



Prospective scientifique de l'INP sur la physique en régimes extrêmes et l'accélération laser-plasma

Sébastien Corde

loa.ensta-paris.fr



- L'exercice de prospective scientifique de l'INP : les grandes lignes
- Le périmètre et la démarche de l'atelier 'extrêmes'
- Enjeux identifiés par l'atelier 'extrêmes'
- Les sources et accélérateurs plasma

Les grandes lignes de l'exercice de
prospective scientifique de l'INP

- Le cadre : pas d'état de l'art, mais l'évolution de la physique à l'**horizon 2030** !
- Comment? En 3 phases :
 - Phase 1 : mai à décembre 2022, questionnaires remplis individuellement ou collectivement (GDRs le plus souvent, également laboratoire), définition par l'équipe INP des thèmes et des copilotes scientifiques des ateliers et de la méthode (participative tout en étant pilotée)
 - **Phase 2 : janvier à juillet 2023**, travail au sein de chaque atelier pour préparer un **texte de prospective de 12 pages** (pour chaque atelier)
 - Phase 3 : colloque de restitution en septembre 2023, année de la physique, document de prospective complet, synthèse pour diffusion large, actions stratégiques pour le futur COP du CNRS, diffusion vers le grand public et les décideurs en janvier 2024
- Pourquoi ?
 - Identifier les thématiques vers lesquelles notre communauté va se diriger et les grands enjeux sociétaux et de recherche fondamentale
 - Positionnement de la physique, permettre à l'INP de définir un plan de stratégie avec actions de lobbying vers divers acteurs (ministères, ANR, industriels, ...), un plan de communication
 - Prospective indispensable, discours "total liberté" n'étant plus audible

- Résultat de la phase 1 : 14 ateliers retenus répartis sur 2 volets
 - 8 thématiques sur le volet 1 “thématiques scientifiques en émergence”
 - 4 thématiques sur le volet 2 “grands défis sociétaux”
 - + 3 thématiques transverses

volet 2 “grands défis sociétaux”

physique pour la santé

physique pour le climat et l'énergie

physique pour l'environnement et l'alimentation

physique pour les technologies quantiques et numériques

transverse

parité-diversité

culture scientifique

impact des transitions écologique, énergétique, numérique sur la recherche dans les laboratoires (sobriété)

- Résultat de la phase 1 : 14 ateliers retenus répartis sur 2 volets
 - 8 thématiques sur le volet 1 “thématiques scientifiques en émergence”
 - 4 thématiques sur le volet 2 “grands défis sociétaux”
 - + 3 thématiques transverses

volet 1 “thématiques scientifiques en émergence”

nouveaux enjeux pour les méthodes numériques

physique en régimes extrêmes

matière lumière et processus quantiques

Pilotes: Valérie Blanchet et Marc-Henri Julien

lois fondamentales

systèmes complexes

matière complexe

électronique et photonique avancée

biophysique

- Chaque binôme de copilotes s'est choisi un bureau pour couvrir raisonnablement la thématique de son atelier
- Cadrage initial du périmètre de l'atelier "physique en régimes extrêmes" : "champs, pression, température, aspects théoriques, processus ultrarapides, plasmas..."
- Le bureau de l'atelier 'extrêmes'

Pilotes :

- Marc-Henri Julien (marc-henri.julien@lncmi.cnrs.fr, *champs magnétiques intenses*)
- Valérie Blanchet (valerie.blanchet@u-bordeaux.fr, *phénomènes ultrarapides*)

Référent INP:

- Antoine Rouse (antoine.rousse@cnrs.fr)

Membres:

- Eddy Collin (*très basse température, eddy.collin@neel.cnrs.fr*)
- Sébastien Corde (accélérateur, plasma laser, *sebastien.corde@polytechnique.edu*)
- François Guyot (pression, WDM, planétologie, *francois.guyot@mnhn.fr*)
- Stefan Hüller (QED, astrophysique, FCI, plasma laser, *stefan.hueller@polytechnique.edu*)
- Maciej LORENC (phénomènes ultrarapides, *maciej.lorenc@univ-rennes1.fr*)

Le périmètre et la démarche
de l'atelier 'extrêmes'

- Au delà du cadrage “méthode participative mais pilotée”, l’organisation était libre et propre à chaque atelier

- Liste de diffusion et etherpad pour communiquer avec la communauté :

<https://listes.services.cnrs.fr/wws/info/prospective.physique.regimes.extremes>

<https://etherpad.in2p3.fr/p/r.6410d6b25a3cb80e371ca6f8fa8efbed>

diffusion à tous les laboratoires et GDRs de ces informations de décembre 2022 à mars 2023

- Démarche de l'atelier 'extrêmes' :

Première étape : travail sur l'état de l'art et définition du périmètre de l'atelier

Rédaction d'un document “périmètre” de 4 pages

Début mars 2023 : diffusion du document “périmètre”, partagé publiquement avec la communauté

Prise en compte des retours pour adapter le périmètre, éviter les trous dans la raquette, exemple : FCM

PERIMETRE CONJONCTUREL* des enjeux en 2023 de la physique en régime extrême.

La physique est dite « en régime extrême » quand l'amplitude des paramètres tels que température, densité, pression, champ électromagnétique et énergie mis en jeu se situent aux limites de ce qu'il est possible de faire. Vient s'y ajouter la variable d'observation qu'est le temps qui peut être aujourd'hui extrêmement court (10^{-17} seconde). La température, pression, énergie, densité, potentiel vecteur et champ sont en général extrêmes dans la physique des plasma chauds, la planétologie et l'astrophysique en général.

Phénomènes ultrarapides : Vouloir suivre les changements de structure de la matière en fonction du temps a deux principaux objectifs intriqués l'un l'autre: comprendre les propriétés d'une matière hors-équilibre pour l'exploiter et la contrôler jusqu'aux limites dynamiques par processus cohérents (non thermiques). Ceci est un sous-domaine de l'interaction laser-matière qui se définit par une maîtrise des relations de phase des différents degrés de liberté en interaction (photon, électron, phonon, polaron...) avec des commutations de phase ultrarapides dites toutes optiques. Pour ce faire, les techniques les plus sensibles (comme photoémission, diffraction, microscopie, coïncidence, polarimétrie, détection multidimensionnelles, etc...) sont étendues aux domaines temporels ultimes en combinant plusieurs impulsions lumineuses ultracourtes avec comme principale variable les délais entre ces impulsions. Ces spectroscopies résolues en temps sont alors capables de suivre les cohérences (déphasage) et relaxation d'énergies mises en jeu dans quasiment toutes les gammes d'énergie (<2keV). Ces avancées reposent sur des développements spectaculaires en termes de sources de lumière (durée, taux de répétition, flux, gamme spectrale et ce au sein de laboratoires mais aussi des nouveaux « grands » instruments tels que les XFEL/ELI). L'assignement des signatures temporelles repose entièrement sur des calculs mésoscopiques de plus en plus performants. Les phénomènes irréversibles peuvent être ainsi résolus, et donc compris, pour des objets de plus en plus complexes (objet unique, matériaux 2D/ topologiques, interface) et plus généralement pour toutes les phases de la matière (gaz, liquide, solide, plasma). Ceci se fait en combinant des larges gammes spectrales allant du THz aux rayons X ainsi que tous les états de spin des photons voire leurs moments angulaires. Une des avancées majeures dans l'étude des processus ultrarapides est le développement d'expériences aux échelles de temps attosecondes - échelle des temps définissant la cohérence temporelle des trajectoires d'électrons au sein de la matière. Ces trajectoires peuvent ainsi être détectées/contrôlées/modifiées en mettant en compétition les pseudo-potentiels définissant la structuration de la matière avec la composante électrique ou encore magnétique du champ laser incident. Toutes ces expériences aux temps ultracourts (<ps) couplées à des simulations, permettent l'étude combinée, des dynamiques des constituants de la matière (particules, quasi-particules) impliquant des processus tels que la corrélation électronique, de spin, les changements structuraux, les dynamiques de magnétisation ou supraconductivité ultrarapides, et plus généralement les transferts d'énergie et de charge.

