

# PEPITES & Co.

RIF 16 & 17 Décembre 2025

Marc VERDERI

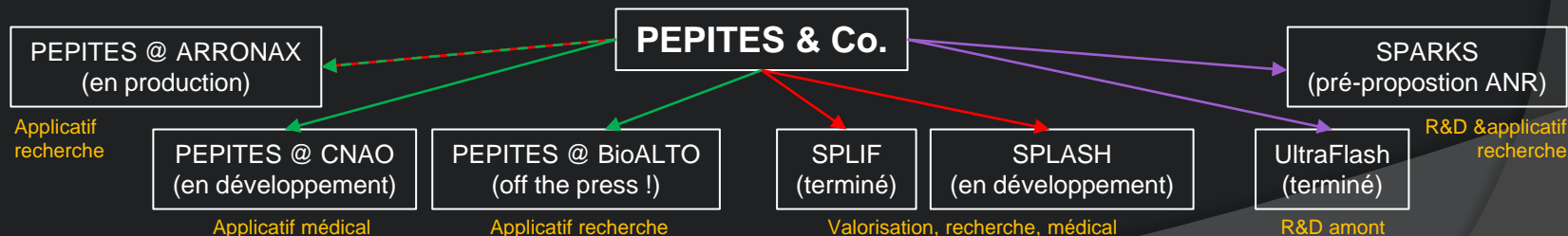
LLR, Ecole polytechnique

# PEPITES: origines & depuis



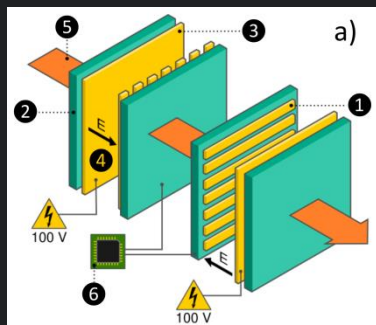
- 2012: discussions<sup>(\*)</sup> avec IBA: changement chambre IC1 à ~2 mètres du patient:
  - Low WET (Water Equivalent Thickness) nécessaire ( $< 15 \mu\text{m}$  WET)
  - Bonne tenue aux radiations ( $10^7 - 10^8 \text{ Gy/an}$ )
- Et on n'a plus entendu parler d'eux depuis 2014 (juste après avoir parlé financement...)
- Mais on s'est pris au jeu !
- Solution d'un **profileur à électrons secondaires**, construit avec des **méthodes de Couches Minces**
  - C'est ultra-mince,  $10 \mu\text{m}$  WET, potentiellement  $0.6 \mu\text{m}$
  - Cela a une grande gamme dynamique
  - C'est tolérant aux radiations (matériaux en eux-mêmes  $\otimes$  absences de contraintes mécaniques) ( $10^9 \text{ Gy en } e^-$ )
  - Et les Couches Minces permettent de décliner la zone sensible de N façons
- Depuis, il y a un moniteur en opération, à ARRONAX, et des "bourgeons"
  - Bourgeons aussi bien en **conventionnel**, qu'en **FLASH**, voire "**UltraFlash**" (ALP):

(\*)Discussion car des anciens du LLR avaient fourni des profileurs à fibres scintillantes à CNAO et au MedAustron



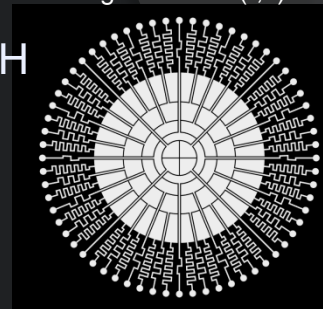
- Mais si je parle de « PEPITES & Co. », il n'y a pas « PEPITES Company » pour autant...
  - Et c'est une question...

# PEPITES: principe



- Moniteur à émission d' $e^-$  secondaires (SEE)
  - Peu de matière nécessaire ( $O(10 \text{ nm})$ ) → minceur
  - Phénomène très linéaire → dynamique+++ → FLASH
  - $e^-$  secondaires  $O(\text{qcq eV})$  → fonctionnement dans le vide
- Construit avec méthodes de Couches Minces
  - Variantes possibles (pistes, segmentation 2D, etc.)

