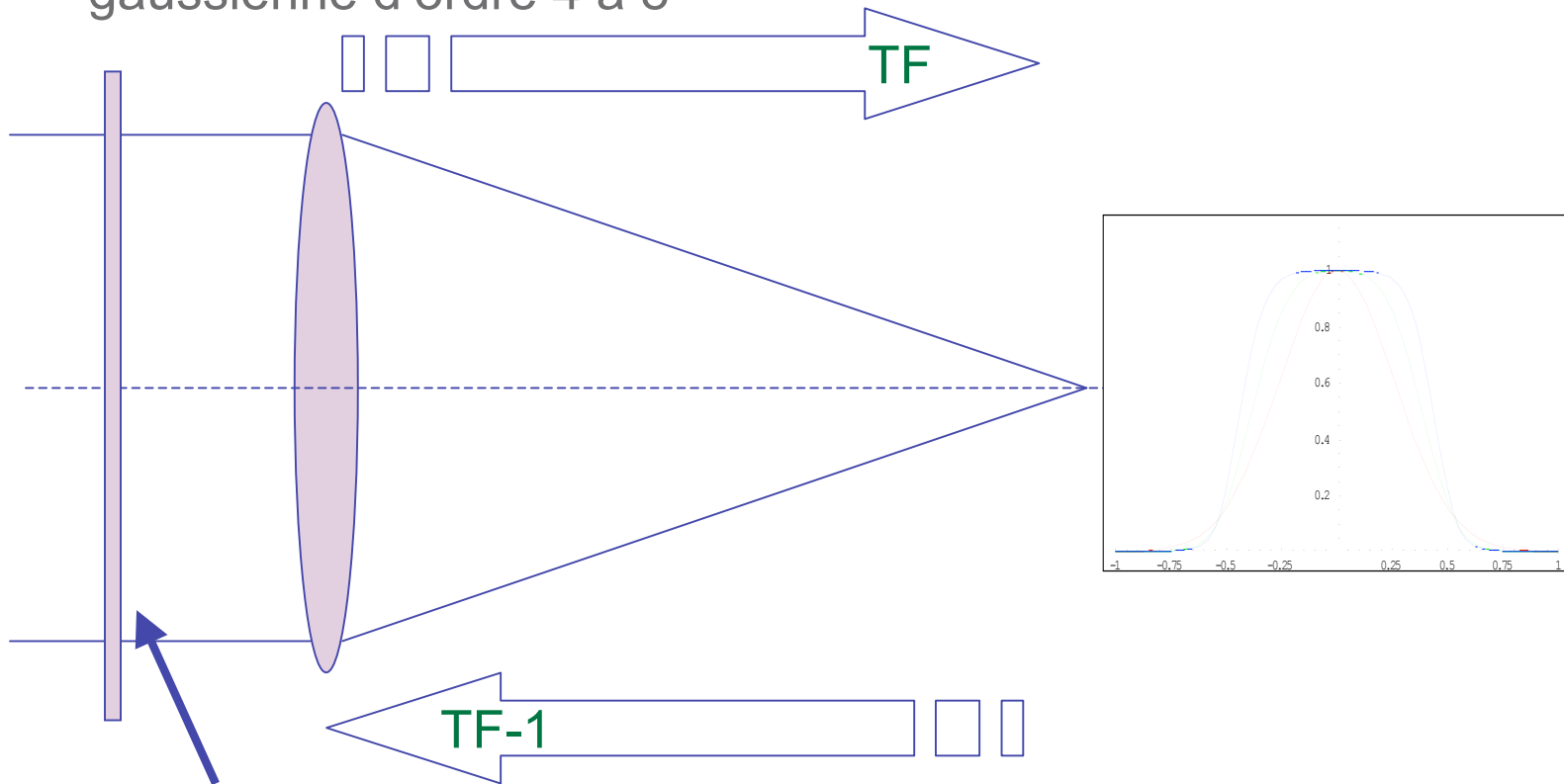
Conversion de fréquence et de focalisation



Encore plus fort !



- Au foyer, je veux une tache focale dont l'enveloppe est une super gaussienne d'ordre 4 à 8



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 réalisé ça aussi



Et

on

a

obtenu

ça



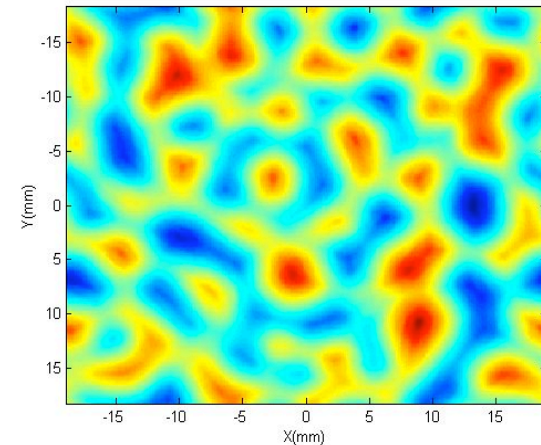
Pas mal ?

A 3% du sommet

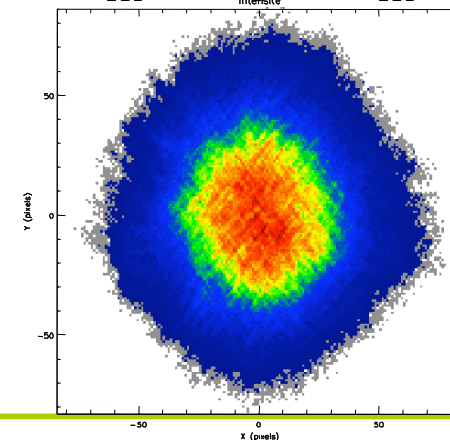
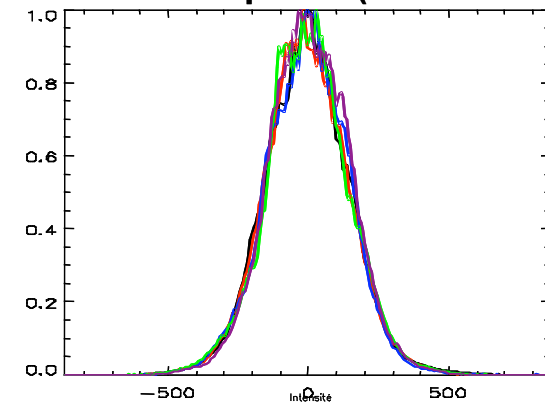
La dimension est de 800 μm

Au sommet

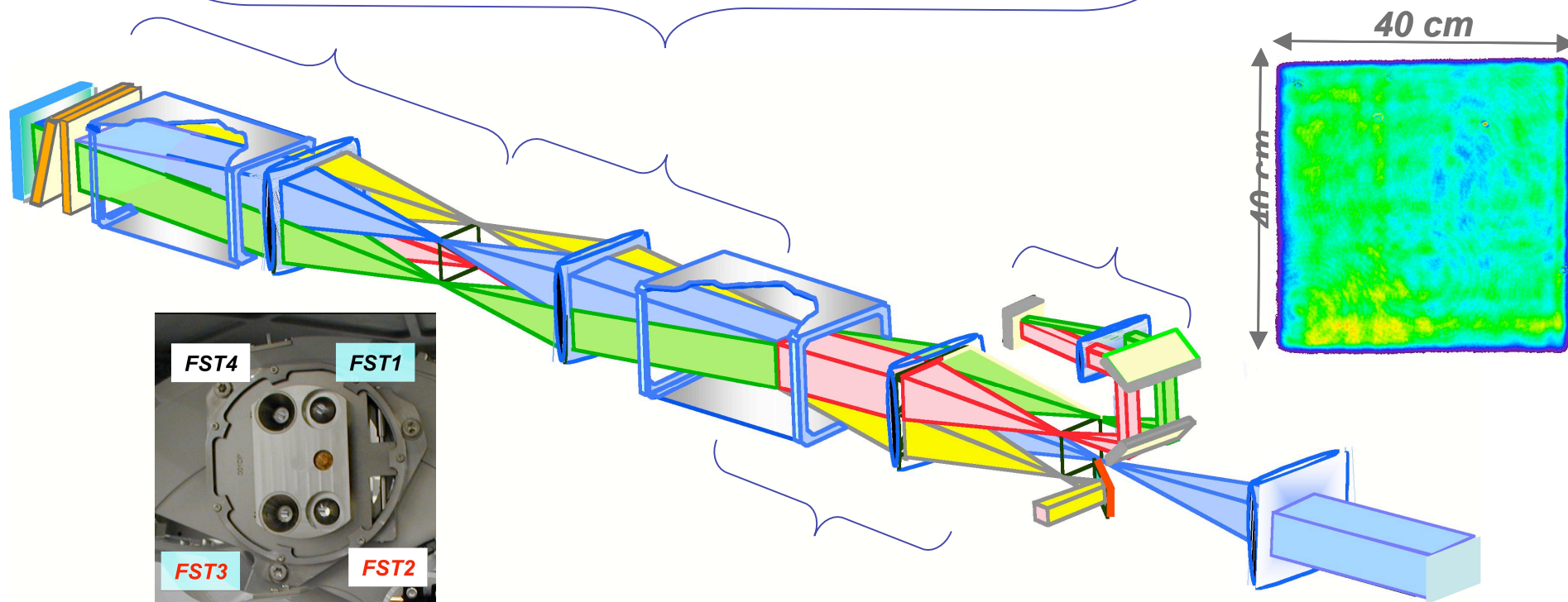
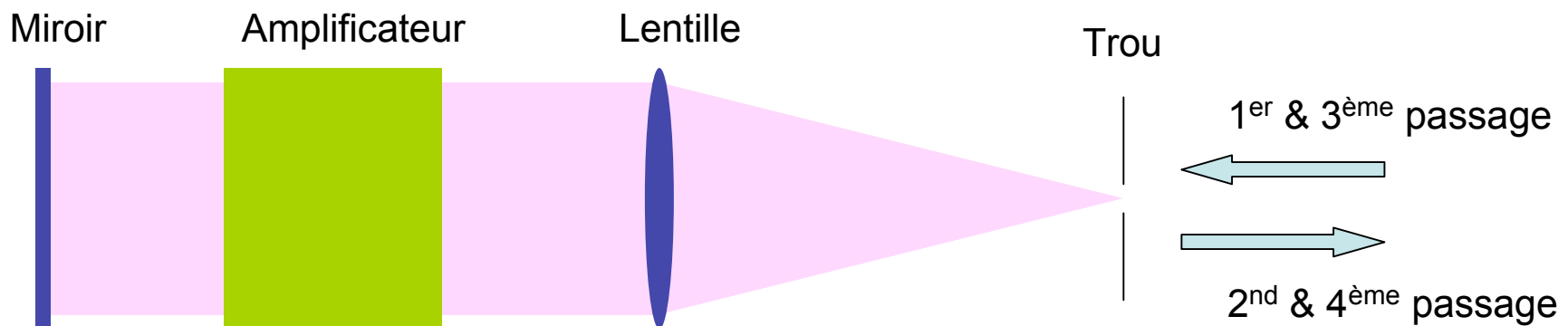
On a $I=10^{+15}$ W/cm²



