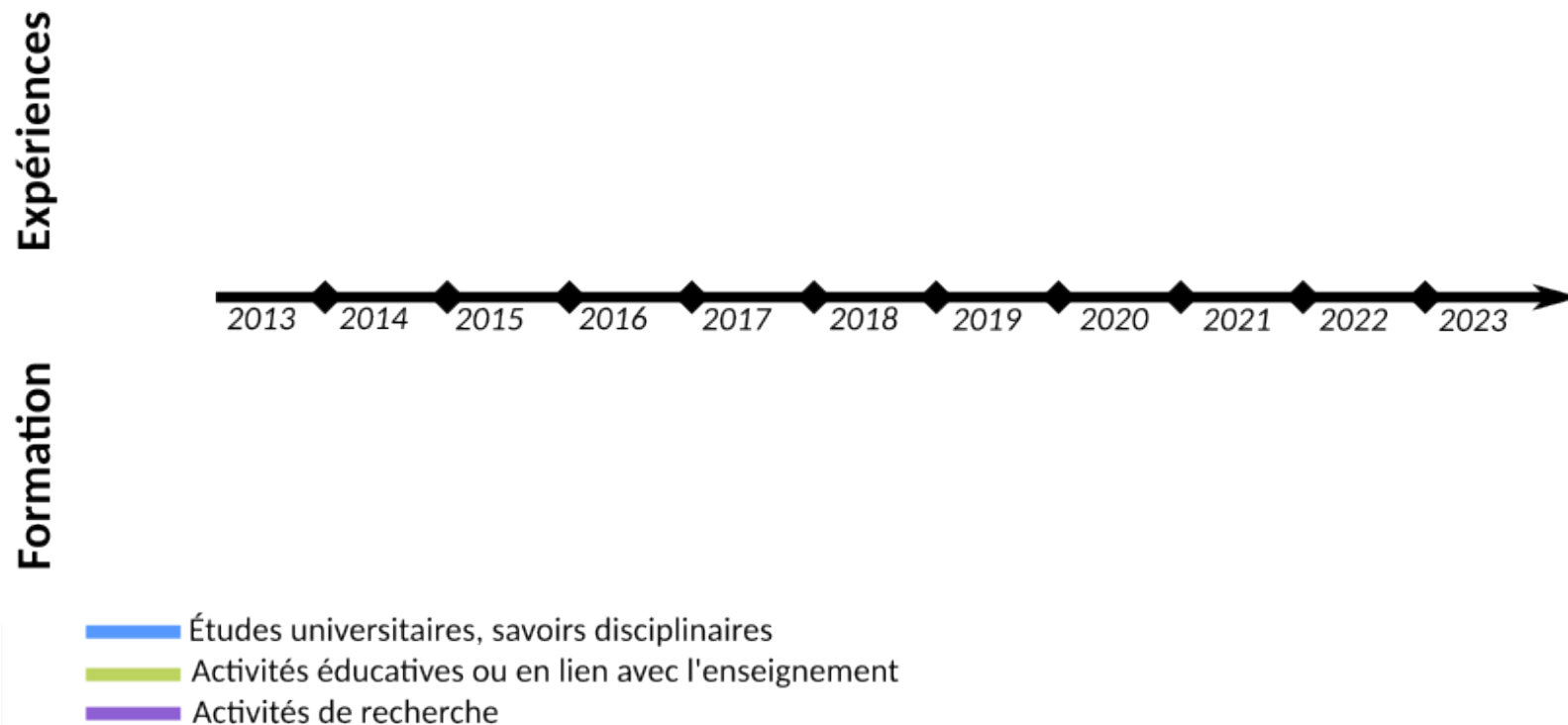


# **Production de photons gamma par laser et création de paires $e^-e^+$ par collision de photons**

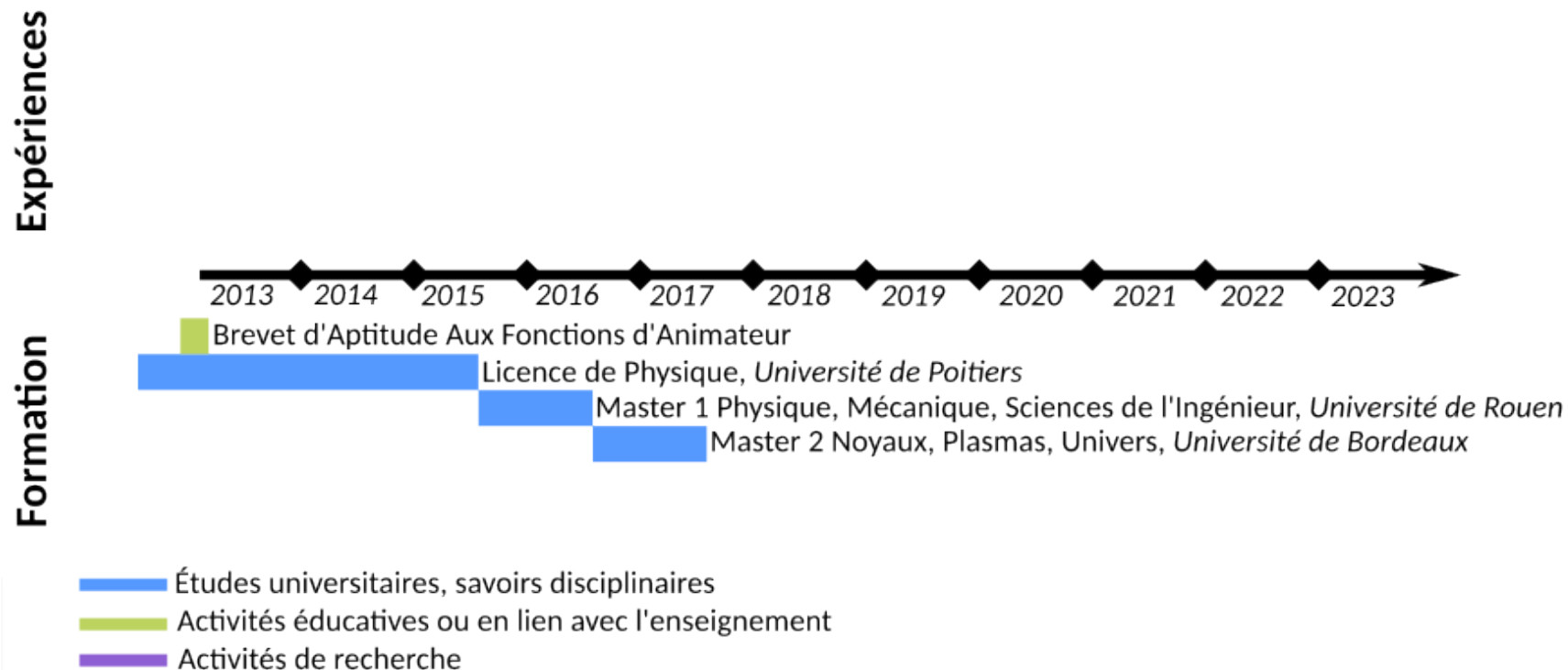
Épreuve de mise en perspective didactique d'un dossier de recherche  
Agrégation spéciale de physique-chimie option physique 2023