Motif 2D  
segmentation ( $r, \theta$ )



## 1 Côté émission:

Bande d'or, 50 nm épaisseur (10 nm pour SEE → au moins 30 pour conductivité → 50 par sécurité)

## 2 Support isolant mince

Jusque là, du "CP1" (Colorless Polyimide 1, NeXolve, US), mais peut-être Kapton, nitrure silicium, etc.

## 3 Côté collection:

film d'or 50 nm, pour l'anode,  $O(100 \text{ V})$ , mais peut-être plus

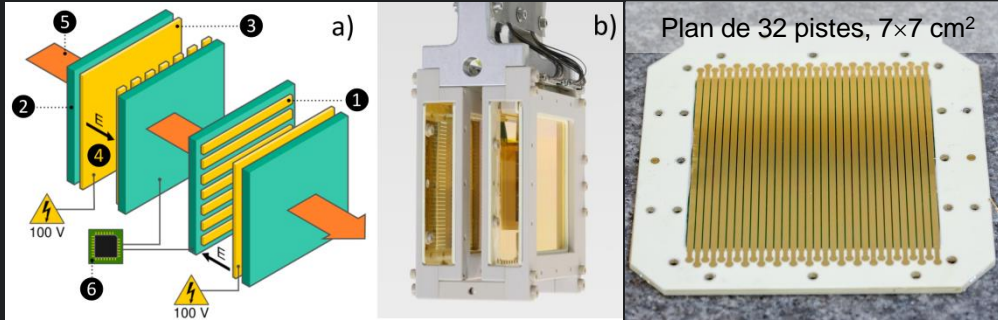
## 4 Champ électrique entre émission – collection

## 5 Faisceau de particules chargées

## 6 Lecture: un canal d'électronique par piste

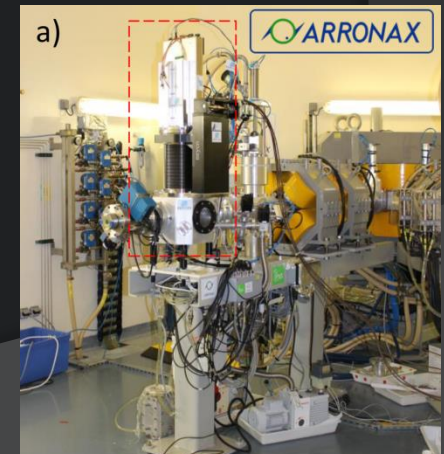
# PEPITES “non-Flash” (faisceau ~continu): ARRONAX, CNAO, BioALTO

# PEPITES @ ARRONAX



- Projet ANR PEPITES (2017 – 2022)
  - ARRONAX, CEA/DEDIP, LLR
- Electronique bas-bruit avec ASIC dédié, conçu par CEA/DEDIP, lecture de courant
- 10  $\mu\text{m}$  WET

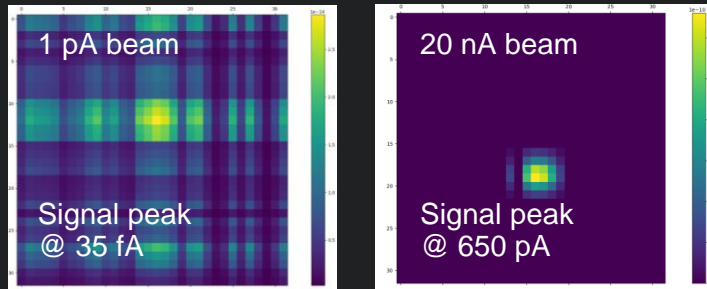
- Installation en mai 2022 sur AX3
- Utilisé en opération de routines
  - Permet retour d'expérience sur le moniteur
  - Feedback sur le mode initialement prévu
    - ie, les faisceaux continus
  - Mais aussi lorsqu'utilisé pour des beams FLASH
    - si pulse pas trop courts
    - La FLASH a (ré)émergé entre le début et la fin de l'ANR PEPITES, qui n'était pas prévu pour cela au départ...



