

Activités en cours dans le groupe MPY-1 à DESY sur les applications du THz dans le domaine des accélérateurs

Thomas Vinatier

DESY, Hambourg, Allemagne

Journée CEA PTC “Instrumentation et Détection”, Vendredi 11 Octobre 2019, Nano Innov, CEA Paris Saclay

Remerciements à Ralph Assmann (group leader), Ulrich Dorda, Barbara Marchetti, Francois Lemery, Max Kellermeier, Hannes Dinter, Frank Mayet, Klaus Flöttmann, l'équipe LASERIX et Christelle Bruni (LAL)

Les recherches menant à ces résultats ont reçues un financement du Conseil Européen de la Recherche sous le European Union's Seventh Framework Programme (FP/2007-2013) ERC Grant Agreement n. 609920, et par Laserlab-Europe Grant Agreement n. 654148.

Plan

- > Introduction
- > Activités en cours liées au THz
- > Conclusions



HELMHOLTZ RESEARCH FOR
GRAND CHALLENGES



Plan: Introduction

> Introduction

- Présentation générale du groupe MPY-1
- Utilité du THz pour les accélérateurs
- Etat de l'art et challenges
- Structure considérée: guide d'onde diélectrique

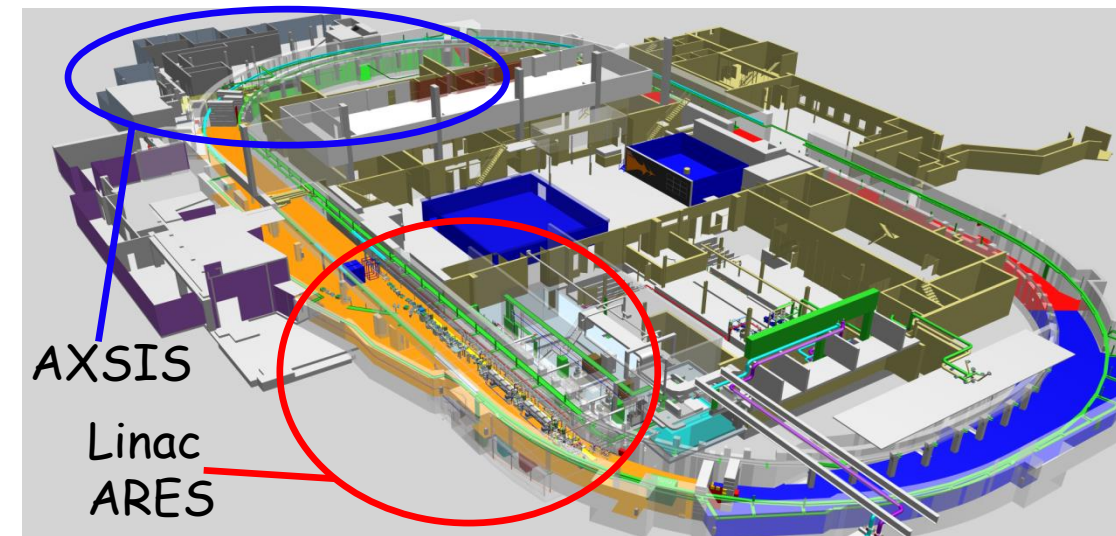
> Activités en cours liées au THz

> Conclusions



Présentation générale du groupe MPY-1

- > **MPY-1**: Groupe inclus dans ARD (Accelerator Research and Development) à **DESY**. Travail portant sur les **nouvelles méthodes d'accélération et de diagnostics** des faisceaux d'électrons. Centré autour du projet **SINBAD** (Short INnovative Bunches and Accelerators at Desy) et du linac ARES (en cours de commissioning).



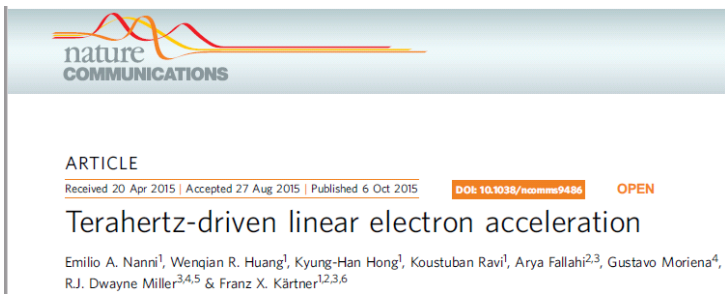
- > **Plusieurs sous-groupes**:
 - Accélération laser-plasma (injection externe)
 - Dielectric laser acceleration DLA (longueur d'onde 1-2 μm)
 - **Accélération et diagnostics par THz (longueur d'onde 1-2 mm)**