**Léo Esnault**

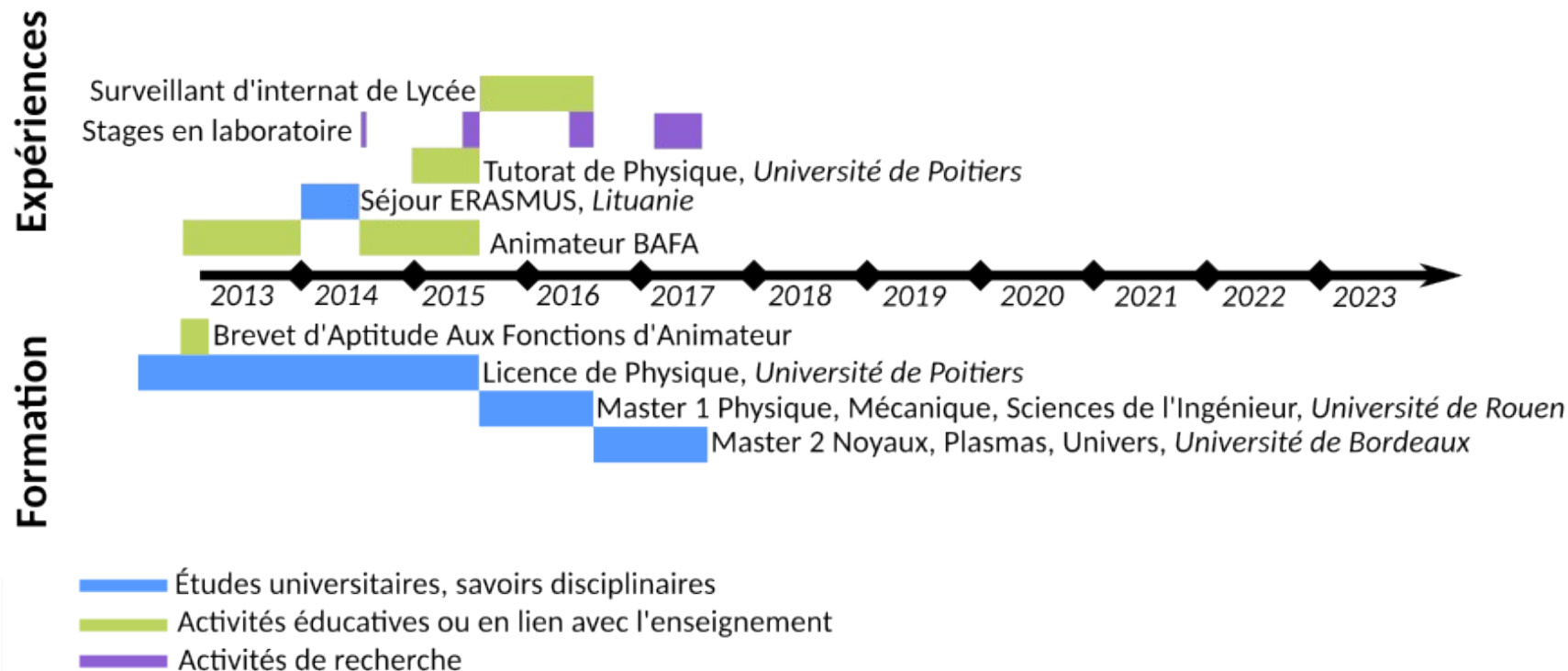
# I - Parcours professionnel



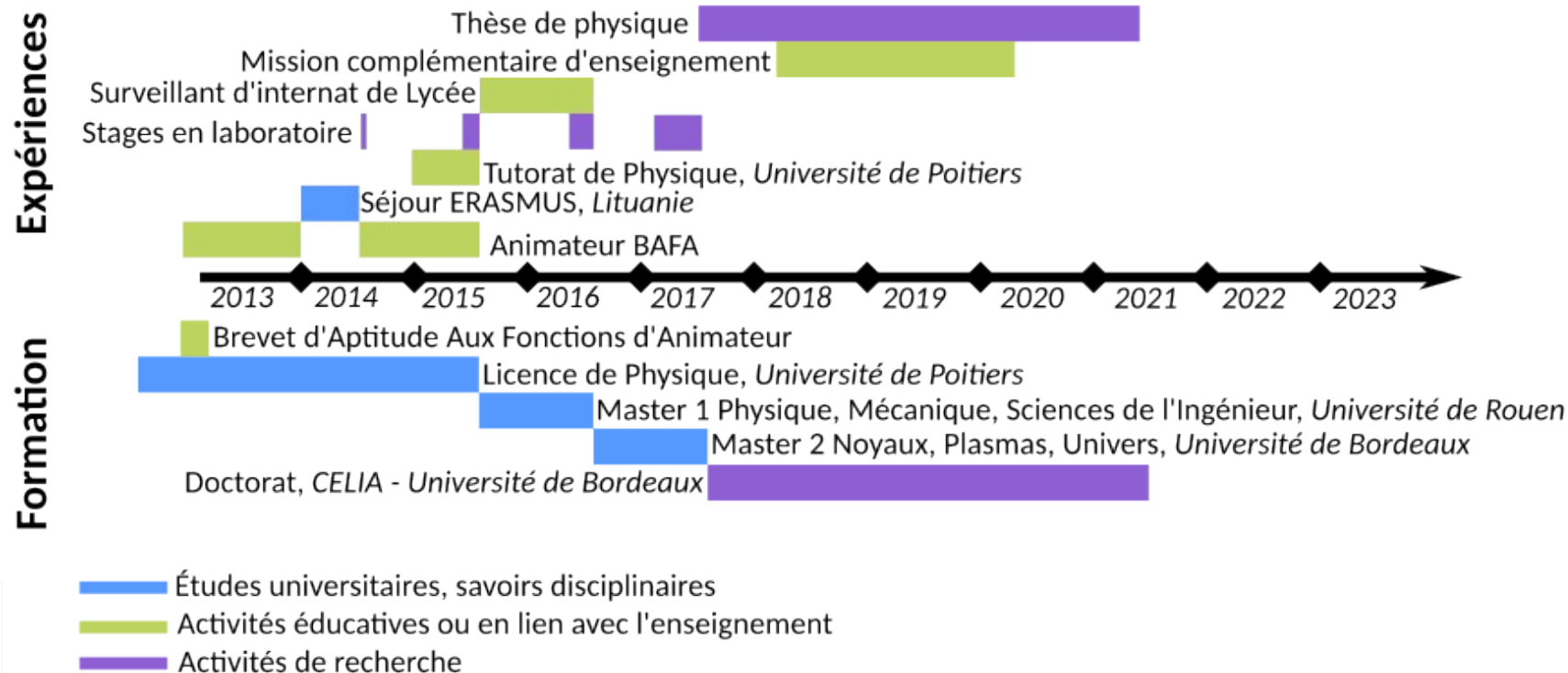
# I - Parcours professionnel



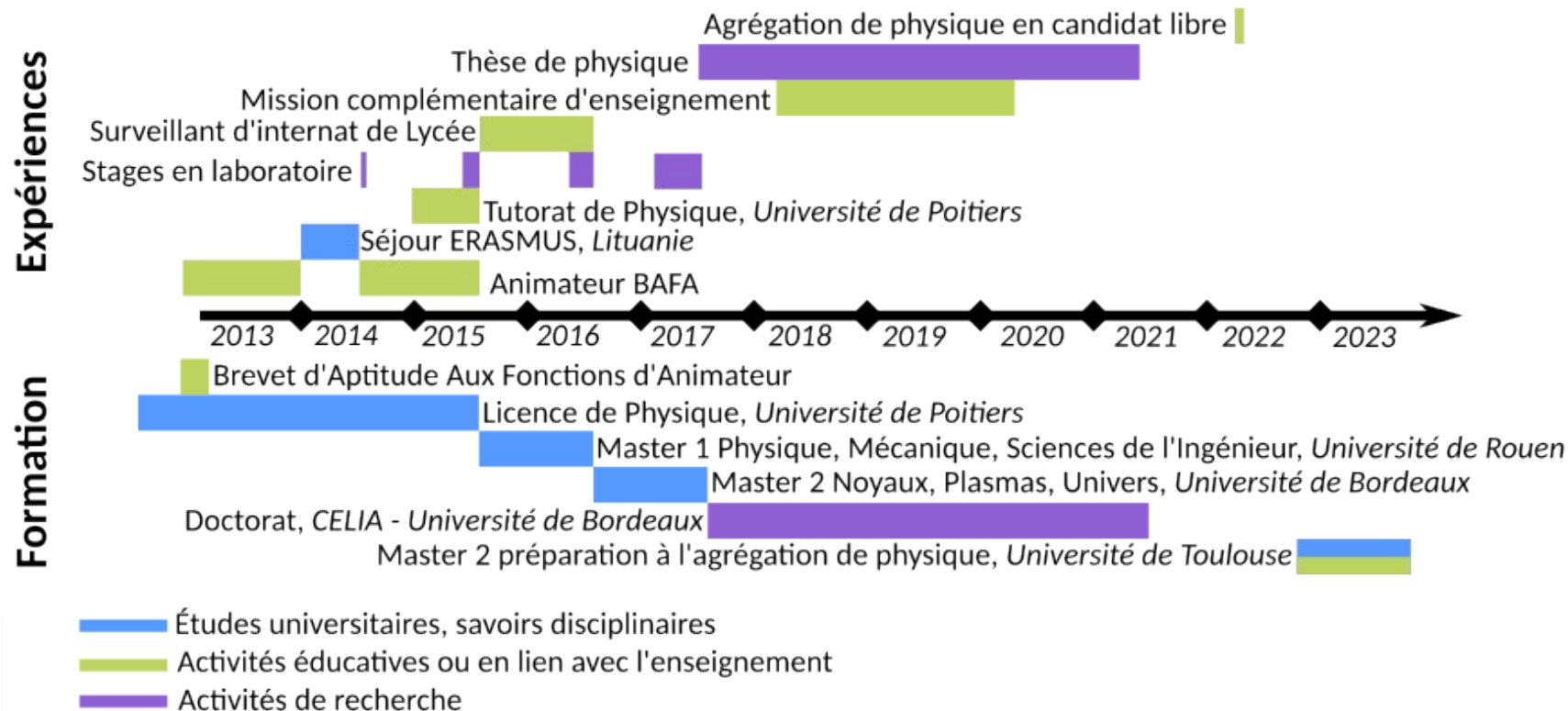
# I - Parcours professionnel



# I - Parcours professionnel



# I - Parcours professionnel



## II - Objectifs et cadre de ma thèse

- Titre : Production de photons gamma par laser et création de paires  $e^-e^+$  par collision de photons
- Objectif : développer une stratégie expérimentale pour l'étude du processus Breit-Wheeler linéaire ( $\gamma\gamma \rightarrow e^-e^+$ ) en laboratoire, en produisant les  $\gamma$  par laser

## II - Objectifs et cadre de ma thèse

- Titre : Production de photons gamma par laser et création de paires  $e^-e^+$  par collision de photons
- Objectif : développer une stratégie expérimentale pour l'étude du processus Breit-Wheeler linéaire ( $\gamma\gamma \rightarrow e^-e^+$ ) en laboratoire, en produisant les  $\gamma$  par laser
- Questions (dans cette présentation):
  - Qu'est ce que le processus Breit-Wheeler linéaire, et comment l'étudier en laboratoire ?
  - Comment estimer et optimiser le nombre de paires  $e^-e^+$  produites ?
  - Comment produire les sources de photons gamma appropriées ?



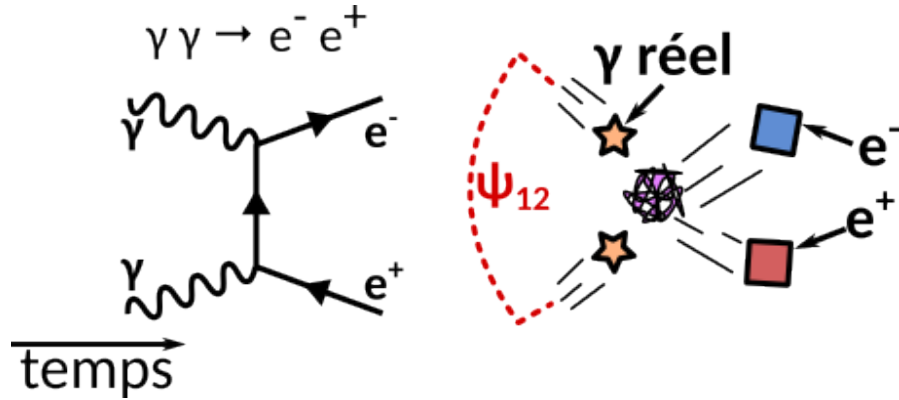
## II - Objectifs et cadre de ma thèse

- Titre : Production de photons gamma par laser et création de paires  $e^-e^+$  par collision de photons
- Objectif : développer une stratégie expérimentale pour l'étude du processus Breit-Wheeler linéaire ( $\gamma\gamma \rightarrow e^-e^+$ ) en laboratoire, en produisant les  $\gamma$  par laser
- Questions (dans cette présentation):
  - Qu'est ce que le processus Breit-Wheeler linéaire, et comment l'étudier en laboratoire ?
  - Comment estimer et optimiser le nombre de paires  $e^-e^+$  produites ?
  - Comment produire les sources de photons gamma appropriées ?

**Ces questions sont interdépendantes (la stratégie de production des photons gamma dépend des possibilités de détection des paires  $e^-e^+$  et inversement)**

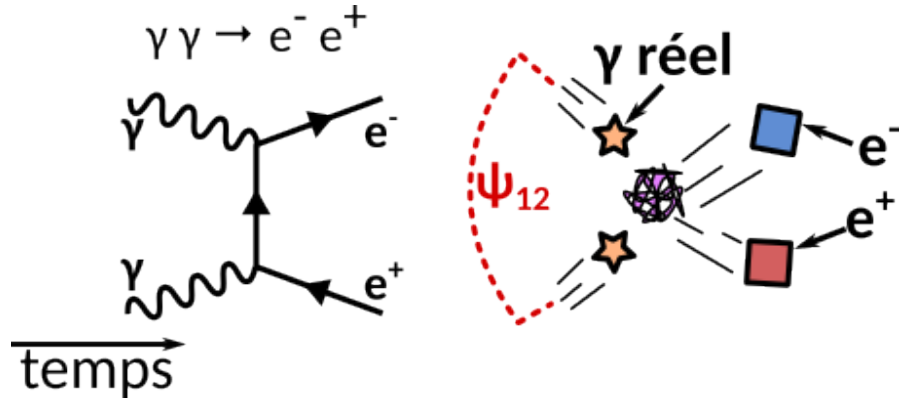
## II - Qu'est ce que le processus Breit-Wheeler linéaire ?

Processus Breit-Wheeler linéaire :



## II - Qu'est ce que le processus Breit-Wheeler linéaire ?

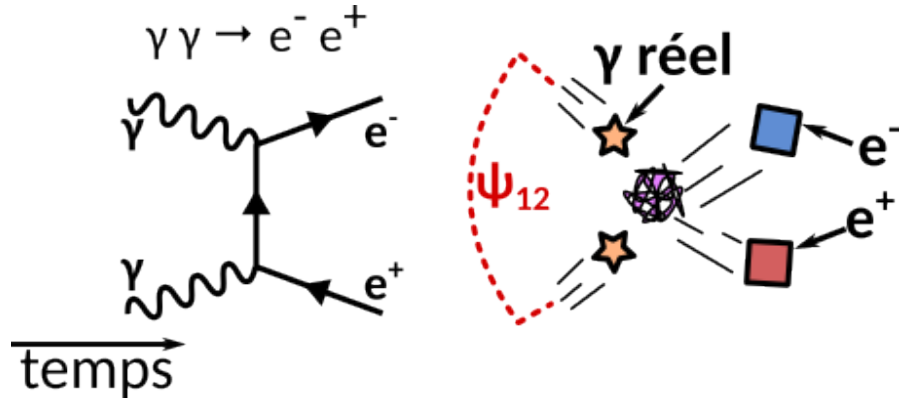
Processus Breit-Wheeler linéaire :



- Création de matière à partir de lumière
- Interaction photon-photon dans le vide (non décrit par les équations de Maxwell)

## II - Qu'est ce que le processus Breit-Wheeler linéaire ?

### Processus Breit-Wheeler linéaire :



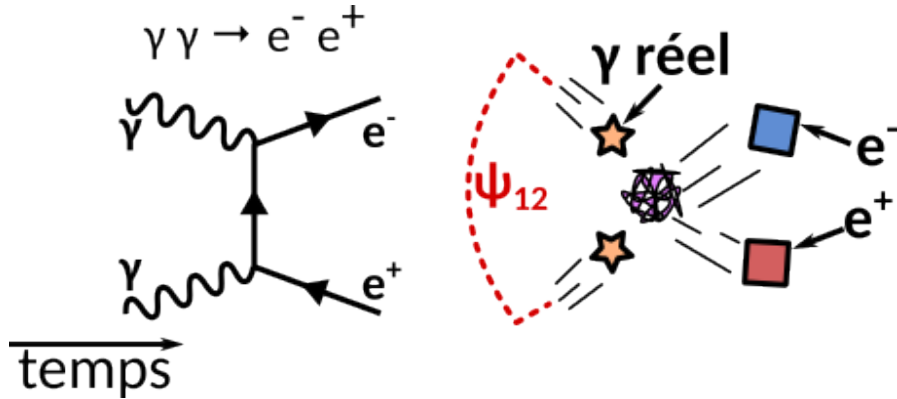
- Création de matière à partir de lumière
- Interaction photon-photon dans le vide (non décrit par les équations de Maxwell)

### • Intérêt :

- Fondamental en électrodynamique quantique
- Important en astrophysique des hautes énergies (opacité de l'univers aux photons TeV, production  $e^-e^+$  proches d'objets compacts)
- Jamais détecté directement en laboratoire !

## II - Qu'est ce que le processus Breit-Wheeler linéaire ?

### Processus Breit-Wheeler linéaire :



- Création de matière à partir de lumière
- Interaction photon-photon dans le vide (non décrit par les équations de Maxwell)

### • Intérêt :

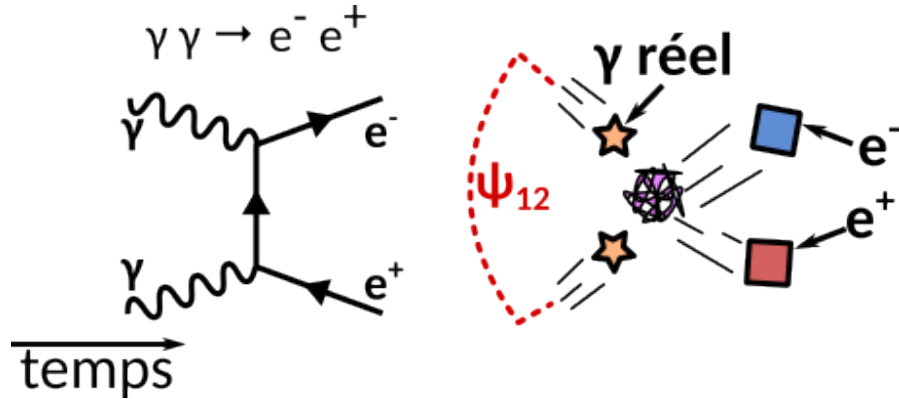
- Fondamental en électrodynamique quantique
- Important en astrophysique des hautes énergies (opacité de l'univers aux photons TeV, production  $e^-e^+$  proches d'objets compacts)
- Jamais détecté directement en laboratoire !

### • Difficultés expérimentales :

- Seuil :  $E_{CM}^2 = 2 E_1 E_2 (1 - \cos(\psi_{12})) \geq (2 m_e c^2)^2$
- Production de sources de photons gamma (énergie  $\gtrsim$  MeV) de haut flux

## II - Qu'est ce que le processus Breit-Wheeler linéaire ?

### Processus Breit-Wheeler linéaire :



- Création de matière à partir de lumière
- Interaction photon-photon dans le vide (non décrit par les équations de Maxwell)

### • Intérêt :

- Fondamental en électrodynamique quantique
- Important en astrophysique des hautes énergies (opacité de l'univers aux photons TeV, production  $e^-e^+$  proches d'objets compacts)
- Jamais détecté directement en laboratoire !

