



PALLAS

Prototype Accelerator Laser-Plasma

PALLAS - Contrôle et caractérisation d'une impulsion laser ultra intense femtoseconde



Pourquoi un laser pilote UHI pour l'accélération laser plasma

UHI : Ultra High Intensity, puissance pic > TW, durée < 100 fs.

Durée: Accélération laser-plasma a émergé avec l'apparition des lasers UHI avec des impulsions sub 50fs.

Excitation "résonante" :

$$c\tau_L \sim \lambda_p/\pi$$

τ_l durée de l'impulsion laser, λ_p longueur d'onde plasma $\sim 33 \mu\text{m}$ pour une densité électronique de $n_e = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, soit $\tau_l \sim 35 \text{ fs}$

Pourquoi un laser pilote UHl pour l'accélération laser plasma

Energie

Champ pondéromoteur laser $\propto \nabla a_0^2$, potentiel normalisé

$$a_0 = eE_L/m_e\omega_{LC}$$

$$a_0 = 0.855 \sqrt{I_L [\text{W.cm}^{-2}] \cdot \lambda_L^2 [\mu\text{m}]}$$

$a_0 > 1; I_L > 2.2 \times 10^{18} \text{ W.cm}^{-2} \rightarrow$ régime relativiste

Waist

En régime non-linéaire $a_0 > 1$ accord spatial dimension transverse laser / taille de la bulle

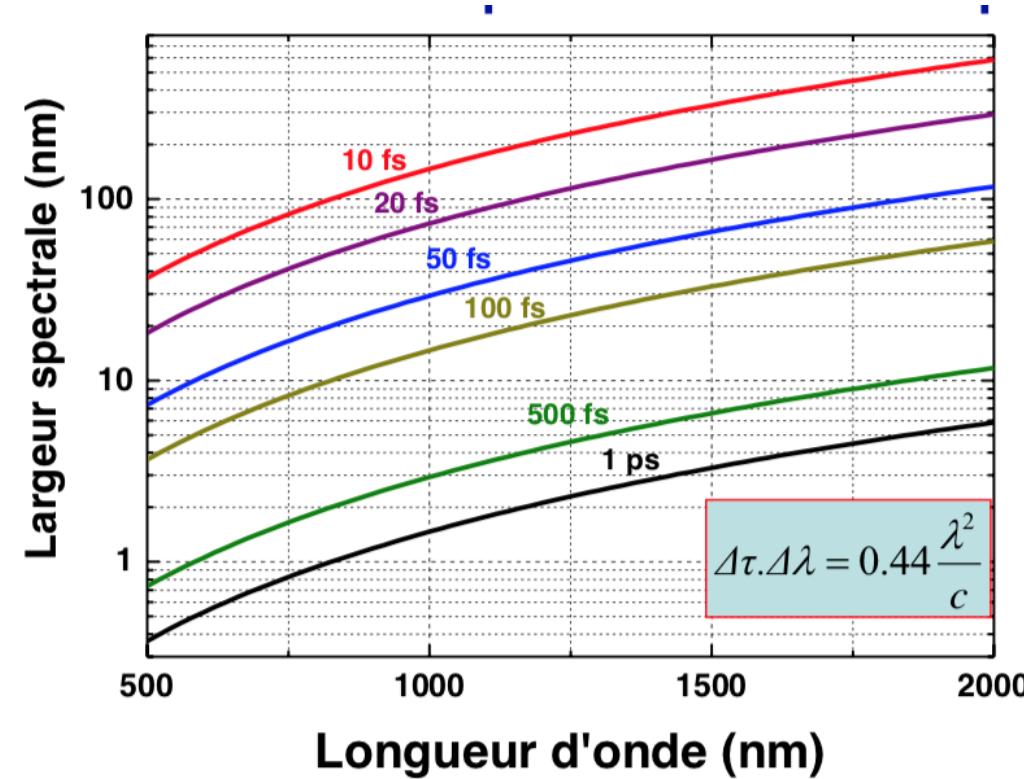
$$w_0^{(m)} \sim \sqrt{a_0} \lambda_p / \pi \sim 15 \mu\text{m}$$

pour $a_0 = 2, n_e = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

Conclusion: système laser $> 25 \text{ TW}$, impulsion femtoseconde, haute énergie $> 1 \text{ J}$ / impulsion