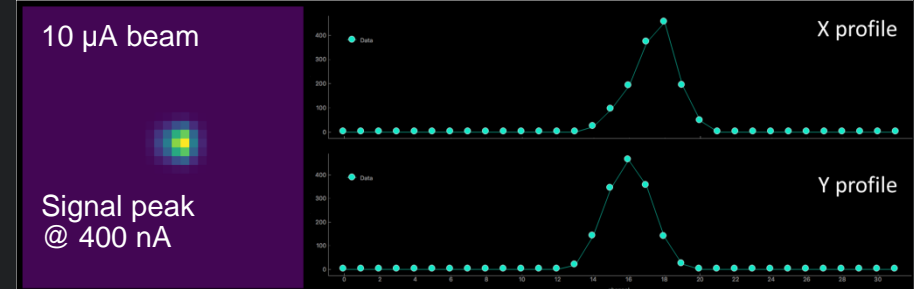
# PEPITES @ ARRONAX

## Faisceaux protons, 68 MeV

### ● Faisceaux continus:

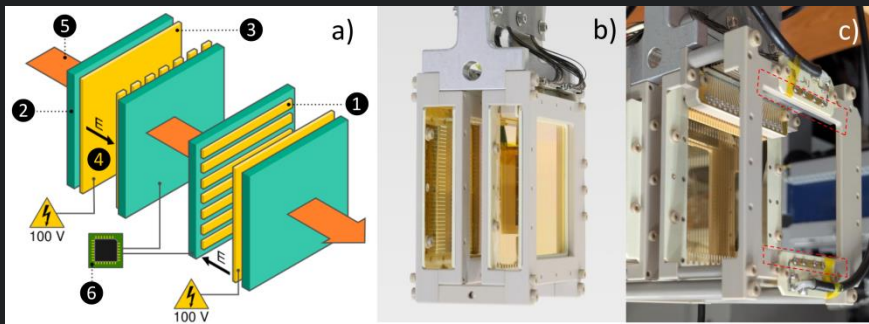


### ● Faisceaux FLASH de 10 ms:



### ● Grande gamme dynamique, grâce à la SEE et la lecture

# PEPITES @ CNAO

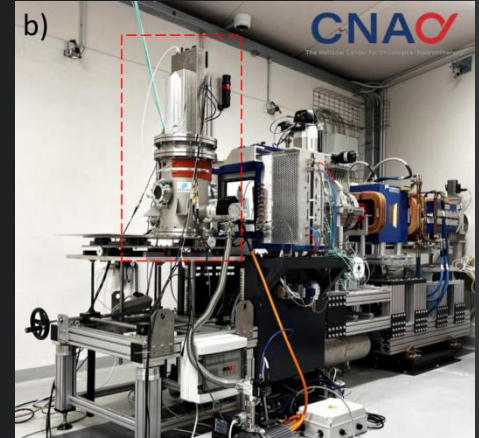
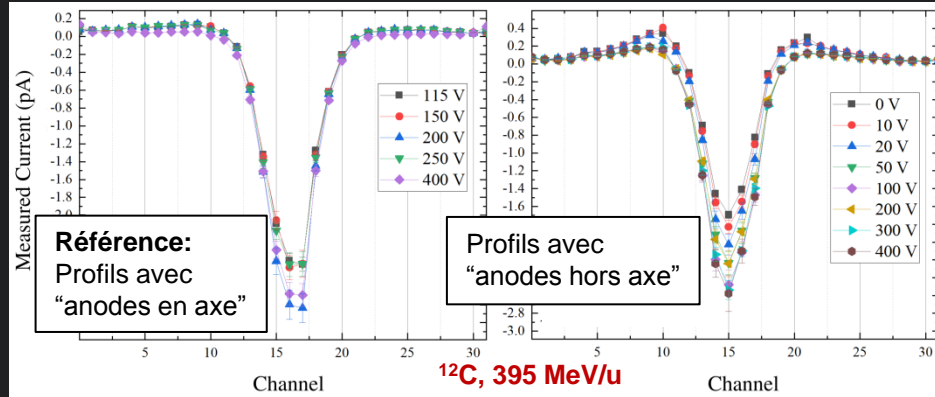