Utilité du THz pour les accélérateurs

- > **Basses fréquences** (quelques GHz) **et amplitudes** (quelques dizaines de MV/m) employées dans les **structures accélératrices conventionnelles** (L-band et S-band)
→ Longue ligne faisceau (≥ 10 m) pour avoir un faisceau d'e⁻ de plus de quelques MeV et/ou comprimés à la **femtoseconde** ou moins.
- > Une des méthodes nouvellement étudiées (≈ 5 ans) pour construire des accélérateurs plus compacts (**complémentaires** des accélérateurs conventionnels) est l'utilisation de champ **THz (0.1 → 10 THz)** injecté dans des **guides d'ondes diélectriques**:
 - Matériau diélectrique → **Champs plus élevés** (jusqu'au GV/m) peuvent être atteints avant claquage → Réduction de la longueur de ligne faisceau pour énergie équivalente (jusqu'à un facteur 100).
 - Haute fréquence → **Compression du faisceau** par velocity bunching **plus forte et plus rapide** (jusqu'à un facteur 100) + Potentiel pour **diagnostic longitudinal avec une résolution (sub)-fs** par adaptation des techniques conventionnelles.
 - Coût de fabrication faible + vitesse de production élevée → **Facilité de remplacement** si erreur de fabrication + Possibilité de **changer de structure pendant opération** → Changement des propriétés du faisceau.

Etat de l'art et challenges

- Plusieurs **expériences d'accélération et diagnostics par THz** réalisées récemment (≤ 5 ans) un peu partout dans le monde.



Première expérience d'accélération THz avec guide d'onde diélectrique. 5 keV de modulation sur un faisceau de 55 keV. Limité par puissance THz disponible et qualité du faisceau d'e⁻.

arxiv:1908.04055 (2019)

Acceleration of relativistic beams using laser-generated terahertz pulses

Morgan T. Hibberd^{1,2}, Alisa L. Healy^{1,3}, Daniel S. Lake^{1,4}, Vasileios Georgiadis^{1,2}, Elliott J. H. Smith^{1,2}, Oliver J. Finlay^{1,4}, Thomas H. Pacey^{1,5}, James K. Jones^{1,5}, Yuri Saveliev^{1,5}, David A. Walsh^{1,2}, Edward W. Snedden^{1,5}, Robert B. Appleby^{1,2}, Graeme Burt^{1,3}, Darren M. Graham^{1,2}, and Steven P. Jamison^{1,4}

Première expérience d'accélération THz d'un faisceau relativiste (35 MeV) sur un accélérateur conventionnel (CLARA). Limité par puissance THz disponible et longueur du faisceau d'e⁻ incident.



Accélération THz récente (projet AXISIS). Démonstration d'un gain d'énergie de 70 keV pour un faisceau de 55 keV. Faible ouverture transverse de la structure (100 μm) → Charge limitée (< 1 fC) et fortes pertes THz lors du couplage.

PHYSICAL REVIEW X 8, 021061 (2018)

Terahertz Streaking of Few-Femtosecond Relativistic Electron Beams

Lingrong Zhao,^{1,2} Zhe Wang,^{1,2} Chao Lu,^{1,2} Rui Wang,^{1,2} Cheng Hu,^{3,4} Peng Wang,⁵ Jia Qi,⁵ Tao Jiang,^{1,2} Shengguang Liu,^{1,2} Zhuoran Ma,^{1,2} Pengfei Qi,^{1,2} Pengfei Zhu,^{1,2} Ya Cheng,^{5,6} Zhiwen Shi,^{3,4} Yanchao Shi,¹ Wei Song,⁷ Xiaoxin Zhu,¹ Jiayu Shi,⁸ Yingxin Wang,⁸ Lixin Yan,⁸ Liguo Zhu,⁷ Dao Xiang,^{1,2,10,*} and Jie Zhang^{1,2,11}

Diagnostic et correction du jitter en temps d'un faisceau d'e⁻ pour UED. Faible ouverture transverse (10 μm) → Limité aux faibles charges (10's fC).



Mesure du profil temporel d'un faisceau d'e⁻ par THz streaking. 15 fs résolution démontrée. Faible ouverture transverse (10's μm).