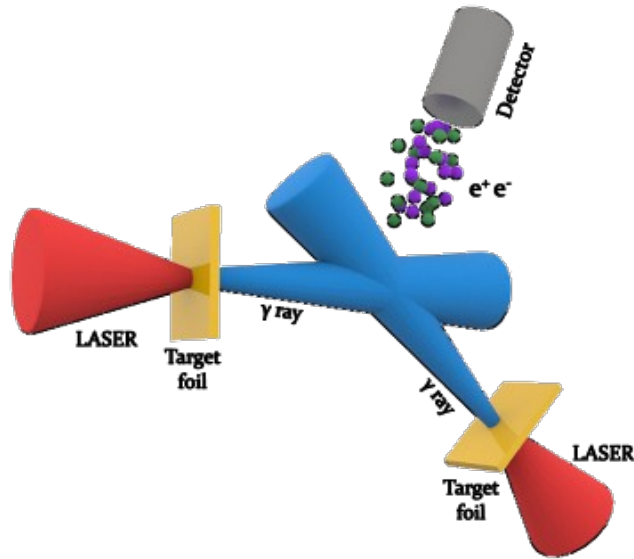
### • Difficultés expérimentales :

- Seuil :  $E_{CM}^2 = 2 E_1 E_2 (1 - \cos(\psi_{12})) \geq (2 m_e c^2)^2$
- Production de sources de photons gamma (énergie  $\gtrsim$  MeV) de haut flux

**Pour observer ce processus en laboratoire, on a besoin de produire des photons gamma**

## II - Comment étudier ce processus en laboratoire ?

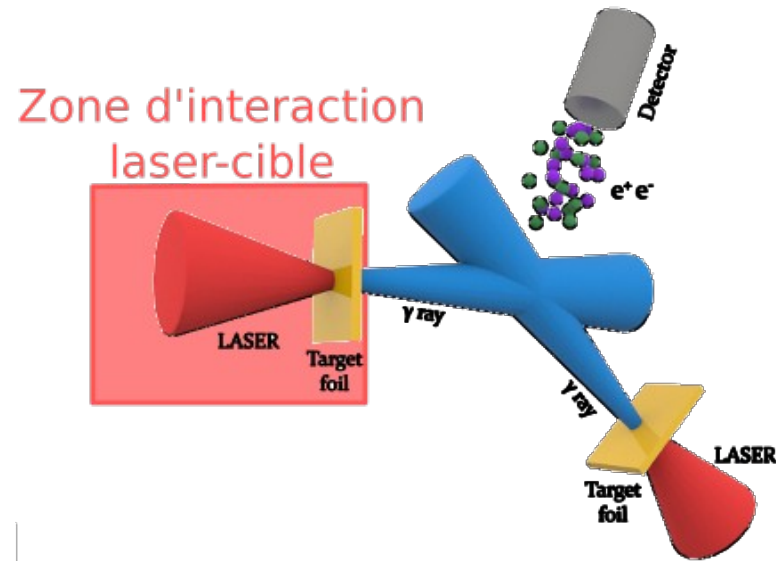
Depuis 2014, il existe plusieurs propositions expérimentales. L'une d'elles :



Ribeyre et al., Physical Review E 2016

## II - Comment étudier ce processus en laboratoire ?

Depuis 2014, il existe plusieurs propositions expérimentales. L'une d'elles :

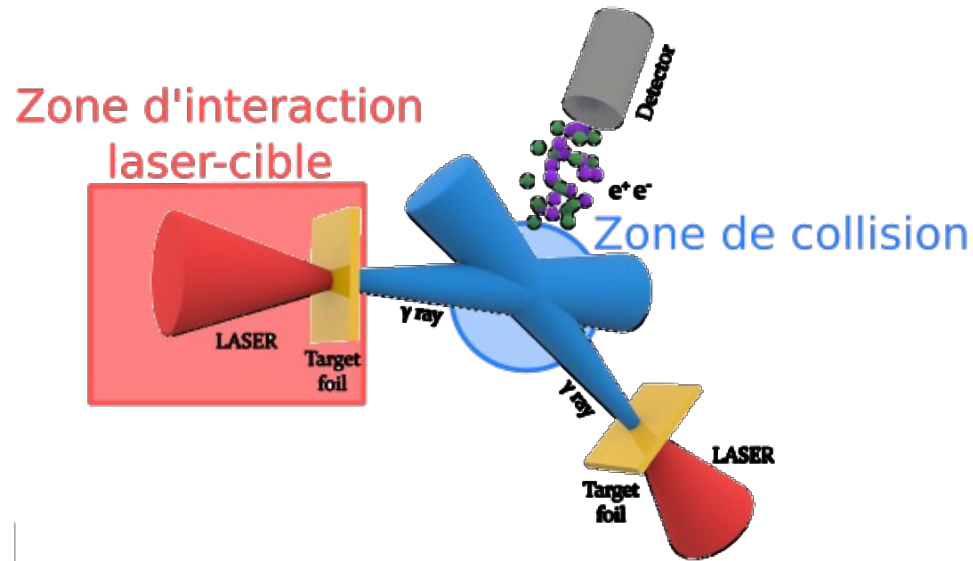


Ribeyre et al., Physical Review E 2016



## II - Comment étudier ce processus en laboratoire ?

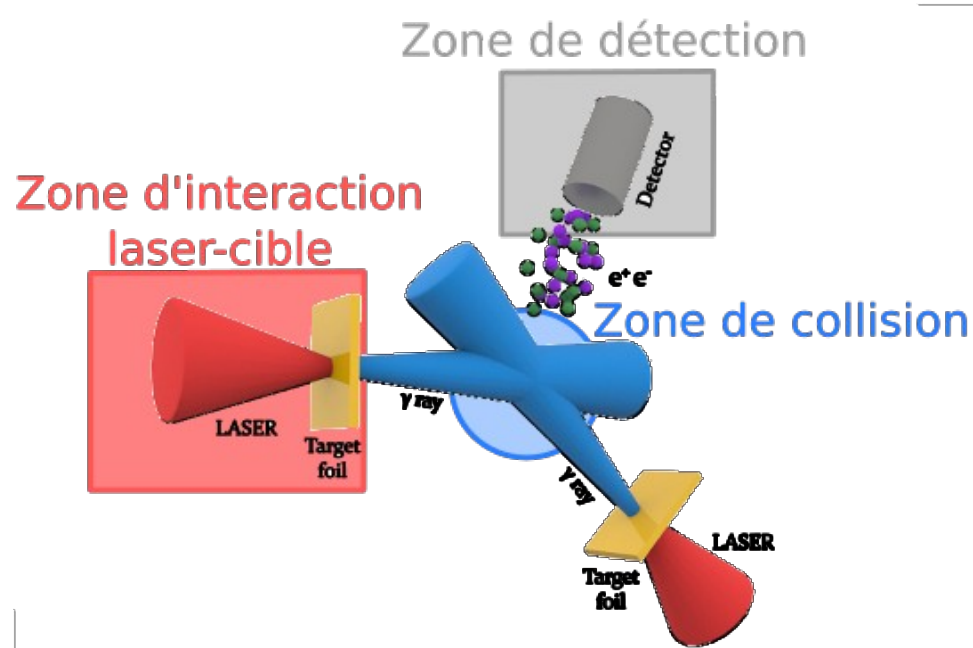
Depuis 2014, il existe plusieurs propositions expérimentales. L'une d'elles :



Ribeyre et al., Physical Review E 2016

## II - Comment étudier ce processus en laboratoire ?

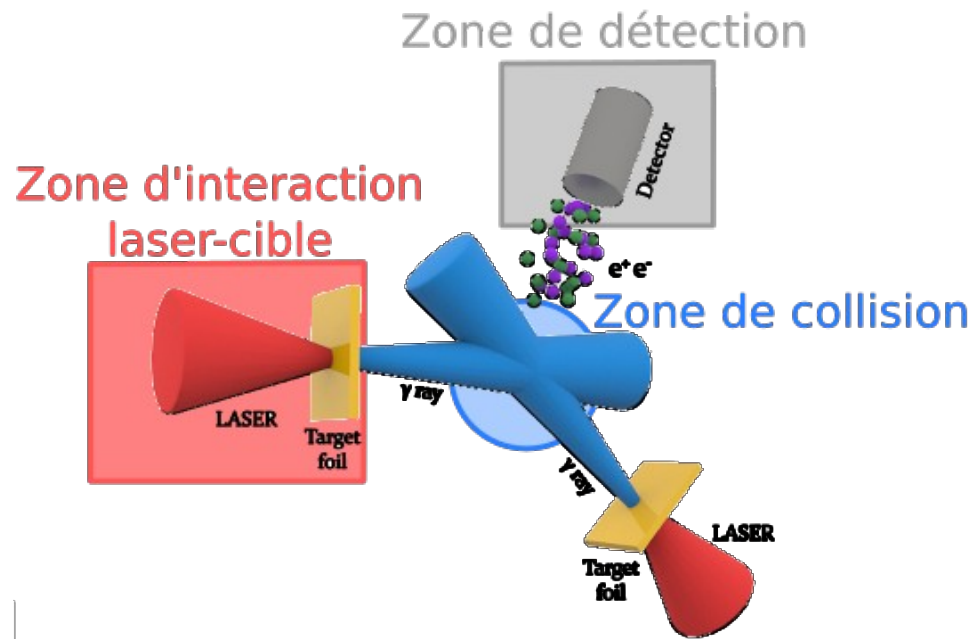
Depuis 2014, il existe plusieurs propositions expérimentales. L'une d'elles :



Ribeyre et al., Physical Review E 2016

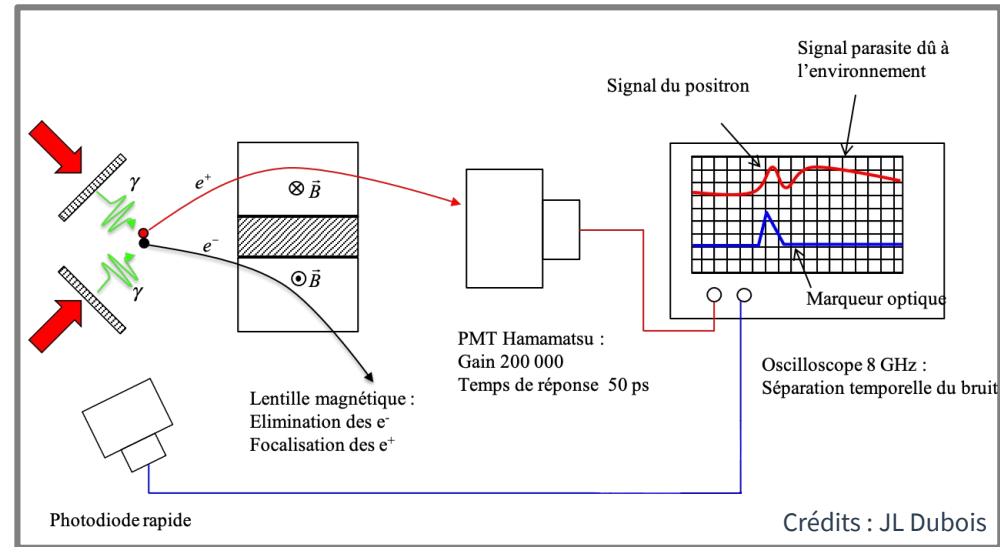
## II - Comment étudier ce processus en laboratoire ?

Depuis 2014, il existe plusieurs propositions expérimentales. L'une d'elles :



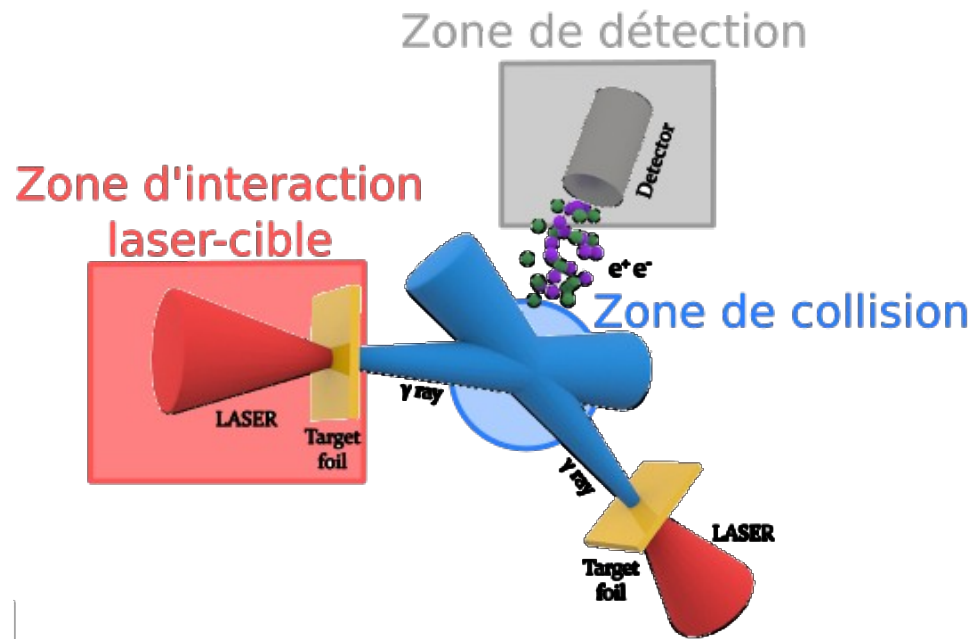
Ribeyre et al., Physical Review E 2016

### Stratégie de détection (JL Dubois et D Khaghani)



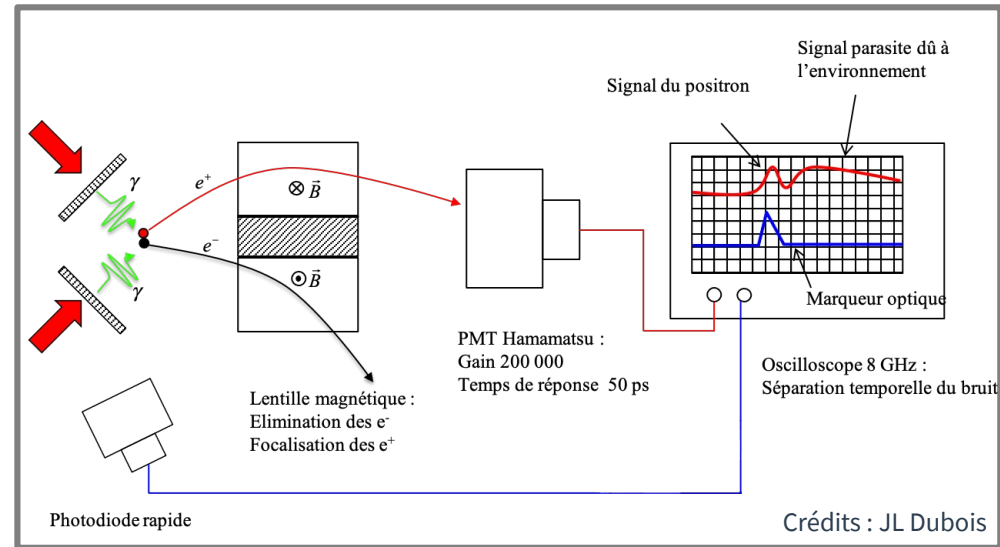
## II - Comment étudier ce processus en laboratoire ?