- Vise à application en clinique
- Adaptation de PEPITES à une utilisation à 6.5 m du patient (!)
  - Carbones: 115 – 395 MeV/u
  - Protons: 62 – 227 MeV
- Contrainte: dispersion induite  $< 100 \mu\text{-rad}$ 
  - WET  $10 \mu\text{m}$  trop importante
  - Réduire à 5 (au moins), mais p 62 MeV ☹...
- Options pour réduire la WET:
  - Amincir ② :
    - possible (et envisagé) mais cout+++ (ex: “LuxFilm”, 100 nm épaisseur, O(5000\$/plan))
  - Anodes hors axe: plans d’anode remplacés par de simple barres métalliques hors axe du faisceau
    - on gagne un facteur 2 ( $10 \mu\text{m}$  WET  $\rightarrow$   $5 \mu\text{m}$  WET)
    - au prix d’un champ non-parallèle & non-uniforme : incidence sur les mesures ?
  - Fusionner les plans de pistes en un motif 2D, avec anode hors-axe et amincissement ②
    - Option gardée sous le coude à ce stade
- Option “anode hors axe” à l’étude cette année

# PEPITES @ CNAO

## Utilisation du « PEPITES NOMADE » :

- Copie du PEPITES @ ARRONAX
- Copie de l'électronique de lecture
- Chambre à vide indépendante, pour tests non-invasifs



## Comparaison profils "anodes en axe" (référence) vs "anodes hors axe":

- "Undershoot" à bas champs  $\Leftrightarrow e^-$ 's sens opposés au signal  $\Leftrightarrow$  retour sur pistes voisines ?
- Numériquement, valeurs moyennes et résolutions très proches entre les deux config.
- Effets systématiques (position dépendante) en cours d'étude

# PEPITES @ BioALTO @ IJCLab



## ◎ **“Hot off the press !”**

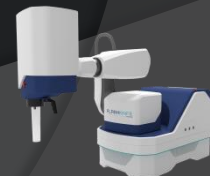
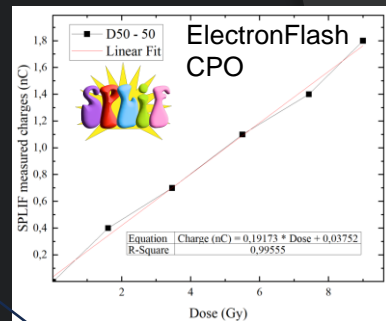
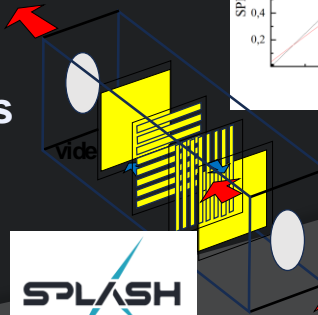
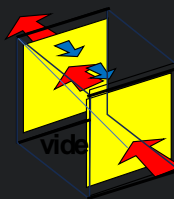


- Quentin Mouchard (& Co.) est lauréat de l' AAP SESAME 2025 de la région Île-de-France !
  - Et un PEPITES dédié fait partie du package.
- ## ◎ Les ions d'intérêt pour BioALTO sont notamment:
- Protons : 4 - 25 MeV
  - Héliums : 15 - 43 MeV
  - Lithiums : 50 MeV
  - Carbones : 87.5 MeV
  - Oxygènes : 128 MeV
  - Dans une gamme d'intensités O(pA) – O(nA)
- ## ◎ Ions peu énergétiques:
- Là aussi, la minceur du détecteur sera un paramètre critique

