



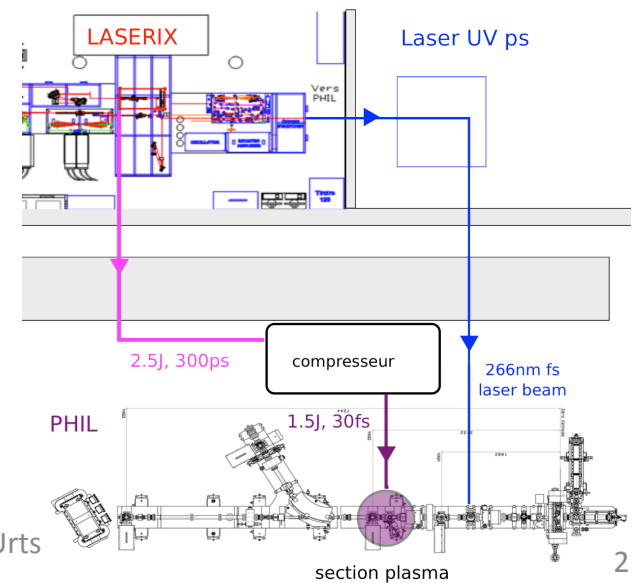
ESCULAP: ElectronS CoUrts pour L'Accélération Plasma

Christelle Bruni, Nicolas Delerue, David Garzella,
Olivier Guilbaud, Sophie Kazamias,
Bruno Lucas, Pierre Lepercq,
Moana Pittman et al.

(avec le soutien des équipes PHIL et Laserix
et des services techniques associés).

Opportunité: Arrivée de Laserix près de PHIL

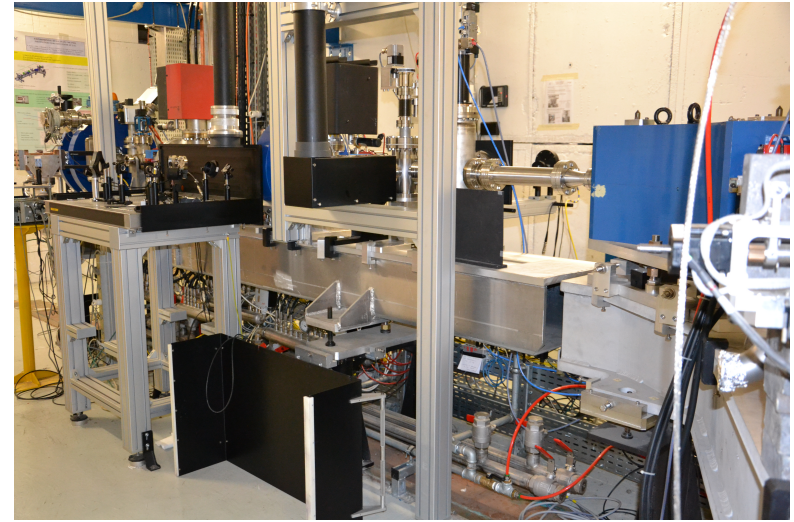
- Depuis 2014 le Laser de l'Université Paris-Sud Laserix est hébergé au LAL.
- Ce laser est installé à proximité de PHIL ouvrant des opportunités scientifiques uniques.



LES INSTALLATIONS PHIL ET LASERIX

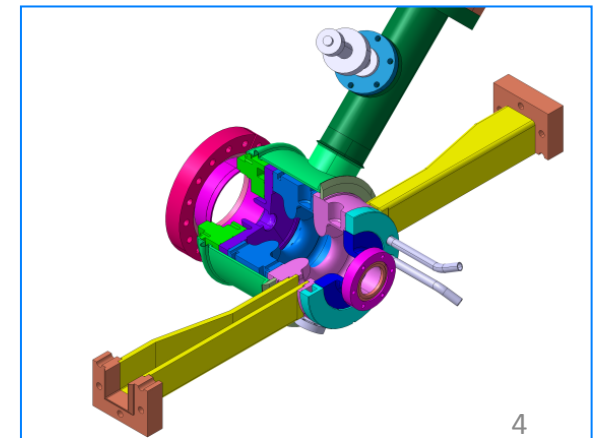
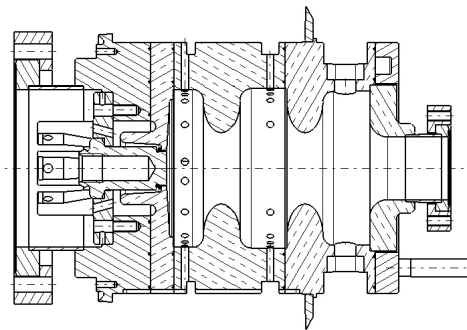
PHIL: une installation de tests pour

- La R&D sur les photoinjecteurs
- La R&D sur les diagnostics faisceaux
- Une opportunité de formation pour les étudiants (Stages, TP,...)
- Des utilisateurs ayant besoin d'un faisceau d'électrons (détecteurs HEP,...).
- Les nouvelles techniques d'accélération.

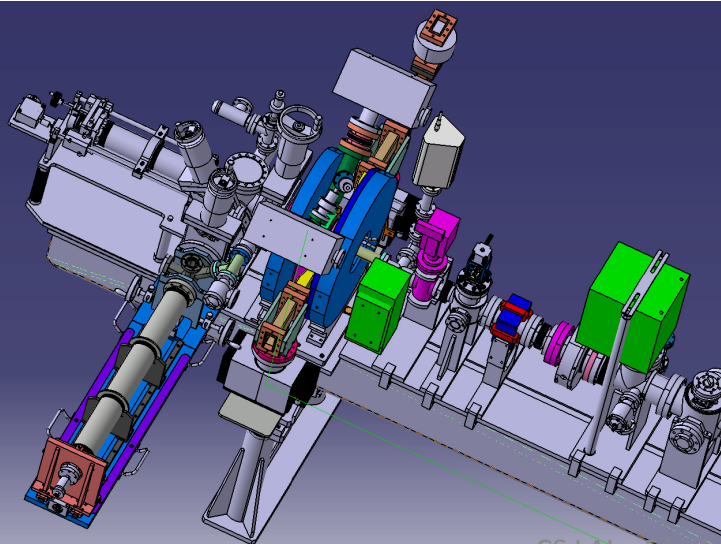
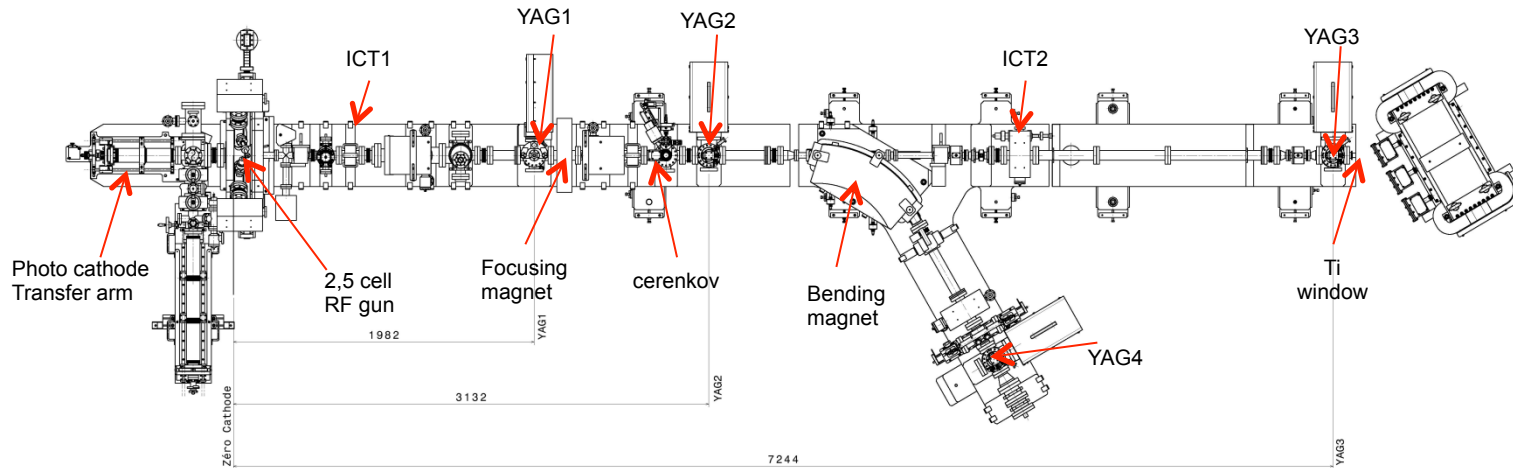


Caractéristiques de PHIL

- Une source RF de haute puissance (20MW)
- Un (deux) laser UV
- Canon 2,5 cellules



L'accélérateur



- Charge: jusqu'à 1 nC selon la cathode.
- Energie: jusqu'à 5 MeV (10 MeV prévu en 2017)
- Dispersion en énergie: 0,2%.
- Emittance: 5 à 10 mm.mrad.
- Taux de répétition: 5Hz.

Le Laser Laserix

Laser pilote de la plateforme LASERIX de l'UPS

- Système CPA (Chirped Pulse Amplification)
basé sur du Ti:Saphir puissance crête ~ 50 TW
 $E_{\max} = 2$ J, $t_{\min} = 35$ fs, $f_{\text{rep}} = 10$ Hz, $\lambda = 800$ nm

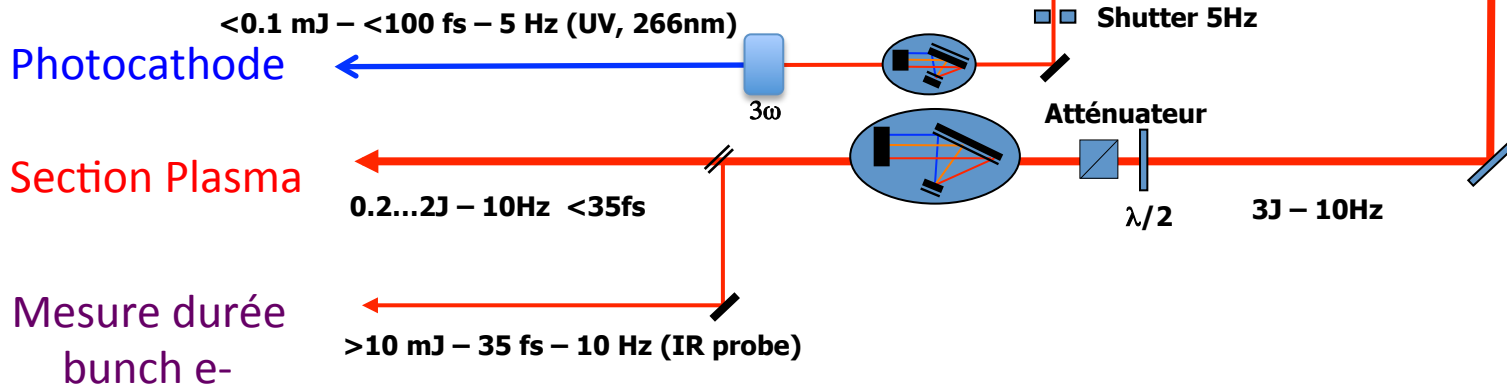
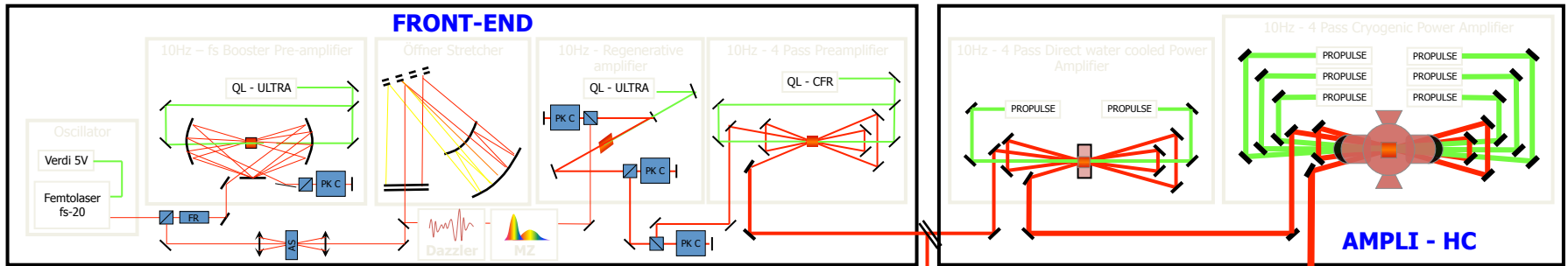
- Impulsion femtoseconde de l'UV à l'IR :
ligne UV (photocathode) + ligne OPA

- Système multi-faisceaux et multi compresseur
originellement dédié aux expériences pompe
sonde.