Accélérateur plasma: Les plasmas se sont révélés être de formidables environnements avec des champs accélérateurs pouvant aujourd'hui dépasser les 100 GeV/m, soit plus de 3 ordres de grandeur au-dessus des accélérateurs classiques radio-fréquences. L'interaction laser-plasma "sous-dense" a permis d'atteindre 10 GeV sur ~10cm pour des électrons, et sur cible solide des protons d'une centaine de MeV. Cette accélération est aujourd'hui également prometteuse en terme d'émittance (<1 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$, cible=10nm.rad) et de brillance pic. Ces accélérateurs ont permis l'émergence d'une nouvelle génération de sources de lumières compactes (bétatron, Compton, laser à électrons libres, etc) dans le domaine spectral X et gamma, avec des propriétés uniques héritées directement des faisceaux plasma : taille de source micrométrique et durée femtoseconde. Ces faisceaux et sources X/gamma permettent notamment de sonder des processus physiques à

Cohérence temporelle, 10^{-12} - 10^{-17} secondes,
 10^9 - 10^{15} W/cm²

GeV/m, Sources
 10^{18} - 10^{20} W/cm²

- Le périmètre in fine :

Phénomènes ultrarapides (ps à as) ou la physique hors-équilibre (HEQ) - jusqu'à $10^{15} \text{ W cm}^{-2}$

Les ions multichargés

Physique atomique des plasmas

Sources et accélérateurs plasma (inclus atto cible solide)

Électrodynamique quantique en champ fort

Astrophysique de laboratoire

Physique des hautes pressions

Recherche fondamentale dans le contexte de la fusion par confinement inertiel (FCI)

Recherche fondamentale pour la Fusion par Confinement Magnétique (FCM)

Champs magnétiques intenses

La physique au millikelvin, dite "basses températures"

- Objectif : tout ça en 12 pages, dont 1-1.5 pages pour les sources et accélérateurs plasma

PERIMETRE CONJONCTUREL* des enjeux en 2023 de la physique en régime extrême.

La physique est dite « en régime extrême » quand l'amplitude des paramètres tels que température, densité, pression, champ électromagnétique et énergie mis en jeu se situent aux limites de ce qu'il est possible de faire. Vient s'y ajouter la variable d'observation qu'est le temps qui peut être aujourd'hui extrêmement court (10^{-17} seconde). La température, pression, énergie, densité, potentiel vecteur et champ sont en général extrêmes dans la physique des plasma chauds, la planétologie et l'astrophysique en général.

Phénomènes ultrarapides : Vouloir suivre les changements de structure de la matière en fonction du temps a deux principaux objectifs intriqués l'un l'autre: comprendre les propriétés d'une matière hors-équilibre pour l'exploiter et la contrôler jusqu'aux limites dynamiques par processus cohérents (non thermiques). Ceci est un sous-domaine de l'interaction laser-matière qui se définit par une maîtrise des relations de phase des différents degrés de liberté en interaction (photon, électron, phonon, polaron...) avec des commutations de phase ultrarapides dites toutes optiques. Pour ce faire, les techniques les plus sensibles (comme photoémission, diffraction, microscopie, coïncidence, polarimétrie, détection multidimensionnelles, etc...) sont étendues aux domaines temporels ultimes en combinant plusieurs impulsions lumineuses ultracourtes avec comme principale variable les délais entre ces impulsions. Ces spectroscopies résolues en temps sont alors capables de suivre les cohérences (déphasage) et relaxation d'énergies mises en jeu dans quasiment toutes les gammes d'énergie (<2keV). Ces avancées reposent sur des développements spectaculaires en termes de sources de lumière (durée, taux de répétition, flux, gamme spectrale et ce au sein de laboratoires mais aussi des nouveaux « grands » instruments tels que les XFEL/ELI). L'assignement des signatures temporelles repose entièrement sur des calculs mésoscopiques de plus en plus performants. Les phénomènes irréversibles peuvent être ainsi résolus, et donc compris, pour des objets de plus en plus complexes (objet unique, matériaux 2D/ topologiques, interface) et plus généralement pour toutes les phases de la matière (gaz, liquide, solide, plasma). Ceci se fait en combinant des larges gammes spectrales allant du THz aux rayons X ainsi que tous les états de spin des photons voire leurs moments angulaires. Une des avancées majeures dans l'étude des processus ultrarapides est le développement d'expériences aux échelles de temps attosecondes - échelle des temps définissant la cohérence temporelle des trajectoires d'électrons au sein de la matière. Ces trajectoires peuvent ainsi être détectées/contrôlées/modifiées en mettant en compétition les pseudo-potentiels définissant la structuration de la matière avec la composante électrique ou encore magnétique du champ laser incident. Toutes ces expériences aux temps ultracourts (<ps) couplées à des simulations, permettent l'étude combinée, des dynamiques des constituants de la matière (particules, quasi-particules) impliquant des processus tels que la corrélation électronique, de spin, les changements structuraux, les dynamiques de magnétisation ou supraconductivité ultrarapides, et plus généralement les transferts d'énergie et de charge.