Depuis 2014, il existe plusieurs propositions expérimentales. L'une d'elles :



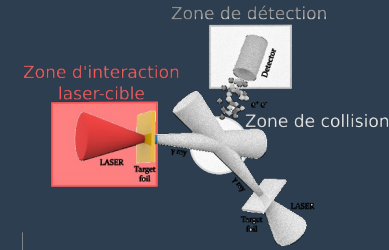
Ribeyre et al., Physical Review E 2016

### Stratégie de détection (JL Dubois et D Khaghani)

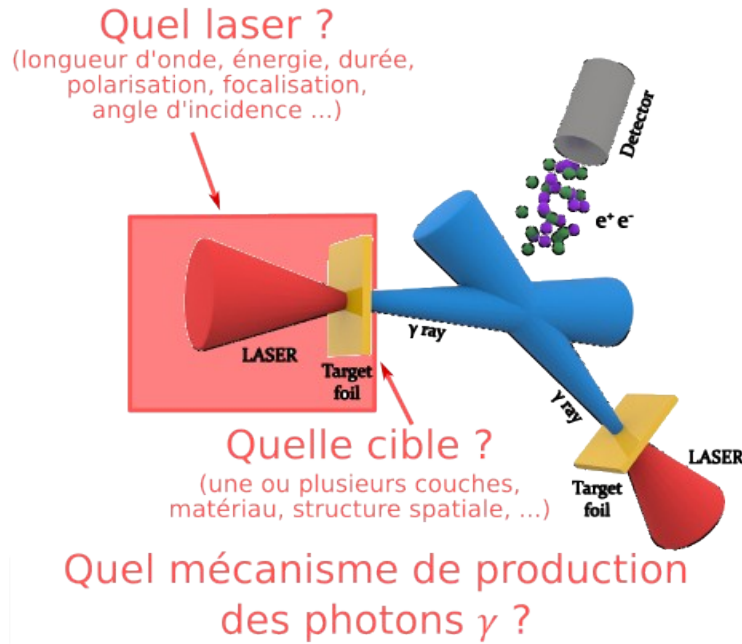


**Notre stratégie : produire de l'ordre de 1 paire  $e^-e^+$  par tir, avec une cadence de tir  $\sim$  Hz**

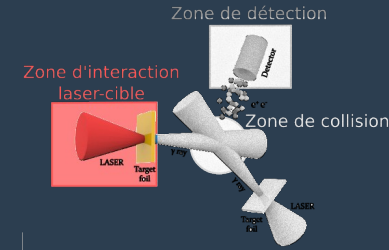
## II - Comment produire les photons gamma nécessaires par laser ?



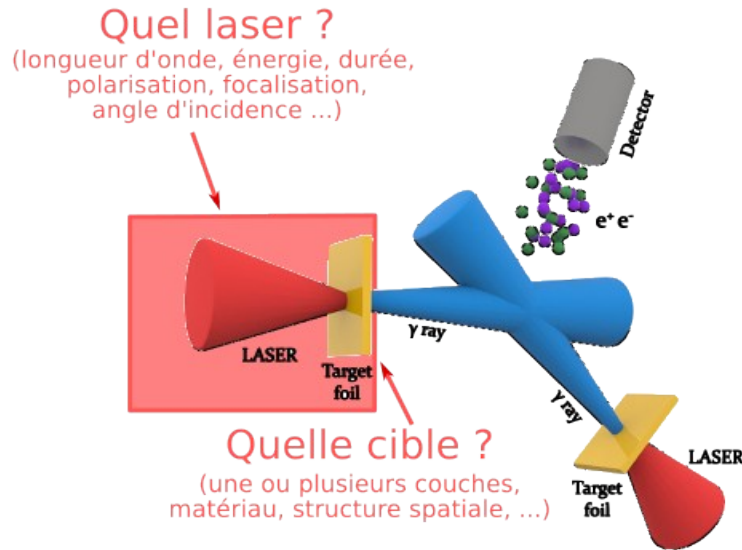
On veut convertir des photons laser ( $h\nu \sim \text{eV}$ ) en photons gamma ( $h\nu \sim \text{MeV}$ )



## II - Comment produire les photons gamma nécessaires par laser ?



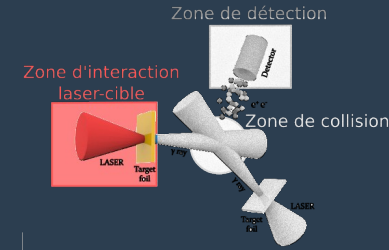
On veut convertir des photons laser ( $h\nu \sim \text{eV}$ ) en photons gamma ( $h\nu \sim \text{MeV}$ )



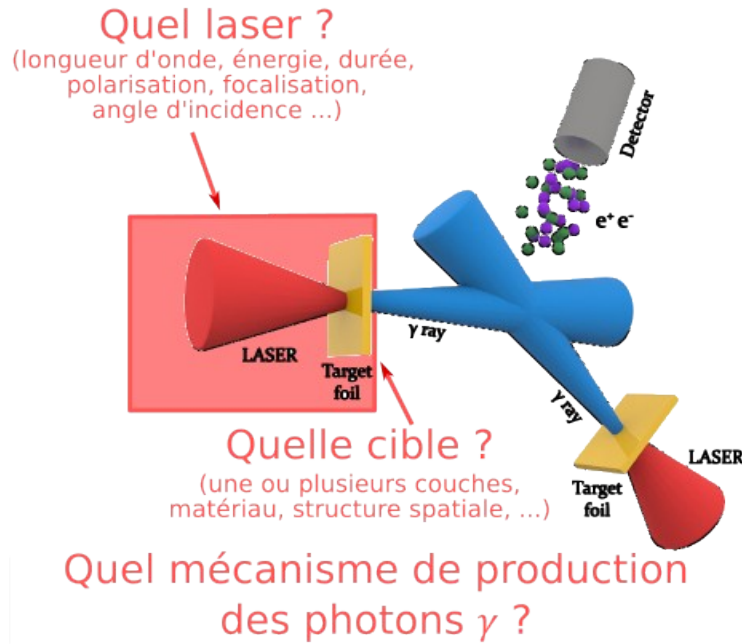
- Ici :
- lasers titane-saphir (cadence de tir  $\sim \text{Hz}$ )
  - $\gamma$  produits via Bremsstrahlung dans une cible solide multi-couches

Quel mécanisme de production des photons  $\gamma$  ?

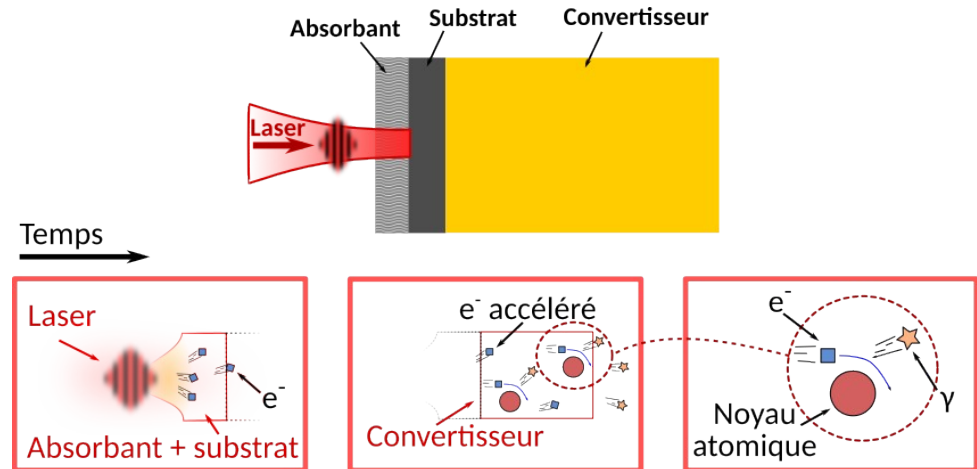
# II - Comment produire les photons gamma nécessaires par laser ?



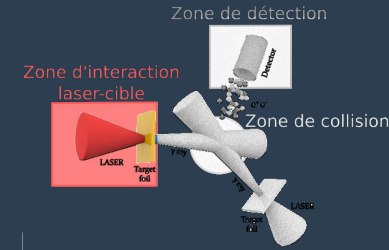
On veut convertir des photons laser ( $h\nu \sim \text{eV}$ ) en photons gamma ( $h\nu \sim \text{MeV}$ )



- Ici :
- lasers titane-saphir (cadence de tir  $\sim \text{Hz}$ )
  - $\gamma$  produits via Bremsstrahlung dans une cible solide multi-couches

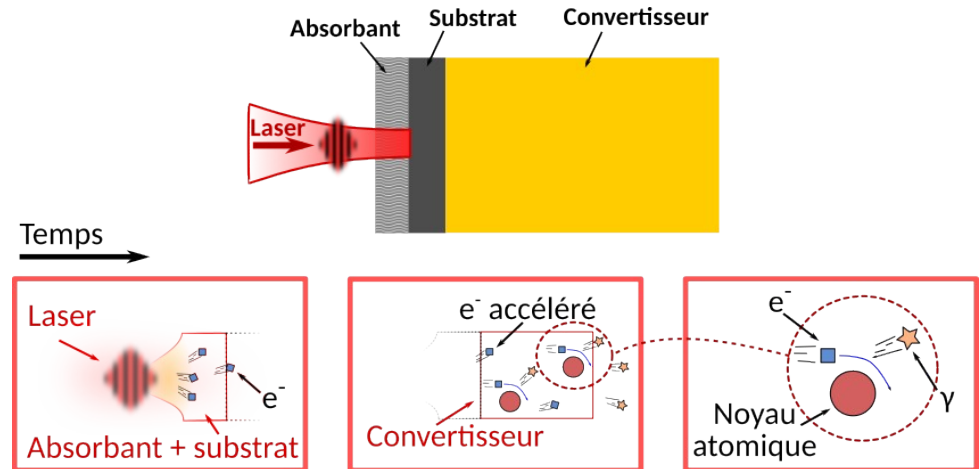
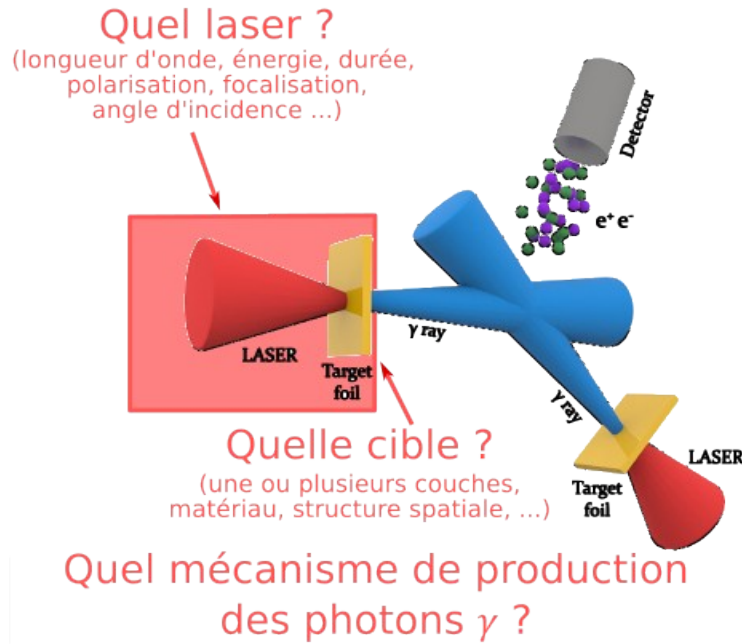


# II - Comment produire les photons gamma nécessaires par laser ?



On veut convertir des photons laser ( $h\nu \sim \text{eV}$ ) en photons gamma ( $h\nu \sim \text{MeV}$ )

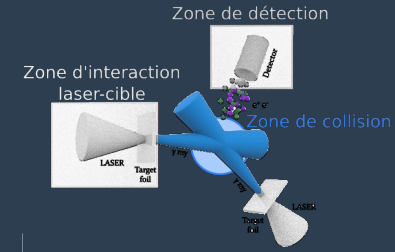
- Ici :
- lasers titane-saphir (cadence de tir  $\sim \text{Hz}$ )
  - $\gamma$  produits via Bremsstrahlung dans une cible solide multi-couches



On peut transférer l'énergie du laser dans des photons gamma via l'accélération d'électrons



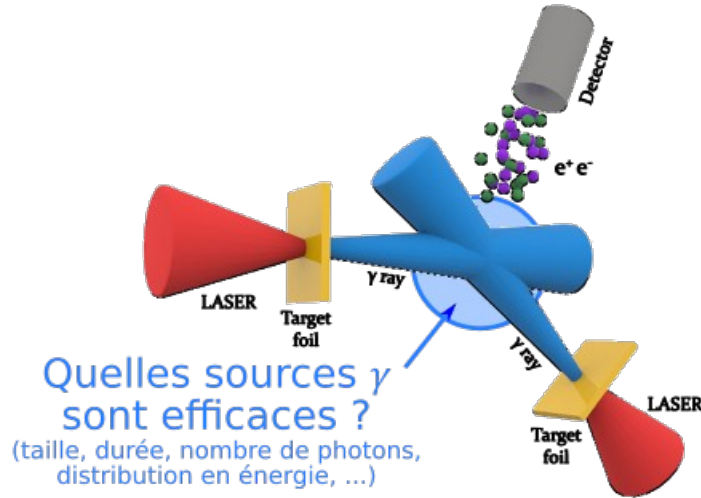
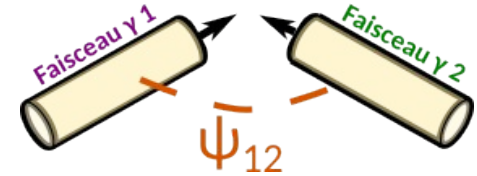
# II – Comment optimiser le nombre de paires $e^-e^+$ produites via Breit-Wheeler linéaire ? (1)



On veut déterminer rapidement quelles configurations sont prometteuses

Modèle théorique :

- $$N_{e^-e^+} = \mathcal{L}_{12}^{sc} \times \tilde{A}_{\text{e}e}^{\text{int}}$$



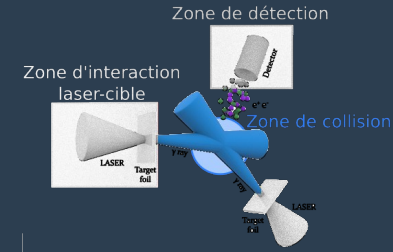
Quelles sources  $\gamma$  sont efficaces ?