# PEPITES & Flash: SPLIF, SPLASH, UltraFlash, SPARKS

# SPLIF & SPLASH

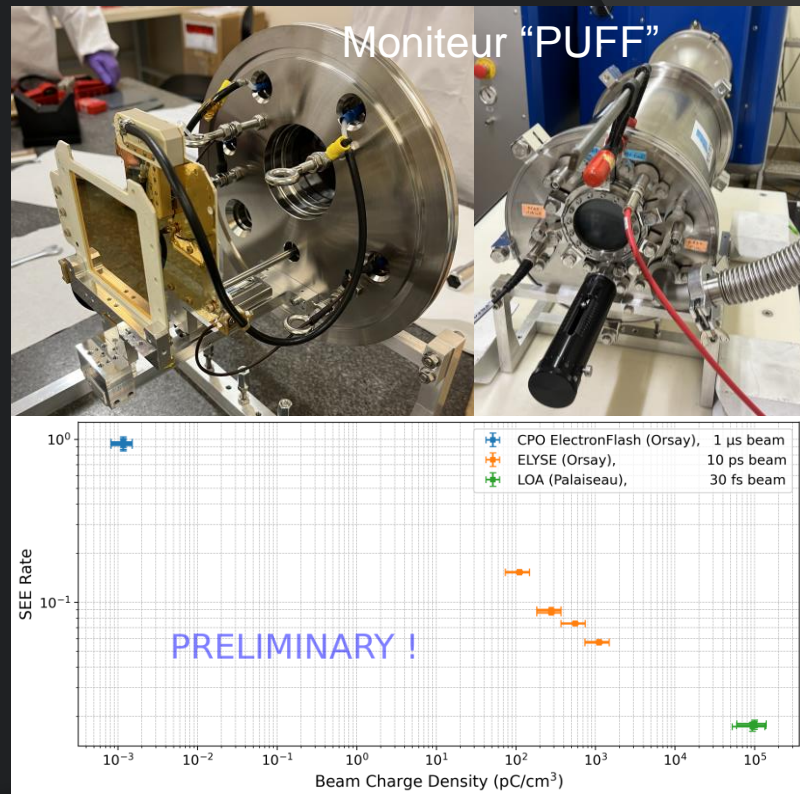
- **But: projets « Proof of Concept » pour dosimétrie et/ou profilage en conventionnel et FLASH, avec les mêmes instruments, portables**
  - Cible: équipement de laboratoires/manips radio-bio
- Projets financés par la prématuration X/IPP, Christophe porteur
- **SPLIF: SimPLe moniteur pour Intensité Flash**
  - 1 an, sept. 2023 – aout 2024
  - Peut-être un brevet (donc je ne montre pas grand-chose...)
  - Etude de marché par cabinet InExtenso
    - « L'intensité, c'est bien, mais si vous pouviez avoir le profil, se serait mieux »...
- **SPLASH: Simple Pepites profiler pour fLASH therapies**
  - 1 ans, mi-avril 2024 – mi-avril 2025
  - Similaire à « PEPITES NOMADE »
    - Mais en nettement plus manipulable...
  - Tests prévus à l'Institut Gustave Roussy, machine Theryq FlashKnife, en février (avec PUFF) et mars, avec SPLASH



FlashKnife Theryq

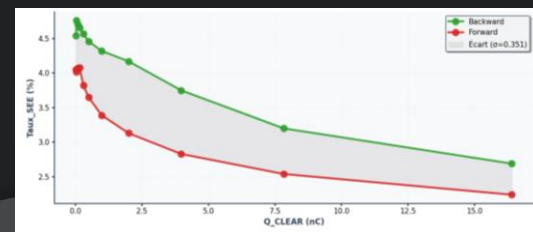
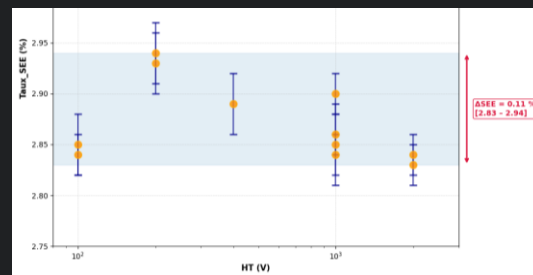
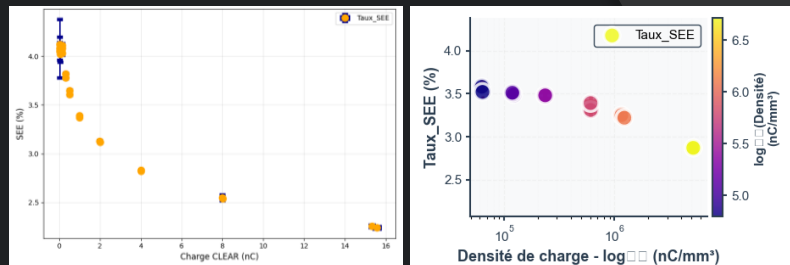
# UltraFlash