Accélérateur plasma: Les plasmas se sont révélés être de formidables environnements avec des champs accélérateurs pouvant aujourd'hui dépasser les 100 GeV/m, soit plus de 3 ordres de grandeur au-dessus des accélérateurs classiques radio-fréquences. L'interaction laser-plasma "sous-dense" a permis d'atteindre 10 GeV sur ~10cm pour des électrons, et sur cible solide des protons d'une centaine de MeV. Cette accélération est aujourd'hui également prometteuse en terme d'émittance (<1 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$, cible=10nm.rad) et de brillance pic. Ces accélérateurs ont permis l'émergence d'une nouvelle génération de sources de lumières compactes (bétatron, Compton, laser à électrons libres, etc) dans le domaine spectral X et gamma, avec des propriétés uniques héritées directement des faisceaux plasma : taille de source micrométrique et durée femtoseconde. Ces faisceaux et sources X/gamma permettent notamment de sonder des processus physiques à

Cohérence temporelle, 10^{-12} - 10^{-17} secondes, 10^9 - 10^{15} W/cm^2

GeV/m, Sources 10^{18} - 10^{20} W/cm^2

- Démarche de l'atelier 'extrêmes' (suite) :

Mars à avril 2023 : préparation et diffusion de **questionnaires, en proposant aussi d'être contacté pour un entretien** (format oral plutôt que réponse par écrite)

Avril à mai 2023 : **entretiens par sous-thématique**, plusieurs dizaines d'entretiens dont 5 personnes interviewées pour les sources et accélérateurs plasma (entretien suivant les questions ci-contre) :

Xavier Davoine (CEA DAM, Arpajon), Jérôme Faure (LOA, Palaiseau), Julien Fuchs (LULI, Palaiseau), Stefan Haessler (LOA, Palaiseau), Sophie Kazamias (IJClab, Orsay)

Juin 2023 : présentation d'un **point d'avancement à la section 04**

Mai à juin 2023 : préparation de versions 0 pour chaque sous-thématique (1 à 2 pages pour chaque), diffusion aux contributeurs (interview), retour

Juin 2023 : préparation de la **version 0 du document prospective 'extrêmes' (12 pages)**, envoi aux sections 3, 4 et 5, **envoi à la communauté le 21 juin 2023**

Visio-conférence avec la communauté le 28 juin 2023

Retours reçus jusqu'au 3 juillet 2023, modification substantielle sur l'astrophysique de laboratoire

Préparation de la **version finale du document prospective 'extrêmes', envoyée le 13 juillet à l'INP**

Colloque de restitution les 12 et 13 septembre en hybride (bureaux au siège, communauté en ligne)

Prospectives sur les ultrafast-2023

Le contexte, ainsi que les questions de ce frama sont disponible sur <https://mycore.core-cloud.net/index.php/s/qj1P9a60n9pNTdA>. Le frama se divise en 2 parties :

- partie 1 : des questions pour que nous puissions vous situer
- partie 2 : les 21 questions de prospectives où vous ne répondez qu'à celles qui vous inspirent ;)



vous nom *

vous email *

vous laboratoire, ville *

Votre Tutelle * Université INP-CNRS INC INSIS autres

Taille du groupe de recherche ds lequel vous travaillez *

Expérimentateur ou Théoricien ? *

Expérimentateur(trice)
 Théoricien(ne)

Echelle de temps typique des phénomènes que vous étudiez ? *

<2 fs - attosecond
 2-20 fs
 20 fs-1ps
 >1 ps

Quelle phase ? *

Diluée
 Liquide/film
 Condensée

Quelle intensité ? *

<1e13 W/cm2
 >1e13 W/cm2

Etat de polarisation que vous utilisez *

linéaire
 elliptique
 combinaison des 2

Quelle(s) technique(s) résolue(s) en temps utilisez vous ? Quelle(s) méthodologie(s) numérique(s) ? Logiciel(s) ? (<150 caractères) *

Quel domaine de longueur d'ondes/énergie ? (plusieurs choix possibles) *

THz
 IR
 Visible/UV
 -6-100 eV
 X-mous
 X-durs
 electrons (~100keV pour UTEM, UED, EELS, ...)

Utilisez vous d'autres modes spatiaux que TEM00-Gaussien ? *

oui
 non

PAGE SUIVANTE >

Ne communiquez aucun mot de passe via Framasforms.

Prospectives INP / Questions thématique accélération plasma et sources

Sébastien CORDE <sebastien.corde@ensta-paris.fr>

Sam 29/04/2023 11:44

À :prospective.physique.regimes.extremes@services.cnrs.fr
<prospective.physique.regimes.extremes@services.cnrs.fr>

Bonjour à tous,

Vous recevez ce message en tant qu'inscrits à la liste de diffusion « Physique en régimes extrêmes » de la prospective INP.

Si vous êtes concerné par la thématique (au sens large) de l'**accélération plasma et des sources de particules et de rayonnement par interaction laser-plasma**, n'hésitez pas à me faire un retour par email aux quelques questions ci-dessous, ce qui permettra d'alimenter le document de prospectives de l'INP sur cette thématique. Alternativement, n'hésitez pas à me solliciter pour un entretien pour discuter de ces questions de vive voix (plutôt que par une réponse écrite).

Si possible, merci de m'envoyer vos réponses **d'ici le 19 mai**.

Merci d'avance.

Cordialement,
Sébastien Corde

Questions:

1) Quelles sont selon vous les grandes questions de physique qu'il reste à étudier et qui seront pertinentes à l'horizon 2030 ? N'hésitez pas à commenter sur comment ces questions joueront un rôle pour l'amélioration des sources et de leur potentiel.

2) Pouvez-vous lister quelques objectifs majeurs (pour la thématique au sens large ou pour votre recherche plus spécifiquement), par exemple en termes de propriété des sources ou en termes des applications que ces sources permettent ?

3) Quels sont les développements, notamment instrumentaux ou en lien avec nos installations expérimentales, qui vous paraissent prioritaires ? N'hésitez pas à justifier brièvement l'importance de ces développements.