Rappel

Une impulsion laser **ultra-courte** \leftrightarrow spectre large



Challenge du contrôle laser pour l'ALP stable

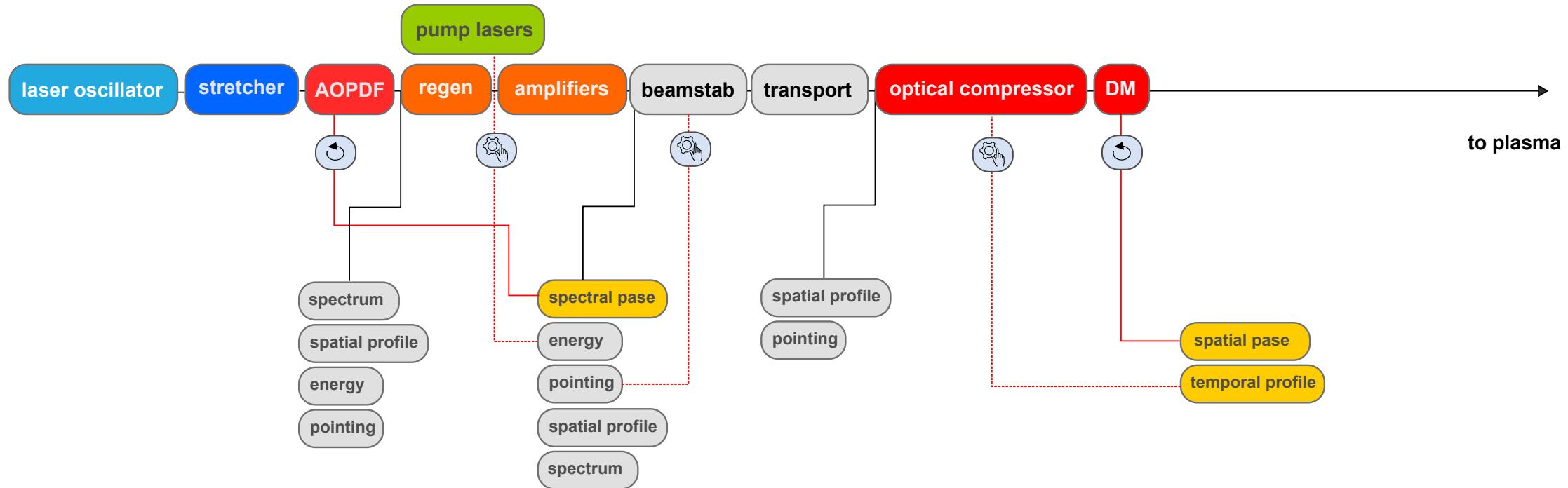
Fonction du régime et schéma d'injection mais très dépendant des performances laser

- PALLAS injection par ionisation tronquée requière
 - stabilité en intensité $< 3\%$ - la contrainte est sur le spatial $I_L = E_L / (\pi w_0^2 \tau_L)$
 - stabilité en position du foyer $dz_0 < 50 \mu\text{m} \Leftrightarrow < 5 \text{ nm (RMS)}$ sur les composantes du front d'onde.
 - stabilité en pointé RMS $< 1 \mu\text{rad}$
- ... sur une impulsion de 30 TW (... effet non linéaire, $n = n_0 + n_1 * I$).
- ... a 10 Hz (~10-30W)

Paramètres **atteignables** mais requièrent un **contrôle avancé** dans le voisinage de la zone utile (interation)