Profil de phase (PV = 24.7 rad)

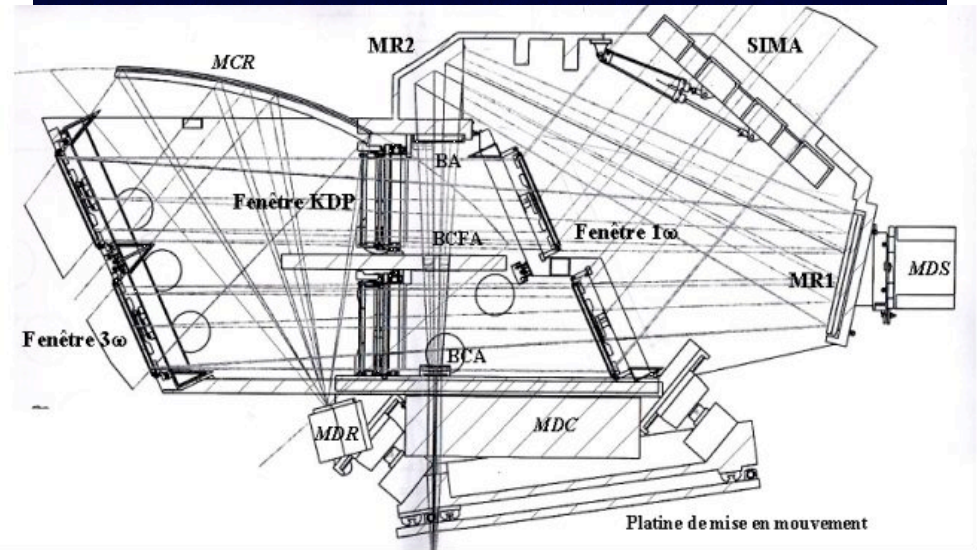
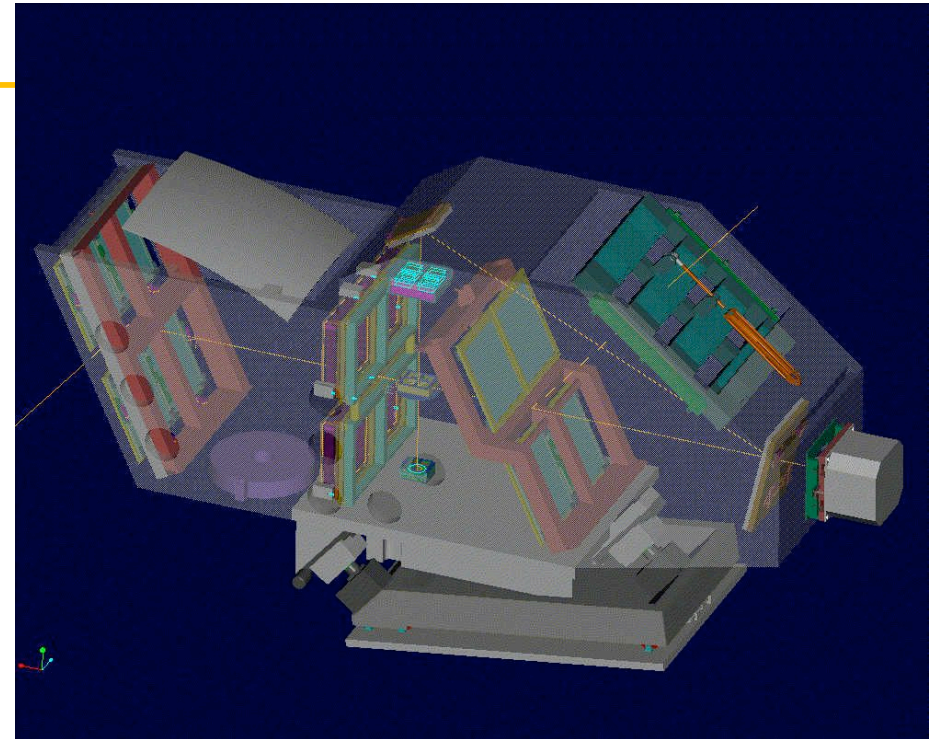
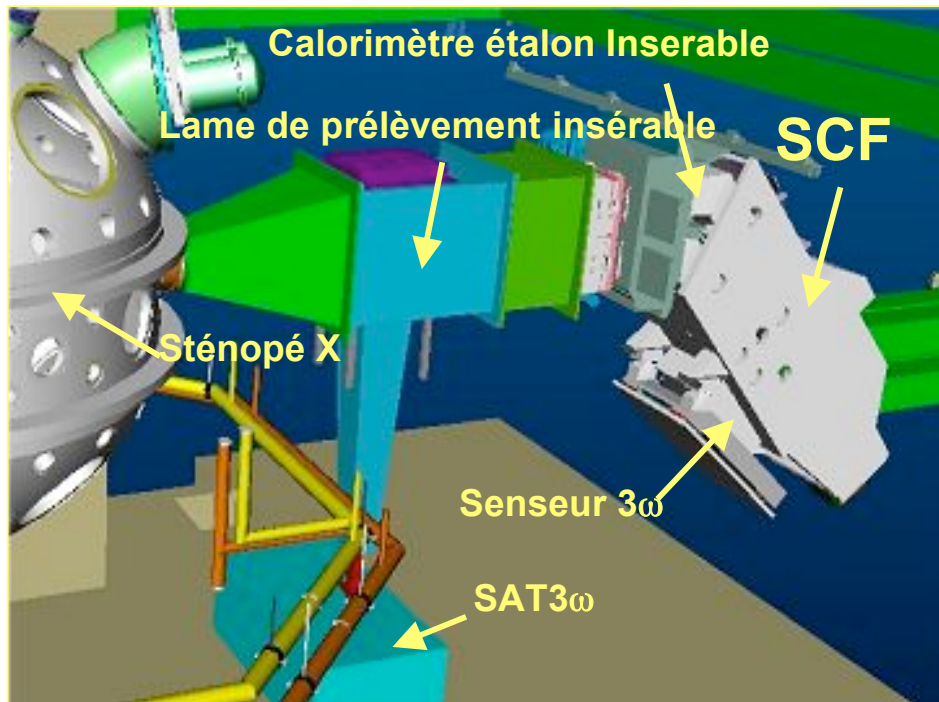


On associe les différents principes + quelques ruses

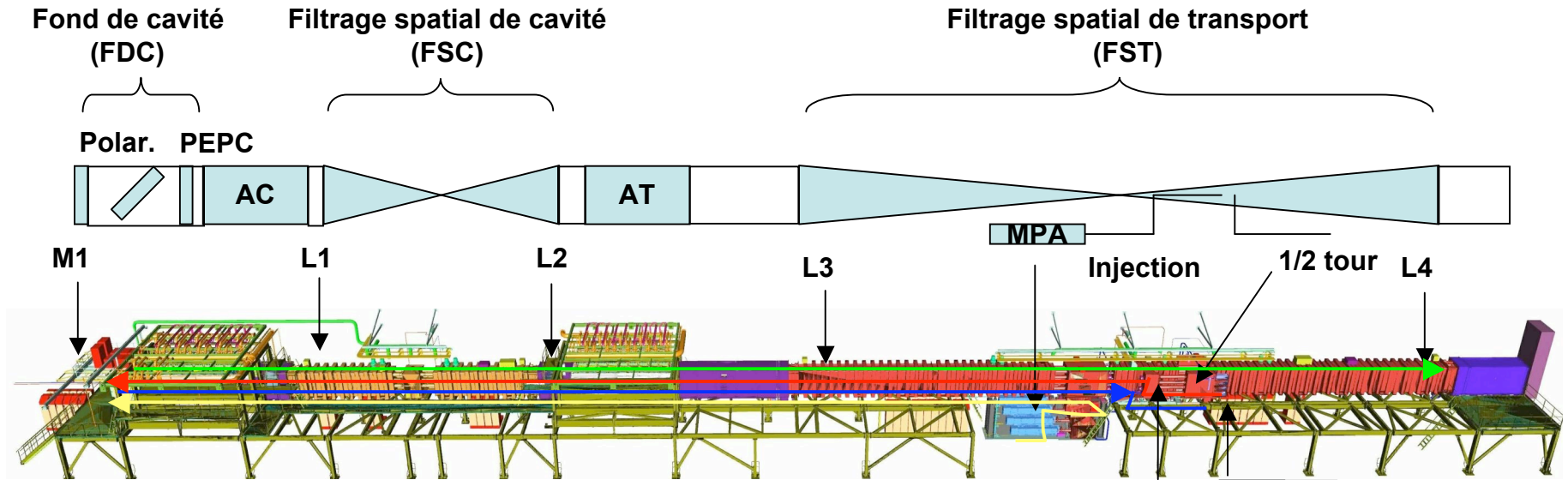




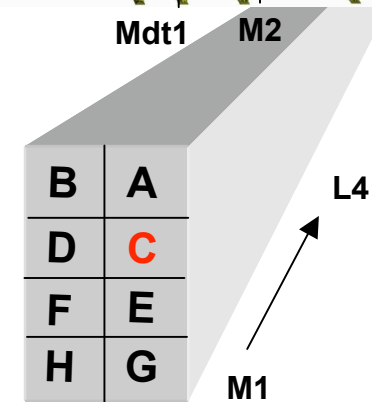
SCF : Système de Conversion de Fréquence et de Focalisation