- Système fiabilisé dernière génération (*Mazzler*,
contrôle commande avancé, *miroir déformable à venir*)



Le Laser



	Faisceau Photocathode			Faisceau haute-cadence	Faisceau haute énergie		
	w	2w	3w	(Ampli 2)	(Ampli 3)		
Energie non-comprimée	2mJ	na	na	3J	10J	20J	40J
Energie comprimée	1mJ	200μJ	50μJ	2J	6,5J	13J	26J
Cadence	10Hz	10Hz	10Hz	10Hz	0.4Hz	0.2Hz	0.1Hz
Durée ultime	40fs	50fs	80fs	30fs	40fs	40fs	40fs
Profil transverse	Gaussien	Gaussien	Gaussien	Top-Hat	Top-Hat	Top-Hat	Top-Hat
Taille NF FWHM	5mm	5mm	5mm	50mm	100mm	100mm	150mm
Taille FF FWHM (f1000)	50μm	25μm	17μm	20μm	10μm	10μm	6.5μm
Puissance	$2,5 \cdot 10^{10} \text{ W}$	$4 \cdot 10^9 \text{ W}$	$6 \cdot 10^8 \text{ W}$	$7 \cdot 10^{13} \text{ W}$	$1,7 \cdot 10^{14} \text{ W}$	$3 \cdot 10^{14} \text{ W}$	$6 \cdot 10^{14} \text{ W}$
Intensité ultime (SR-60%)	$7 \cdot 10^{14} \text{ W/cm}^2$	$5 \cdot 10^{14} \text{ W/cm}^2$	$2 \cdot 10^{14} \text{ W/cm}^2$	10^{15} W/cm^2	10^{20} W/cm^2	$2 \cdot 10^{20} \text{ W/cm}^2$	10^{21} W/cm^2

CS LAL - Février 2016 - ElectronS CoUrts

pour l'Accélération Plasma

Opportunités scientifiques

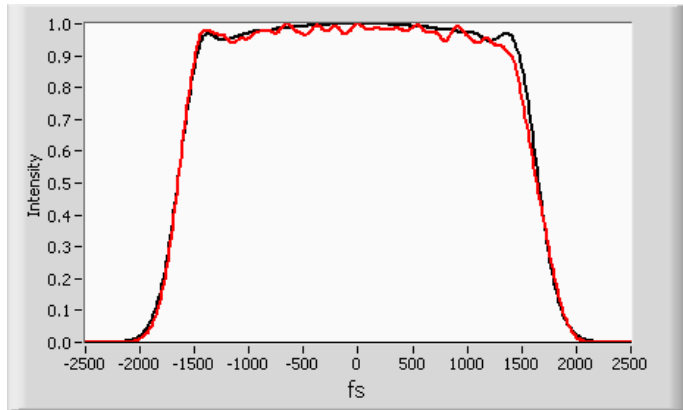
- Laserix est un laser produisant des impulsions ultra-courtes ($\sim 40\text{fs}$).
- Une petite fraction de ces impulsions seront utilisées pour produire des paquets d'électrons ultra-courts sur PHIL.
- Ces paquets d'électrons combinés à la puissance du laser dans un plasma pourraient être accélérés jusqu'à des énergie $> 100\text{ MeV}$.

PRODUCTION ET TRANSPORT DE PAQUETS COURTS

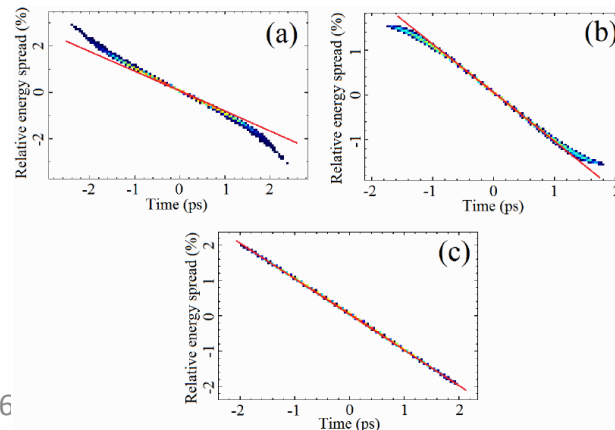
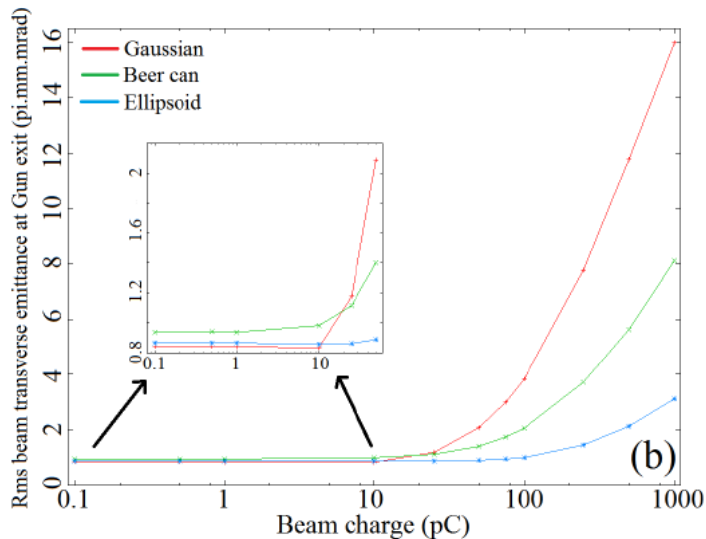
Production de paquets courts

- La production de paquets d'électrons sub-ps est importante pour les sources de lumières (haute brillance).
- Application dans le domaine de la production de rayonnement (THz,...).
- Élément important pour l'accélération laser-plasma.
- Activité sur ce sujet au LAL depuis de nombreuses années (ANR FEMTAC, projet P2IO DRUM, thèse de Thomas Vinatier...).

Production de paquets courts: Importance du laser



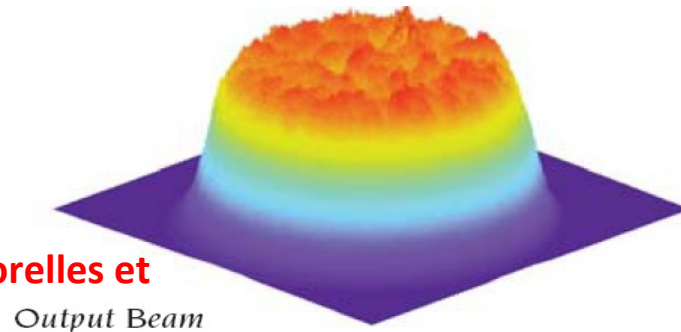
- Pour produire des paquets courts, il faut une impulsion laser courte => importance d'utiliser les impulsions courtes de Laserix.
- La forme de cette impulsion est aussi très importante => Collaboration avec le LIDYL (CEA/DRF) sur la mise en forme des paquets.
- ANR FEMTAC, projet P2IO DRUM (financé).



Mise en forme du paquet

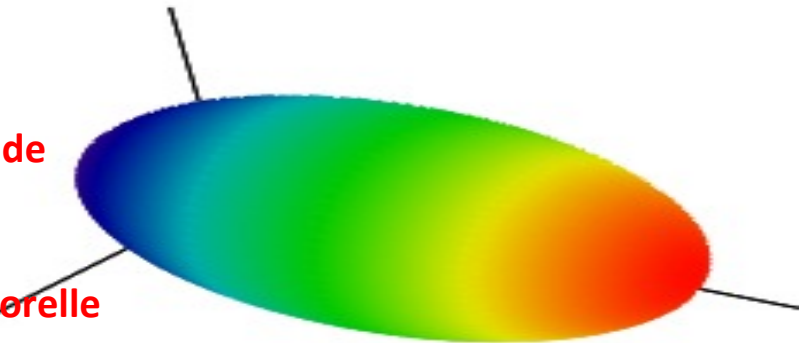
Impulsions Super Gaussiennes (« beer can »)

- Réalisation d'un cylindre isodensité (électrons -> photons)
- Découplage entre les dépendances temporelles et spatiales
- Minimisation de l'émittance par rapport à une impulsion gaussienne



✓ Impulsions ellipsoïdales

- Minimisation des non-linéarités des forces de charge d'espace (cf. C. Limborg)
- Réduction possible au seul terme d'émittance de cathode
- Pas de découplage: manipulation Spatio-temporelle

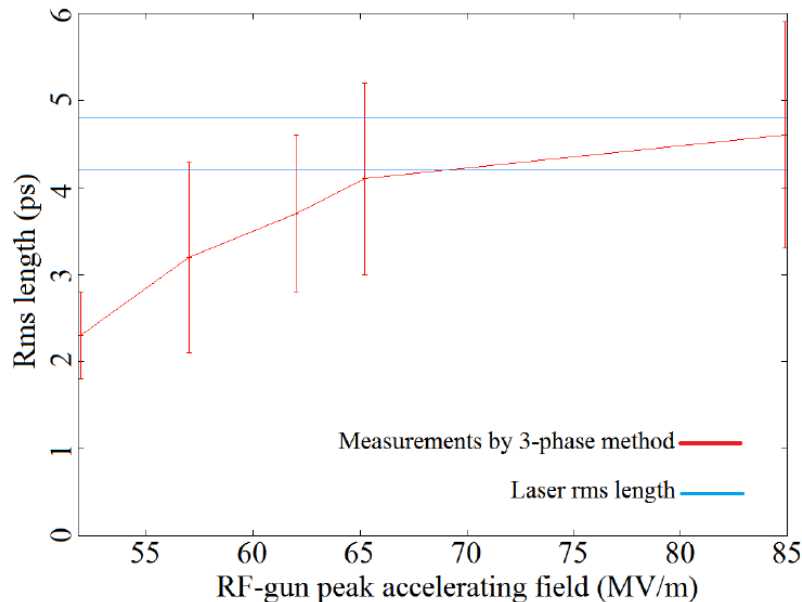


Production de paquets courts: Transport de paquets

Charge (pC)	Diamètre (mm rms)	Durée du paquet (fs) @30cm	Taux d'accroissement (fs/m)
2	0.7	91	10
10	0.9	100	40
100	1.2	200	110

- Le transport des paquets d'électrons apporte d'autres défis.
- Un fonctionnement à une charge plus basse permet de conserver un paquet plus court.

Production de paquets courts: Mesure de longueur

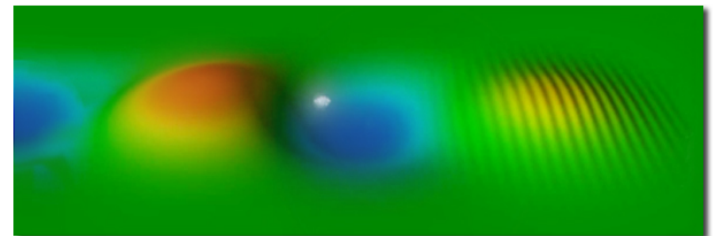


- Des tests préliminaires ont été effectués sur PHIL pour mesurer la longueur des paquets courts en utilisant la méthode des 3 phases.
- Les mesures seront plus faciles avec la section accélératrice supplémentaire financée par P2IO (DRUM).

ACCELERATION LASER-PLASMA

Principe de l'accélération

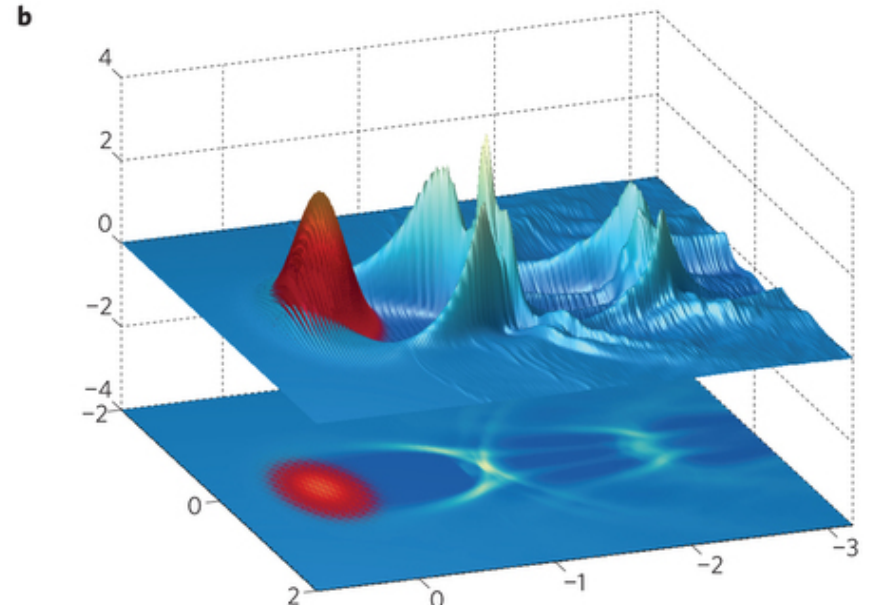
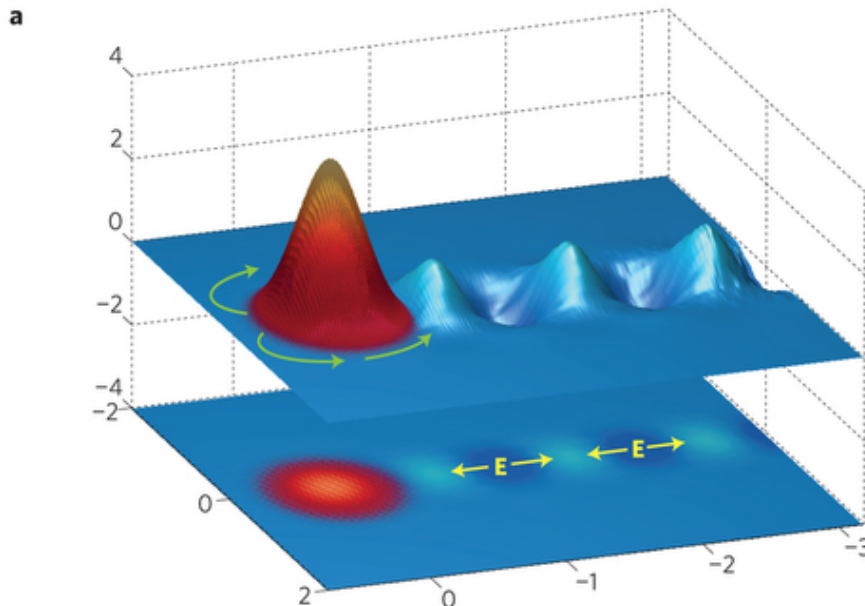
- Une impulsion (laser) se déplaçant dans un plasma induit un sillage.
- Une particule se trouvant à la bonne phase dans ce sillage pourra être accélérée.