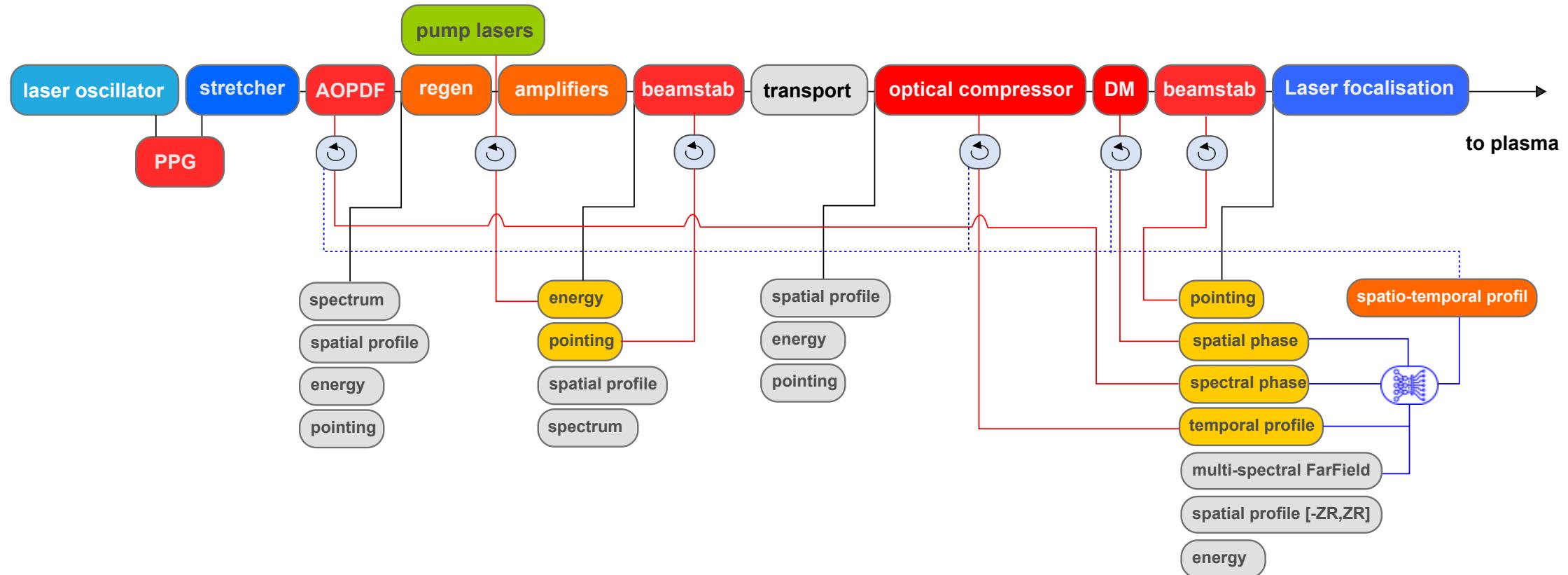
Synoptique système laser CPA 50 TW

installation laser pilote standard pour expérience ALP



valeur typique stabilité énergie < 5% RMS, pointé $\sim 10\text{urad RMS}$, durée < 15% FWHM

... système laser CPA 50 TW pilote d'un accélérateur laser-plasma



+ data logging, online monitoring.

=> objectifs : stabilité énergie < 1% RMS, pointé \sim 1urad RMS, durée < 5% FWHM

Caractérisation laser - 1

=> instrumentation caractérisation du champ laser : $E_L^2(r)$, $E_L^2(t)$, $\phi(r)$, $\Phi(\omega)$

- Intégration de moyen de caractérisation **développé/vendu par l'industrie photonique**
 - **spatial** : mesure de phase (front d'onde) Shack-Hartmann ou LTSI, Intensité (CMOS/CCD), position (4QD, PSD)
 - **temporel/spectral** : mesure d'autocorrelation, Self-Referenced Spectral Interferometry, *frequency resolved optical gating (FROG)*
 - **spectral** : spectromètre 1D, 2D

=> instrumentation issue des laboratoires pour caractérisation souvent ponctuelle ...