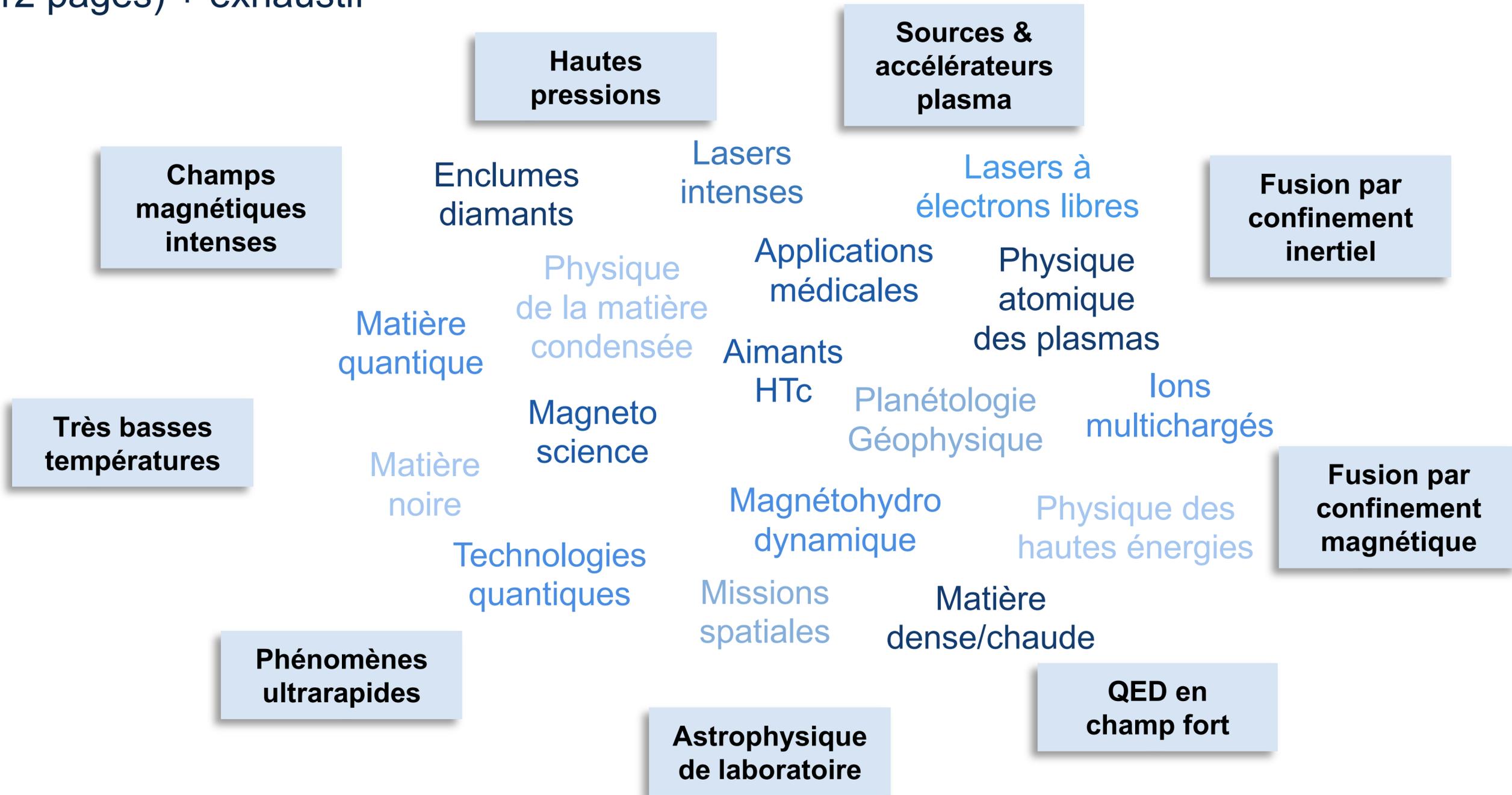
4) Pouvez-vous identifier des verrous qui doivent être étudiés et lever en priorité à l'horizon 2030 ?

5) Voyez-vous de nouveaux sujets prometteurs ou de nouvelles idées émerger en 2030, et qui pourront bouleverser le paysage de l'accélération plasma et des sources ?

Enjeux identifiés par l'atelier
'extrêmes'

PHYSIQUE EN REGIMES EXTREMES

- Domaines parfois très éloignés (mais interconnexions)
- Texte (12 pages) + exhaustif



TRÈS BASSES TEMPÉRATURES

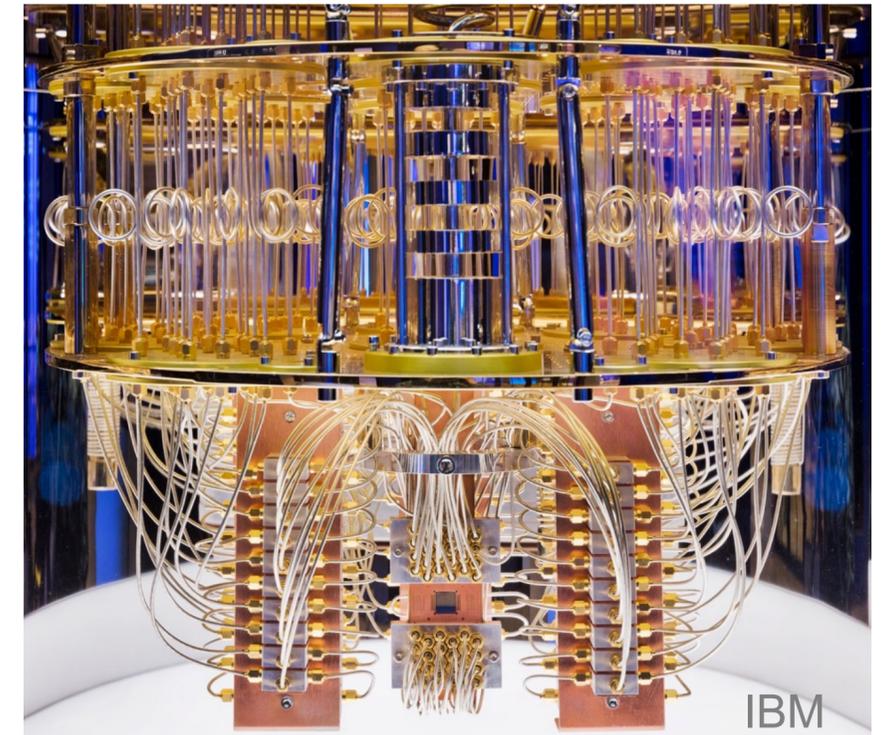
(Eddy Collin)

Horizon 2030

- **Températures extrêmes ($< 1\text{mK}$) & frontières de la physique :** Fluides quantiques, résonateurs opto-mécaniques, interact. électron-noyau, etc.
- **Matériaux quantiques :** couplage à d'autres conditions extrêmes
- **Ingénierie quantique** (« Technologie habilitante »)

Enjeux, points de vigilance

- Expertise technique, plateformes ouvertes (ex : machine $100\ \mu\text{K}$ Inst. Néel)
- Enjeux : fermes de cryostats vs. mega-cryostat, hélium vs. « cryo-free »
- Acteurs industriels : bénéfice/risque pour milieu académique
- **Assurer leadership technique & technologique :** transmission compétences, mise en valeur instrumentation, continuité ingénierie/recherche, etc.



CHAMPS MAGNETIQUES INTENSES

(MHJ)

Matière condensée (matériaux quantiques)

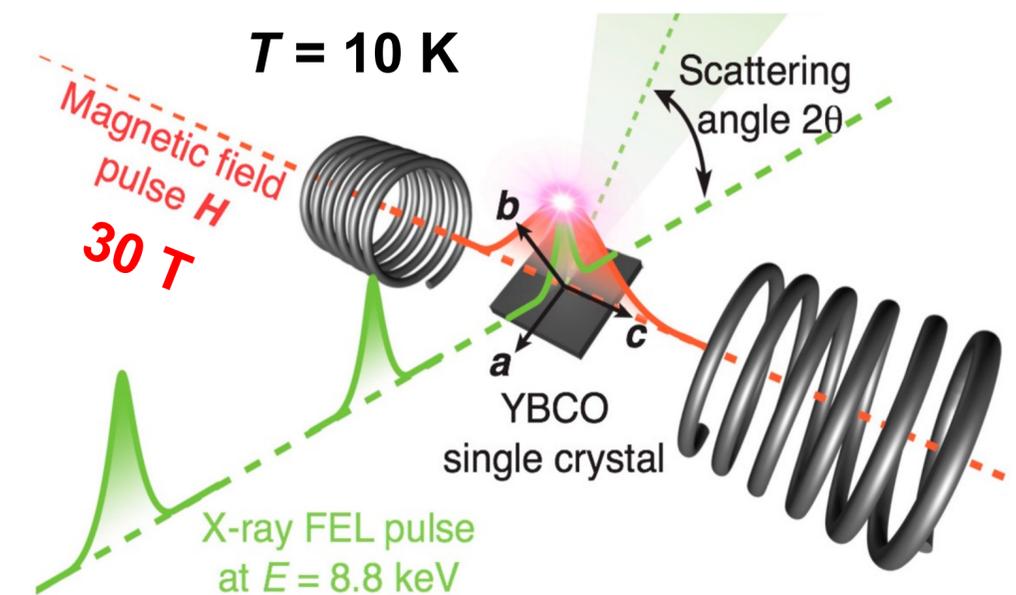
Et aussi : astrolab, fusion par confinement magnétique, fondements de la physique, magnétohydrodynamique, physique des particules, magnétoscience, caractérisation câbles supraconducteurs, etc.