Régimes d'accélération

- Plusieurs régimes sont possibles pour le champ créé par le sillage selon l'amplitude du champ électrique normalisé créé dans le plasma (a_0):
 - À gauche: puissance laser modérée ($a_0 \sim 0.5$)
=> régime linéaire.
 - À droite: laser plus intense ($a_0 = 4$)
=> régime non linéaire, formation d'une bulle

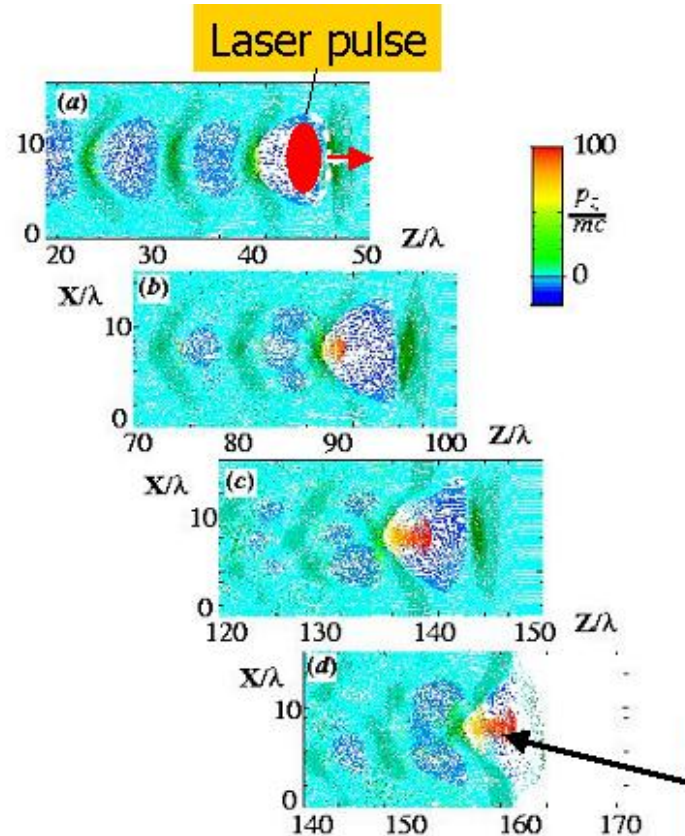
$$a_0 = \frac{eE_0}{m_e \omega c}$$



S.M. Hooker, Nature Photonics 7 775 (2013). DOI:10.1038/NPHOTON.2013.234

Accélération plasma: régime non linéaire

- Dans le régime non linéaire des électrons sont « arrachés » du plasma puis accélérés.
- La plupart des résultats d'accélération avec des forts gradients d'accélération ont été obtenus dans ce régime.



Plasma density:

$$3.5 \times 10^{19} / \text{cm}^3$$

Laser pulse :

$$6.6 \text{ fs}$$

$$20 \text{ mJ}$$

$$3 \text{ TW}$$

$$a_0 = 1.7$$

<http://www.mpq.mpg.de/lpg/research/LWFA/LWFA.html>
A. Pukhov and J. Meyer-ter-Vehn, Appl. Phys. B74, 355 (2002)

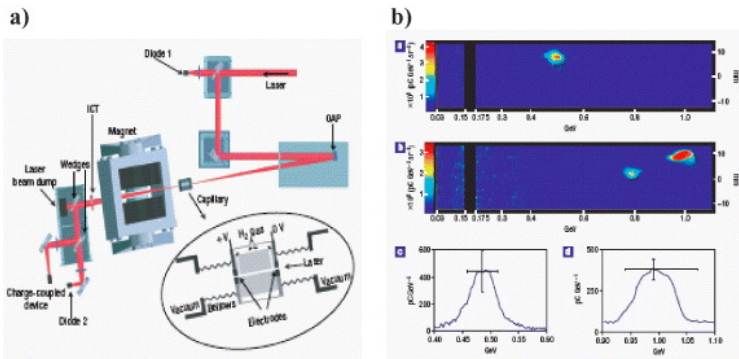


Résultats en régime non-linéaire

- En 2004 et 2006 plusieurs résultats importants ont été obtenus:

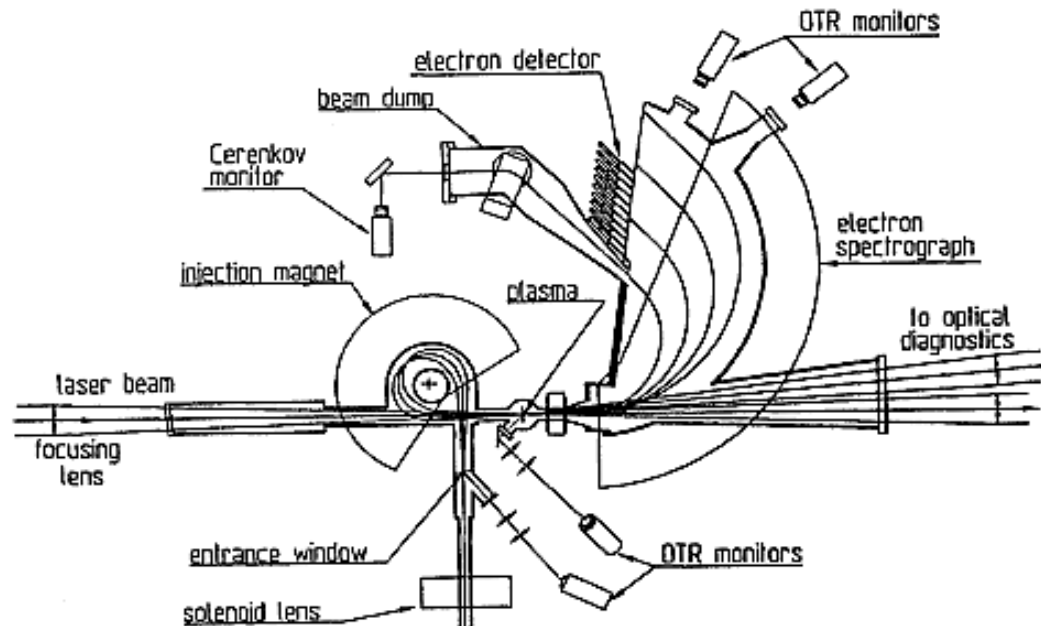
- paquets d'électrons > 100 MeV avec une dispersion en énergie limitée.

- Plus récemment des paquets de plusieurs GeV ont été produits.



Régime linéaire

- Dans le régime linéaire, l'onde plasma accélère des électrons injectés depuis l'extérieur.
- Première réalisations: 1998 au LULI
F. Amiranoff et al, Phys. Rev. Lett. 81, 9950 (1998)



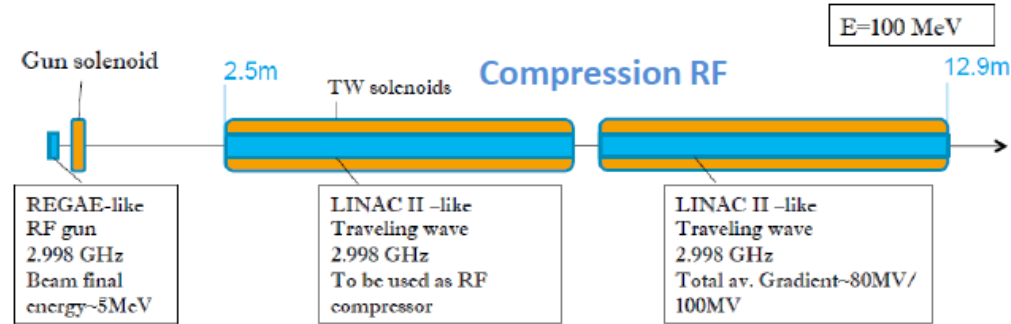
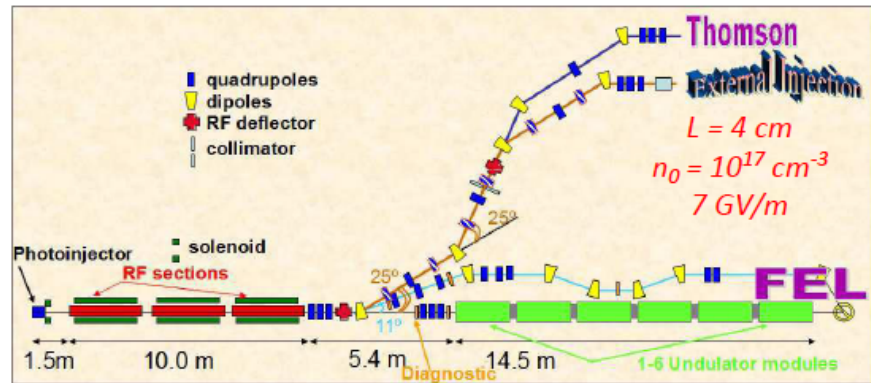
Régime linéaire: expériences en préparation

- Les expériences en régime linéaire avec injection externe requièrent un injecteur capable de produire des paquets courts (sub-ps) d'électrons relativistes.
- Plusieurs groupes préparent des expériences avec injection externe:
 - SPARC-LAB @Frascati
 - ELETTRA @Trieste
 - SINBAD @DESY-HH
 - REGAE @DESY-Zeuthen
 - VELA/CLARA @Daresbury Laboratory
- Toutes sont à des énergies d'injection > 20 MeV

Expériences d'injection externe (1/2)

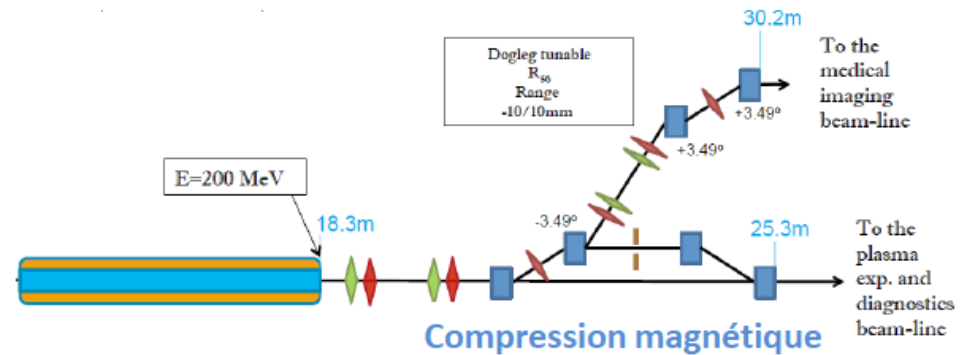
@ SPARC_LAB

@ SINBAD

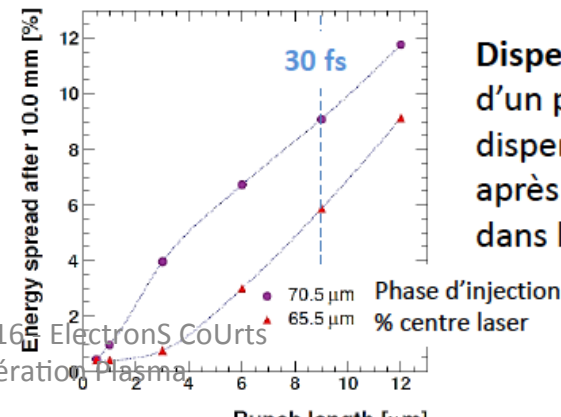
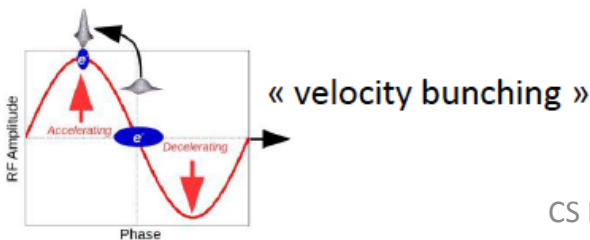


$Q_b = 20 \text{ pC}$

	Cathode	Linac end	Dogleg end	Gas cell	Capillary
Energy (MeV)		80	80	120	630
Emitn (mm.mrad)		0.23	2.7	4.5	3.5
Bunchlength rms (fs)	300	70	30	4.5	3.5



Compression RF Compression magnétique



Dispersion en énergie
d'un paquet injecté avec une
dispersion initiale de 0.1 %
après 10 mm de propagation
dans le plasma

Expériences d'injection externe (2/2)