=> effort important pour l'intégration dans "une machine" x contrôle-commande

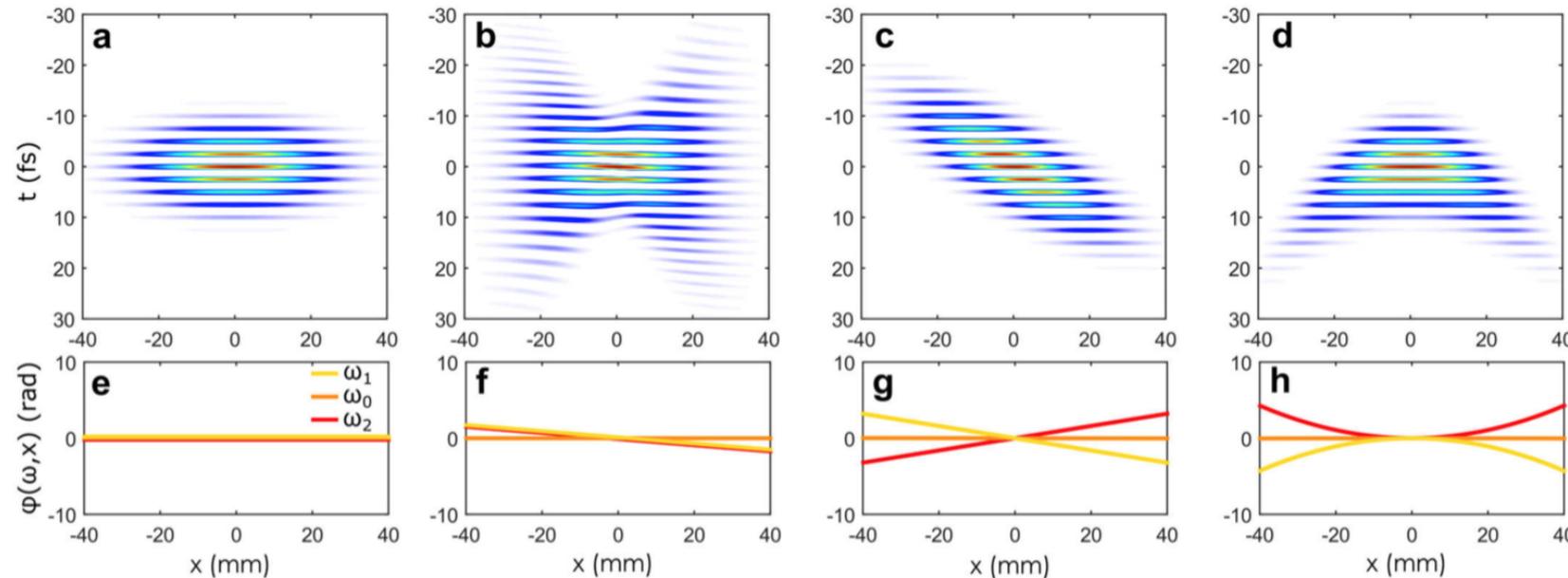
Caractérisation laser - 2

=> Système laser CPA couple le spatial/temporel(spectral) : étireur + amplificateur + compresseur

$$\varphi(\omega, \mathbf{r}) = \varphi(\omega_0, \mathbf{r}) + \frac{\partial \varphi(\omega_0, \mathbf{r})}{\partial \omega} \delta\omega + \phi(\omega, \mathbf{r})$$

Phase front
@ ω_0 *Pulse front*
 τ_0 *Spatially-varying*
 pulse shape

F. Quéré, S. Jolly et al.



Caractérisation laser - 3

Négliger les effets spatio-temporel \Leftrightarrow négliger les aberrations chromatiques

- Une impulsion peut être localement courte ou une tache focale
- "temps d'arrivée" sur la cible différent

Instruments développé reconstruction de la phase par spectroscopie de Fourier résolue spatial (FF)
complexe, temps de reconstruction > 3minutes