(taille, durée, nombre de photons, distribution en énergie, ...)

Influence des paramètres de collision ?

(distance, angle, synchronisation et paramètre d'impact)

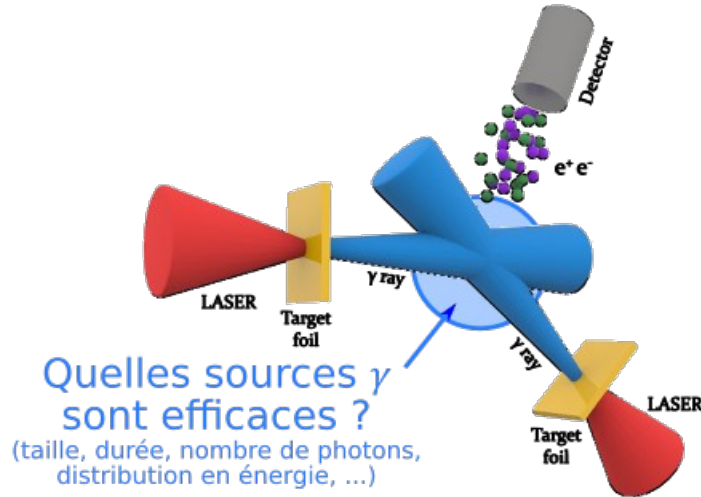
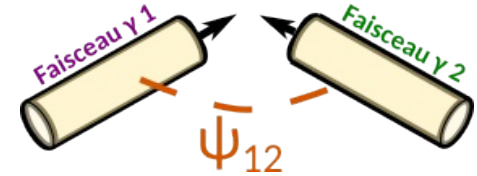
# II – Comment optimiser le nombre de paires $e^-e^+$ produites via Breit-Wheeler linéaire ? (1)



On veut déterminer rapidement quelles configurations sont prometteuses

Modèle théorique :

- $N_{e^-e^+} = \mathcal{L}_{12}^{sc} \times \tilde{A}_{ee}^{int}$
- $\mathcal{L}_{12}^{sc}$  est maximisée pour des sources  $\epsilon$  denses



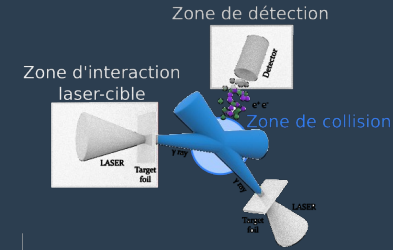
Quelles sources  $\gamma$  sont efficaces ?

(taille, durée, nombre de photons, distribution en énergie, ...)

Influence des paramètres de collision ?

(distance, angle, synchronisation et paramètre d'impact)

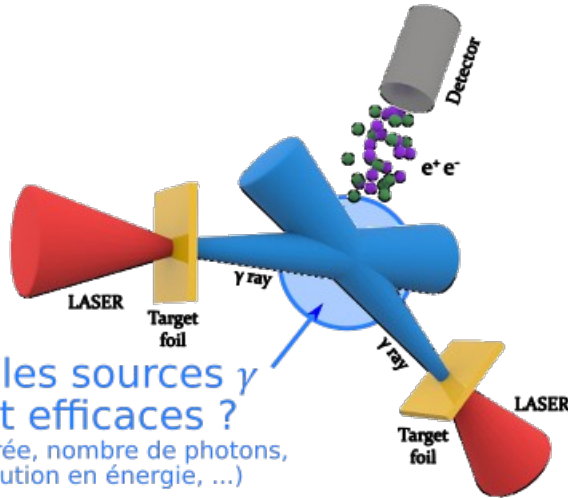
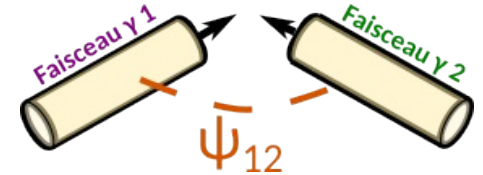
# II – Comment optimiser le nombre de paires $e^-e^+$ produites via Breit-Wheeler linéaire ? (1)



On veut déterminer rapidement quelles configurations sont prometteuses

Modèle théorique :

- $N_{e^-e^+} = \mathcal{L}_{12}^{sc} \times \tilde{A}_{ee}^{int}$
- $\mathcal{L}_{12}^{sc}$  est maximisée pour des sources  $\epsilon$  denses
- $\tilde{A}_{ee}^{int} = \iint_0^\infty dE_1 dE_2 [f_1(E_1, K_1) f_2(E_2, K_2) \tilde{A}_{ee}(E_1, E_2, A_{12})]$
- Pour des sources Bremsstrahlung :  $f = \exp(-E/K)/K$



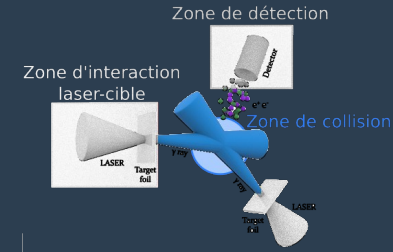
Quelles sources  $\gamma$  sont efficaces ?

(taille, durée, nombre de photons, distribution en énergie, ...)

Influence des paramètres de collision ?

(distance, angle, synchronisation et paramètre d'impact)

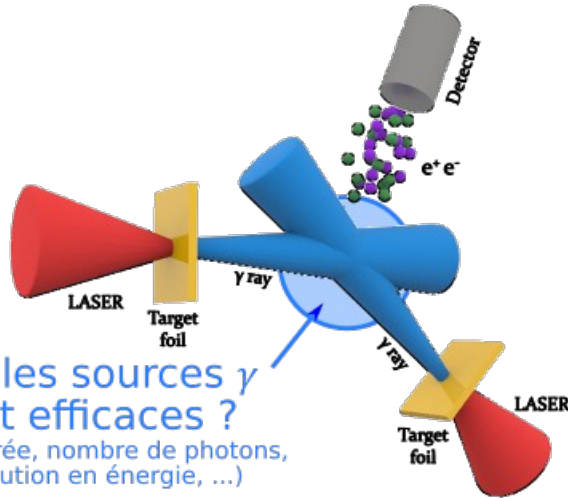
# II – Comment optimiser le nombre de paires $e^-e^+$ produites via Breit-Wheeler linéaire ? (1)



On veut déterminer rapidement quelles configurations sont prometteuses

Modèle théorique :

- $N_{e^-e^+} = \mathcal{L}_{12}^{sc} \times \tilde{A}_{ee}^{int}$
- $\mathcal{L}_{12}^{sc}$  est maximisée pour des sources  $\epsilon$  denses
- $\tilde{A}_{ee}^{int} = \iint_0^\infty dE_1 dE_2 [f_1(E_1, K_1) f_2(E_2, K_2) \tilde{A}_{ee}(E_1, E_2, A_{12})]$
- Pour des sources Bremsstrahlung :  $f = \exp(-E/K)/K$
- Pour  $\psi_{12}$  fixé, quelles valeurs de  $K_1$  et  $K_2$  choisir pour maximiser  $\sigma_{\gamma\gamma}^{int}$  ?

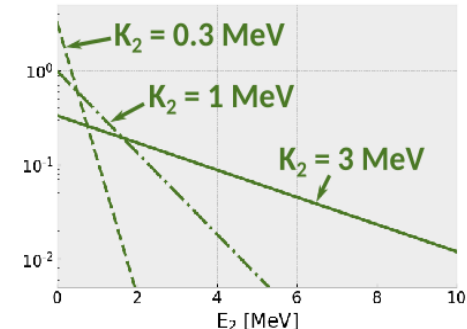
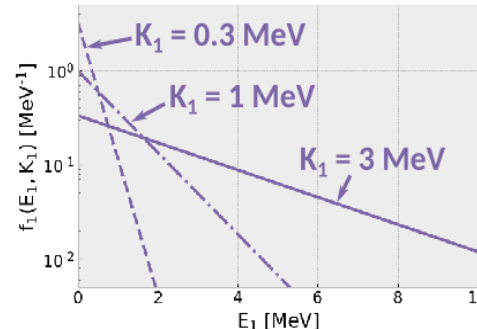


Quelles sources  $\gamma$  sont efficaces ?

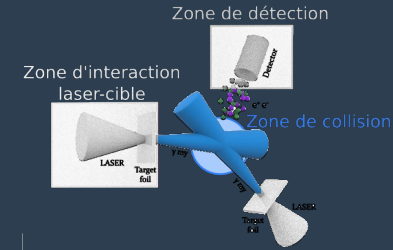
(taille, durée, nombre de photons, distribution en énergie, ...)

Influence des paramètres de collision ?

(distance, angle, synchronisation et paramètre d'impact)

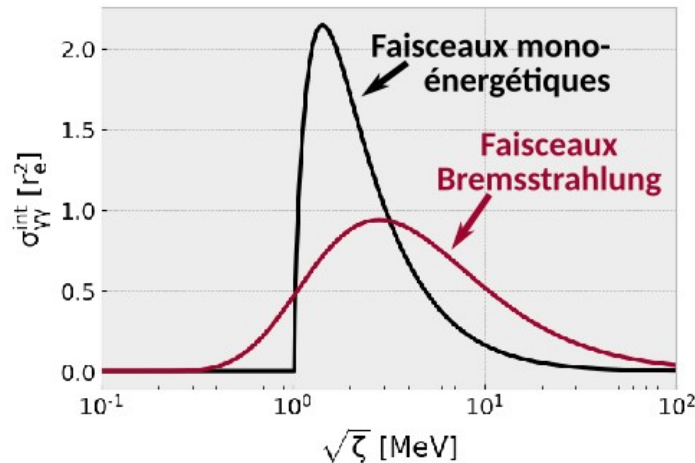


# II – Comment optimiser le nombre de paires $e^-e^+$ produites via Breit-Wheeler linéaire ? (2)



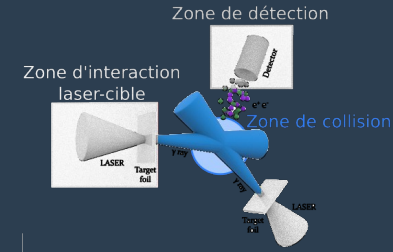
**Objectif :** maximiser  $\sigma_{\gamma\gamma}^{\text{int}}$  pour maximiser  $N_+$

Sous certaines conditions\*,  $\sigma_{\gamma\gamma}^{\text{int}}$  peut s'exprimer en fonction d'une seule variable  $\sqrt{\zeta} = \sqrt{2 K_1 K_2 (1 - \cos \psi_{12})}$



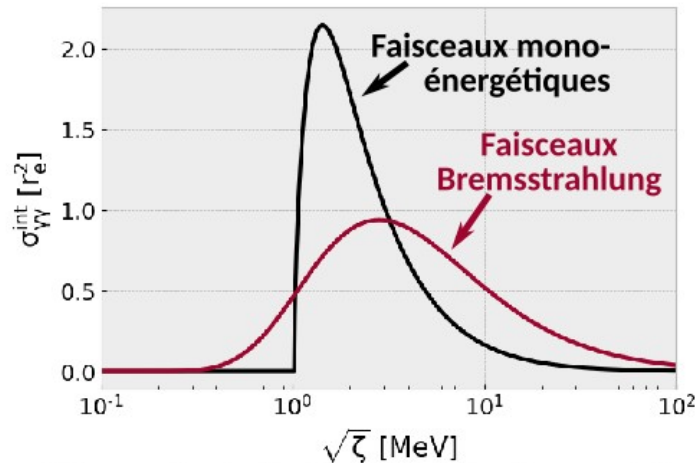
\*Esnault et al., Plasma Physics and Controlled Fusion 2021

# II – Comment optimiser le nombre de paires $e^-e^+$ produites via Breit-Wheeler linéaire ? (2)



**Objectif :** maximiser  $\sigma_{\gamma\gamma}^{\text{int}}$  pour maximiser  $N_+$

Sous certaines conditions\*,  $\sigma_{\gamma\gamma}^{\text{int}}$  peut s'exprimer en fonction d'une seule variable  $\sqrt{\zeta} = \sqrt{2 K_1 K_2 (1 - \cos \psi_{12})}$



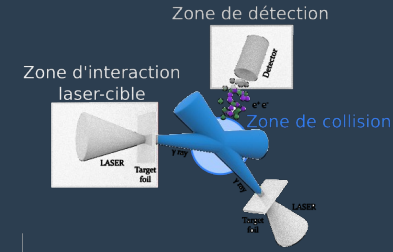
\*Esnault et al., Plasma Physics and Controlled Fusion 2021

**Pour deux sources**

**Bremsstrahlung identiques :**

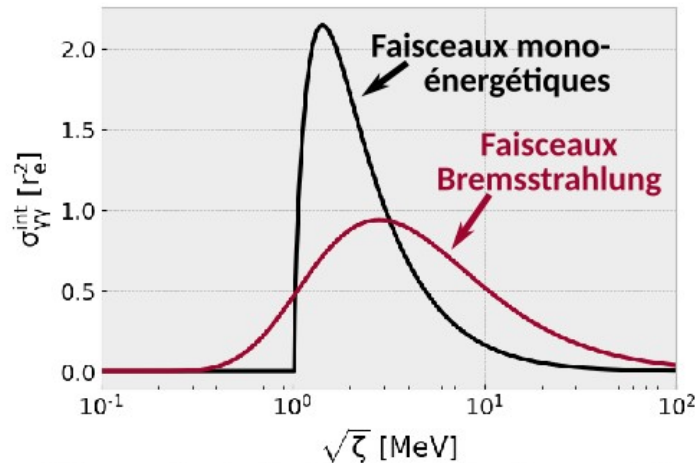
- Le max. de  $\sigma_{\gamma\gamma}^{\text{int}}$  est divisé **seulement par 2** par rapport au max. de deux faisceaux mono-énergétiques
- $\sigma_{\gamma\gamma}^{\text{int}}$  est peu sensible à des variations de  $\psi_{12}$ ,  $K_1$  ou  $K_2$
- Si  $\psi_{12} = 180^\circ$ , on maximise  $\sigma_{\gamma\gamma}^{\text{int}}$  pour  $K_1 = K_2 \approx 1.4$  MeV  
 $\Rightarrow$  **déjà disponible en laboratoire** depuis la fin des années 1990 !