Le prototype LIL : sous-système amplificateur



Concept faisceaux par fagots :
4 faisceaux = 1 quadruplet

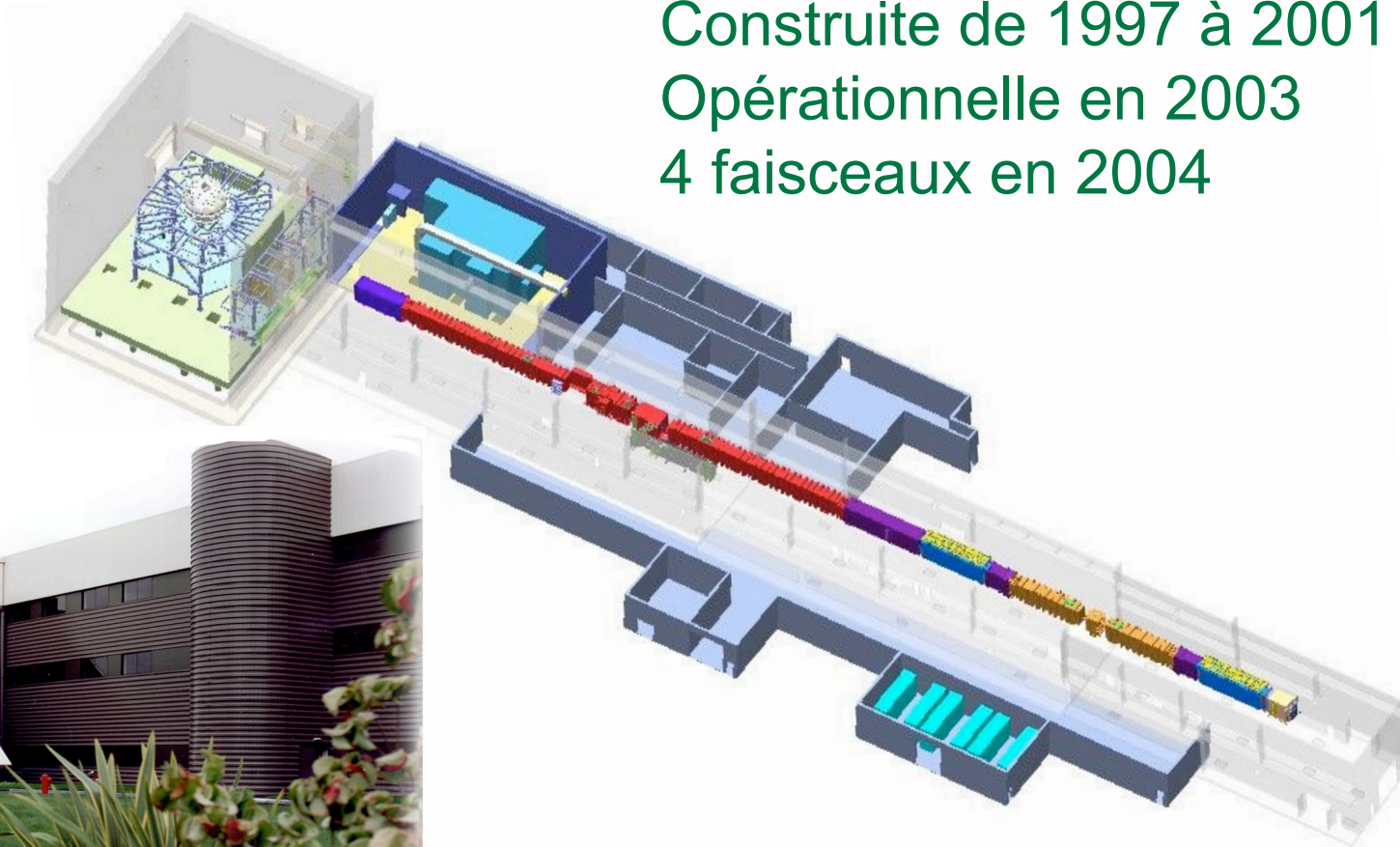


Appellation
des 8 faisceaux

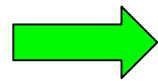
La Ligne d'Intégration Laser



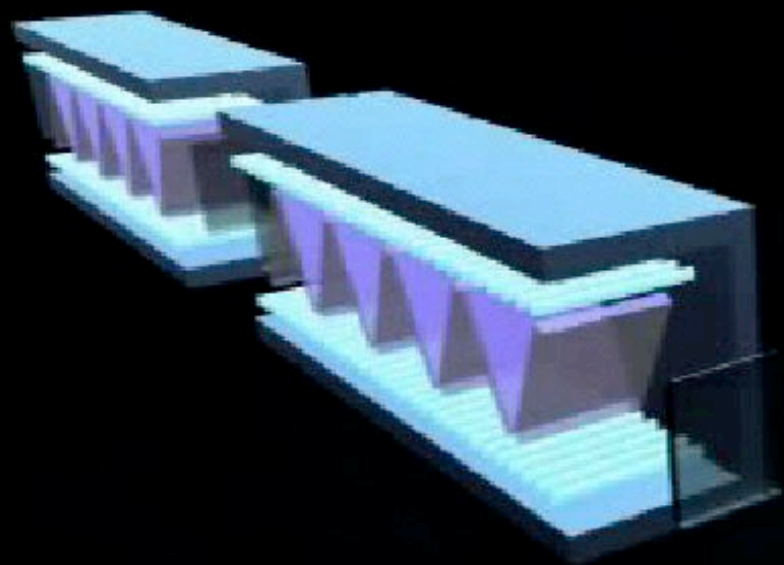
Construite de 1997 à 2001
Opérationnelle en 2003
4 faisceaux en 2004