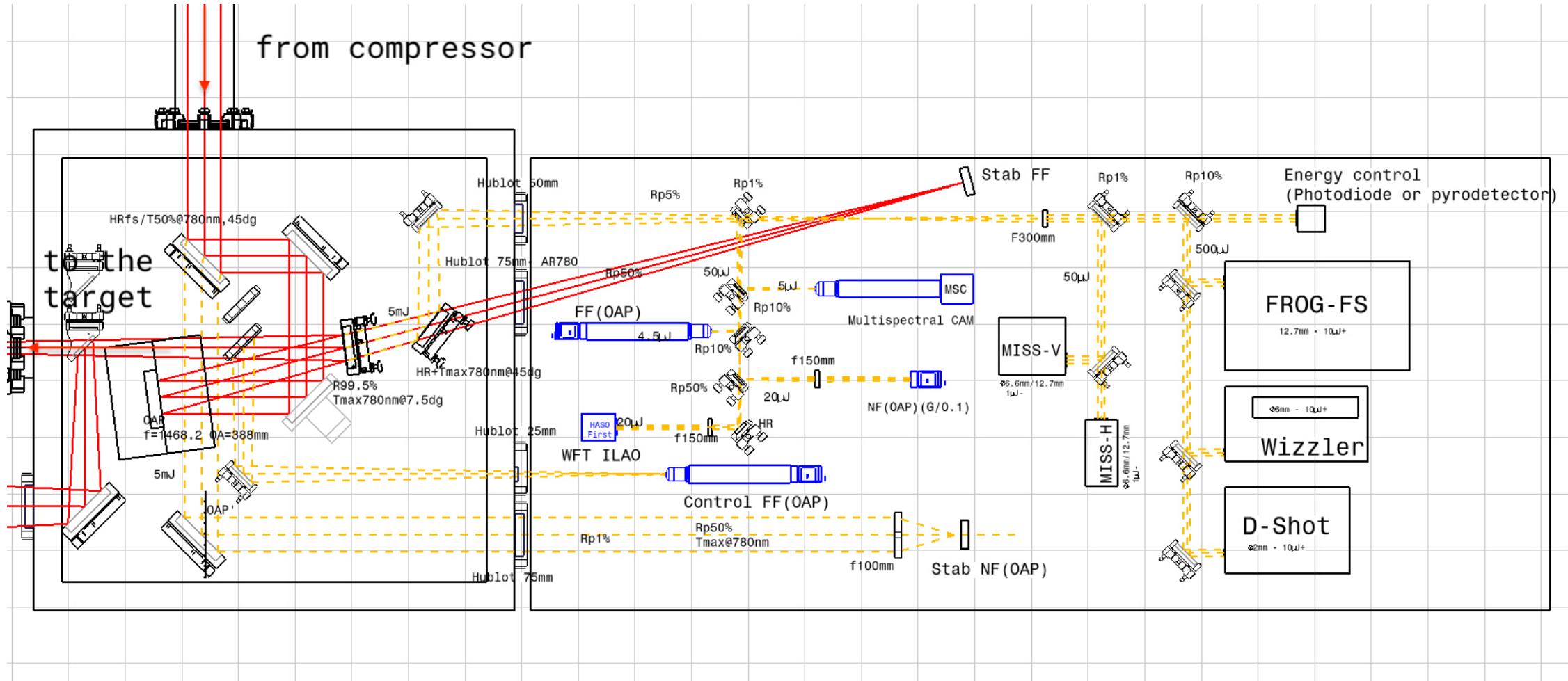
- R&D@ IJClab **projet ML-COLA** (V. Kubytskyi, M.Pittman, E. Baynard *et al.*) combine l'utilisation caméra multi-spectrale $I(x, y, \omega_i), i = 1..8$, mesure des phases $\phi(x, y), \Phi(\omega)$ indépendante et utilisation machine learning pour reconstruire $\phi(x, y, \omega)$ à une répitition > 1 Hz.

Moyen de correction/contrôle

intégration de solution commercial et développement avec combinaison de technologies avancées (*usinage laser, spatiale...*)

- **phase spectral** : modulateur acousto-optique (AOPDF).
- **phase spatial** : miroir déformable
- **pointé** : monture cale piezo tip/tilt combinée à des miroirs ultra-léger en SiC pour la correction sur les faisceaux grand diamètre (ARDOP/IJClab/Mersen/MRC GmbH) - correction large bande (0 -400 Hz) - sonde de référence colinéaire et séparation spectrale

Exemple de mise en place pour PALLAS



Discussion

- le projet **PALLAS** nécessite de redéfinir l'état de l'art de l'opération/contrôle des lasers pilote UHI .
- pousser une maîtrise technologique à l'état de l'art n'est possible qu'avec
 - les **ressources** (assistance techniques, opération, développement) d'expérience permettant l'aggrégation des compétences
 - une **plateforme maintenue dans le temps**
 - la possibilité de "perdre" du **temps** dans les détails
- **Non discuté** : transport laser, évolution du système laser LASERIX avec PALLAS, possibilité de mutualisation de matériel, évolution des pratiques vers des "*bas taux CO₂*"
- ...version des slides avec les références sera updatée...

Merci

remerciements : Elsa, Julien, Moana, l'équipe ALEA et les optomécaniciens du BE qui ont de près ou de loin contribué.e.s au contenu de ces slides.