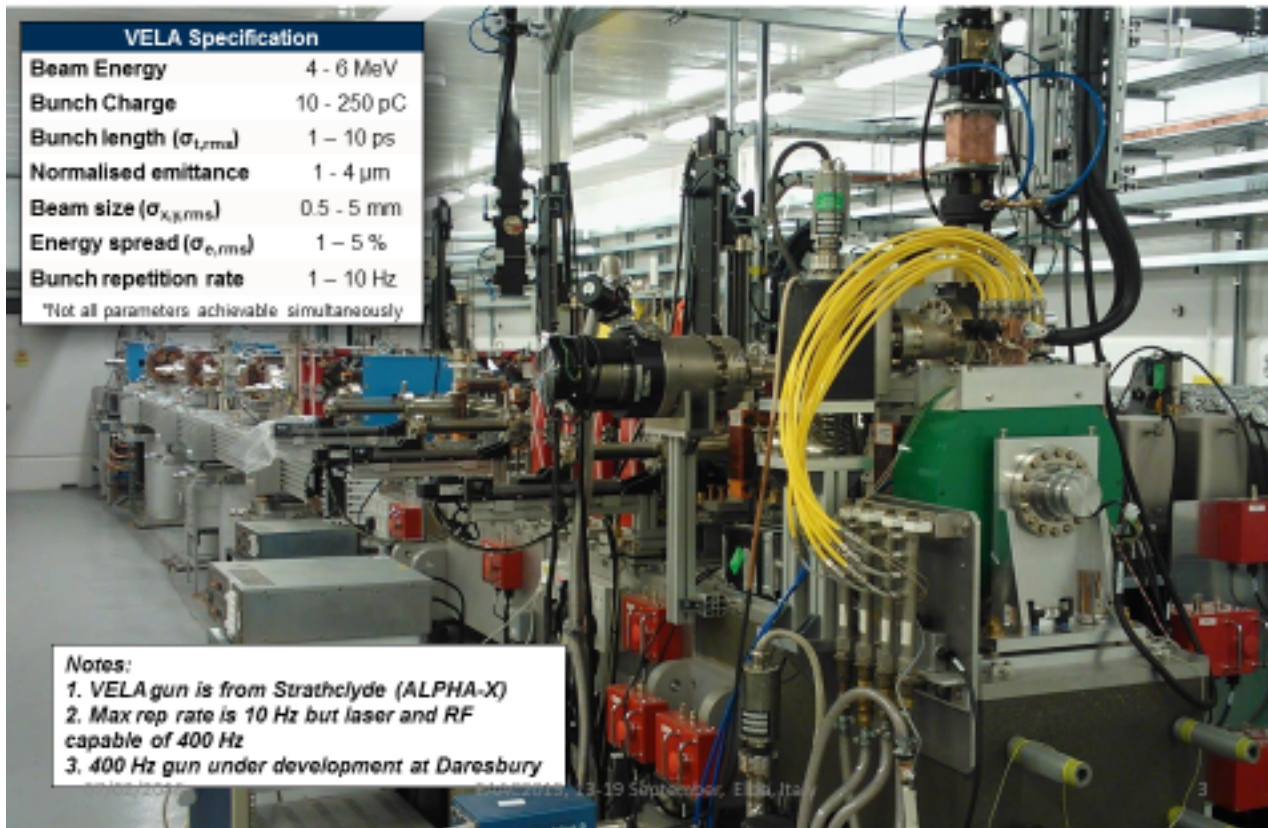
VELA (Versatile Electron Linear Accelerator)

VELA Specification	
Beam Energy	4 - 6 MeV
Bunch Charge	10 - 250 pC
Bunch length ($\sigma_{t,rms}$)	1 - 10 ps
Normalised emittance	1 - 4 μm
Beam size ($\sigma_{x,y,rms}$)	0.5 - 5 mm
Energy spread ($\sigma_{e,rms}$)	1 - 5 %
Bunch repetition rate	1 - 10 Hz

**Not all parameters achievable simultaneously*

Notes:

1. VELA gun is from Strathclyde (ALPHA-X)
2. Max rep rate is 10 Hz but laser and RF capable of 400 Hz
3. 400 Hz gun under development at Daresbury

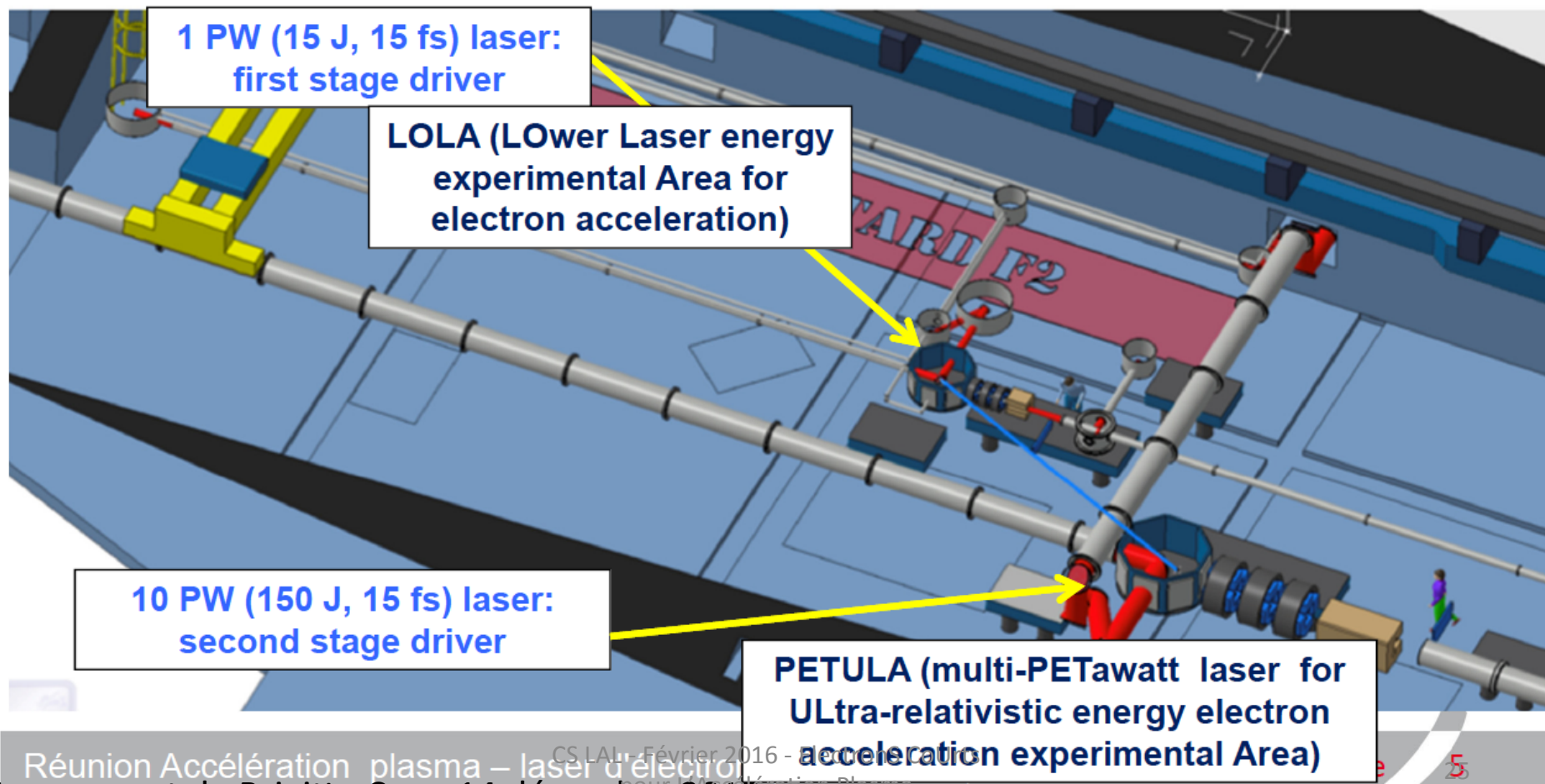


APOLLON

- Le laser 10 PW APOLLON est en cours d'installation à l'Orme des merisiers. Premières expériences prévues en 2017
- Une salles d'expériences (salle longue focale) sera dédiée à l'accélération plasma.
- Lasers: 1PW et 10 PW 15fs-1ps
- Buts:
 - Production et accélération d'électrons en régime non-linéaire, avec le faisceau 1 PW *démarrage prévu en 2017*
 - Accélération à 2 étages, avec les faisceaux 1 et 10 PW; *à partir de 2018*
- Besoin de contributions pour préparer ces expériences.
- Les tests sur ESCULAP pourront apporter des informations importantes, en particulier sur les diagnostics d'électrons et l'injection externe.

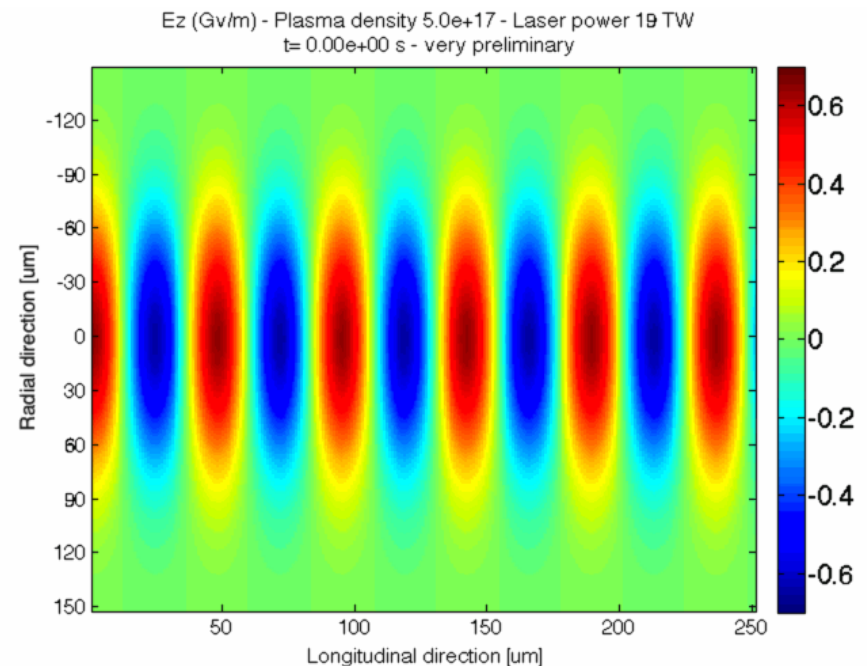
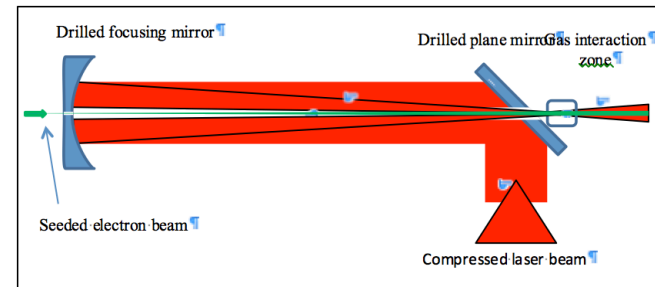
Implantation multi-étages dans la salle longue focale

Tests de concepts innovants et accélération d'électrons contrôlée multi-GeV



Objectif scientifique d'ESCU LAP: Exploration de l'injection externe (1)

- Les électrons fournis par PHIL seront injectés dans l'onde plasma créée par LASERIX.
- Intégration d'un étage plasma dans un accélérateur conventionnel.
- Etude du couplage du paquet à l'onde plasma.



Accélération plasma: Quelques chiffres

Plasma density: $n_0[10^{17} \text{cm}^{-3}] \simeq 0,486 \times \text{pression}[mbar]$
 $n_0 \simeq 10^{17} \text{cm}^{-3} \rightarrow \text{pression} \simeq 2mbar$

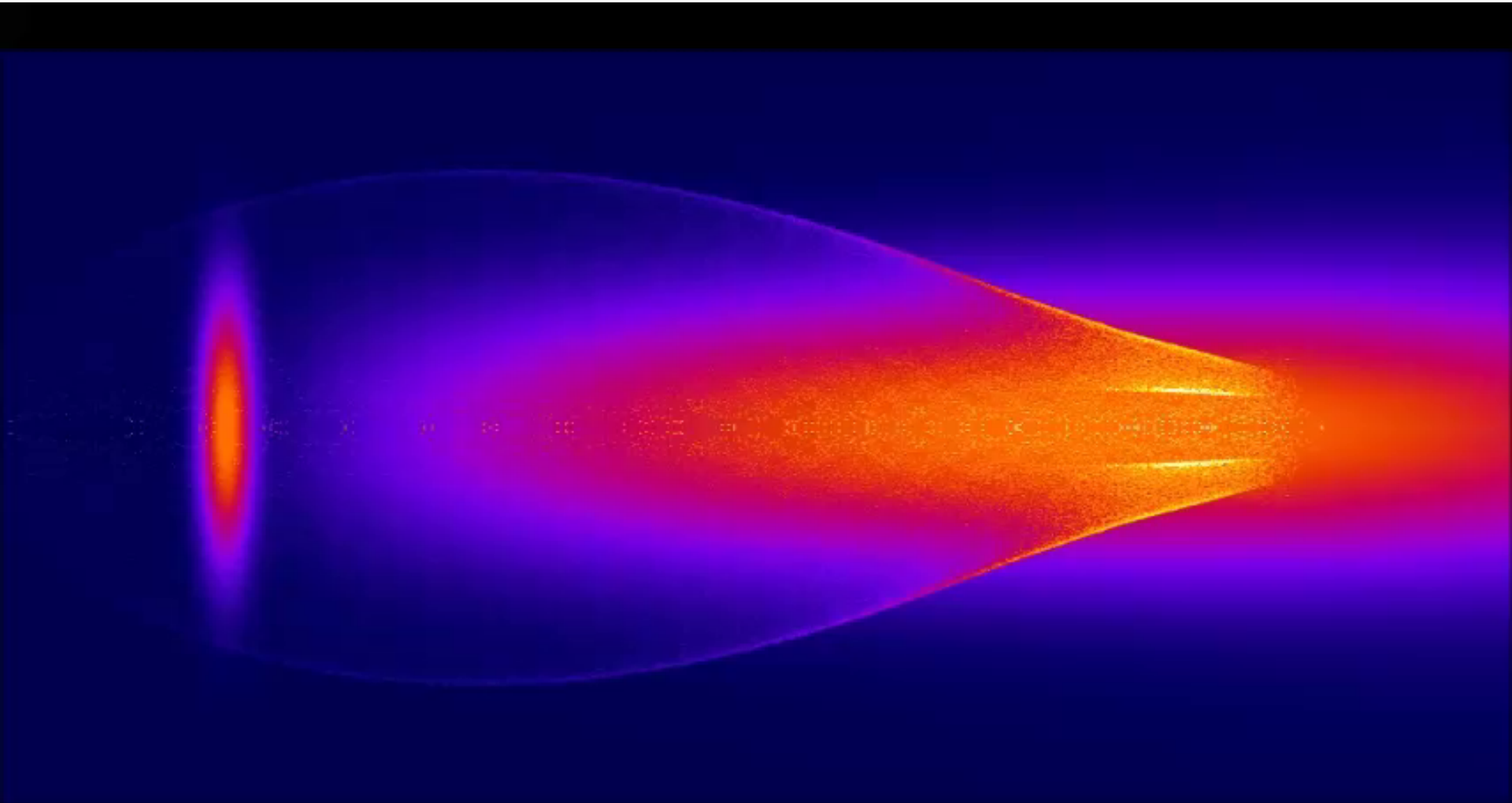
Gradient accélérateur: $E_0[V/m] \simeq 96\sqrt{n_0[\text{cm}^{-3}]}$
 $n_0 \simeq 10^{17} \text{cm}^{-3} \rightarrow E_0 \simeq 300 \times MV/cm$