- Projet MITI LLR – LOA, 2023 & 2024
  - Applicabilité de la SEE aux faisceaux LPA ?
  - Pulses de O(30 fs), O(30 kA) crête = ☠ ?
- Conception/réalisation d'un appareil simple (PUFF):
  - 2 plans pleins, face à face
  - Gap variable, HT variable
- Données prises (en électrons) à
  - ElectronFlash/CPO: O(1  $\mu$ s)
  - ELYSE (Orsay): O(10 ps)
  - LOA (Palaiseau): O(30 fs)
- Rendement = f(densité de charge)
  - le: charge faisceau / volume faisceau
    - Limitation: faisceau pas uniforme → refaire
  - Fort effet d'atténuation du signal
    - Mais pas sans espoir pour un moniteur

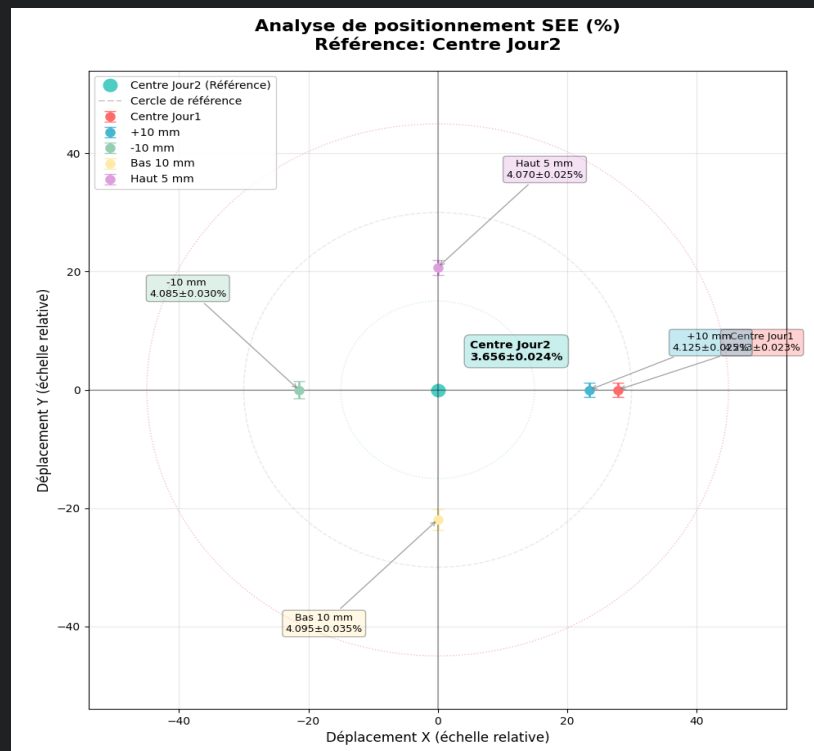


# Test à CLEAR (CERN), mai 2025

- Initialement motivé par SPLASH
  - Mais beaucoup de recouvrement avec UltraFlash, etc.
  - **But: caractérisation du signal de SEE en conditions “assez agressives”**
- CLEAR machine électron très versatile:
  - Trains pulses O(5 ps), 1 à 150 pulses
  - espacés de 333 ou 666 ps
  - O(10 pC) à O(20 nC) (au moins)
  - Energie 80 – 200 MeV
  - Taille faisceau (qcq mm × qcq mm)
- Utilisation de PUFF
- Analyse réalisée par Sadrack
  - Ici présent ;)