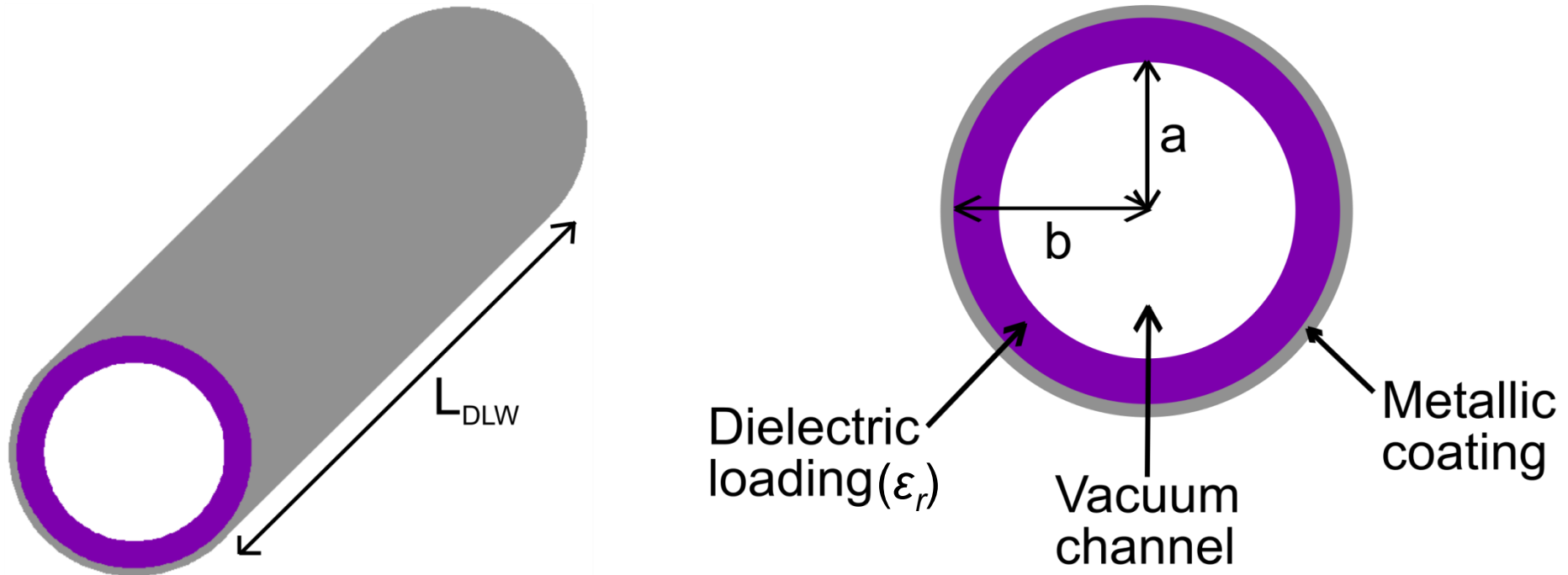


HELMHOLTZ RESEARCH FOR GRAND CHALLENGES



Structure considérée: guide d'onde diélectrique

- > **Structure considérée: Capillaire diélectrique cylindrique creux avec revêtement métallique** servant de guide d'onde pour le THz (\equiv structure à onde progressive).



- > **Différents modes excités selon l'application:** TM_{01} pour accélération (analogue aux structures conventionnelles) et HE_{11} pour diagnostic/déflexion.

Plan: Activités en cours liées au THz

> Introduction

> Activités en cours liées au THz

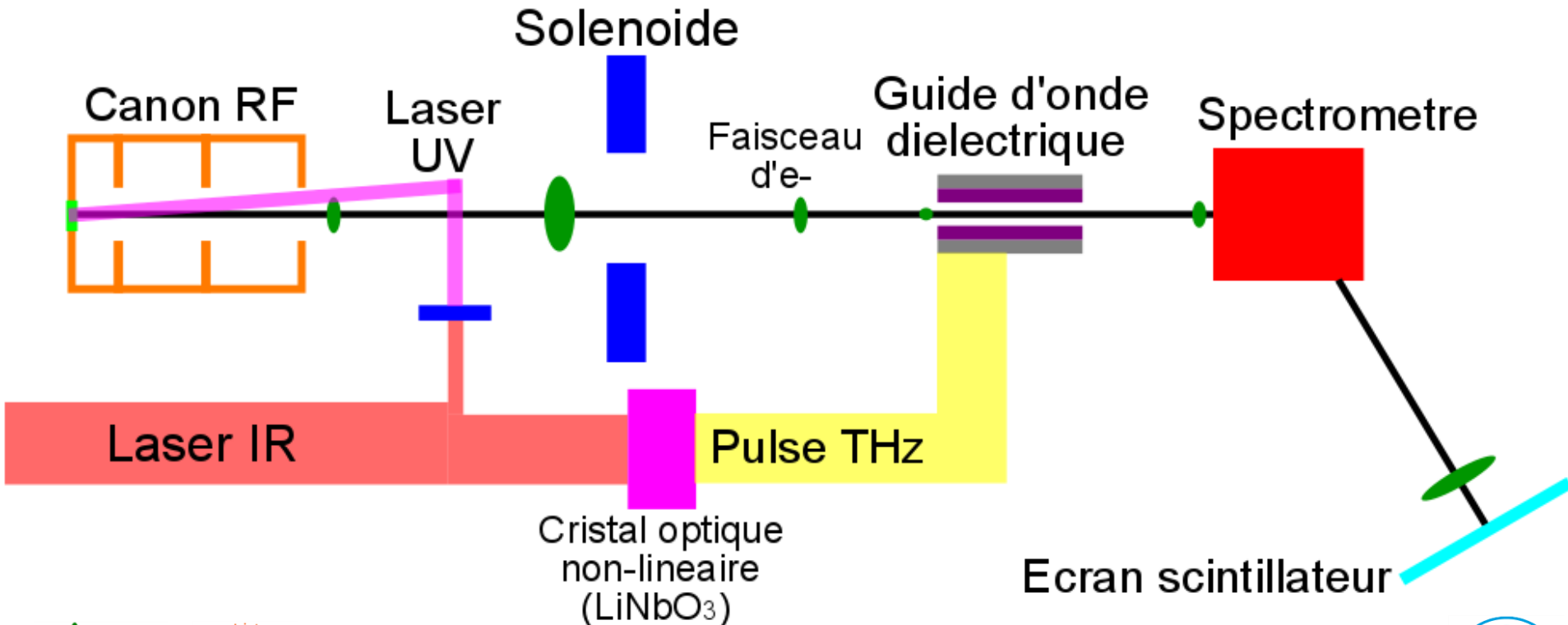
- Expérience d'accélération sur PHIL/LASERIX au LAL
- Diagnostics longitudinaux
- Caractérisation des propriétés du diélectrique
- Etudes sur les applications futures
- Développement d'une ligne de diagnostics compacte