Zone accélératrice: $\frac{1}{4}\lambda_p \simeq \frac{1}{4} \frac{2\pi c}{\sqrt{\epsilon_0 m_e / e^2}} \frac{1}{\sqrt{n_0}}$
 $n_0 \simeq 10^{17} \text{cm}^{-3} \rightarrow \frac{1}{4}\lambda_p \simeq \frac{100}{4} \mu m$

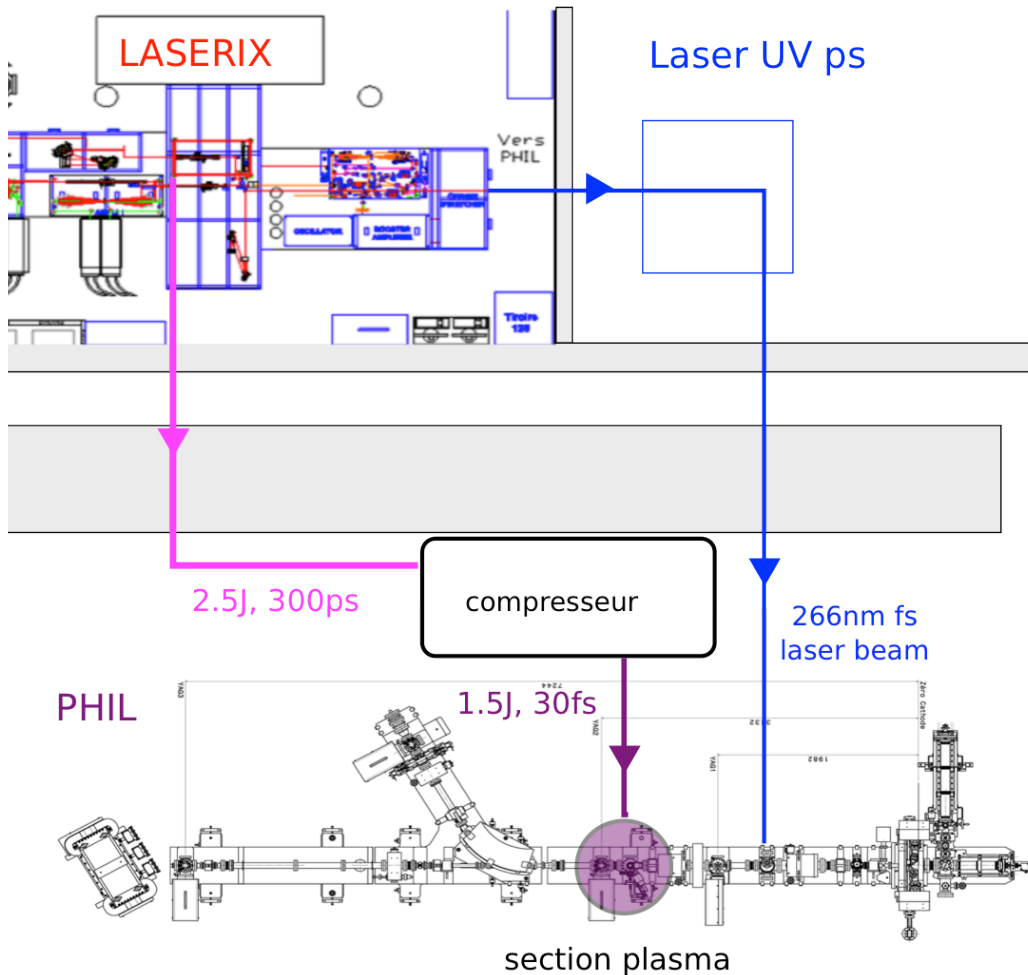
Vitesse de groupe: $\gamma_{\text{plasma}} \simeq \sqrt{\frac{10^{21}}{\lambda^2 n_0}} \simeq 125$

Vitesse des electrons: $\gamma_{\text{electron}} \simeq \frac{P_e}{M_e} \simeq \frac{10MeV}{0.5MeV} \simeq 20$

Premières simulations: Injection à 10 MeV



Implantation et premiers tests



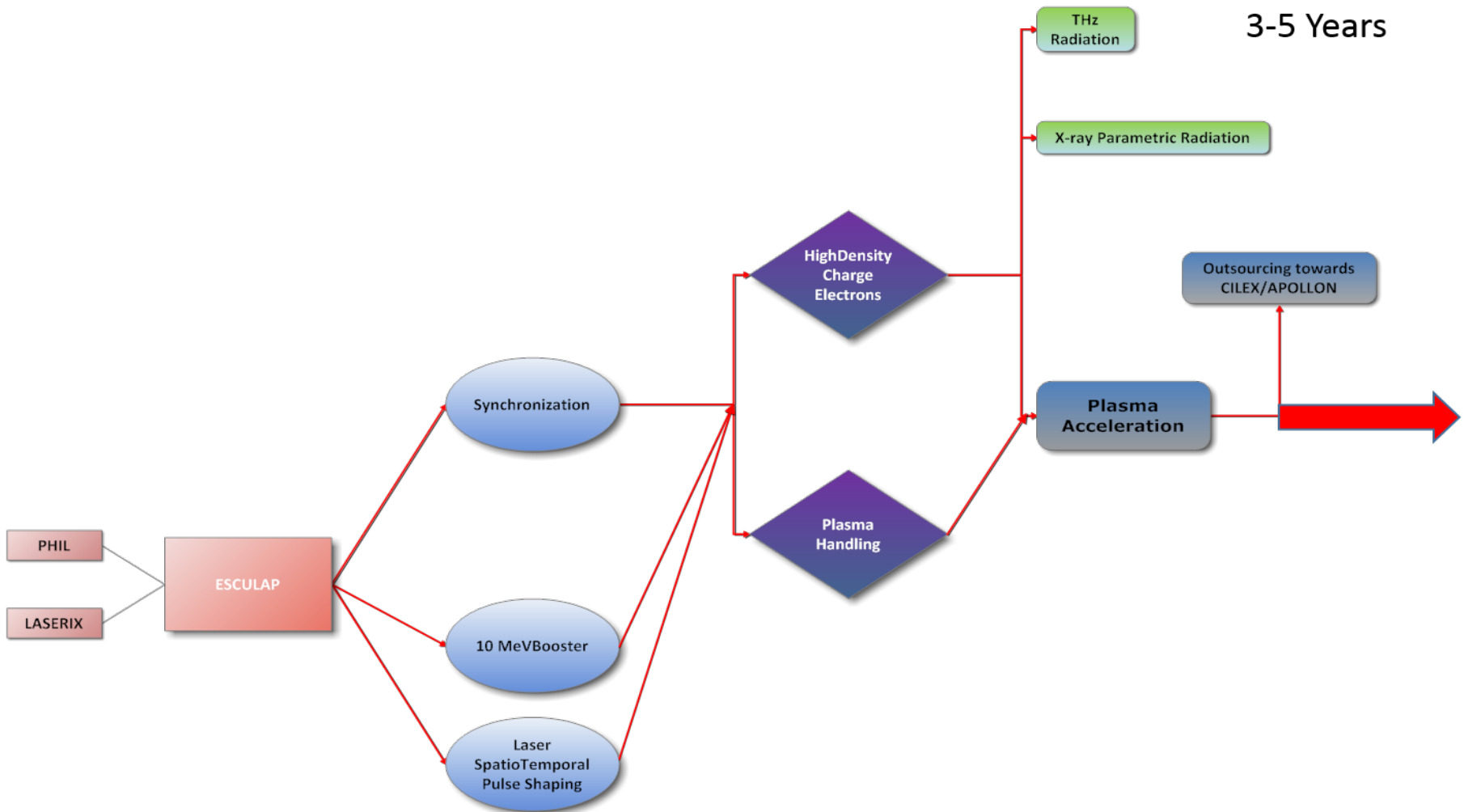
- PHIL et Laserix sont situés à quelques mètres l'un de l'autre.
- Servitudes existantes pour coupler les deux.
- Premiers photons issus de ce couplage produits à l'été 2015.
- Compétences laser et accélérateurs disponibles sur le même site.



Objectifs du projet

1. Production et manipulation de paquets courts d'électrons.
 - Pré-requis pour l'accélération plasma.
 - Nombreuses applications comme source de rayonnement.
2. Accélération d'électrons dans un plasma
3. Transfert et collaboration avec CILEX/
APOLLON.

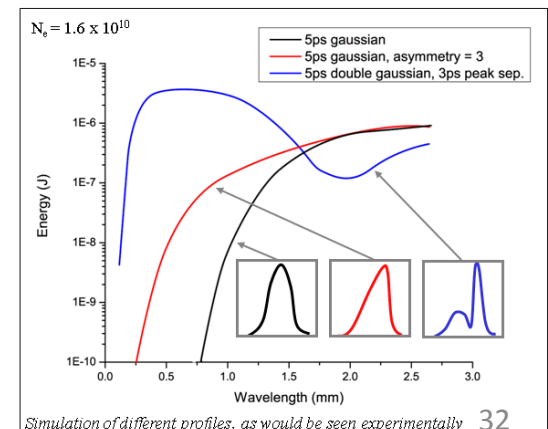
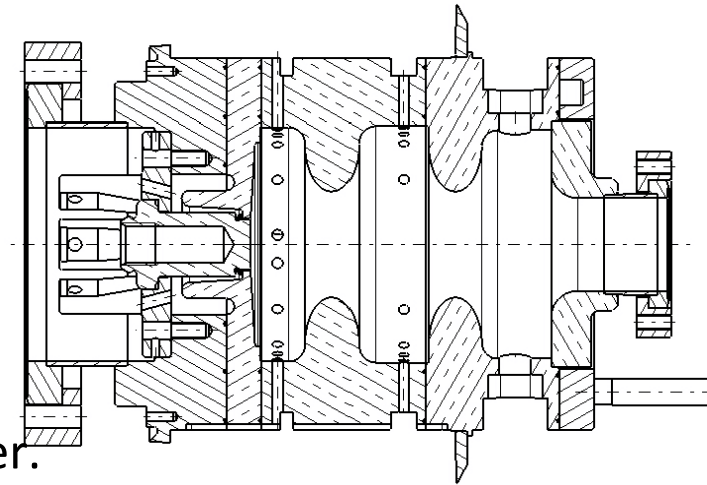
Objectifs du projet



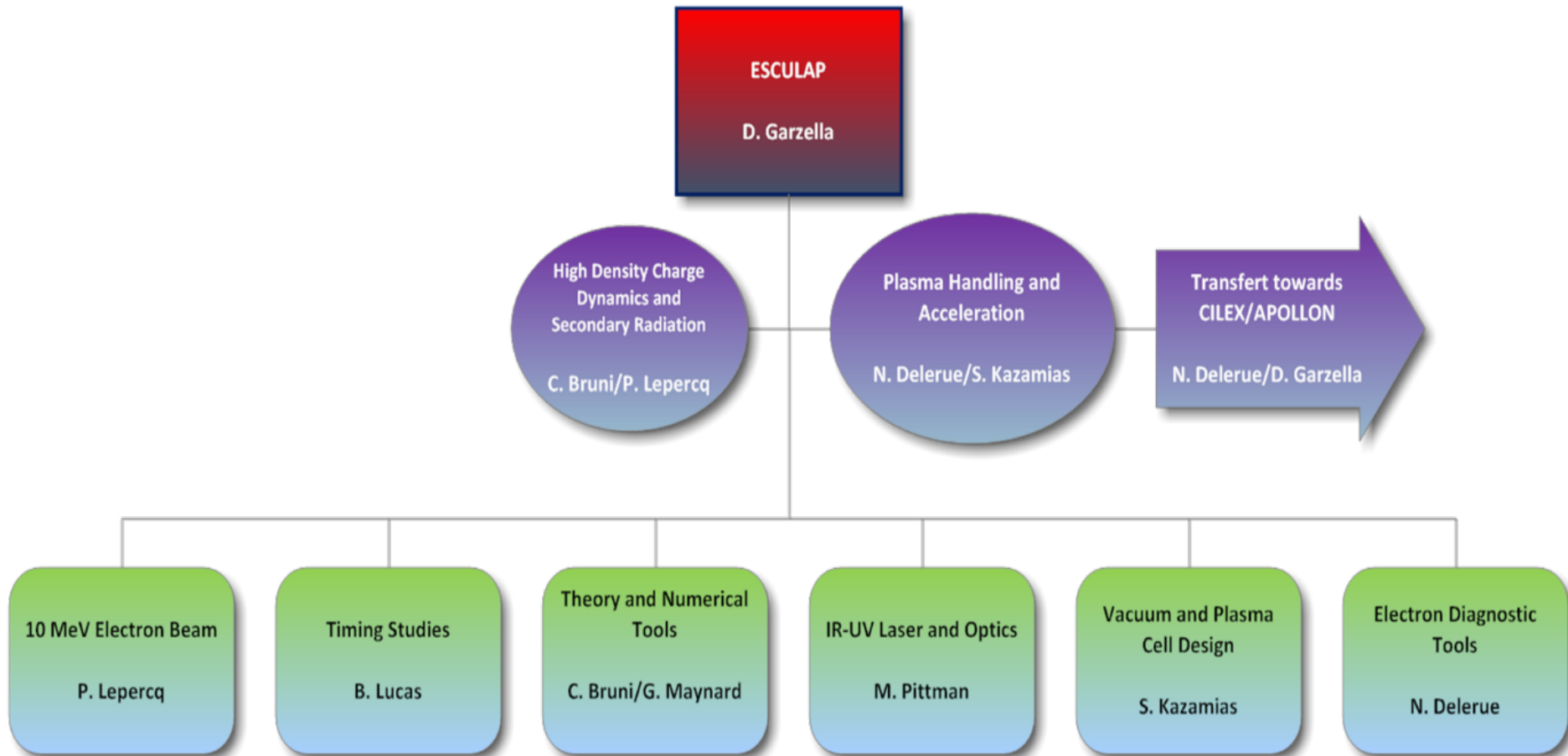
Défis à relever

Plusieurs défis majeurs à relever pour ces expériences:

- Simulations Start-to-the end du paquet d'électron de PHIL au détecteur.
 - Accélération du faisceau de PHIL à 10 MeV
 - Optimisation du couplage électrons-onde plasma (temporel et spatial).
 - Transporter un paquet ultra-court d'électrons sans trop l'allonger.
 - Transport et mise en forme de l'impulsion laser.
 - Conception de la cellule Plasma.
 - Compatibilité entre les contraintes UHV de la photocathode et l'injection de gaz d'un plasma.
 - Caractériser les paquets d'électrons produits et en particulier leur longueur (durée).
- => Plusieurs groupes de travail.