# II – Comment optimiser le nombre de paires $e^-e^+$ produites via Breit-Wheeler linéaire ? (2)



**Objectif :** maximiser  $\sigma_{\gamma\gamma}^{\text{int}}$  pour maximiser  $N_+$

Sous certaines conditions\*,  $\sigma_{\gamma\gamma}^{\text{int}}$  peut s'exprimer en fonction d'une seule variable  $\sqrt{\zeta} = \sqrt{2 K_1 K_2 (1 - \cos \psi_{12})}$



\*Esnault et al., Plasma Physics and Controlled Fusion 2021

**Pour deux sources**

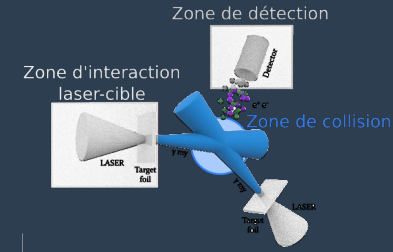
**Bremsstrahlung identiques :**

- Le max. de  $\sigma_{\gamma\gamma}^{\text{int}}$  est divisé **seulement par 2** par rapport au max. de deux faisceaux mono-énergétiques
- $\sigma_{\gamma\gamma}^{\text{int}}$  est peu sensible à des variations de  $\psi_{12}$ ,  $K_1$  ou  $K_2$
- Si  $\psi_{12} = 180^\circ$ , on maximise  $\sigma_{\gamma\gamma}^{\text{int}}$  pour  $K_1 = K_2 \approx 1.4$  MeV  
 $\Rightarrow$  **déjà disponible en laboratoire** depuis la fin des années 1990 !

**Les sources Bremsstrahlung semblent prometteuses (efficaces, faciles à produire, robustes)**

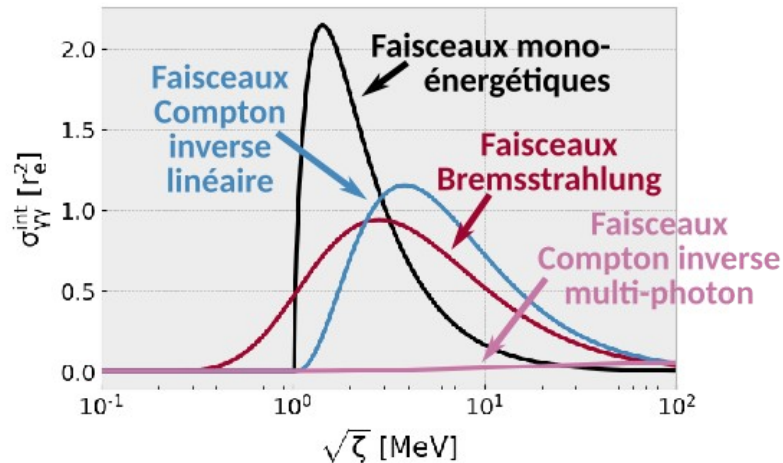


# II – Comment optimiser le nombre de paires $e^-e^+$ produites via Breit-Wheeler linéaire ? (2)



**Objectif :** maximiser  $\sigma_{\gamma\gamma}^{\text{int}}$  pour maximiser  $N_+$

Sous certaines conditions\*,  $\sigma_{\gamma\gamma}^{\text{int}}$  peut s'exprimer en fonction d'une seule variable  $\sqrt{\zeta} = \sqrt{2 K_1 K_2 (1 - \cos \psi_{12})}$



\*Esnault et al., Plasma Physics and Controlled Fusion 2021

**Pour deux sources**

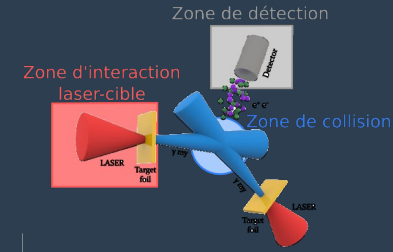
**Bremsstrahlung identiques :**

- Le max. de  $\sigma_{\gamma\gamma}^{\text{int}}$  est divisé **seulement par 2** par rapport au max. de deux faisceaux mono-énergétiques
- $\sigma_{\gamma\gamma}^{\text{int}}$  est peu sensible à des variations de  $\psi_{12}$ ,  $K_1$  ou  $K_2$
- Si  $\psi_{12} = 180^\circ$ , on maximise  $\sigma_{\gamma\gamma}^{\text{int}}$  pour  $K_1 = K_2 \approx 1.4$  MeV  
 $\Rightarrow$  **déjà disponible en laboratoire** depuis la fin des années 1990 !

**Les sources Bremsstrahlung semblent prometteuses (efficaces, faciles à produire, robustes)**



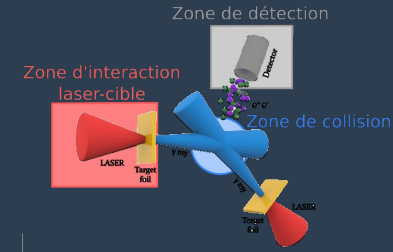
## II - Comment simuler cette expérience en un temps de calcul raisonnable ?



Il n'existe pas de code qui permet de simuler la totalité de cette expérience

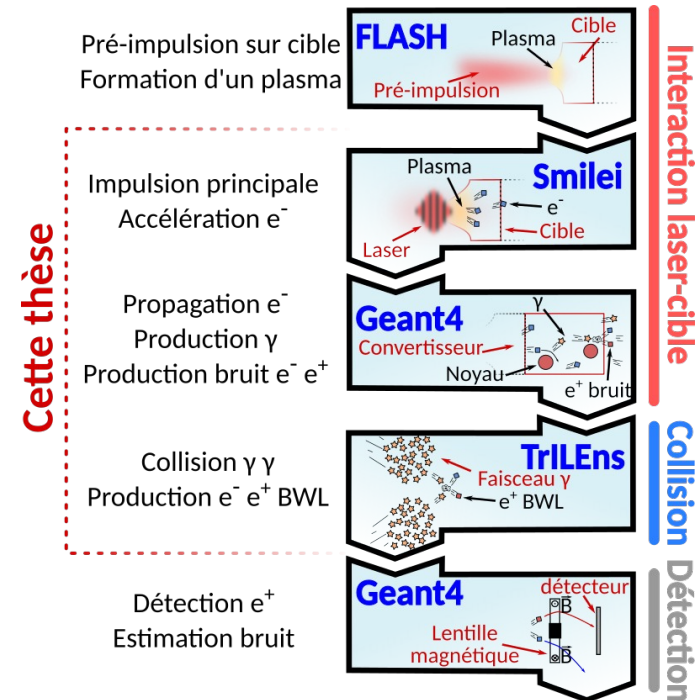
- Smilei (*Particle-In-Cell*) : interaction laser-matière, accélération d'électrons
- Application Geant4 (*Monte Carlo*) : propagation de particules dans la matière, production des  $\epsilon$  via Bremsstrahlung
- TrILens (*hybride*) : collision des photons  $\epsilon$ , création de paires  $e^-e^+$  via Breit-Wheeler linéaire

# II - Comment simuler cette expérience en un temps de calcul raisonnable ?

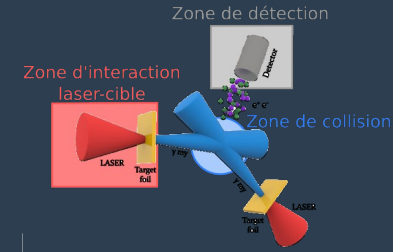


Il n'existe pas de code qui permet de simuler la totalité de cette expérience

- Smilei (*Particle-In-Cell*) : interaction laser-matière, accélération d'électrons
- Application Geant4 (*Monte Carlo*) : propagation de particules dans la matière, production des  $\epsilon$  via Bremsstrahlung
- TrILEns (*hybride*) : collision des photons  $\epsilon$ , création de paires  $e^-e^+$  via Breit-Wheeler linéaire



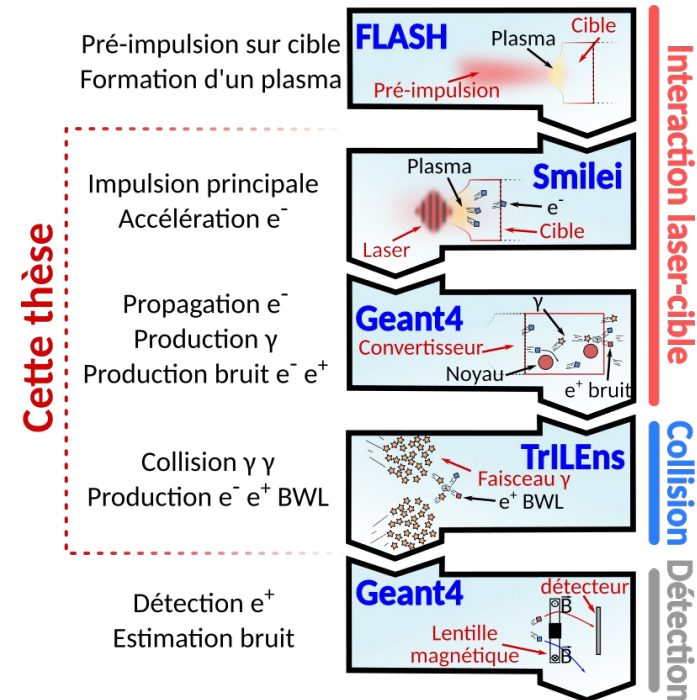
# II - Comment simuler cette expérience en un temps de calcul raisonnable ?



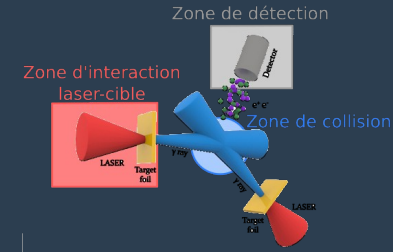
Il n'existe pas de code qui permet de simuler la totalité de cette expérience

- Smilei (*Particle-In-Cell*) : interaction laser-matière, accélération d'électrons
- Application Geant4 (*Monte Carlo*) : propagation de particules dans la matière, production des  $\epsilon$  via Bremsstrahlung
- TrILEns (*hybride*) : collision des photons  $\epsilon$ , création de paires  $e^-e^+$  via Breit-Wheeler linéaire

Comment faire transiter les données ? J'ai développé une méthode générale et un module d'analyse (p2sat, Python orienté objet, open source, article en cours!)



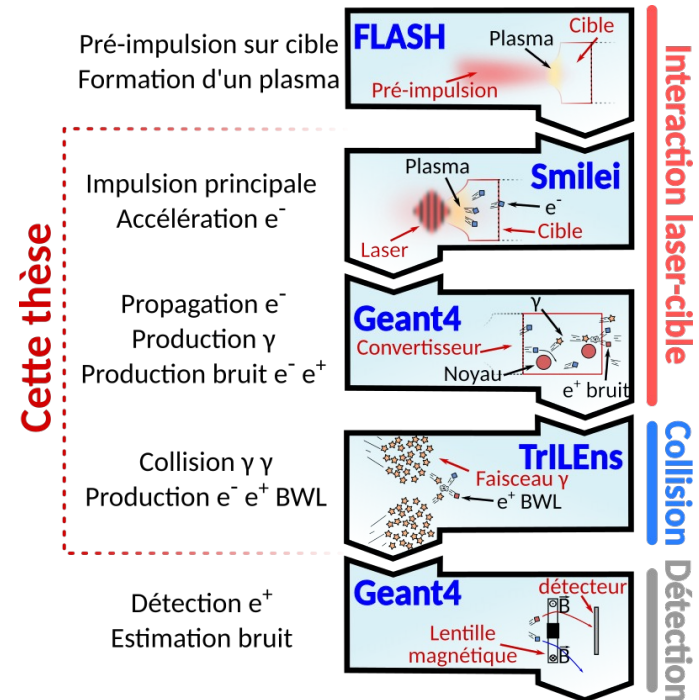
# II - Comment simuler cette expérience en un temps de calcul raisonnable ?



Il n'existe pas de code qui permet de simuler la totalité de cette expérience

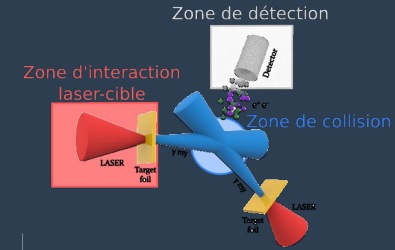
- Smilei (*Particle-In-Cell*) : interaction laser-matière, accélération d'électrons
- Application Geant4 (*Monte Carlo*) : propagation de particules dans la matière, production des  $\epsilon$  via Bremsstrahlung
- TrILEns (*hybride*) : collision des photons  $\epsilon$ , création de paires  $e^-e^+$  via Breit-Wheeler linéaire

Comment faire transiter les données ? J'ai développé une méthode générale et un module d'analyse (p2sat, Python orienté objet, open source, article en cours!)