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



**Retour d'expérience
pour le LMJ**

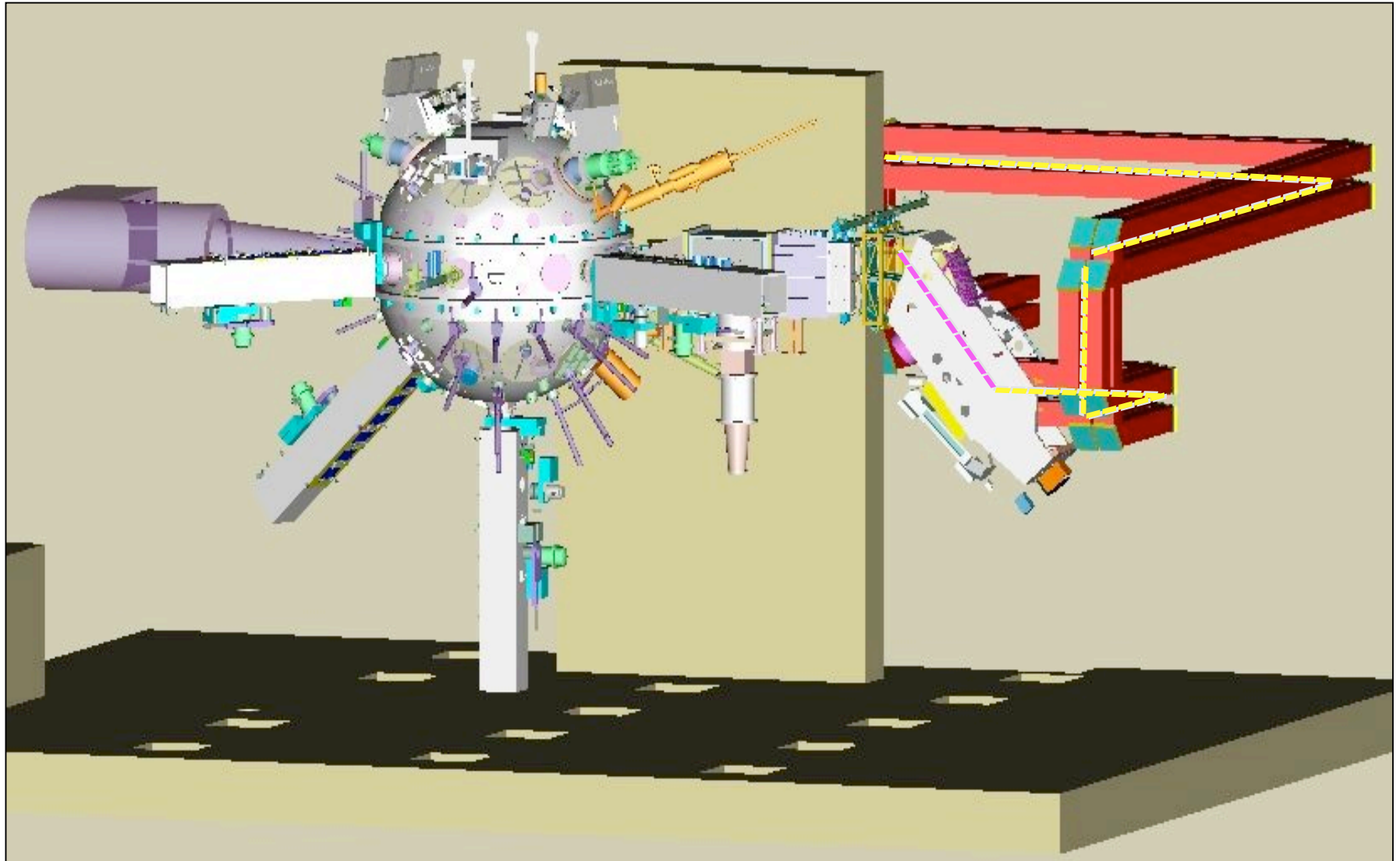


Unités Remplaçables en Ligne de la Section Amplificatrice

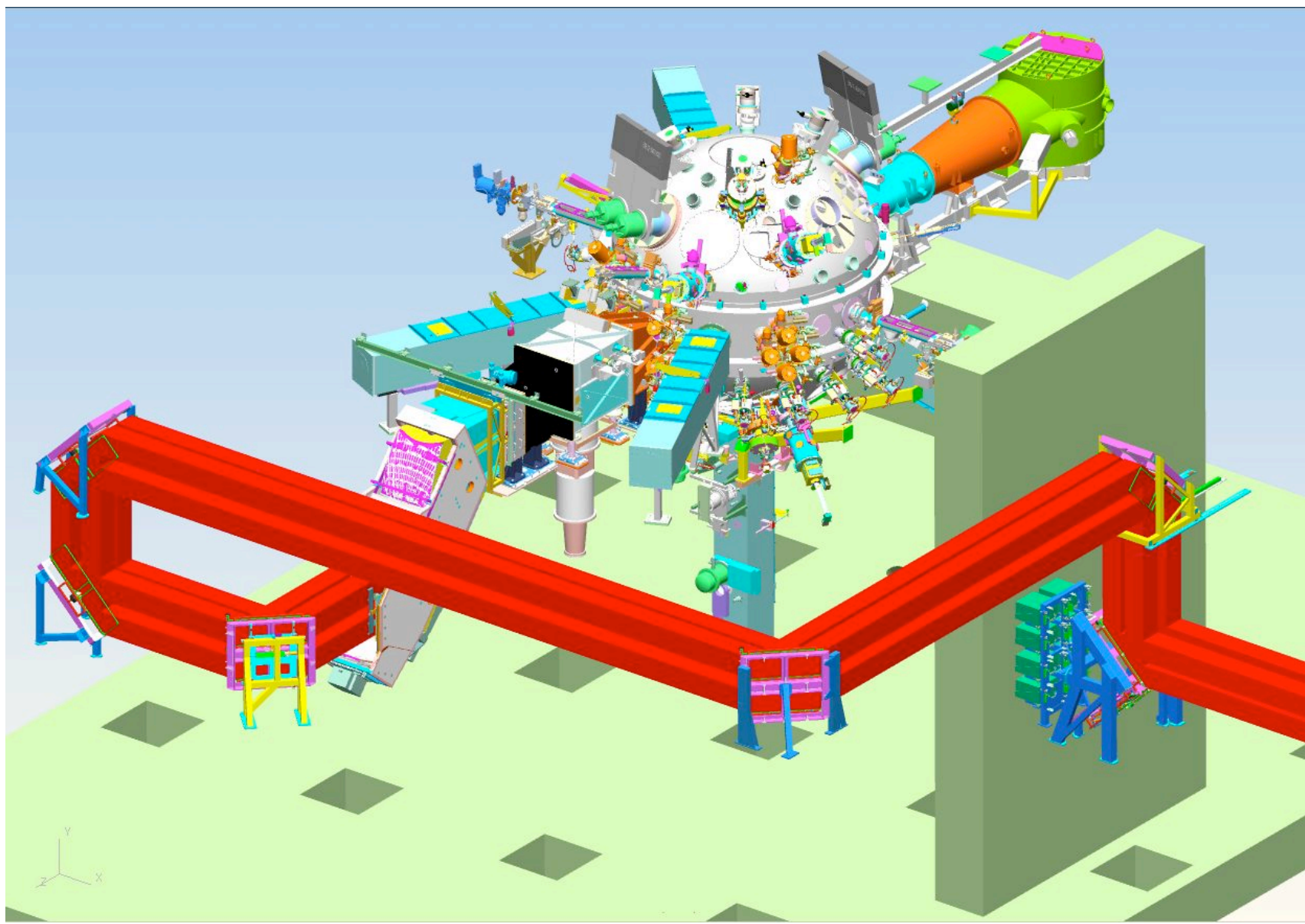


Transport de l'impulsion laser vers le Hall Expérimental

cea



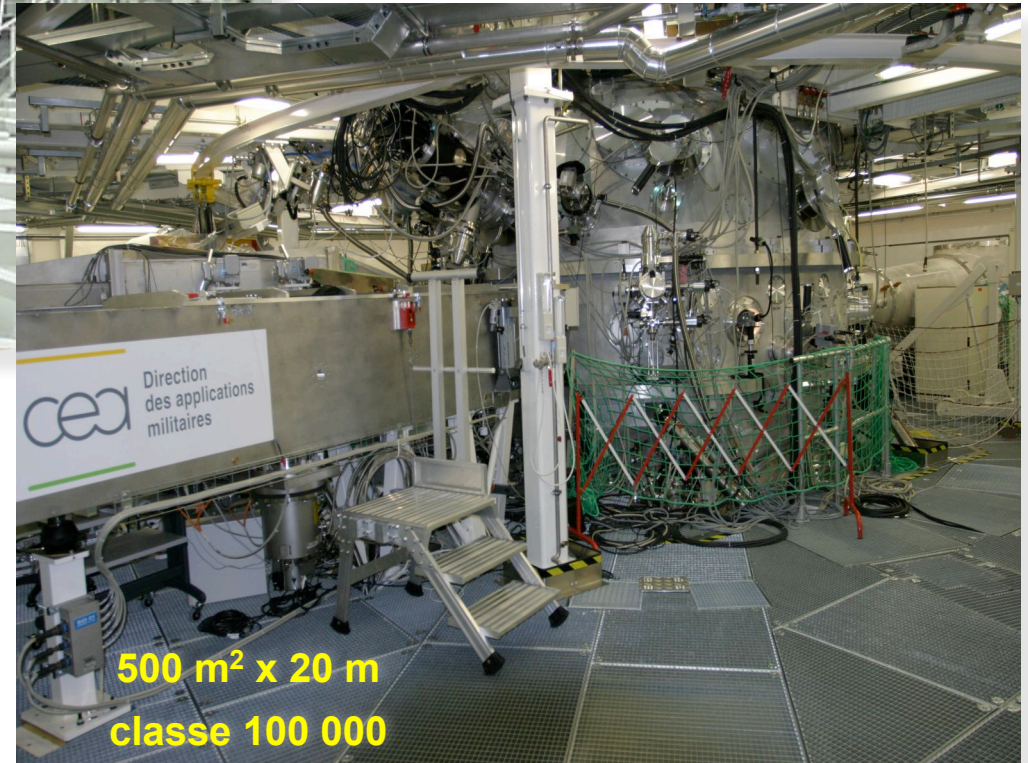
Situation actuelle : QUADRUPLLET



Halls laser et d'expériences LIL



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