Organisation du projet



La théorie-modélisation est une partie intégrante du projet Esculap

OBJECTIFS

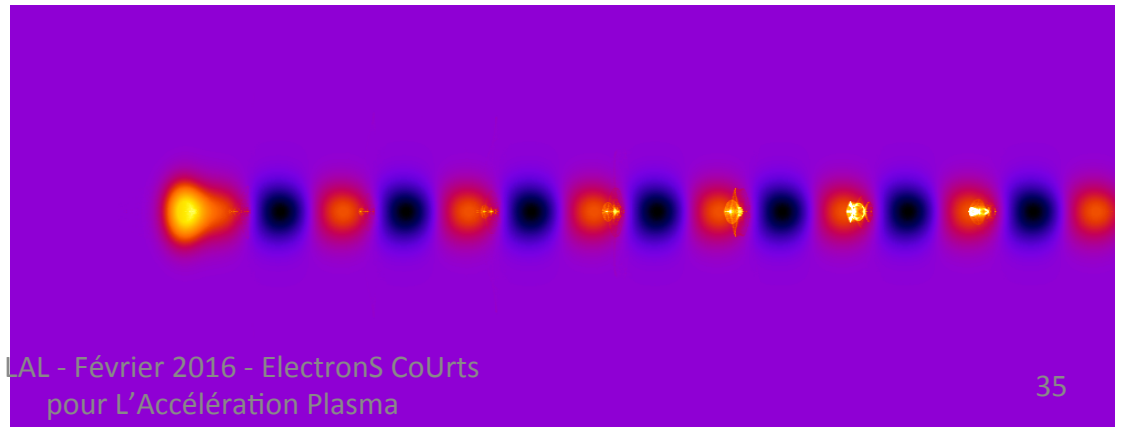
- Aide à la détermination de la configuration de base
- Optimisation des paramètres de configuration en fonction des données expérimentales
- Analyse des résultats expérimentaux
- Diagnostics
- Préparer les évolutions de l'installation
- Travailler en synergie avec salle longue focale Apollon

MOYENS

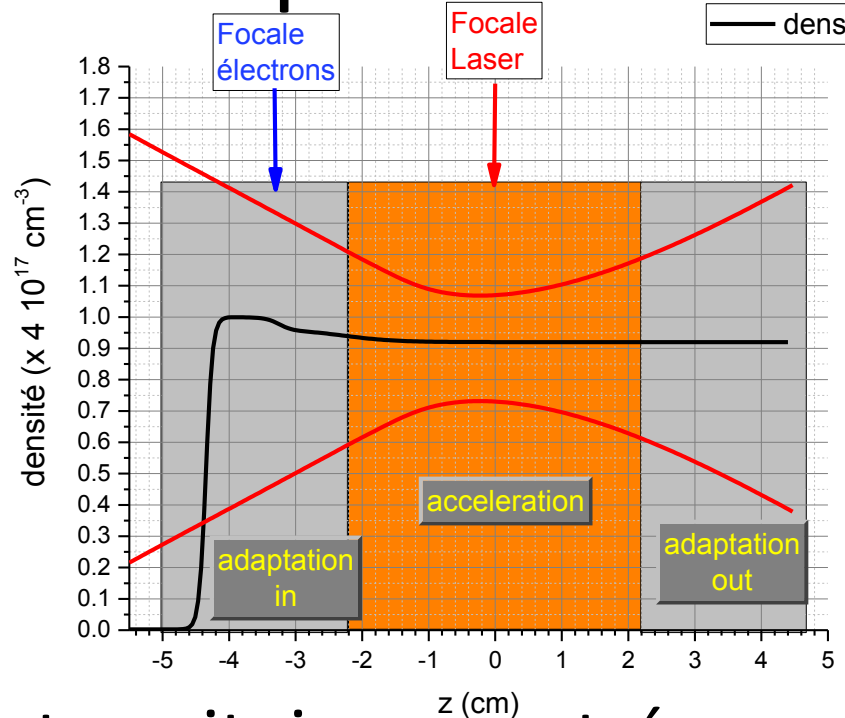
- Calculs analytiques (interactions quasi-linéaires)
- Simulation numérique start-to-the end, associant
 - Faisceauologie électrons
 - Faisceauologie Laser
 - Physique des plasmas
 - Physique des fluides

Éléments de la configuration de base courts termes

- Configuration 'Simple' :
 - LASERIX : 1 seul faisceau laser, pas de guidage, mais au max d'énergie et de puissance actuel : 2,5 J et 45 fs FWHM
 - PHIL
 - Sans booster : 6 MeV, 500 fs rms, 100pc, $d < 200 \mu\text{m}$: Phase de test et de validation
 - Avec booster : 10 MeV, 300 fs rms, 100 pc, $d < 150 \mu\text{m}$
 $E > 100 \text{ MeV}$, $Q > 10 \text{ pc}$
 - Cellule : He, 1-10 mbar, 1-10 cm
 - Accélération en structure multi-paquets



L'interaction électrons-plasma est décomposée en 3 zones

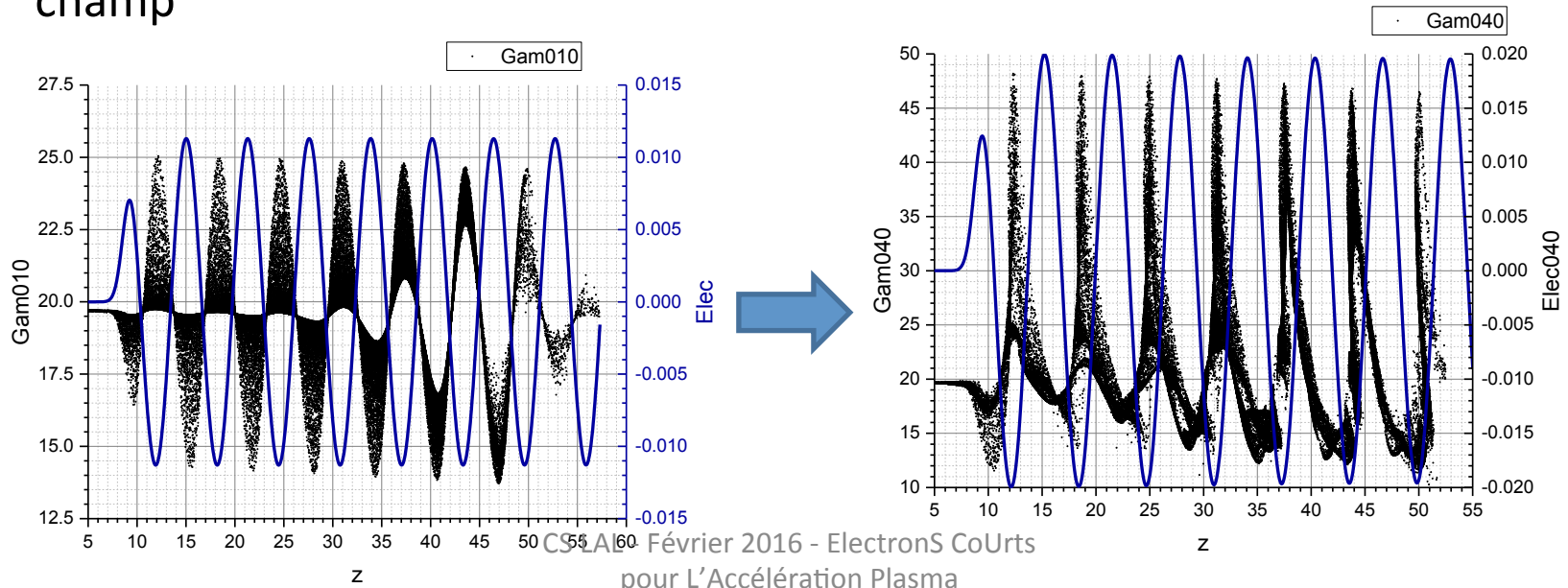


- Une zone transitoire en entrée, pour adapter le faisceau d'électrons à l'onde plasma
- Une zone accélératrice
- Une zone transitoire en sortie, en particulier pour réduire la divergence

10 MeV est un bon compromis pour optimiser la zone transitoire d'entrée

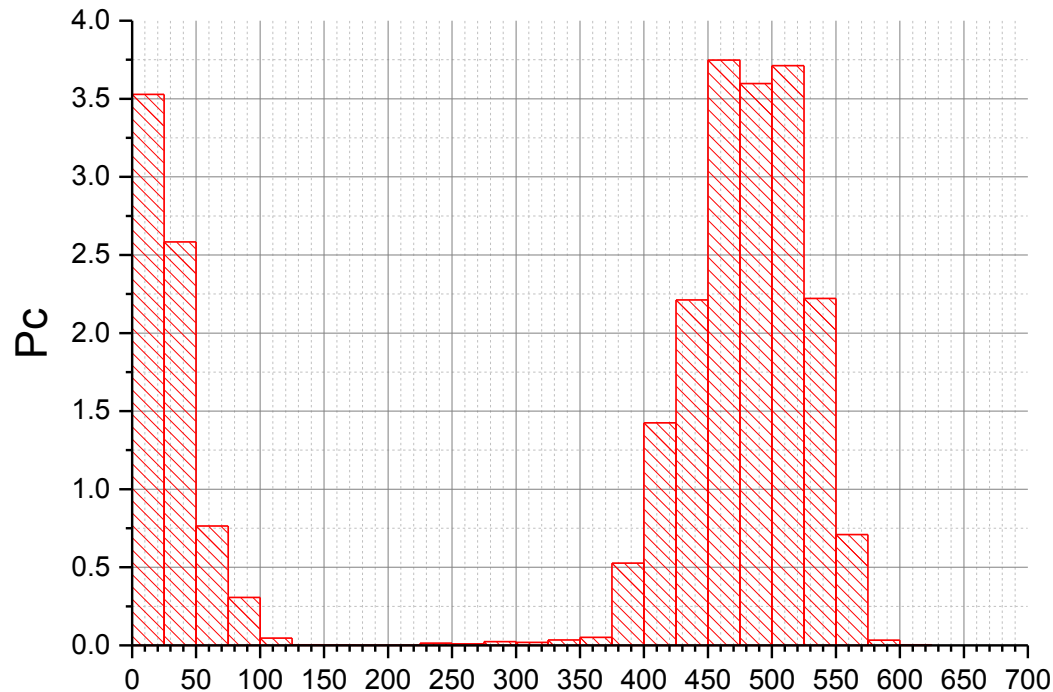
$$l_e \propto \gamma_e^2 \quad l_e < 1cm \quad l_e \frac{d\gamma_e}{dz} > \gamma_e$$

- Capturer le maximum de charge dans l'onde
- Limiter la croissance de l'émittance
- Réduire la durée de chaque paquet et les positionner au maximum de champ

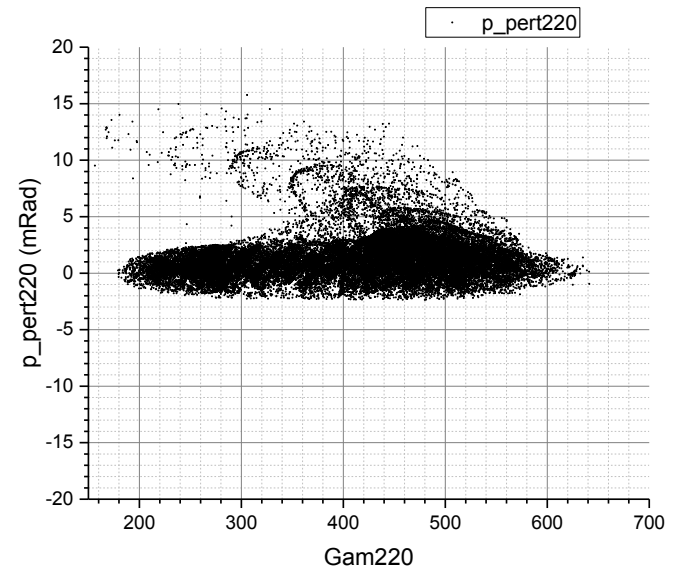
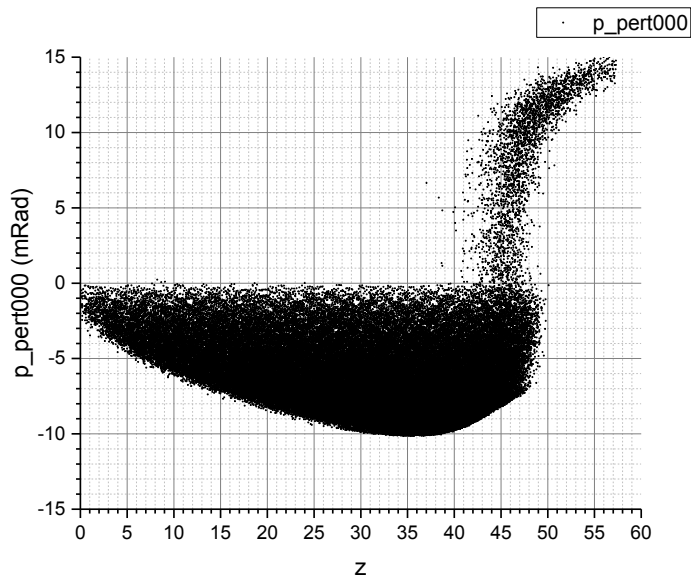


Laserix permet d'atteindre des champs > 100 MeV/cm sur plusieurs cm

- Durée 45 fs optimale pour des pressions de l'ordre du mbar.