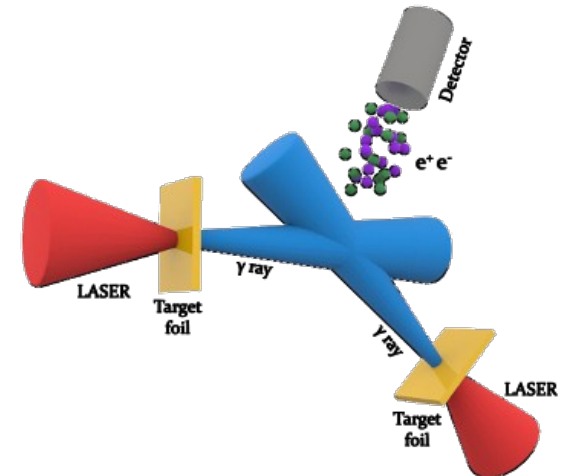
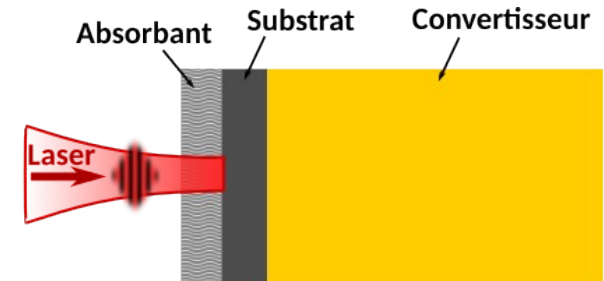
La simulation de cette expérience nécessite d'utiliser plusieurs types de codes en synergie

## II – Cette stratégie pourrait elle être réalisée avec les moyens technologiques actuels ? (1)

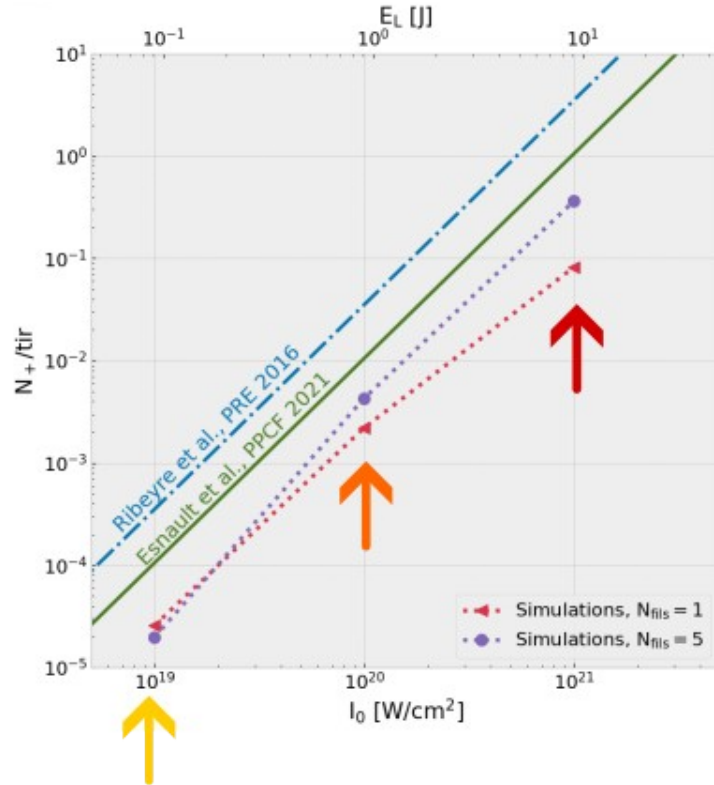
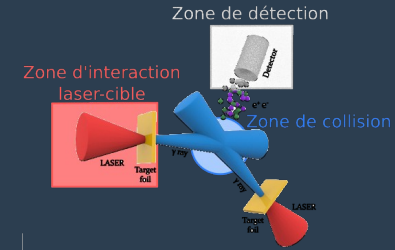


On utilise cette chaîne de simulations pour étudier une configuration réaliste

- Laser titane-saphir typique,  
 $I_0 = 10^{19}, 10^{20}, 10^{21} \text{ W/cm}^2$  (énergie 0.1, 1, 10J)
- Cible multi-couches
  - Absorbant en polystyrène structuré (fils d'épaisseurs et d'espacement variables)
  - Substrat en polystyrène (permet de tenir les fils)
  - Convertisseur en platine (efficace pour Bremsstrahlung)
- Collision des faisceaux avec un angle  $\approx 90^\circ$ ,  
à 500  $\mu\text{m}$  de distance



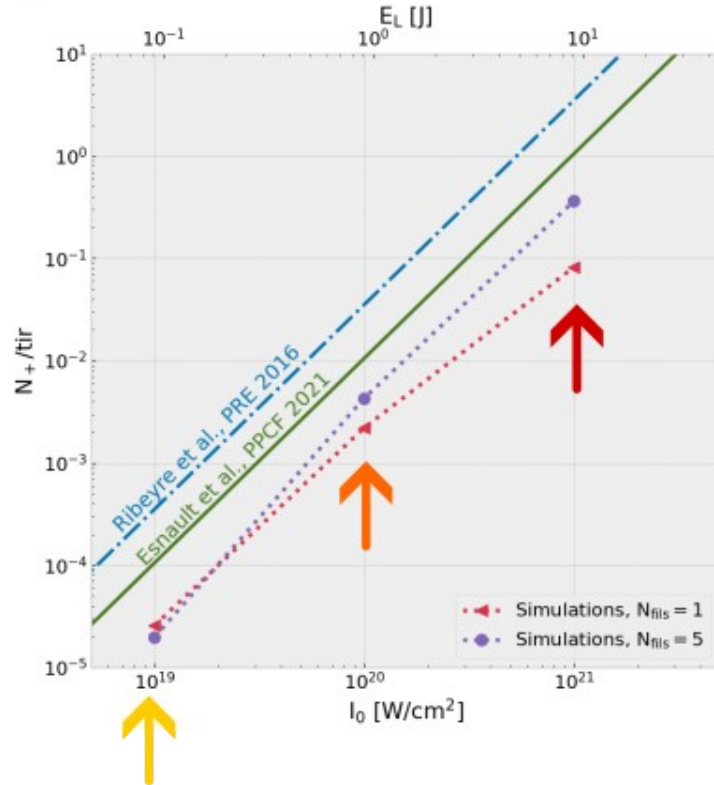
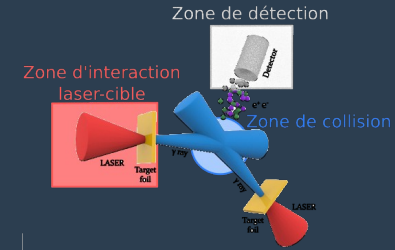
## II – Cette stratégie pourrait elle être réalisée avec les moyens technologiques actuels ? (2)



Simulations :

$I_0 \text{ (W/cm}^2\text{)}$	$10^{19}$	$10^{20}$	$10^{21}$
$N_{e-e+} \text{ par tir}$			

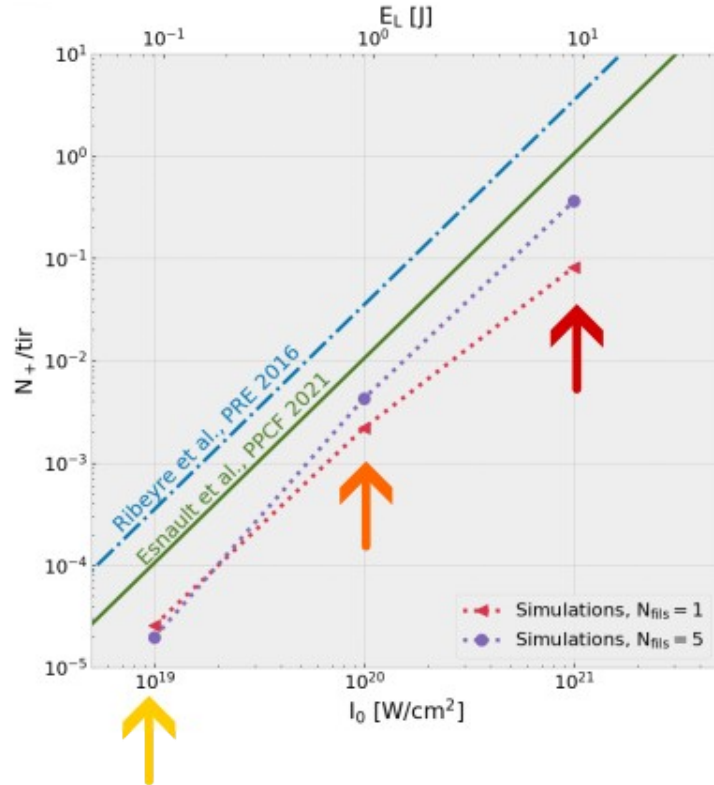
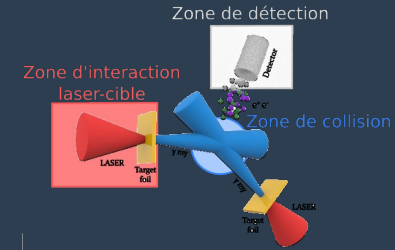
## II – Cette stratégie pourrait elle être réalisée avec les moyens technologiques actuels ? (2)



### Simulations :

$I_0 \text{ (W/cm}^2\text{)}$	$10^{19}$	$10^{20}$	$10^{21}$
$N_{e-e+} \text{ par tir}$	$\sim 10^{-5}$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$

## II – Cette stratégie pourrait elle être réalisée avec les moyens technologiques actuels ? (2)



### Simulations :

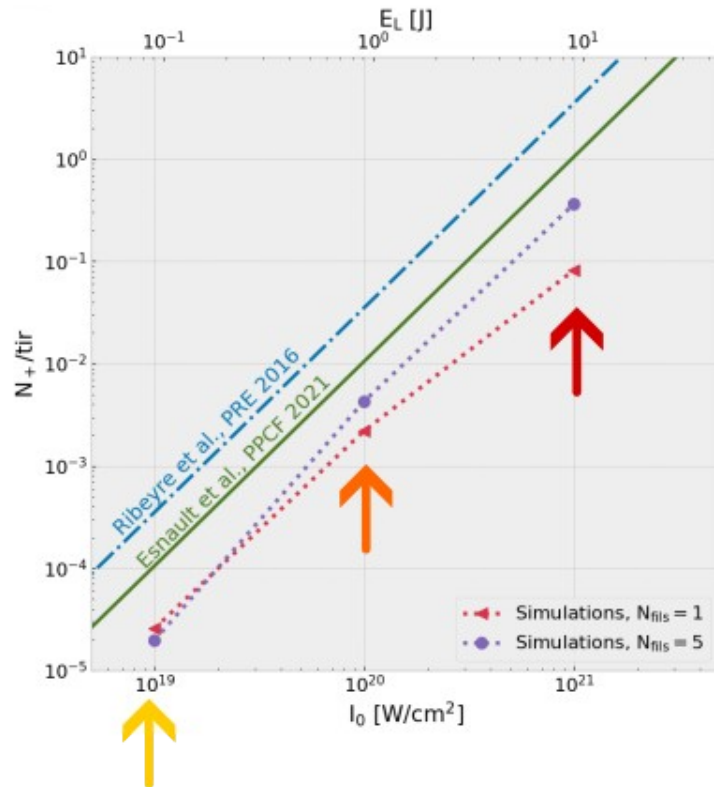
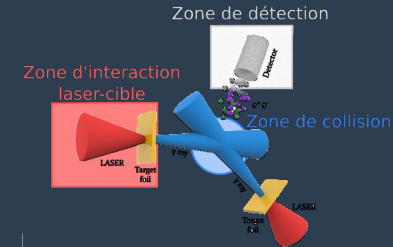
$I_0 \text{ (W/cm}^2\text{)}$	$10^{19}$	$10^{20}$	$10^{21}$
$N_{e-e+} \text{ par tir}$	$\sim 10^{-5}$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$

$N_{e-e+}/\text{tir}$  via Ribeyre  $\rightarrow \times 10$

$N_{e-e+}/\text{tir}$  via Esnault  $\rightarrow \times 3$



## II – Cette stratégie pourrait elle être réalisée avec les moyens technologiques actuels ? (2)



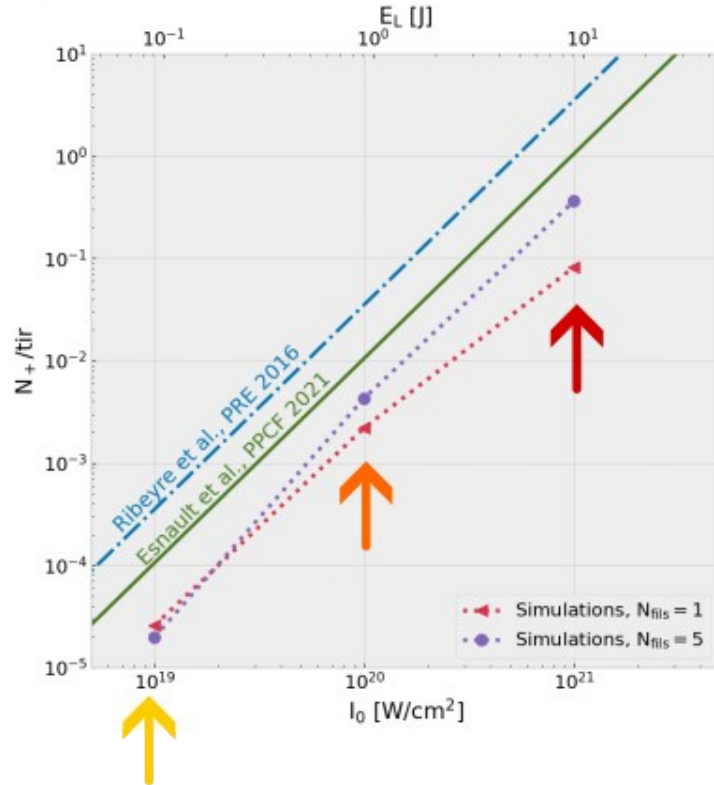
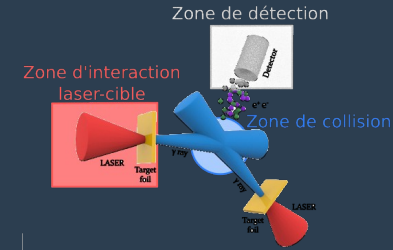
### Simulations :

$I_0 \text{ (W/cm}^2\text{)}$	$10^{19}$	$10^{20}$	$10^{21}$
$N_{e-e+} \text{ par tir}$	$\sim 10^{-5}$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$
$N_{e-e+} \text{ pour } 10^5 \text{ tirs}$	$\sim 1$	$\sim 10^2$	$\sim 10^4$