Horizon 2030

- Exploiter nouvelles bobines (supra, hybride, pulsé)
- Techniques + sophistiquées (imagerie optique, STM, transport HF, ...)
- Combinaison de conditions extrêmes

Enjeux, points de vigilance

- Assurer leadership technique et technologique
- **Compétitivité installations** (vs. USA, Chine, etc.)



FUSION PAR CONFINEMENT MAGNETIQUE (FCM)

(Stefan Hüller)

Contexte ITER. Ici : recherche fondamentale dans cadre de la FCM.

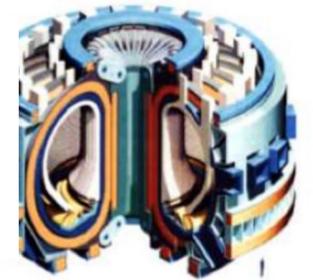
Horizon 2030

- Maîtriser conditions de bord spécifiques aux tokamaks (interaction plasma – paroi)
- Comprendre organisation des modes plasma & optimiser régime d’opération
- Développer nouveaux diagnostics (profil radial de courant, etc.)

Enjeux, points de vigilance

- Calculs haute performance. Initiative à échelle européenne ?
- Forte articulation avec **physique atomique des plasmas** (idem FCI & astrolab)
- **Compétences académiques** en physique *fondamentale*, dont formation étudiants
- **Tokamaks pour recherche fondamentale** :
→ Maintien et amélioration (WEST/Cadarache, etc.) et construction + compacts (bobines HTc, $V \propto B^{-4}$)

Magnetic
Confinement



Density	solid / 10^8
Temperature	10 keV
Confinement time	seconds

FUSION PAR CONFINEMENT INERTIEL (FCI)

(Stefan Hüller)

Recherche fondamentale dans cadre de la FCI. Contexte : résultats du NIF (National Ignition Facility Laser) = premier pas vers génération d'énergie. Mais nombreux défis avant réacteur.

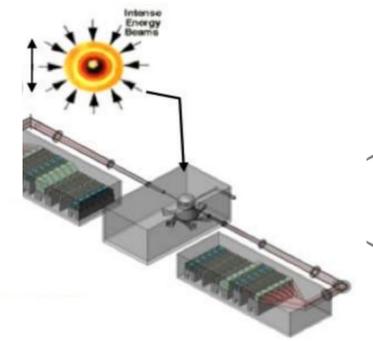
Horizon 2030

- Maîtriser interaction laser-plasma, instabilités hydrodynamiques & turbulences
- Développer cibles plus performantes et matériaux plus résistants

Enjeux, points de vigilance

- Jalons : rendement laser > qq 10 %, cadence qq tirs/sec, gain $G > 100$ (schéma par attaque directe)
- Maintien compétences académiques
- France : communauté laser (académique & industrielle)
- **Europe : besoin d'une installation/collaboration académique**

Inertial Confinement



Density	$10^3 \times \text{solid}$
Temperature	10 keV
Confinement time	10's ps

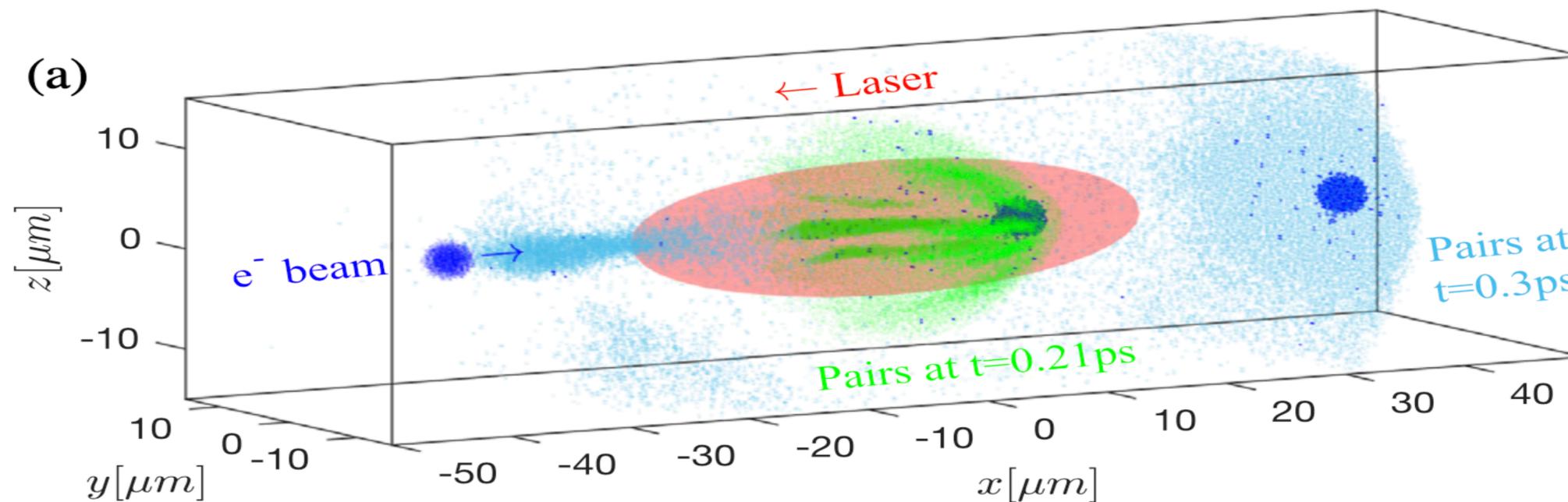
QED en champs forts

(Stefan Hüller)

Etudier en laboratoire des processus fondamentaux (relativistes et quantiques) de l'interaction matière-rayonnement.

Horizons 2030

- Grâce aux nouvelles installations laser (**>10PW**) : s'approcher du **champ de Schwinger (10^{18}V/m)** → explorer des phénomènes comme la création de paires e^-/e^+ et la non-linéarité du vide
- Impact sur **l'astrophysique**



Meuren, Forum ILP 2023
PRL 127, 095001 (2021)

QED en champs forts

(Stefan Hüller)

Etudier en laboratoire des processus fondamentaux (relativistes et quantiques) de l'interaction matière-rayonnement.