L'adaptation en sortie permet de réduire la divergence des électrons



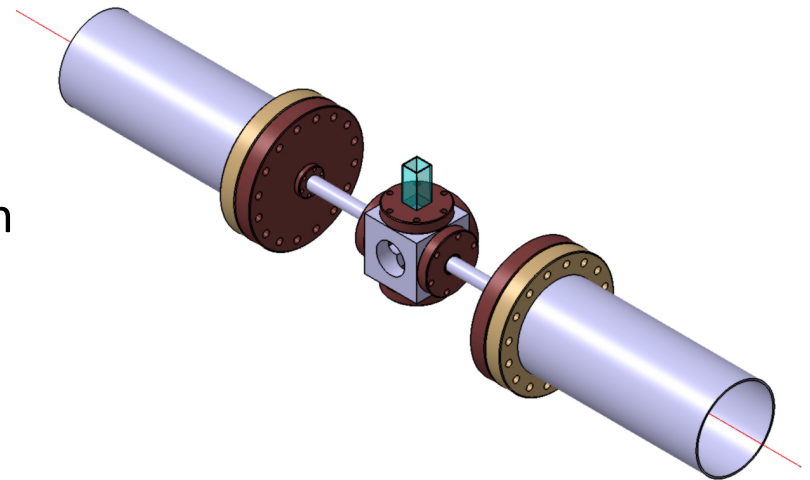
Résultats préliminaires (10 MeV)

- Champ accélérateur > 100 MeV/cm
- Plus de 75 % des 100 pc capturés par l'onde plasma
- Faisceau Q > 10 pc à 250 MeV sans optimisation
- L'aspect multi-paquet amplifie l'influence du profil en densité de la cible
 - $>$ possibilité de contrôler l'espace des phases des électrons en jouant sur le profil
 - $>$ Le faisceau d'électron est sensible à des fluctuations de densité de l'ordre du %

Défis à relever:

Compatibilité UHV cathode-plasma

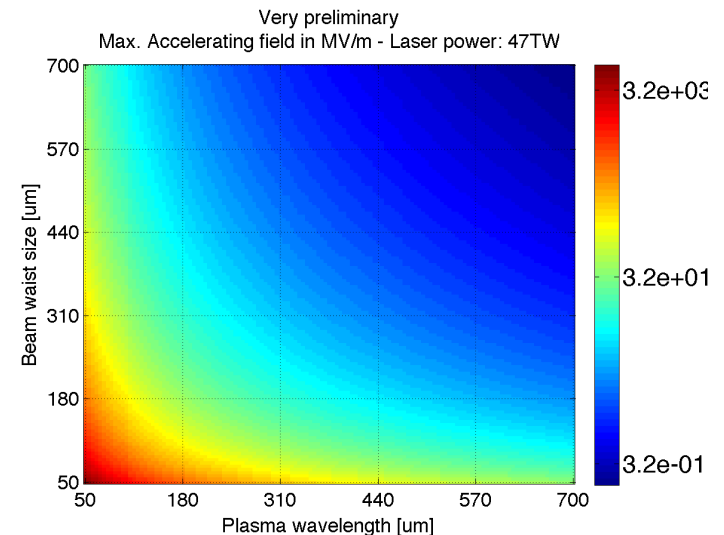
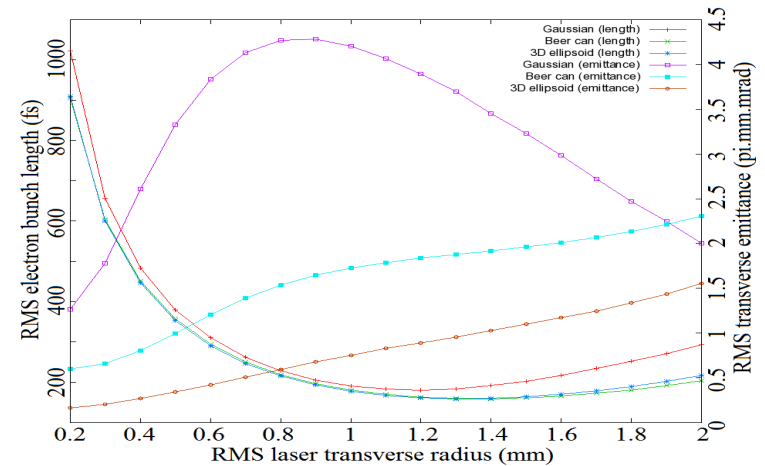
- La photocathode requiert un vide poussé. Toute « pollution » du vide peut entraîner une dégradation de ses performances.
- Impossible de mettre une fenêtre qui laisse passer le laser et les électrons sans les dégrader de manière importante.
- L'utilisation de gaz légers rends le problème plus difficile.
- Une solution utilisant un pompage différentiel est envisagée.
- Il est nécessaire de trouver une solution avant de pouvoir commencer les premières expériences.
- Utilisation de l'expérience existante au laboratoire (B. Mercier, C. Prevost) avec des systèmes proches réalisés pour le LURE.



Défis à relever:

Transport d'un paquet ultra-court d'électrons

- Le transport d'un paquet d'électrons entraîne son allongement.
- La forme du paquet au moment de sa production est aussi très importante.
- Une optique minimisant cet allongement devra être mise au point pour pouvoir diminuer la longueur d'onde plasma (et donc augmenter le champ accélérateur).



Mise en Forme Spatiale et temporelle

Tests multi-systèmes dans l'IR :

Dazzler, masques de phase, façonnage de photocathode)

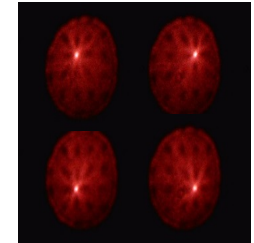
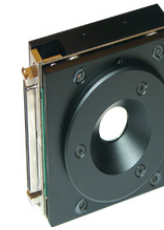
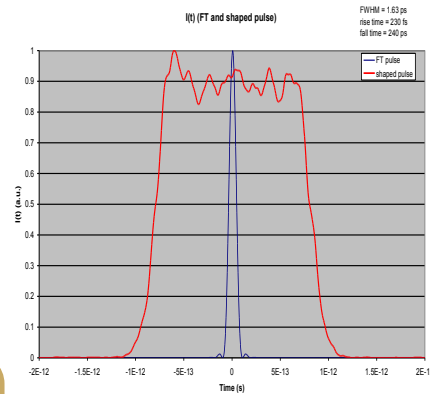
Miroirs déformables, télescopes asphériques

Modelisation S2E

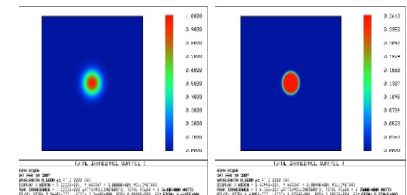
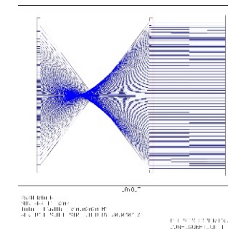
Validation et fiabilisation pour une impulsion « beer-can »

Text hybrides IR-UV et faisceau ellipsoïdal

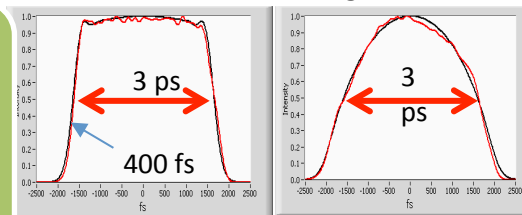
Single-shot IR Longitudinal Pulse Shaping



ZEMAX Calculations



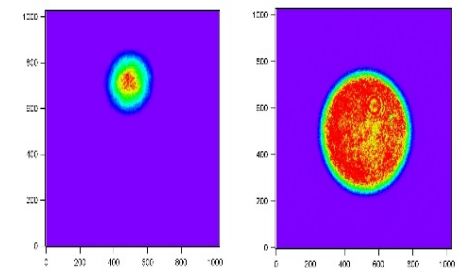
Direct UV@266 nm Longitudinal Pulse Shaping



Square

Parabolic

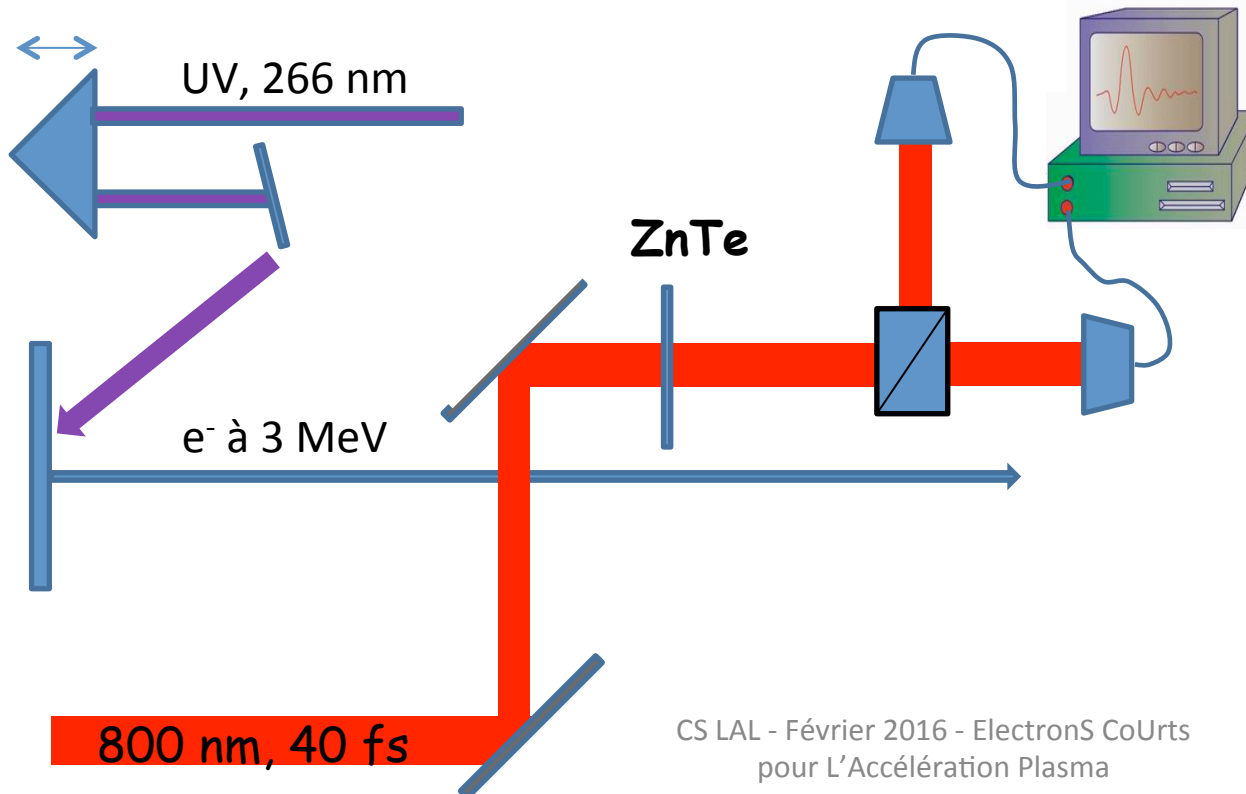
Experiment



Défis à relever: Synchronisation du paquet d'électrons avec le laser IR d'ionisation

Problématique :

- Le paquet d'électrons est créé sur la photocathode par un faisceau UV provenant d'un prélèvement (2 mJ à 800 nm) avant amplification du Laserix.
- Le laser d'ionisation 2 J focalisé suit un autre chemin jusqu'à la cellule plasma.
- Synchronisation du paquet d'électrons et de l'onde plasma.