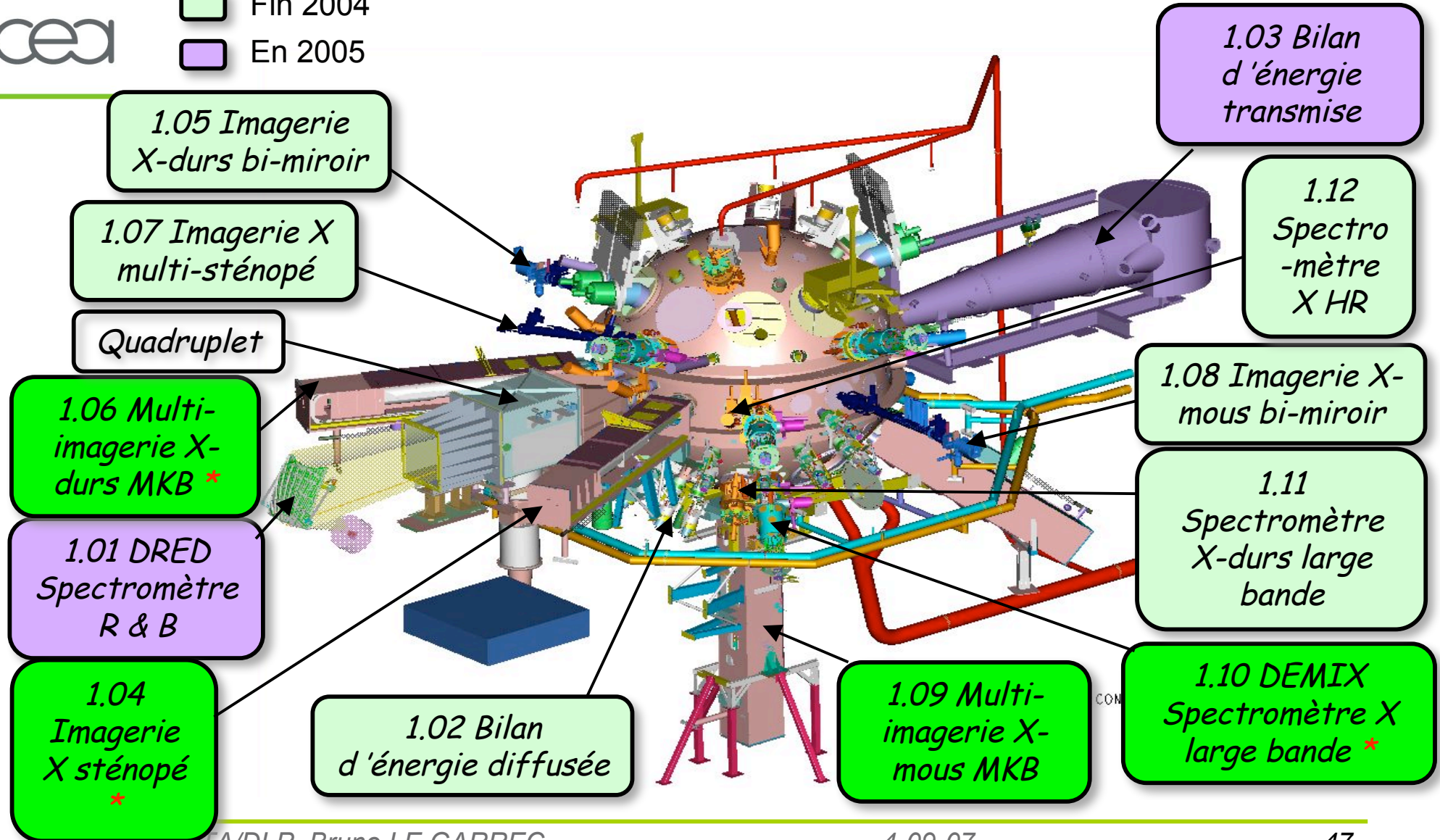


500 m² x 20 m
classe 100 000

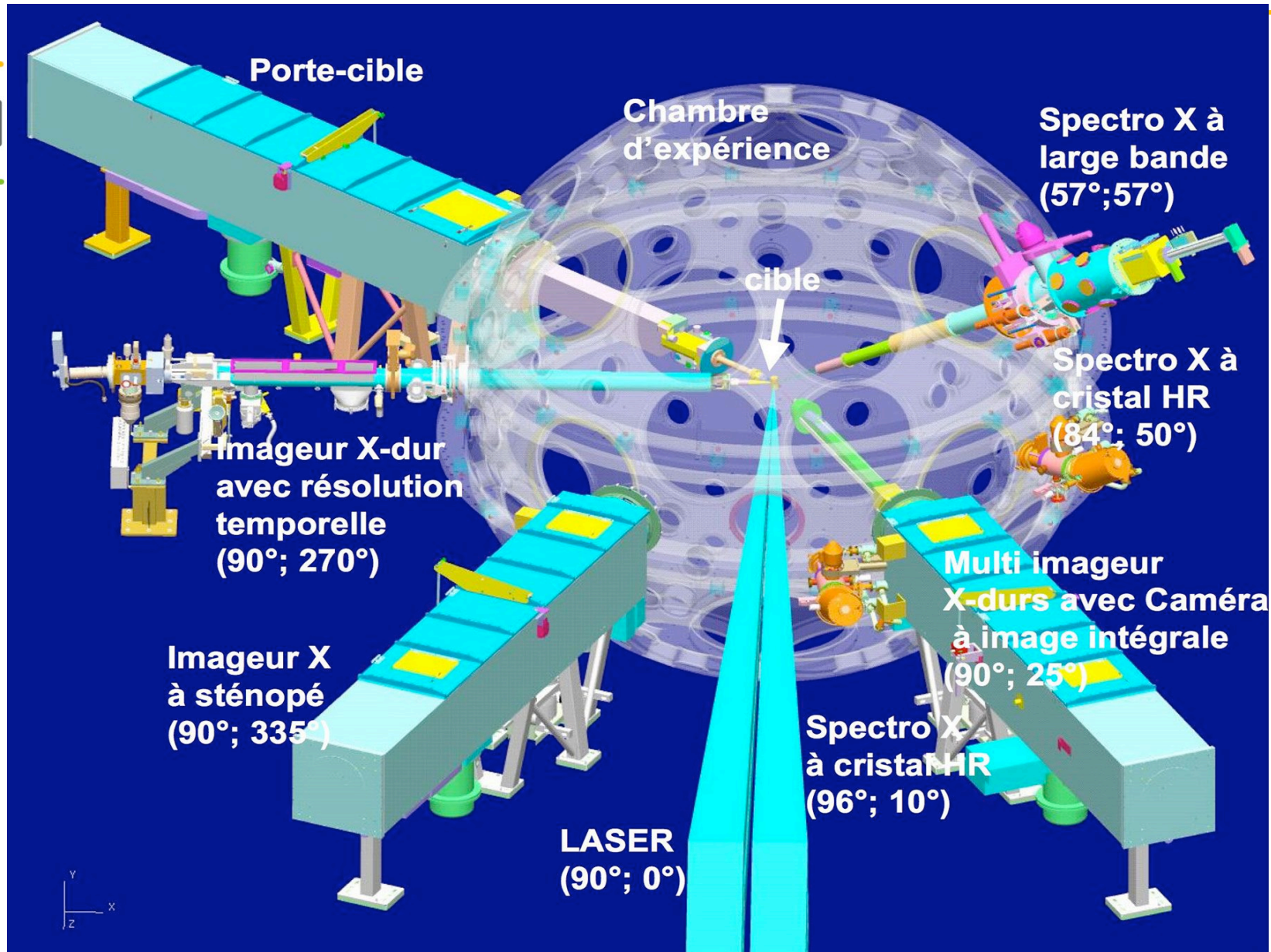
Diagnosics Plasma sur la LIL



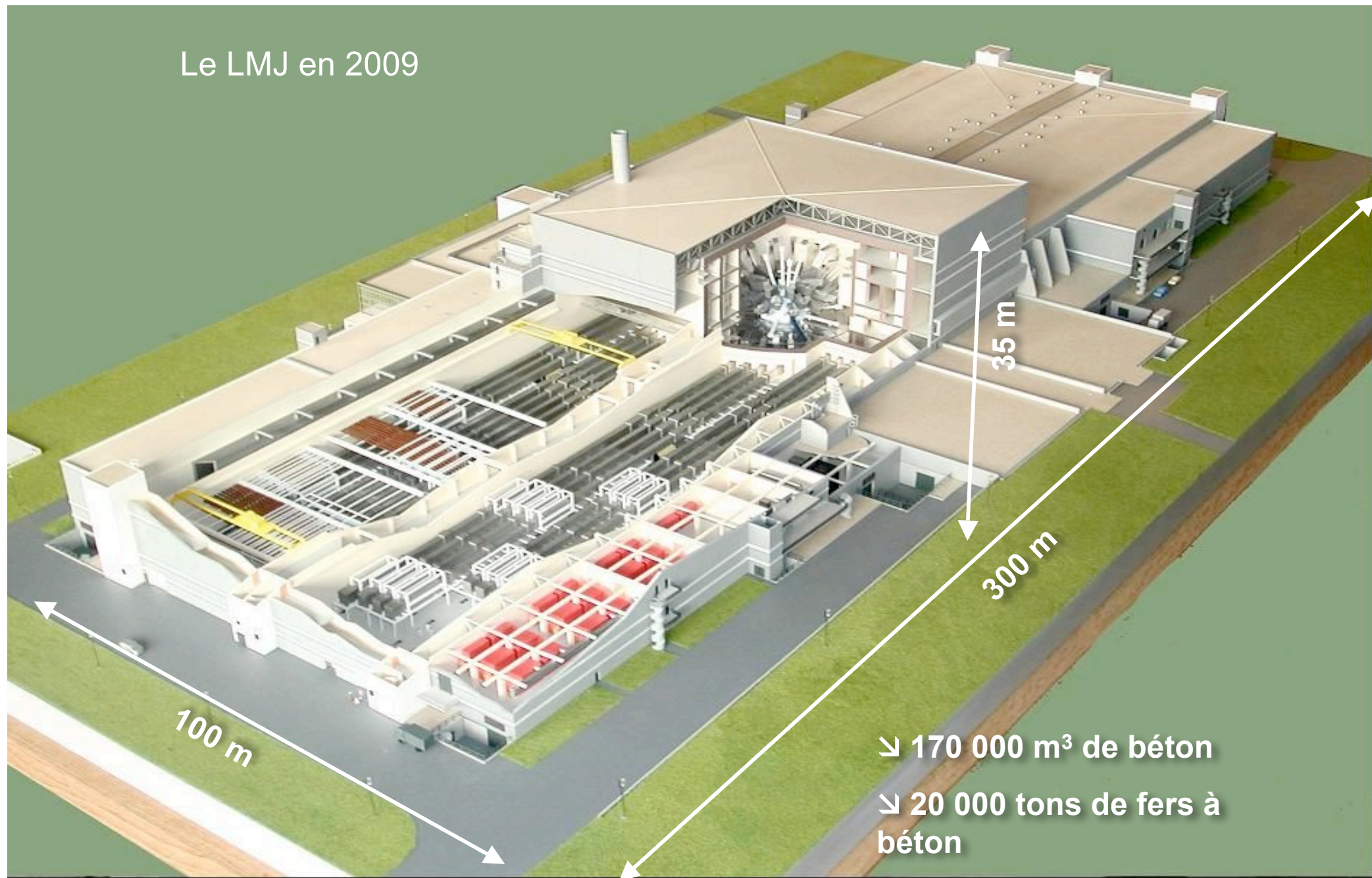
- Pour exp 2004
- Fin 2004
- En 2005



Système d'expérience LIL



Le LMJ en 2009





BATIMENT LMJ - RdC
Zones Est/West

HALLS LASER
classe 100 000

2 halls indépendants

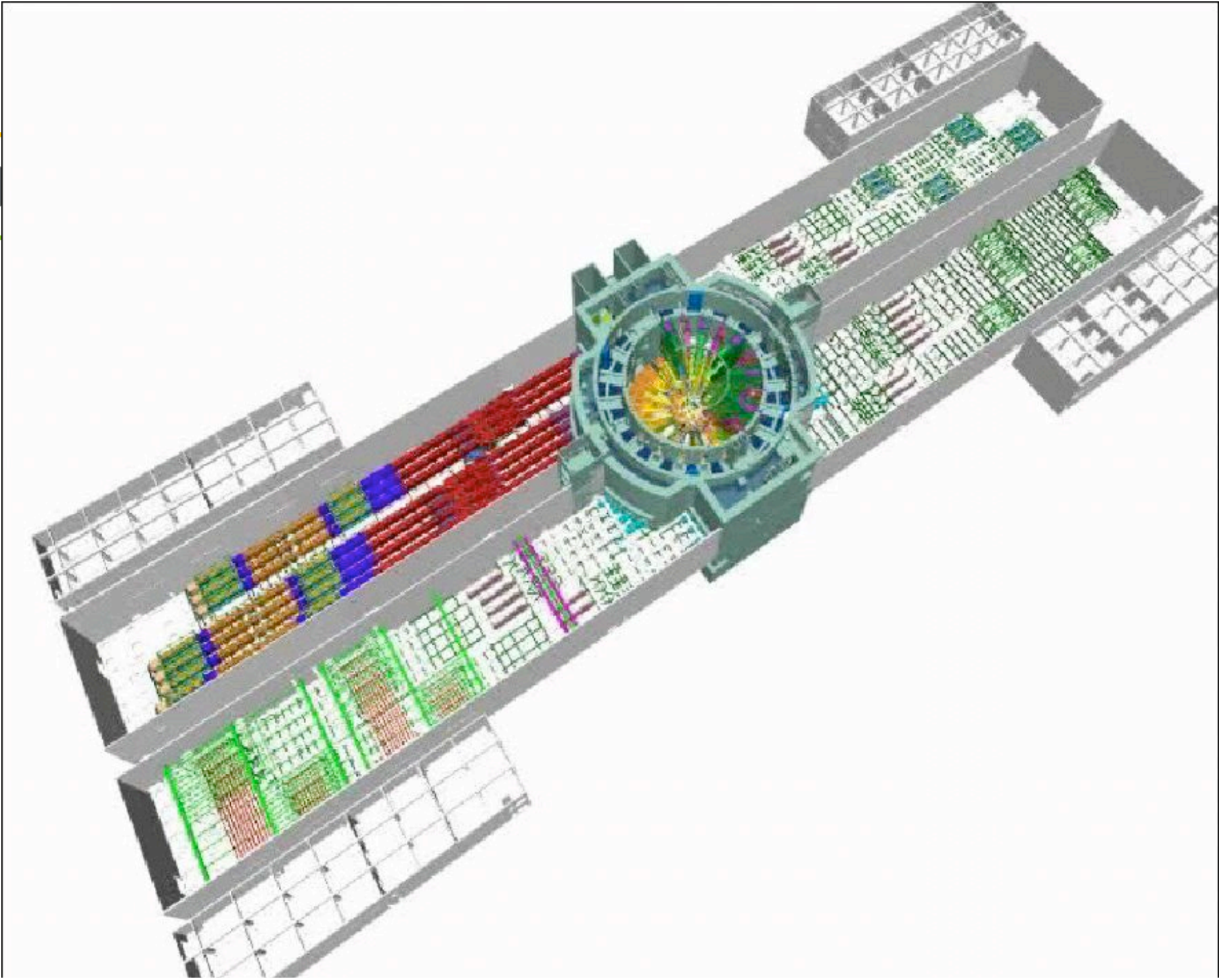
Galerie Centrale