> Conclusions



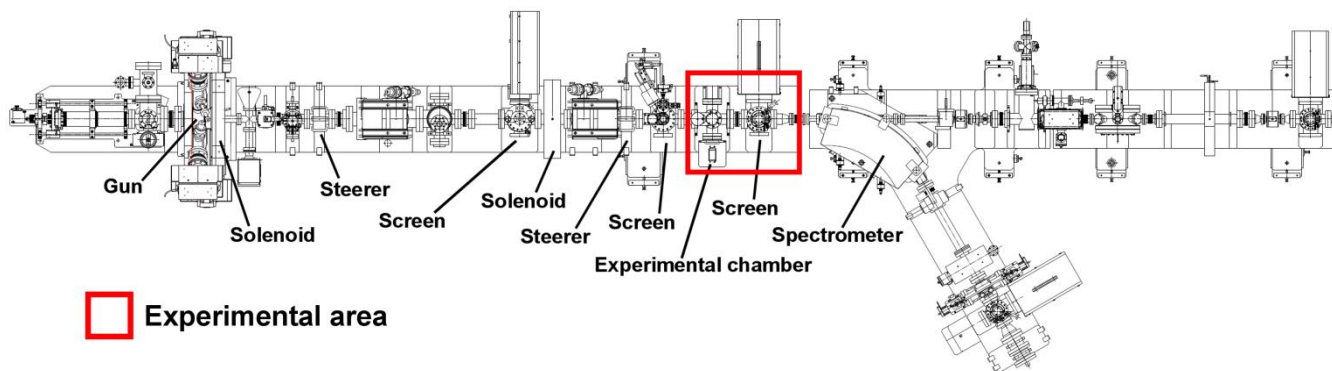
Expérience d'accélération sur PHIL/LASERIX au LAL

- > **Collaboration DESY/PHIL/LASERIX** débutée en 2018 avec pour but de réaliser une **expérience de démonstration pour l'accélération THz**.
- > **Principe**: Injection du faisceau d'électrons venant du canon de **PHIL** dans un **guide d'onde diélectrique** pour post-accélération par un **pulse THz** (génééré à partir du laser IR de **LASERIX**) se propageant dans le guide d'onde (mode TM_{01}).

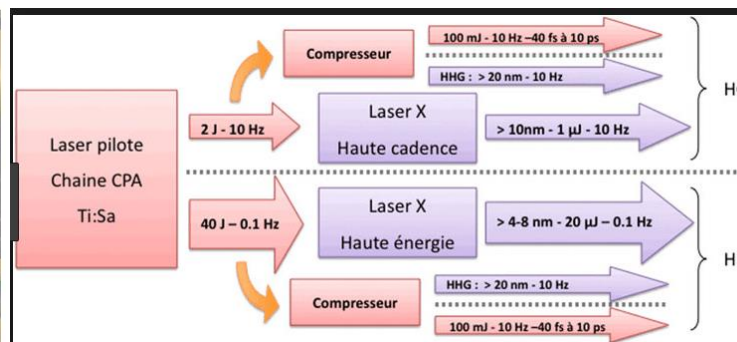


PHIL/LASERIX au LAL

- > **PHIL/LASERIX** au LAL → Combine **photoinjecteur** (paquets courts d'électrons à 3-4 MeV) avec un **laser Terawatt** ($> 1 \text{ J}$ et $< 1 \text{ ps}$) → **Idéal pour une expérience de démonstration d'accélération THz.**



PHIL: Banc de test pour photoinjecteur du LAL. Accueil utilisateurs du faisceau d'électrons.



LASERIX: Laser IR/XUV de l'Université Paris Sud. En synergie avec PHIL + accueil utilisateurs pour IR, XUV et X mous.

Génération de THz sur LASERIX

- > **Première campagne expérimentale** en Novembre 2018 pour **test/validation de la génération de THz** sur LASERIX avec le laser IR (0.91 J, 15 mm FWHM transverse et 1.2 ps FWHM en temporel).

- > Maximum de **1.3 mJ** mesuré à **$f \approx 160$ GHz** dans un pulse de **6 périodes** (≈ 35 MW **puissance crête** moyenne) \rightarrow 0.14% d'efficacité de conversion mesurée.