Horizons 2030

- Grâce aux nouvelles installations laser ($>10\text{PW}$) : s'approcher du **champ de Schwinger** (10^{18}V/m), et explorer des phénomènes comme la création de paires e^-/e^+ et la non-linéarité du vide
- Impact sur **l'astrophysique**
- Nouvelle installation (Apollon : $1\text{PW} \rightarrow 10\text{PW}$) pour explorer les premiers phénomènes accessibles

Enjeux

- **Fiabilisation d'Apollon**
- **Couplage avec des accélérateurs (laser ou « classique »)**
- **Soutien Théorique**

Astrophysique de laboratoire

(Stefan Hüller)

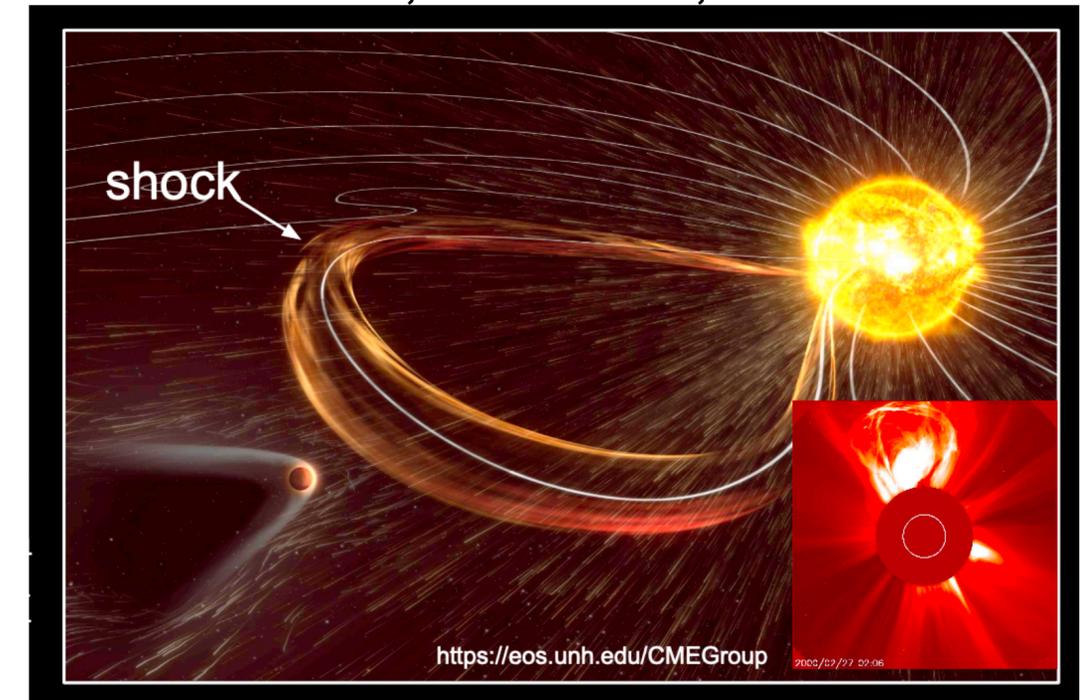
Lasers de haute énergie (kJ-ns) couplées à l'application **des lois d'échelle** des systèmes astronomiques

↓
données inestimables en laboratoire complétant les observations astronomiques.

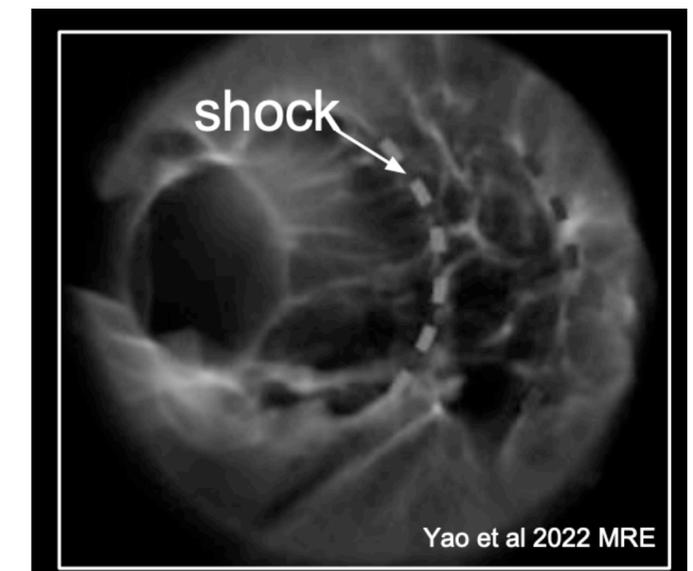
Horizons 2030

Explorer des phénomènes dans les vestiges de supernovae (chocs radiatifs etc.), des processus d'accrétion et d'éjection dans les étoiles nouvellement formées, reconnexion magnétique et turbulence dans les régimes fortement compressibles etc.

Coronal mass ejection :
size 10^{13} cm, $T \sim 10$ eV, dens. ~ 1 cm $^{-3}$



Laboratory plasma :
size 1 cm, $T \sim 100$ eV, dens. $\sim 10^{18}$ cm $^{-3}$



Source : A. Ciardi, ForumLP2023

Astrophysique de laboratoire

(Stefan Hüller)

Lasers de haute énergie (kJ-ns) couplées à l'application **des lois d'échelle** des systèmes astronomiques



données inestimables en laboratoire complétant les observations astronomiques.

Horizons 2030

Explorer des phénomènes dans les vestiges de supernovae (chocs radiatifs etc.), des processus d'accrétion et d'éjection dans les étoiles nouvellement formées, reconnexion magnétique et turbulence dans les régimes fortement compressibles etc.

Enjeux

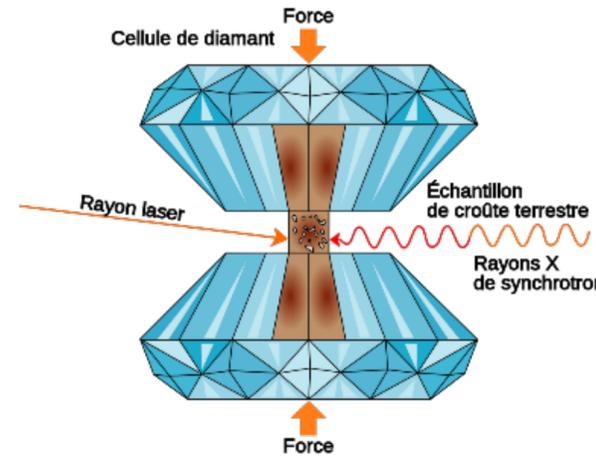
- **Champs magnétiques externes > 50 Teslas**
- **Energie laser (ns) > 10 kJ (taille intermédiaire)**
- **Des diagnostics innovants basés sur des sources secondaires**
- **Maintenir la compétence de modélisation en physique atomique plasma**

Physique des hautes pressions – Warm Dense Matter

(Francois Guyot)