Les locaux techniques - SS1

Sas Matériels -
cl 100 000

3 Sas Accès
Matériels
cl 100 000

Sous-stations Energie
et Fluides



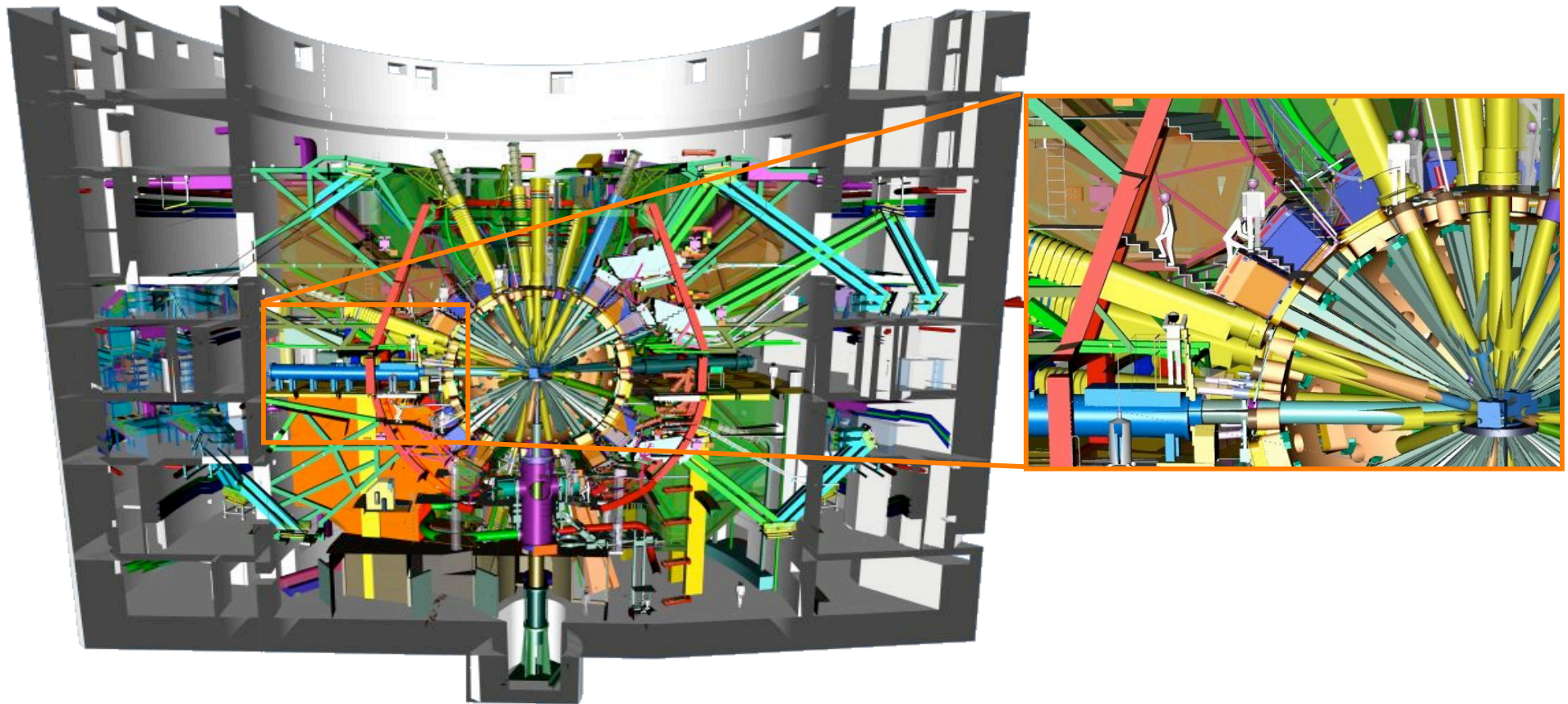
Introduction de la chambre du Laser Mégajoule (nov 2006)

cea

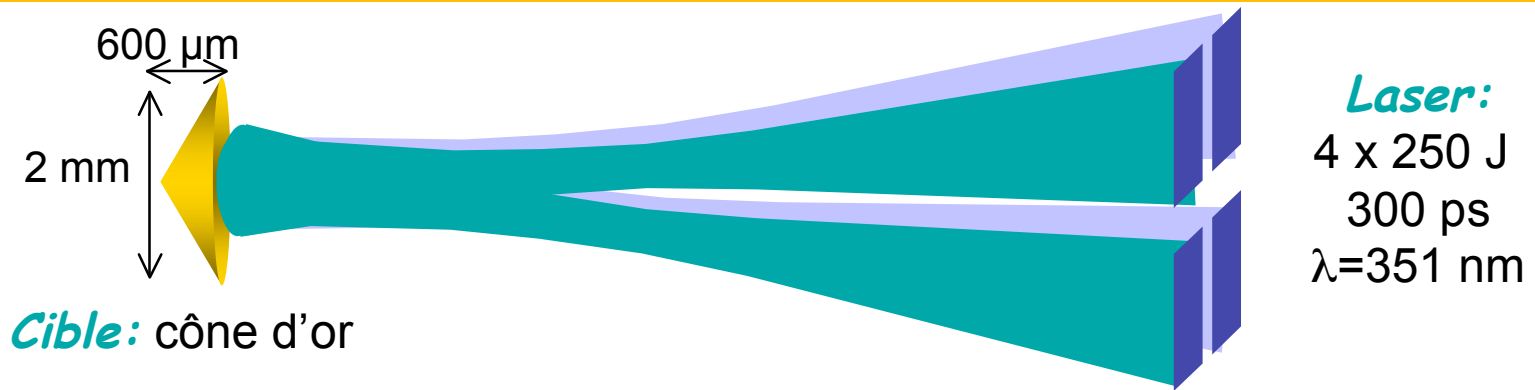


« Crédits photo: Philippe LABEGUERIE »

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

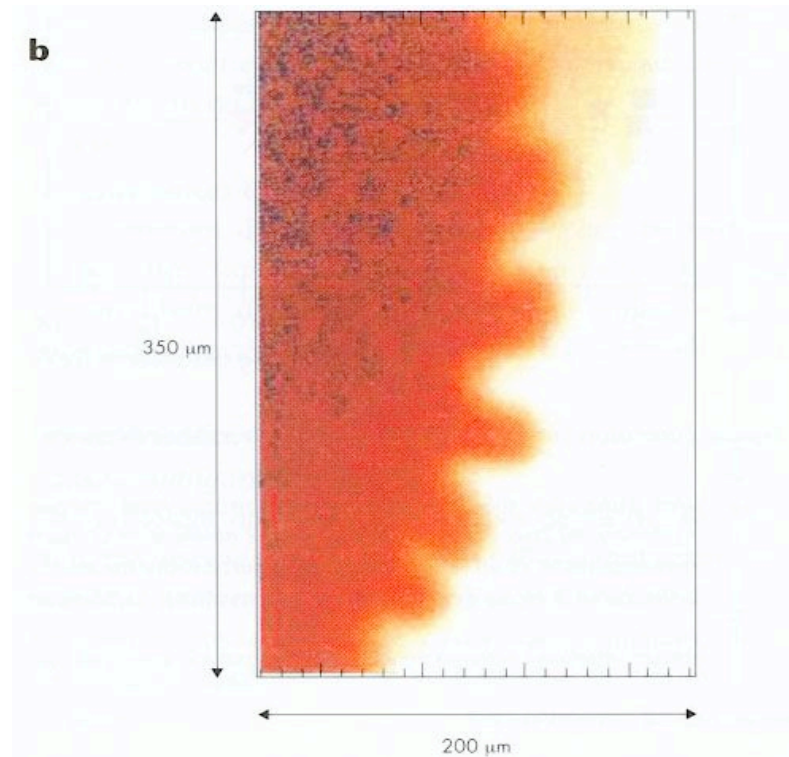
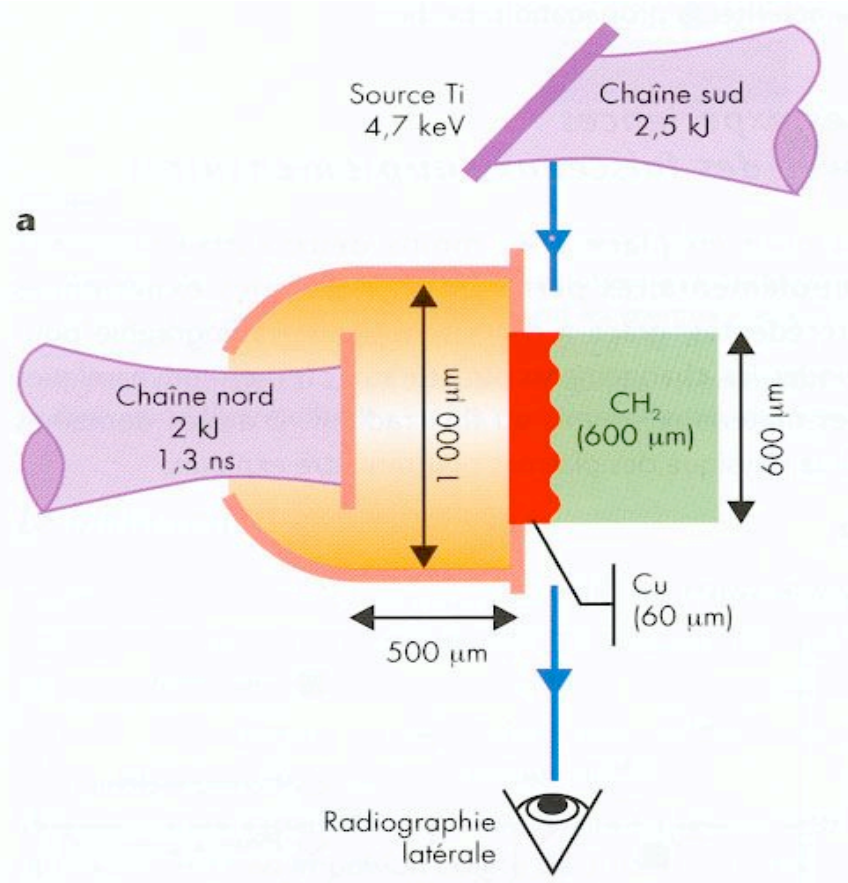