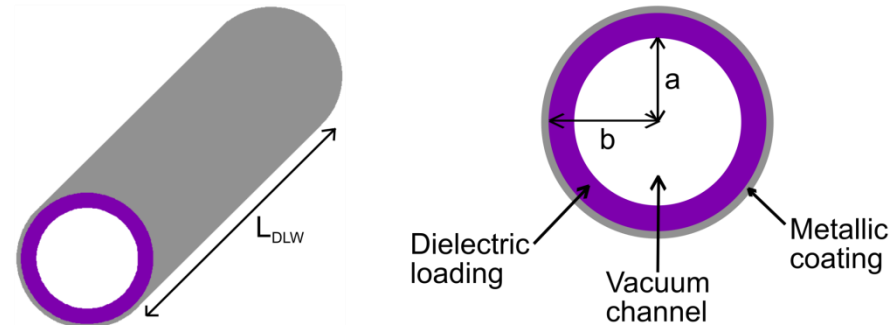
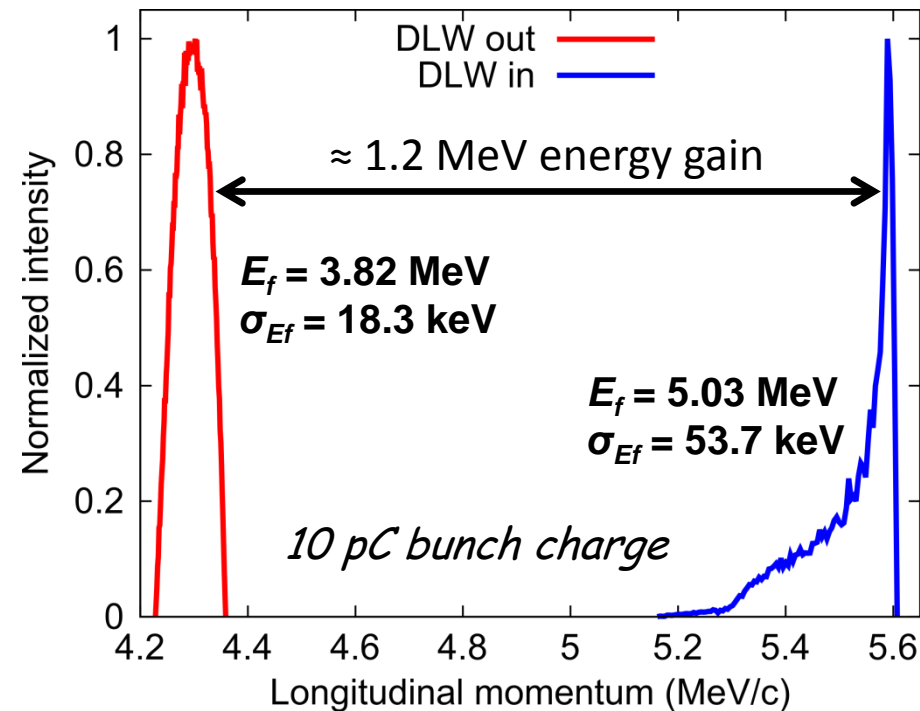
- > **Montage non optimisé** (absorption du THz dans le cristal, extraction et transport du THz jusqu'au détecteur) \rightarrow **potentiel pour amélioration** significative.

Travail soumis pour publication. Preprint accessible sous [arxiv:1909.07472](https://arxiv.org/abs/1909.07472)



Simulations d'accélération sur PHIL

- **Simulations ASTRA** effectuées en prenant en compte les **performances actuelles de PHIL** et les **résultats de génération THz** obtenus sur LASERIX avec marge de sécurité pour pertes (35 MW → 25 MW).



Paramètres assumés du guide d'onde diélectrique et du pulse THz:

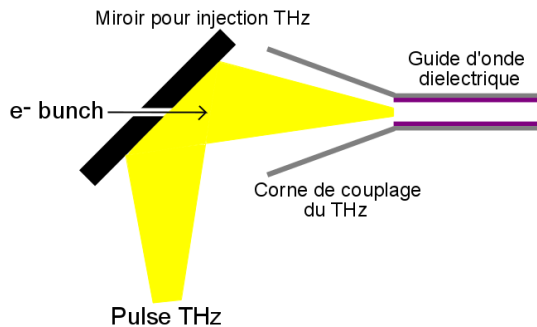
- * $a = 1$ mm; $b - a = 180$ μ m; $L = 2$ cm; $\epsilon_r = 4.4$.
- * Fréquence = 160 GHz; Puissance crête = 25 MW; Amplitude = 63.3 MV/m; Vitesse de phase = c ; Durée = 67 ps; Vitesse de groupe = 0.513c.

- **> 1 MeV de gain en énergie** attendu avec un **shift clair du spectre d'énergie** du faisceau d'e⁻ (aller au-delà de la modulation en énergie déjà démontrée ailleurs).