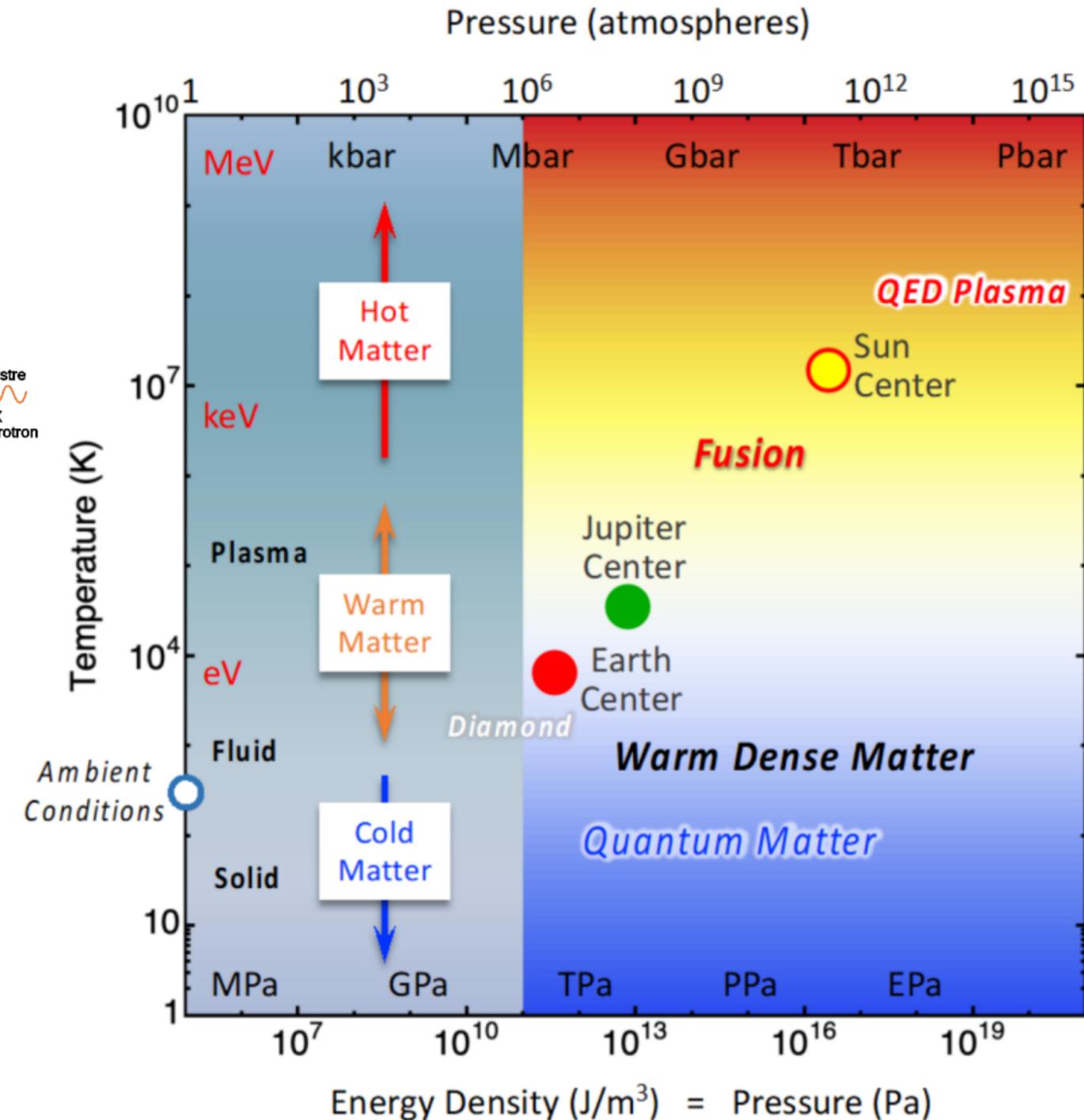
Explorer des conditions expérimentalement inédites de très hautes pressions ($> 10 \text{ Mbar}$) couplées à de relativement basses températures ($< 10^4 \text{ K}$)

Outils : Cellules à enclumes de diamant et laser intenses nanosec



Horizons 2030

- Reproduire expérimentalement les intérieurs planétaires, en particulier d'exoplanètes massives.
- Découvrir de nouvelles structures solides et liquides à propriétés physiques remarquables.
- Maintenir, grâce la pression, des propriétés quantiques jusqu'à des températures inusuelles.
- Forte articulation avec la modélisation *in silico* de la matière condensée



Physique des hautes pressions – Warm Dense Matter

(Francois Guyot)

Explorer des conditions expérimentalement inédites de très hautes pressions (**> 10 Mbar**) couplées à de relativement basses températures (**< 10⁴K**)

Outils : Cellules à enclumes de diamant et laser intenses nanoseconds

Horizons 2030

- Reproduire expérimentalement les intérieurs planétaires, en particulier d'exoplanètes massives.
- Découvrir de nouvelles structures solides et liquides à propriétés physiques remarquables.
- Maintenir, grâce la pression, des propriétés quantiques jusqu'à des températures inusuelles.
- Forte articulation avec la modélisation *in silico* de la matière condensée

Enjeux Instrumentaux

- **Cibles avancées (qualité+caractérisations)**
- **Mesures avancées en cellules diamant à ultra-haute pression**
- **Energie laser (ns) > 10kJ (taille intermédiaire)**
- **des diagnostics innovants basés sur lasers, XFEL, synchrotrons**
- **Installation hybride (kJ-ns et PW-fs)**

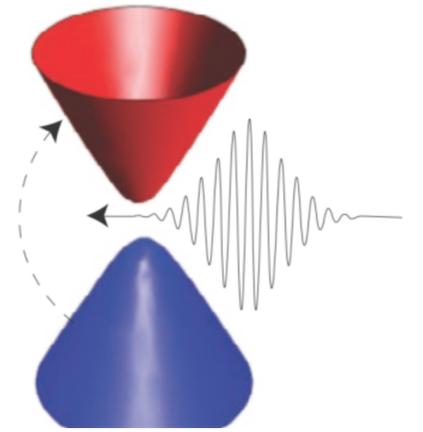
Phénomènes hors-équilibre de 10^{-12} à 10^{-17} sec

(Maciej Lorenc & Valérie Blanchet)