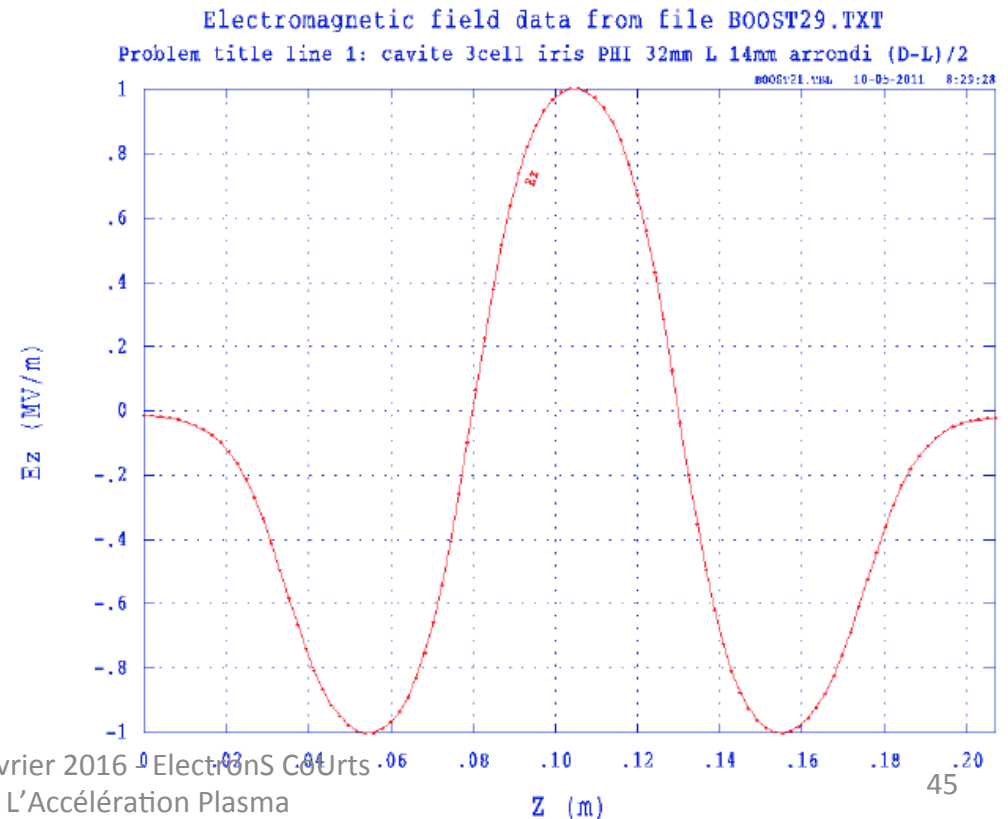
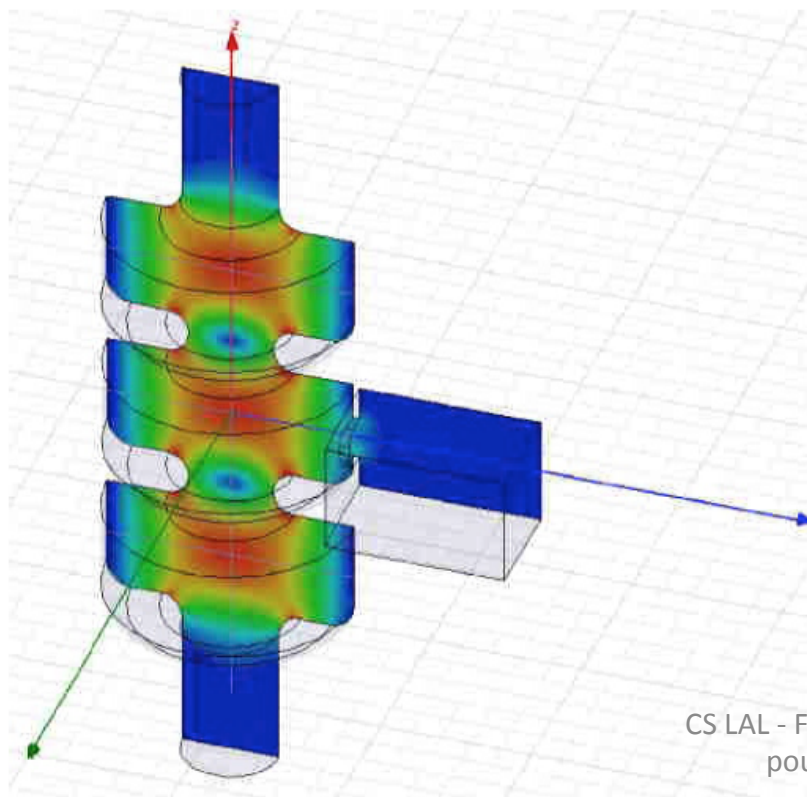
Synchronisation par méthode électrooptique : biréfringence induite par le faisceau d'électrons dans un cristal de ZnTe.

Faisceau d'ionisation atténué sonde la biréfringence et permet la synchronisation temporelle du faisceau laser et du paquet d'électron.

Résolution recherchée : quelques ps (ligne à retard fs)

Conception d'une cavité accélératrice pour atteindre 10 MeV

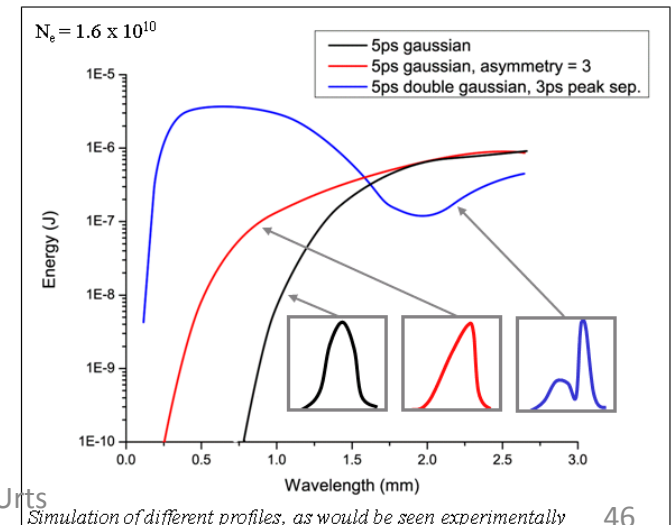
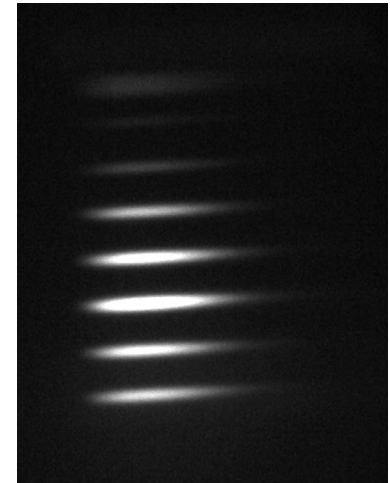
- Une injection à 10 MeV permettra d'étudier pleinement l'interaction électron-plasma dans le régime relativiste
- => conception d'une cavité accélératrice pour PHIL.



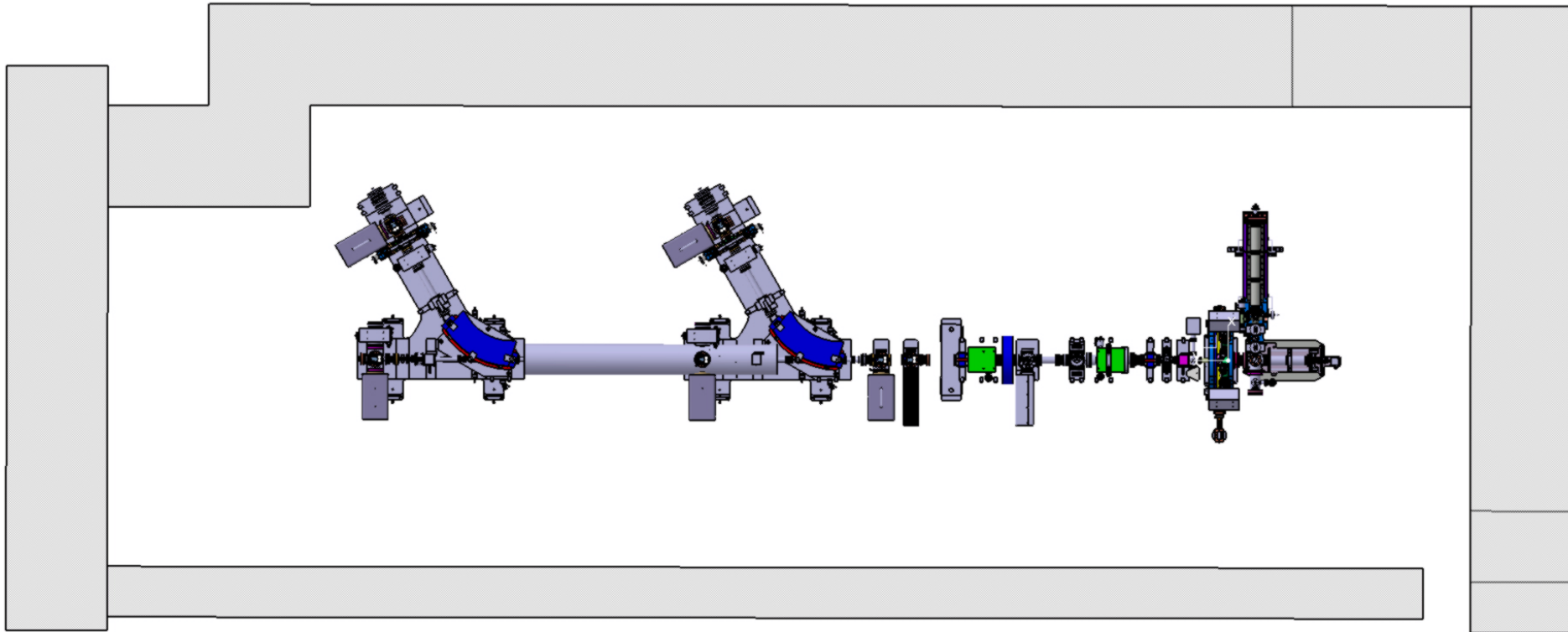
Défis à relever:

Caractérisation des électrons

- L'effet de l'accélération plasma sur les paquets d'électrons devra être analysée.
- Pour cela il faudra caractériser les électrons avec et sans plasma.
- Un enjeu majeur sera la mesure de la structure temporelle des paquets



Installation dans PHIL



- Une longueur d'insertion de 3m est à prévoir pour les expériences d'accélération plasma.
- Afin de pouvoir caractériser les électrons en sortie de cavité accélératrice et en sortie de chambre plasma un deuxième spectromètre devra être installé.

Objectifs pour 2016 (1/2)

2016 = année de travaux préparatoires suivant 3 axes:

- Conception et modélisation
 - Définition de l'optique de transport des photons
 - Définition de l'optique de transport des électrons
 - Définition de la Cellule Plasma
 - Réflexion sur une injection du paquet d'électrons à plus haute énergie.
- ...

Objectifs pour 2016 (2/2)

- Expérience
 - Mise en forme Impulsion UV LASERIX pour la photocathode.
 - Caractérisation paquets d'électrons incident (charge, émittance, spectre).
 - Expériences en mode Multiphotonique.
 - Tests de synchronisation.
 - Réalisation Booster 10 MeV.
 - Approvisionnement déphaseur.
 - Dispositif de mesure de durée des paquets d'électrons et du spectre.
- Administration et stratégie
 - Dépôt de la demande d'Extension de l'autorisation ASN de PHIL.
 - Rédaction d'un Avant Projet Détaillé (APD).
 - Financement extérieur (dont FET-OPEN).
 - Collaborations (CILEX-APOLLON, International).

Budget

- Plusieurs financements extérieurs ont déjà été obtenus ou sont en cours de demande (P2IO, PhOM, FET...).
- La réalisation des tâches préliminaires nous permettra d'estimer le budget total dont nous aurons besoin sur la durée du projet.
- Pour 2016 le budget a été estimé à 48k€.

<i>Coordination</i>	
Missions techniques	3 k€
<i>Booster</i>	
Electronique	5 k€
Composants RF	10 k€
<i>Faisceaux Laser IR-UV et Optique</i>	
Optomécanique	10 k€
<i>Diagnostics Electrons</i>	
OTR	4 k€
Spectromètre électrons	6 k€
<i>Synchronisation</i>	
Spectromètre + caméra CCD	3 k€
<i>Éléments optiques</i>	7 k€

Ressources humaines

Nom	Affiliation	Fraction
Elsa Baynard	CLUPS	0,3
Christelle Bruni	LAL	0,3
Kevin Cassou	LAL	0,15
Julien Demailly	LPGP	0,3
Nicolas Delerue	LAL	0,5
Denis Douillet	LAL	0,2
David Garzella	CEA/DRF	0,3
Alexandre Gonnin	LAL	0,2
Olivier Guilbaud	LPGP	0,3
Stéphane Jenzer	LAL	0,7
Sophie Kazamias	LPGP	0,3
Pierre Lepercq	LAL	0,15
Bruno Lucas	LPGP	0,4
Gilles Maynard	LPGP	0,25
Moana Pittman	CLUPS	0,3

Tableau 1 : Récapitulatif des FTE déjà identifiés pour ESCULAP

- Implication de membres de 4 laboratoires (LAL, LPGP, CLUPS-LUMAT et CEA/DRF/LIDYL) et 3 tutelles (CNRS, U-Psud et CEA).
- 1 Postdoc déjà financé par P2IO.

Conclusions

- ESCULAP associe Laserix et PHIL pour explorer, pour la première fois en France, la production de paquets courts d'électrons relativistes et leur interaction avec une onde plasma de très forte amplitude.
- Le principal objectif est de démontrer une accélération contrôlée d'une forte charge avec des champs très élevés ≈ 10 GV/m.
- 2016 sera consacrée à des travaux préliminaires et à la rédaction de l'APD d'ESLULAP pour la période 2017-2020.
- ESCULAP a une bonne complémentarité avec d'autres projets de Paris-Saclay