LIL: Validation Concept Expérimental JET (1 seul Tir)



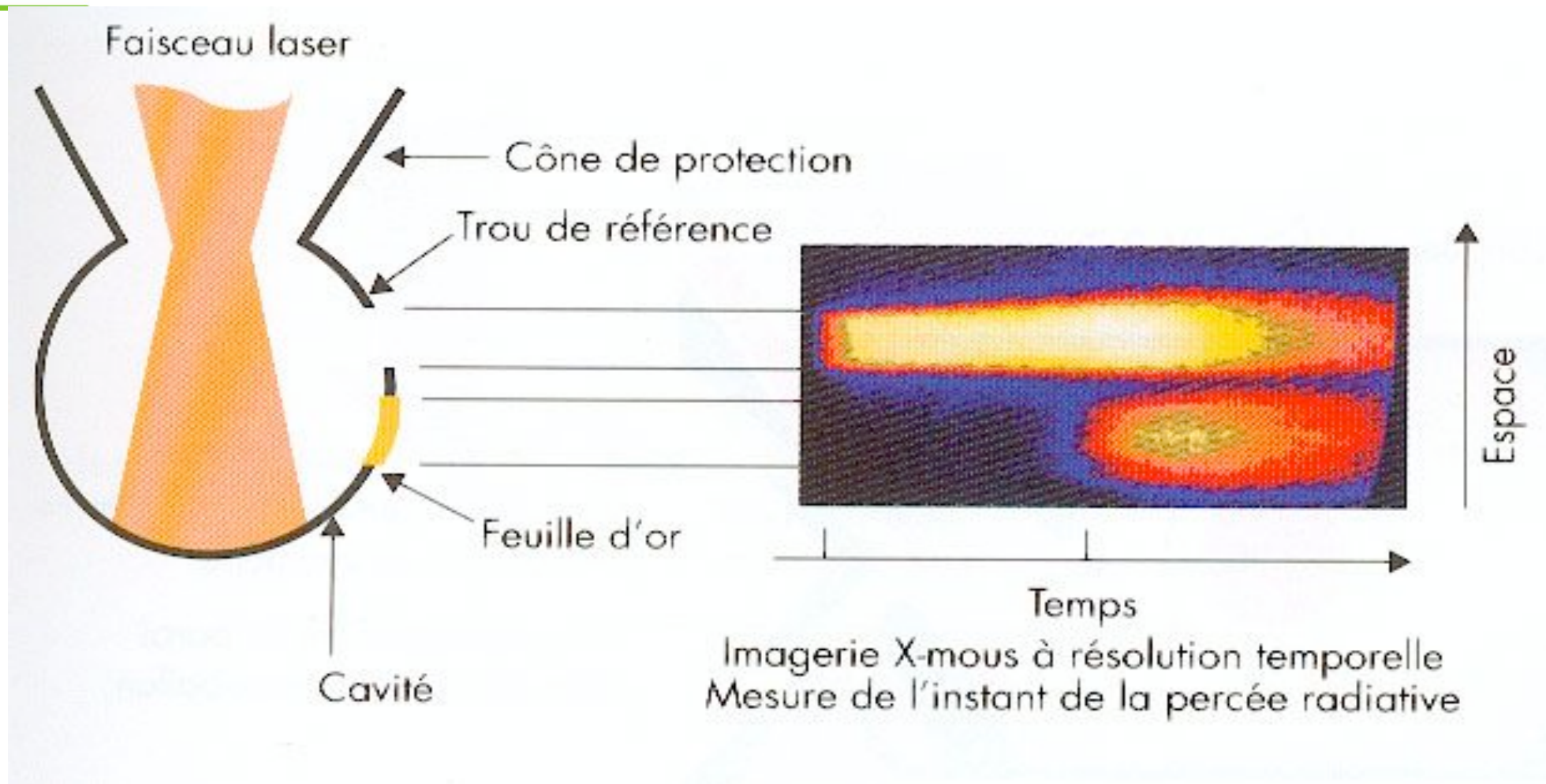
	<i>Attendu</i>	<i>Observé</i>
IMAGERIE X mou à 90°	<p>Jet de plasma</p> <p>Cône</p>	<p>Cône</p> <p>Jet de plasma</p> <p>obturation (défaut d'alignement du diagnostic)</p>
IMAGERIE X dur face avant	<p>Cône</p> <p>Grille d'obturation pas 100 μm</p> <p>impact laser sur cible</p>	<p>ombre de la grille</p>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

Mesures d'instabilités hydrodynamiques en astrophysique



Le nombre d'Atwood du couple Cu/CH₂ 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)

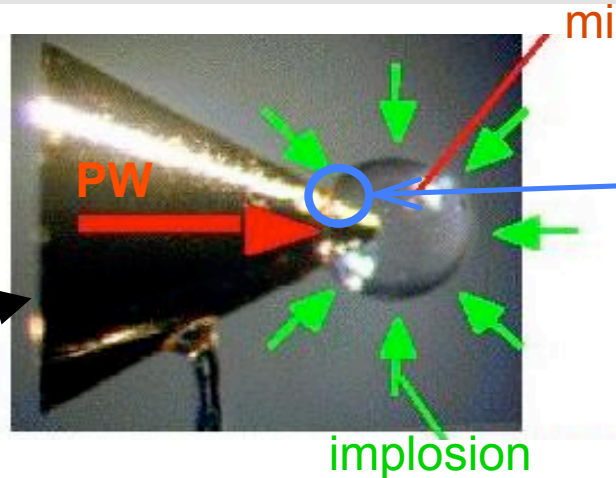
Sources de rayonnement X



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



OBJECTIF Fusion par Confinement Inertiel: Allumage rapide (PW)



Cône d'or pour guider le PW

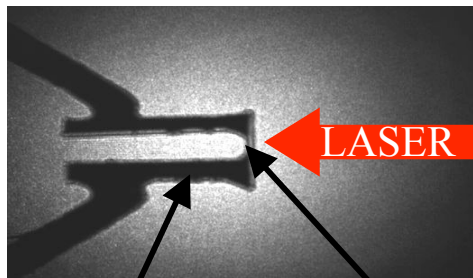
micro-ballon

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

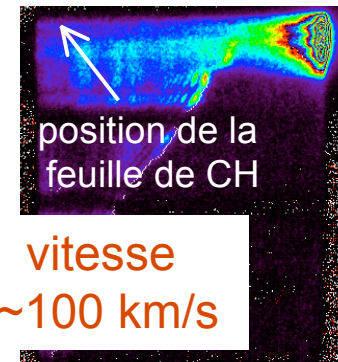


100 J
1 ns
1054 nm

plaque d'or (idem cône)

feuille de CH (idem micro-ballon)