$N_{e-e+}/\text{tir}$  via Ribeyre  $\rightarrow \times 10$

$N_{e-e+}/\text{tir}$  via Esnault  $\rightarrow \times 3$

## II – Cette stratégie pourrait elle être réalisée avec les moyens technologiques actuels ? (2)



### Simulations :

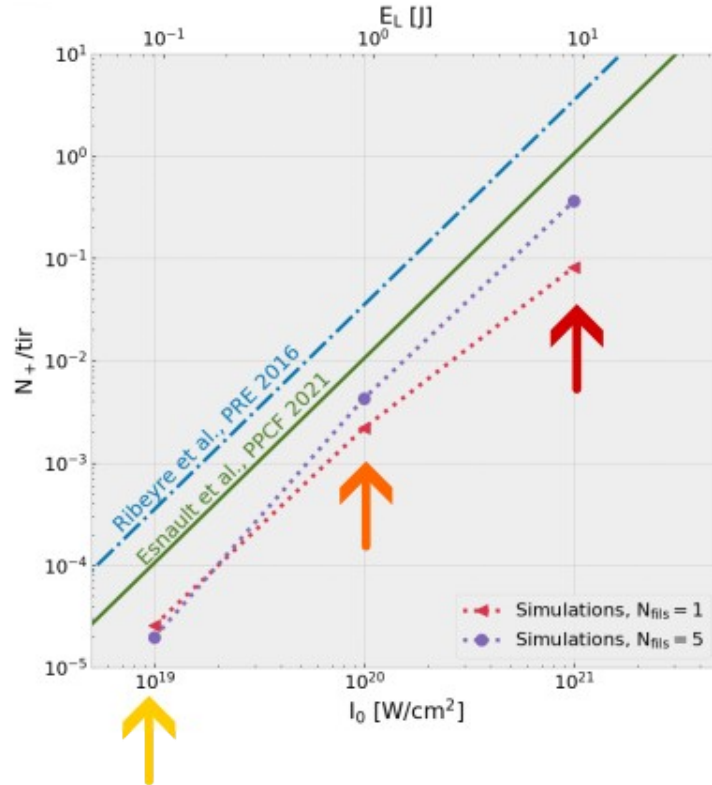
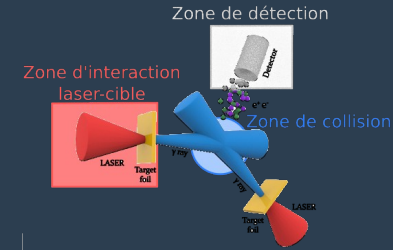
$I_0 \text{ (W/cm}^2\text{)}$	$10^{19}$	$10^{20}$	$10^{21}$
$N_{e-e+} \text{ par tir}$	$\sim 10^{-5}$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$
$N_{e-e+} \text{ pour } 10^5 \text{ tirs}$	$\sim 1$	$\sim 10^2$	$\sim 10^4$

$N_{e-e+}/\text{tir}$  via Ribeyre  $\rightarrow \times 10$

$N_{e-e+}/\text{tir}$  via Esnault  $\rightarrow \times 3$

Détection du processus Breit-Wheeler non linéaire (1997) :  
 $\sim 200 e^+$  en  $\sim 20\,000$  tirs à 0.5 Hz

## II – Cette stratégie pourrait elle être réalisée avec les moyens technologiques actuels ? (2)



### Simulations :

$I_0$ (W/cm²)	$10^{19}$	$10^{20}$	$10^{21}$
$N_{e-e+}$ par tir	$\sim 10^{-5}$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$
$N_{e-e+}$ pour $10^5$ tirs	$\sim 1$	$\sim 10^2$	$\sim 10^4$

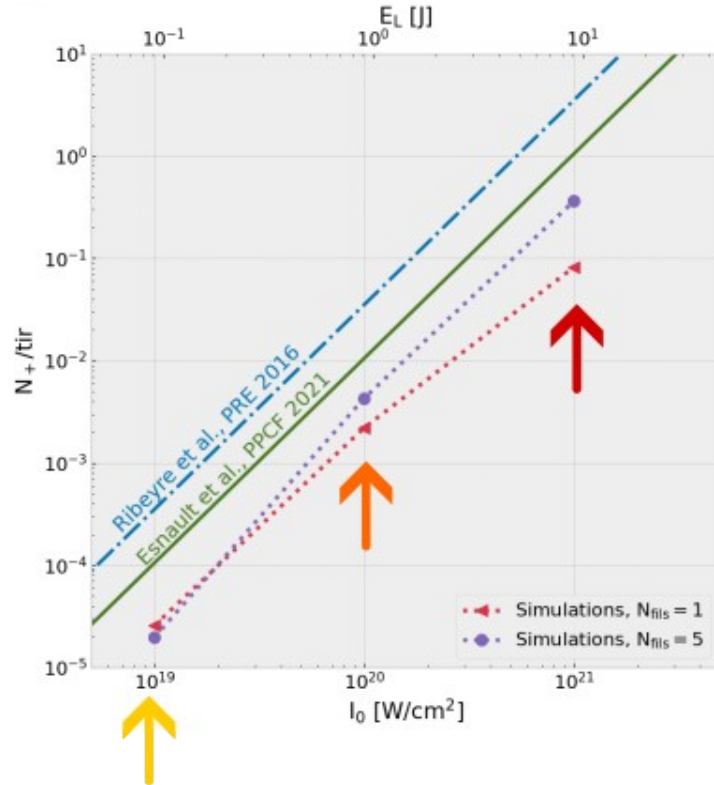
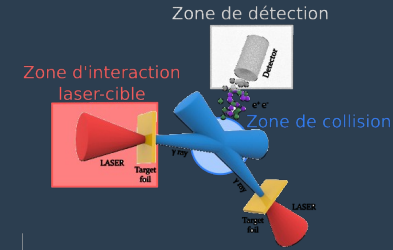
$N_{e-e+}$ /tir via Ribeyre  $\rightarrow \times 10$

$N_{e-e+}$ /tir via Esnault  $\rightarrow \times 3$

Détection du processus Breit-Wheeler non linéaire (1997) :  
 $\sim 200 e^+$  en  $\sim 20\,000$  tirs à 0.5 Hz

Extrapolation :  $\sim 1$  paire/tir pour  $\sim 15$  J/impulsion  
 $\rightarrow$  Astra Gemini (2x15 J à 1/20 Hz), HAPLS (2x30 J à 10 Hz)

## II – Cette stratégie pourrait elle être réalisée avec les moyens technologiques actuels ? (2)



### Simulations :

$I_0$ (W/cm <sup>2</sup> )	$10^{19}$	$10^{20}$	$10^{21}$
$N_{e-e+}$ par tir	$\sim 10^{-5}$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$
$N_{e-e+}$ pour $10^5$ tirs	$\sim 1$	$\sim 10^2$	$\sim 10^4$

$N_{e-e+}$ /tir via Ribeyre  $\rightarrow \times 10$

$N_{e-e+}$ /tir via Esnault  $\rightarrow \times 3$

Détection du processus Breit-Wheeler non linéaire (1997) :  
 $\sim 200 e^+$  en  $\sim 20\,000$  tirs à 0.5 Hz

Extrapolation :  $\sim 1$  paire/tir pour  $\sim 15$  J/impulsion  
 $\rightarrow$  Astra Gemini (2x15 J à 1/20 Hz), HAPLS (2x30 J à 10 Hz)

**Notre stratégie pourrait en principe être réalisée avec les moyens technologiques actuels !**

## II – Conclusion scientifique

- Stratégie développée dans cette thèse :
  - Prometteur. On a besoin de données expérimentales.
  - Gestion du bruit = problème. On peut tester d'autres schémas de production de gamma plus complexes mais moins bruités.

## II – Conclusion scientifique

- **Stratégie développée dans cette thèse :**
  - Prometteur. On a besoin de données expérimentales.
  - Gestion du bruit = problème. On peut tester d'autres schémas de production de gamma plus complexes mais moins bruités.
- **Modèle théorique :**
  - Adapté d'un formalisme connu (lien avec physique des particules).
  - Résultats pour différents spectres pouvant être adaptés à plusieurs expériences ou à des situations astrophysiques.

## II – Conclusion scientifique

- **Stratégie développée dans cette thèse :**
  - Prometteur. On a besoin de données expérimentales.
  - Gestion du bruit = problème. On peut tester d'autres schémas de production de gamma plus complexes mais moins bruités.
- **Modèle théorique :**
  - Adapté d'un formalisme connu (lien avec physique des particules).
  - Résultats pour différents spectres pouvant être adaptés à plusieurs expériences ou à des situations astrophysiques.
- **Moyens de simulations :**
  - Dans l'air du temps (chaîne de codes, C++ et Python orienté objet, open source).
  - Adapté à la production de particules par laser (gamma,  $e^+$ , pions, ...) voir à d'autres contextes (physique médicale, physique des particules, ...).

## II – Conclusion scientifique

- **Stratégie développée dans cette thèse :**
  - Prometteur. On a besoin de données expérimentales.
  - Gestion du bruit = problème. On peut tester d'autres schémas de production de gamma plus complexes mais moins bruités.
- **Modèle théorique :**
  - Adapté d'un formalisme connu (lien avec physique des particules).
  - Résultats pour différents spectres pouvant être adaptés à plusieurs expériences ou à des situations astrophysiques.
- **Moyens de simulations :**
  - Dans l'air du temps (chaîne de codes, C++ et Python orienté objet, open source).
  - Adapté à la production de particules par laser (gamma,  $e^+$ , pions, ...) voir à d'autres contextes (physique médicale, physique des particules, ...).
- **Contexte général :**
  - Production de particules énergétiques par laser (depuis quelques dizaines d'années).
  - Interaction photon-photon, électrodynamique quantique par laser (très actuel).



### III – Liens avec l'enseignement

Ma thèse : compétences disciplinaires et transverses, pourraient être remobilisés en enseignement

Exemple : Activité numérique en Python niveau PC, propagation dans un milieu non absorbant et dispersif (plasma transparent)

Lien :

<https://nbviewer.org/github/lesnat/Agregation-physique/blob/main/Propagation%20plasma.ipynb>

# Conclusion

## Mon parcours :

- Intérêt pour la recherche et l'enseignement
- Multiples expériences en contact avec la jeunesse (de 7 à 22 ans)

## Mes projets :

- Enseignement au lycée dans un premier temps
- Enseignement en CPGE, BTS ou BUT à moyen terme



**Merci pour votre attention !**

## Backup :

- images rapport
- revoir thèse (ordres de grandeurs des trucs dits dans le rapport)
- BO activité

# III – Activité documentaire en terminale spécialité Physique Chimie : accélération d'électrons par laser

- Activité documentaire sur les accélérateurs linéaires : <https://www.lelivrescolaire.fr/page/15223415>
- Article sur l'accélération d'électrons par laser (rapide) : <https://apollonlaserfacility.cnrs.fr/acceleration-delectrons/>
- Article sur les accélérateurs laser-plasma (complet) : <https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/2013/02/refdp201333p23.pdf>
- Questions (compétence):
  - De quand date le 1<sup>er</sup> accélérateur linéaire de particules (accélérateurs dit « conventionnels », ou linac) ? → LeLivreScolaire : 1928  
Depuis quand est étudié le principe de « l'accélérateur plasma laser » (noté APL dans la suite) ? → Malka : 1970 numériquement et théoriquement, années 1990 expérimentalement
  - Quelle est la force ressentie par les particules qui lui permet d'être accéléré dans le cas d'un linac ? → LeLivreScolaire : la force électrique.  
Dans le cas de l'APL ? → Appolon : champs électriques donc force électrique aussi
  - Quel type de particules peut être accéléré via un linac → LeLivreScolaire : des particules chargées  
Dans le cas de l'ALP → Malka : e- (pour ce type de méthode)
  - On donne 1 TeV = 1000 GeV et 1 GeV = 1000 MeV. L'électron-Volt (eV) est une unité d'énergie ( $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ). Quelle est l'ordre de grandeur des énergies maximales des électrons pour les plus grands accélérateurs linéaires en cours d'étude ? Malka : de la centaine de GeV au TeV  
Pour l'accélération laser plasma ? Malka et Appolon : de l'ordre de la dizaine de GeV
  - Quel est l'avantage majeur de la méthode d'accélération plasma laser par rapport aux accélérateurs linéaires ? → Malka ou Appolon : ils sont beaucoup plus compacts car les champs accélérateurs supportés par le plasma sont largement supérieurs à ceux supportés par les cavités RF

# III – Activité numérique niveau PC : Propagation d'un paquet d'onde dans un milieu faiblement dispersif

Autre activité :

<https://physique-chimie.dis.ac-guyane.fr/Exemple-d-usage-3-Propagation-d-un-paquet-d-onde-PSI.html>

# III – Travaux dirigés niveau Licence 3 de physique : cinématique relativiste

- Le processus de création d'une paire  $e^-e^+$  par collision de deux photons réels, appelé processus Breit-Wheeler linéaire, est un processus fondamental de l'électrodynamique quantique et est supposé jouer un rôle dans plusieurs phénomènes d'astrophysique des hautes énergies (opacité de l'Univers aux photons de très haute énergie, création de paires  $e^-e^+$  proche de trous noirs supermassifs ou de pulsars, ...). Il n'a cependant jamais été détecté directement en laboratoire, principalement à cause de l'absence de sources de photons énergétiques de suffisamment haut flux.

Référence : Ribeyre et al., Plasma Physics and Controlled Fusion 2017 (<https://doi.org/10.1088/0741-3335/59/1/014024>)

- Questions :
  - Faire un schéma de la collision de deux photons (avant la création d'une paire  $e^-e^+$ ) dans le référentiel du laboratoire, et dans le référentiel du centre d'inertie de la collision. On appelle  $\psi$  l'angle de collision entre les photons 1 et 2 dans le référentiel du laboratoire. Compréhension du phénomène et définition du centre d'inertie (somme des impulsions = 0).
  - Donner les 4-impulsions des photons dans le référentiel du laboratoire, et dans celui du centre d'inertie de la collision (avant la collision). Définition du 4-vecteur impulsion, choix d'un système d'axes (ou imposer un axe selon la bissectrice?).
  - Donner les 4-impulsions des paires produites dans le référentiels du centre d'inertie (après la collision). On suppose l'émission isotrope dans le référentiel du centre d'inertie.
  - Quel est le seuil à partir duquel la création d'une paire  $e^-e^+$  est possible ? Calculer l'énergie de seuil, et discuter de son invariance de Lorentz.
  - Calculer la vitesse du référentiel du centre d'inertie dans le référentiel du laboratoire.
  - On s'intéresse aux paires émises selon l'axe  $-x$ . Calculer l'impulsion de ces paires dans le référentiel du laboratoire.
  - Sous quelle condition l'impulsion des paires est elle toujours orientée selon  $+x$  ? Quel intérêt pour la détection de ce processus ?

## Données laser Ti:Sa

[https://www.researchgate.net/figure/2-Absorption-and-emission-spectra-of-the-Ti-sapphire-laser-The-broad-character-of-the\\_fig1\\_280611286](https://www.researchgate.net/figure/2-Absorption-and-emission-spectra-of-the-Ti-sapphire-laser-The-broad-character-of-the_fig1_280611286)