Futures étapes

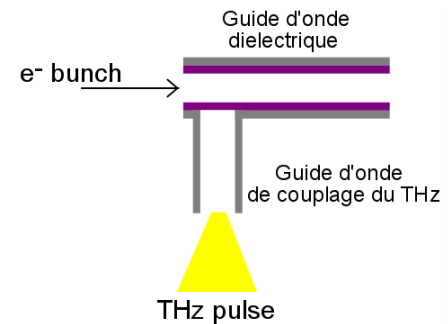
> **Plusieurs étapes à accomplir** avant l'expérience d'accélération THz elle-même:

- Définir le **design du coupleur** pour injection du pulse THz dans le guide d'onde diélectrique (2 options considérées).



* ***Couplage de face***: Le + simple. Efficacité déjà prouvée. Introduit un miroir dans l'axe du faisceau d'électrons → risque de pertes.

* ***Couplage de côté***: Aucun élément dans la ligne du faisceau d'électrons. Reste à dessiner et à tester.



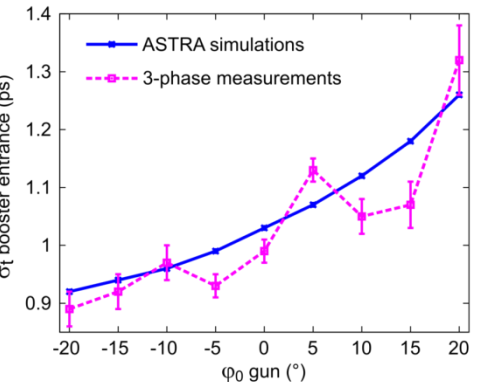
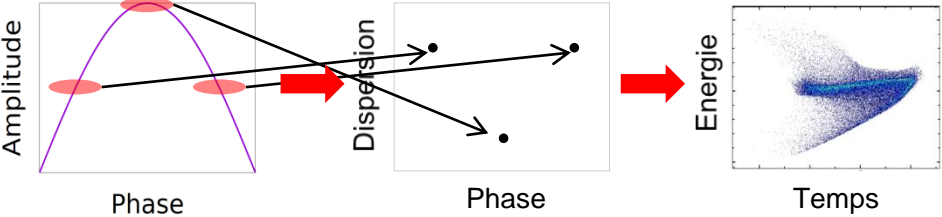
- **Tester l'efficacité du couplage** du THz dans le guide d'onde diélectrique sur **LASERIX** (peut être combiné avec l'optimisation de la génération de THz).
- **Définir l'implémentation de l'expérience** dans la ligne de faisceau de **PHIL**.
- **Transport du faisceau d'électrons** à travers le guide d'onde diélectrique **sans THz**.

Diagnostics longitudinaux

➤ Etudes sur l'**adaptation de concepts conventionnels** de diagnostics longitudinaux dans le **domaine THz** → Potentiel pour **résolution temporelle à la femtoseconde** et en-deçà avec des **diagnostics compacts** (quelques cm).

Méthode des 3 phases / Tomographie

Changement de la phase d'une structure accélératrice
 → Changement du spectre en énergie du faisceau →
 Reconstruction de l'espace des phases longitudinal.



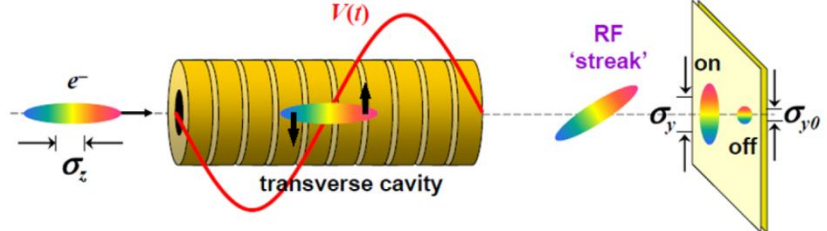
Capacité démontrée à PITZ (1.3 GHz) jusqu'à 900 fs (plot à gauche).

Scaling → Potentiel pour (sub)-fs dans la gamme THz.

Sous-produit (gratuit) d'une expérience d'accélération.

Structure déflectrice transverse

Champ dans la structure → Impulsion transverse
 fonction du temps → Profil temporel déplacé dans le plan transverse → Mesure avec un écran.



Couramment utilisée dans le **domaine RF** avec des résolutions de quelques dizaines de fs (S-band) à moins de 1 fs (X-band). **Longue structure (≈ 1 m) + klystron requis.**

Résolution fs attendue (avec **faible énergie requise**) aux **fréquences THz** avec le mode HE_{11} dans un guide d'onde diélectrique.