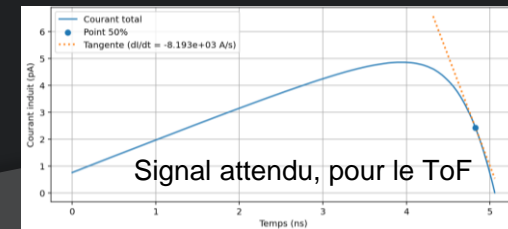
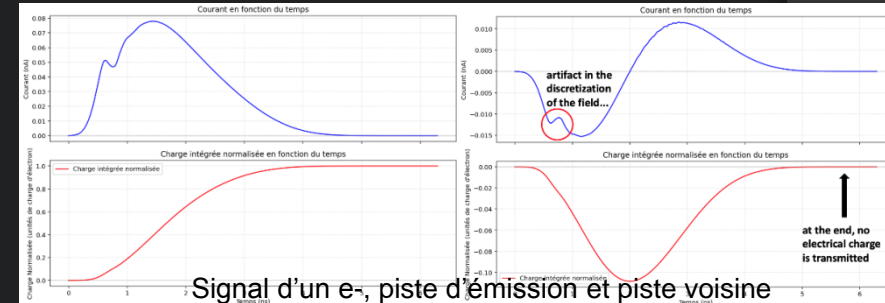
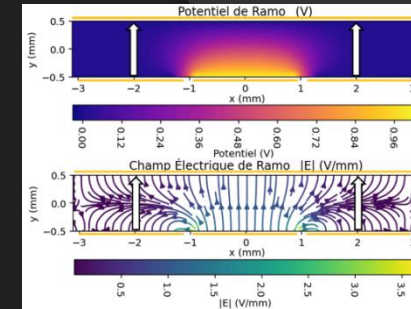
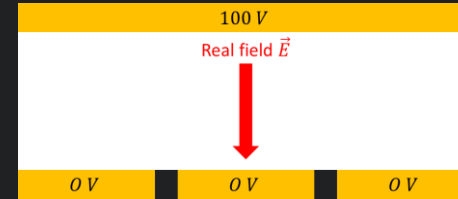
# Test à CLEAR (CERN), mai 2025



- Dépôt d'une pré-proposition ANR: suite du projet MITI UltraFlash (2023 & 2024)
  - En coopération avec le LOA (Palaiseau) et le CEA/DEDIP (Saclay)
  - Durée prévue: 4 ans
- Deux buts principaux:
  - Étude du signal
    - Et compréhension des effets d'atténuation
  - Utilisabilité (peut-on corriger des effets d'atténuation ?) & utilisation de ce signal, pour un profileur de faisceau
- Machine laser-plasma visée: LAPLACE
  - Machine électron 20 MeV – 1 GeV, 100 Hz de taux de répétition
  - Le moniteur devra fournir une mesure / pulse
    - Elec. actuelle doit être repensée → occasion d'une élec. "générique" ?

# ToF avec PEPITES ?

- Idée au départ de Charbel
  - Pas applicable à ARRONAX
  - Mais peut-être à LhARA
    - Protons accélérés LPA → Faisceau très bref → temps de passage précis
- Stage de M1 au printemps
  - Alexandre Poirot (top !)
  - Sujet exploratoire !
- Intérêt:
  - Nécessite de revenir à la compréhension de base de la formation du signal
    - Théorème de Shockley-Ramo
  - Nécessaire pour le ToF
  - Mais très instructif pour PEPITES en général



# What's next ?

# What's next ?

- ARRONAX:
  - suite précieux feedback
- CNAO:
  - Moniteur en clinique d'ici 2 – 3 ans
  - Si tout va bien
  - Et si tout va vraiment très bien: jouvence de O(20) moniteurs sur le site de CNAO...
- BioALTO
  - On commence en janvier...
- SPARKS: si accepté, projet 4 ans
  - SEE en condition extrême
  - Et moniteur basé sur ce signal
  - (fun fact: un projet "SPARK" a été déposé par l'équipe neutrino du LLR...)
- Trans-PEPITES": électronique, capable de servir tous les use-cases serait top
  - A voir par quelle acrobatie financer cela (SPARKS pourrait être une voie...)
- Valorisation:
  - Productions de O(1 - 10) PEPITES-like
    - Echelle
  - SPLIF et SPLASH motivés par une exploration de la problématique d'une industrialisation
  - Mais on commence à comprendre:
    - les industriels n'achèteront qu'une start-up prête à l'emploi...
    - Et ça 30 ans qu'on a 30 ans...
  - De plus, l'idée ne serait pas de faire "un produit", mais des moniteurs avec zone sensible adaptée aux différents sites
    - Cela semble "confusant" par rapport aux cas habituels...
  - Partage des expériences bienvenu...

# Merci !