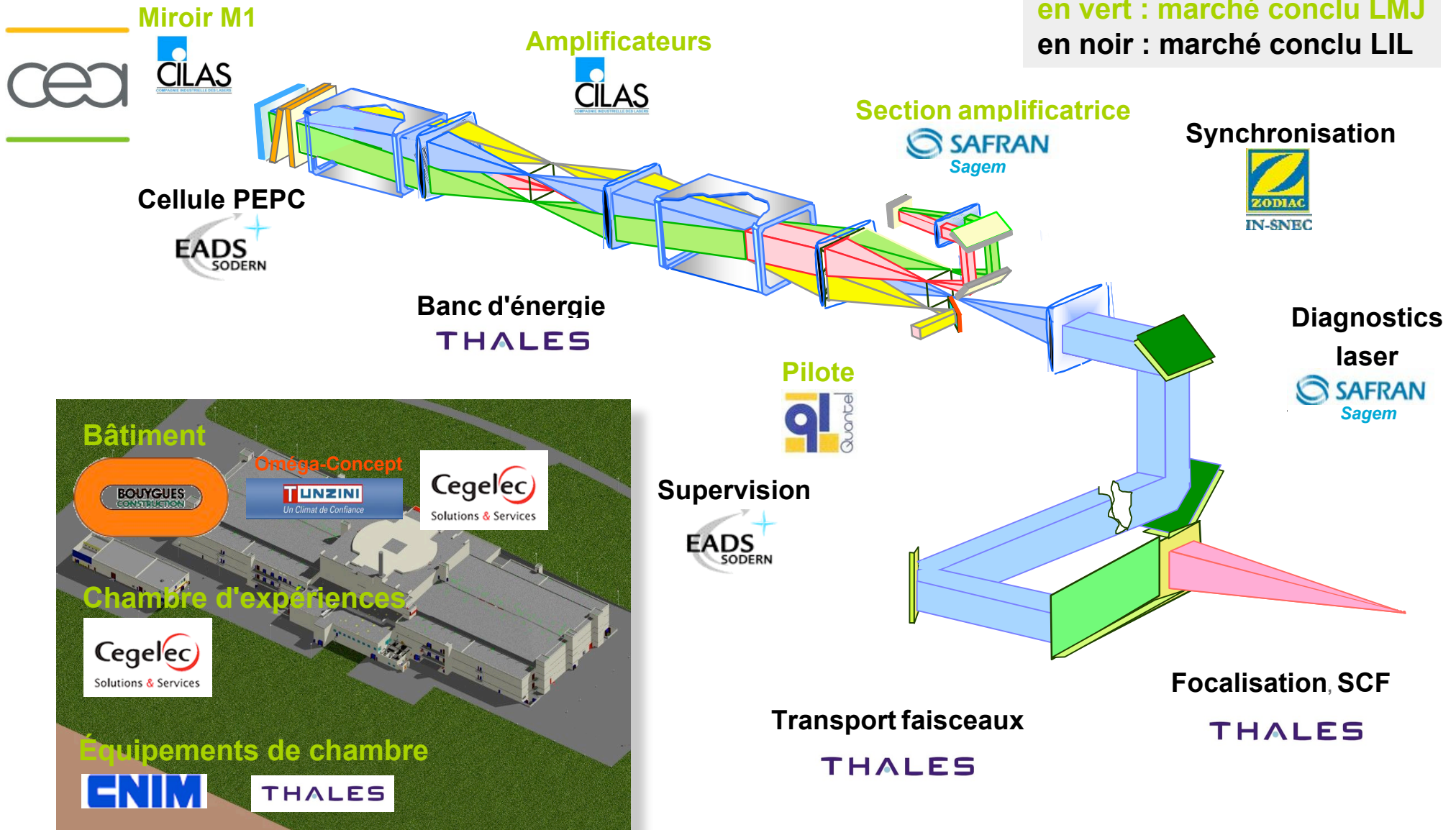
espace



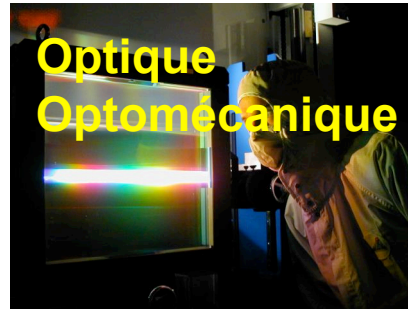
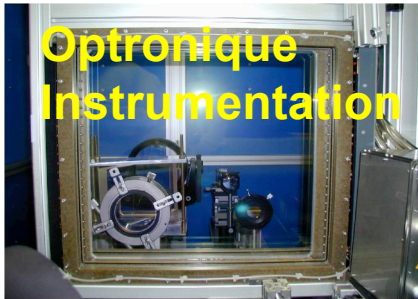
vitesse ~100 km/s

temps

LMJ : 17 sous-ensembles industriels

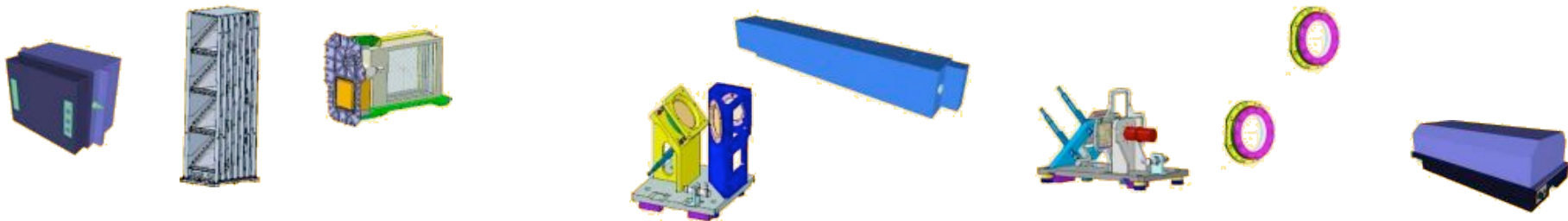
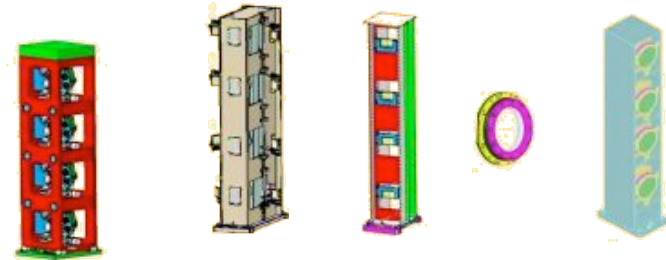
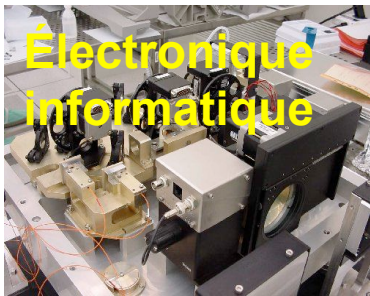


Les principaux besoins industriels liés au LMJ



Montage 5 ans

Maintenance > 30 ans



Véhicule de transfert pour la maintenance des URL

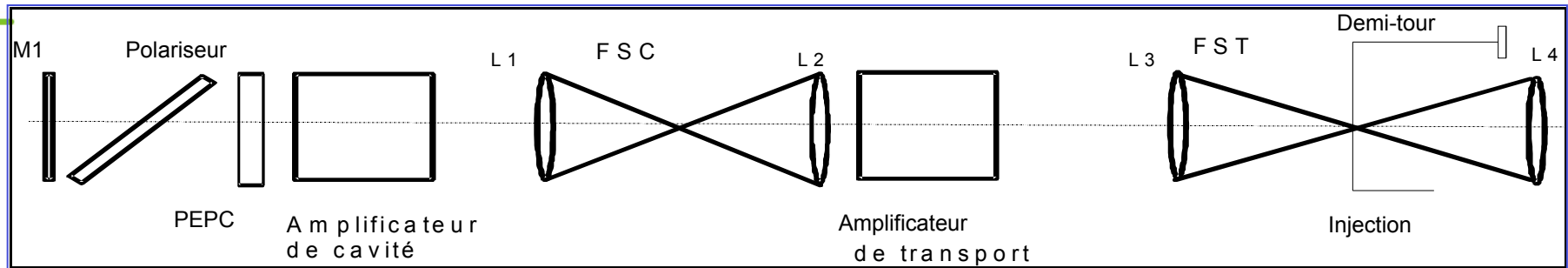
cea



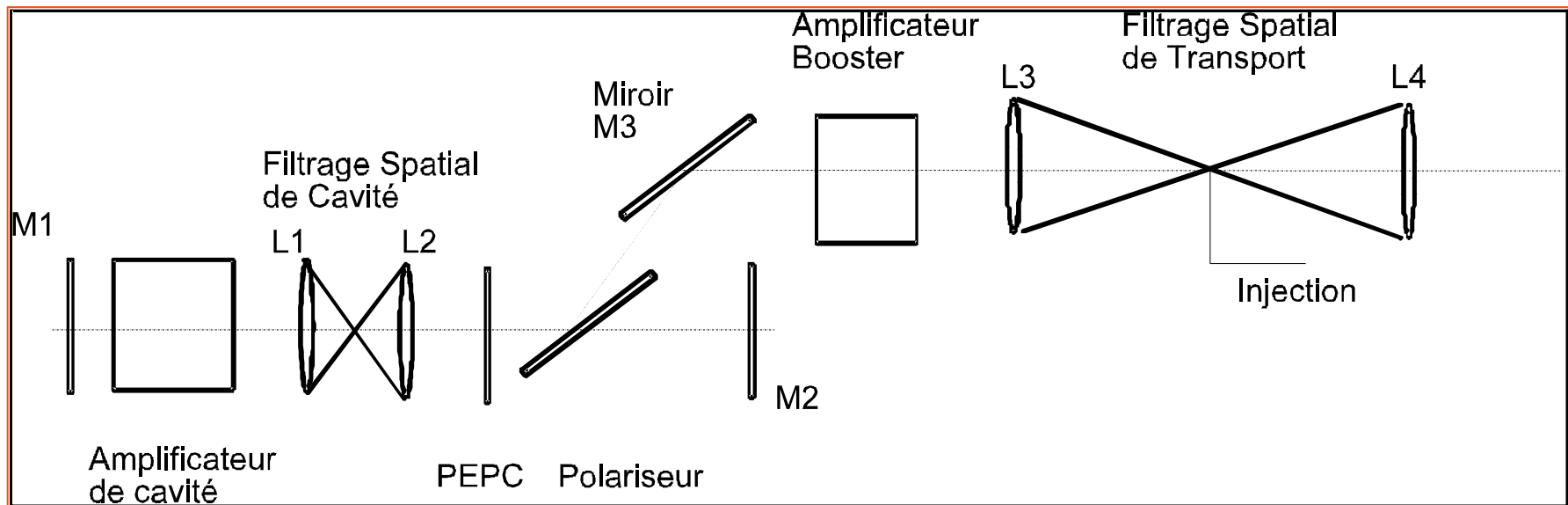
Comparaison des schémas de base LMJ et NIF : structure de la partie amplificatrice à 1053 nm



LMJ : amplificateur 4 passages « linéaire »



NIF : amplificateur régénératif + booster sur 2 plans



Comparaison des schémas de base **LMJ** et **NIF**



•=> variantes LMJ (multiplexage angulaire) et NIF (régénératif)

- **240 faisceaux**
- **configuration 9/9 ou 9/7**
- **4320 plaques lasers**
- **4 passages = le faisceau traverse 72 (64) plaques**
- **pilote 0.5 J par faisceau**
- **fin de chaîne à 2 réseaux dont le 3ω focalisant**

- **192 faisceaux**
- **configuration 11/5**
- **3072 plaques lasers**
- **Ampli régénératif + 1 Ampli 2 passages**
« booster » = le faisceau traverse 54 plaques
- **pilote 3J par faisceau**
- **fin de chaîne classique à lentille et prisme**