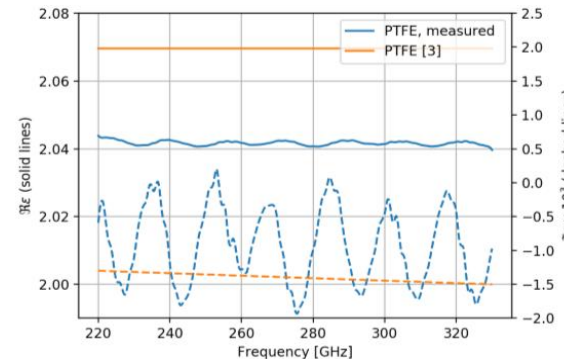
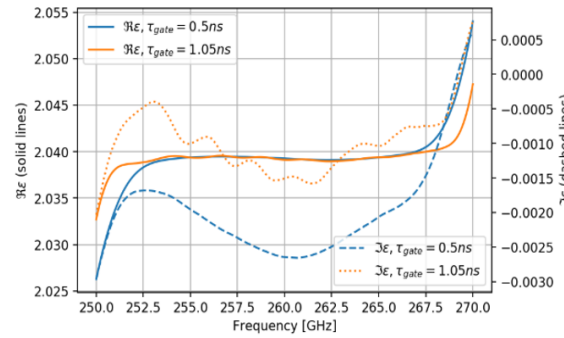
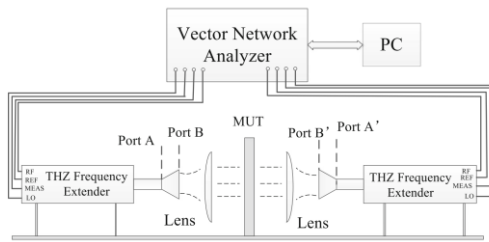
Expérience de démonstration en préparation (REGAE).



Caractérisation des propriétés du diélectrique

> Connaissance des propriétés du diélectrique essentielle:

- **Indice de réfraction** influe sur la **vitesse de phase** du pulse THz dans le guide d'onde (à laquelle la **dynamique du faisceau d'e⁻** est très sensible).
- **Pertes THz** doivent être connues pour déterminer l'**évolution de l'amplitude du champ** le long du guide d'onde.

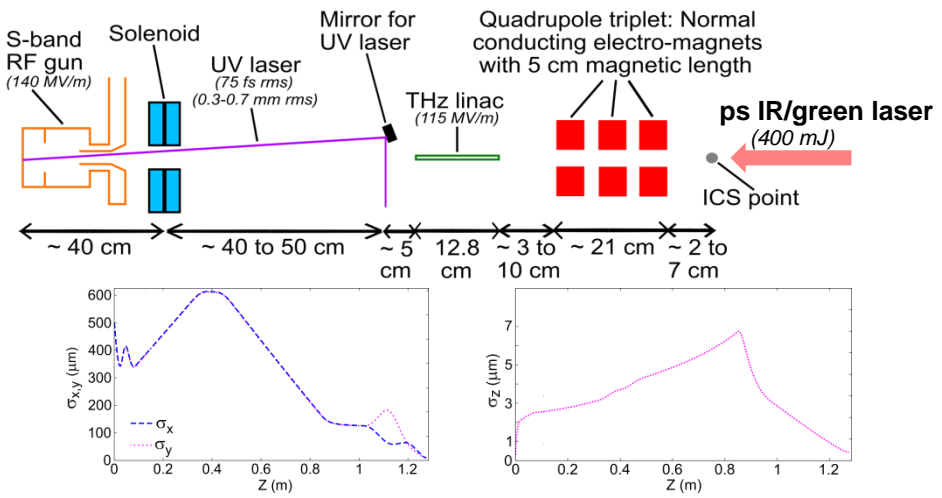


- > Optimisation du montage en cours par étalonnage via un matériau connu (Téflon). Première mesure sur un matériau inconnu (résine pour imprimante 3D).

Etudes sur les applications futures

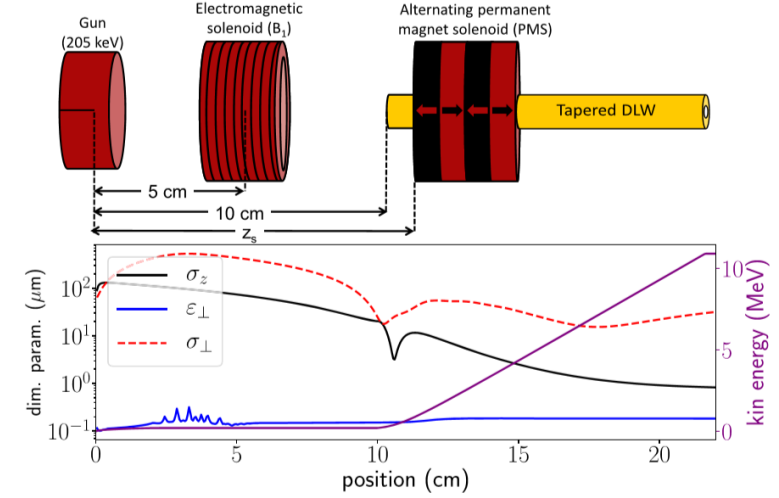
> L'approche étudiée est de coupler un **canon S-band conventionnel** comme source d'électrons avec un **guide d'onde diélectrique dans le domaine THz** pour accélérer et compresser la durée du faisceau d'électrons.

T. Vinatier et al., J. Appl. Phys. **125**, 164901 (2019)



Quelques **pC**, 15-20 MeV, **1 fs**, dispersion < 1%,
taille transverse < **10 μm rms**, ligne faisceau < **1.5 m**

F. Lemery et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **21**, 051302 (2018)



100's **fC**, 10-15 MeV, **qqs fs**, dispersion < 1%, taille transverse 10's μm rms, ligne faisceau **qqs 10's de cm**

- > Applications: - **Source Compton compacte** pour impulsions rayons-X (sub)-femtosecondes.
- **Diffraction électronique** (sub)-femtoseconde
- **Injecteur** pour accélérateurs basés sur le DLA ou le laser-plasma



Développement d'une ligne de diagnostics compacte

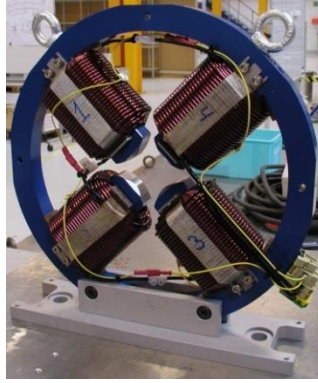
> Développement ligne compacte de diagnostics. **Important pour potentielles applications.**



PCB steerer



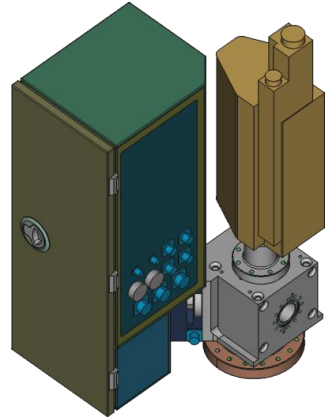
ICT



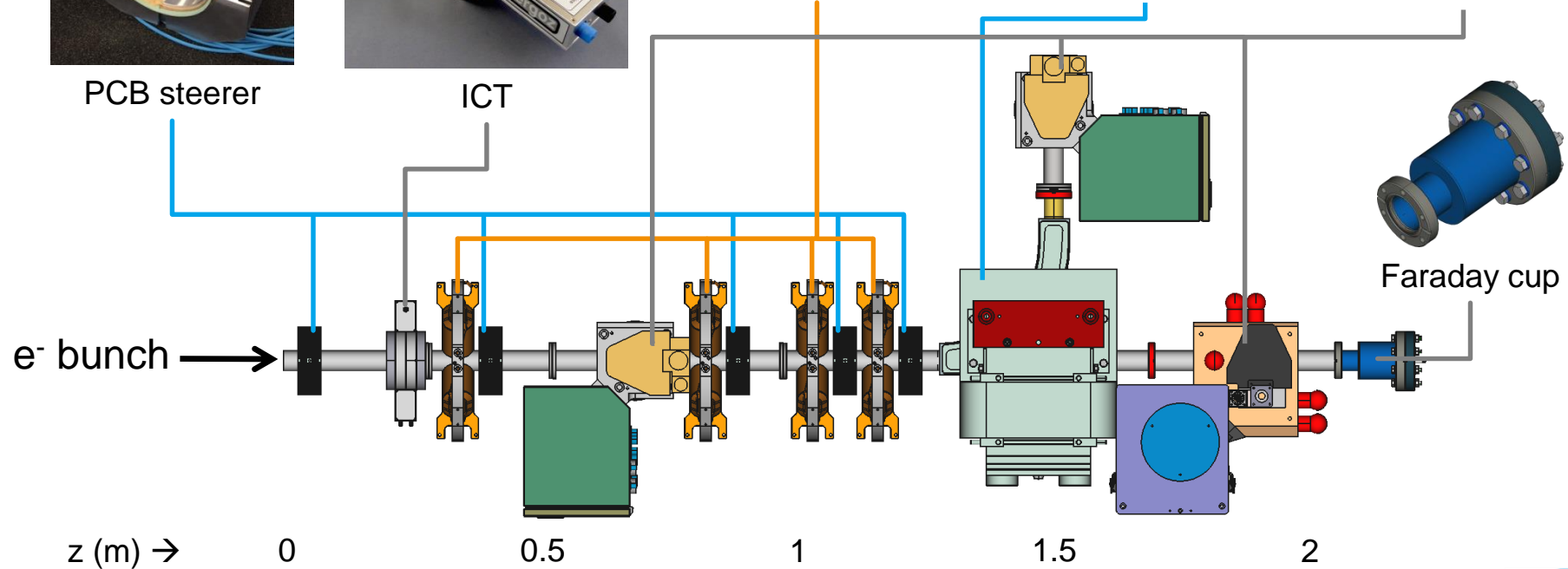
Quadrupole



Spectrometer dipole



Screen station



RESEARCH FOR GRAND CHALLENGES



Plan: Conclusions

- > Introduction
- > Activités en cours liées au THz
- > Conclusions



HELMHOLTZ RESEARCH FOR
GRAND CHALLENGES



Conclusions

- Plusieurs activités liées aux **applications du THz (100-300 GHz)** dans le **domaine des accélérateurs** sont actuellement en cours dans le **groupe MPY-1 à DESY** avec une orientation générale vers **l'accélération et le diagnostic via guides d'ondes diélectriques**. Activité très jeune (**≈ 3 ans**) et limitée en effectif (**4-5 personnes**).