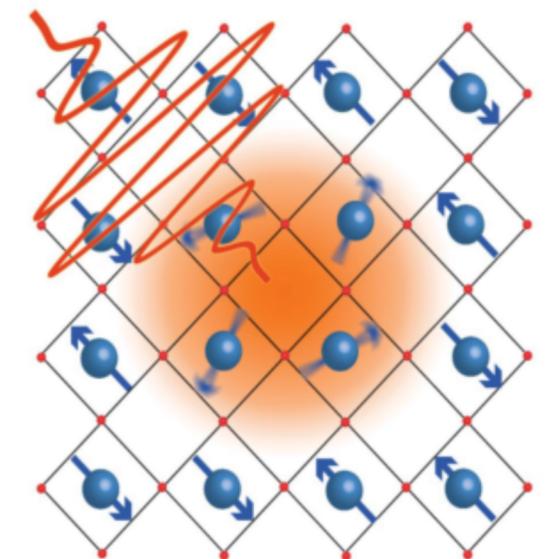
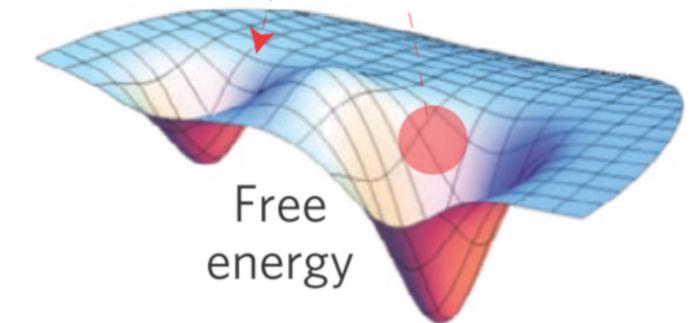
Horizon 2030

- Sonder à l'échelle **nm/fs** avec sensibilité quantique (électron, spin, phonon, polaron, polariton...) : *dynamique hors-équilibre dans les nouveaux matériaux, aux interfaces, paramètres extrêmes*
- Aspect de **cohérence** dans les oscillations collectives
- Dynamique d'un nano-objet/nanograin **unique** à l'échelle fs (quelque soit l'objet)
- Sonder à de **multiéchelles**
- Impulsions multiples et structuration avancée du champ électrique pour **agir/contrôler**

Valley control
and Berry phase modulation



Metastable states



Phénomènes hors-équilibre de 10^{-12} à 10^{-17} sec

(Maciej Lorenc & Valérie Blanchet)

Enjeux

Horizon 2030

- Sonder à l'échelle **nm/fs** avec sensibilité quantique (électron, spin, phonon, polaron, polariton...) : *dynamique hors-équilibre dans les nouveaux matériaux, aux interfaces, paramètres extrêmes*
- Aspect de **cohérence** dans les oscillations collectives
- Dynamique d'un nano-objet/nanograin **unique** à l'échelle fs (quelque soit l'objet)
- Sonder à de **multiéchelles**
- Impulsions multiples et structuration avancée du champ électrique pour **agir/contrôler**

- Source intense THz ($>1\text{MV/cm}$)
- **fs-ARPES avec Spin-détection/X-ray**
- **XFEL: Hautes énergies ($>70\text{ keV}$), résolution attoseconde et nm, choix de polarisation**
- **Nouveaux matériaux plasmoniques avec source $<10\text{fs}$**
- **UTEM : stabilisation/détecteur**
- **Combinaison de plusieurs sondes optique/XFEL**
- **SUPPORTS théoriques**

Sources et accélérateurs plasma

- Reprend les éléments discutés lors des entretiens et les retours de la communauté
- Structuré autour d'un **contexte applicatif** large et varié :
 - applis sociétales et médicales
 - FEL (on vient de passer un tournant)
 - QED
 - HEP
 - applications scientifiques (WDM, astro de labo, physique nucléaire, pompe-sonde ultrarapide)
- qui orientent les développements sur les paramètres source
- Axes de recherche pour 2030 - orienté physique avec des **questions fondamentales**
- Grands objectifs et frontières pour 2030
- **Développements instrumentaux** et besoins en infrastructure (cibles avancées, systèmes dédiés, haute cadence, fiabilisation et montée en qualité, installations hybrides)
- Transversalité entre physique et ingénierie, et entre expérience et théorie/simulation. Importance des prototypes, voir d'aller vers des machines.
- Un commentaire qui revient souvent dans les entretiens : une **vrai application qui dépasse la preuve de principe et notre domaine disciplinaire**

(densité, température, champs EM). Ces données atomiques sont évidemment essentielles en astrophysique. Pour les plasmas issus des expériences menées auprès des grands instruments (e.g. FCM, FCI, XFEL, lasers de puissance), elles conditionnent à la fois la conception de diagnostics spectroscopiques judicieux et la pertinence de simulations numériques souvent lourdes. En appui aux développements en cours et pour pousser vers des conditions encore plus extrêmes, la communauté "physique atomique des plasmas" fait face à des configurations inédites et encore peu explorées. Un des grands défis réside dans l'évaluation correcte de l'émissivité des plasmas de numéro atomique Z-élevé, pour optimiser la conversion du rayonnement X dans les cavités (aux parois) **en FCI** et pour contrôler les pertes radiatives dans les Tokamaks **en FCM** (tungstène). La présence de champs magnétiques intenses dans les plasmas astrophysiques (Soleil, naines blanches) et dans les plasmas de laboratoire (FCM et FCI, Z-machine) apporte de nouveaux challenges dans la modélisation de leurs propriétés radiatives. Pour le calcul de spectres synthétiques en fort champ magnétique et dans les conditions en haute densité d'énergie, ces investigations nécessitent le développement cohérent de modèles de cinétique des populations, d'hydrodynamique, de physique atomique et de profil de raies, couplés à des modèles de transfert radiatif, en parallèle avec des expériences, avec des résolutions spatiales et temporelles élevées, sur des plateformes dédiées à la validation de ces modèles. Pour la matière dense et chaude, la pertinence des méthodes combinant dynamique moléculaire quantique et théorie de la fonctionnelle densité est questionnable de par leur vision 'matière condensée' et basse température, qui voit les électrons comme un gaz de Fermi-Dirac sur des cœurs ioniques gelés. Avec la température, ces cœurs ioniques devraient déployer toute la complexité de leur structure atomique. De manière plus générale, **le problème de la structure atomique est un problème à N-corps loin d'être clos** pour les atomes neutres ou faiblement ionisés où le problème des corrélations entre les électrons peut être très important. Les tables de données spectroscopiques utilisées en astrophysique, dans le X-XUV et Laser Induced Breakdown Spectroscopy, sont loin d'être complètes voire même fiables.

Sources et accélérateurs plasma

Les plasmas sont des outils formidables pour développer de nouveaux types d'accélérateurs et de nouvelles sources de rayonnement ou de particules avec des propriétés uniques, notamment des champs accélérateurs extrêmes surpassant de plusieurs ordres de grandeur ceux des accélérateurs radiofréquences. La physique de ces sources et accélérateurs va de l'interaction d'impulsions laser ou faisceaux de particules avec des plasmas sous-denses (cible gazeuse) pour les électrons, positrons et la génération de rayons X et gamma via bêtatron et Compton, à l'interaction laser-plasma sur cible solide pour les ions, électrons, neutrons et la génération d'harmoniques et d'impulsions *as* intenses sur miroir plasma. Cette physique implique généralement des intensités laser très élevées, au-delà de 10^{18} W/cm². Cinq familles d'applications potentielles structurent cette recherche : les **applications sociétales et médicales** (e.g. imagerie, radiothérapie flash, radiographie industrielle), les **FEL**, la **QED** en champ fort (voir ci-dessous), la **physique des hautes énergies** (collisionneur de particules) et les **applications scientifiques** (physique nucléaire en condition plasma, astrophysique de laboratoire, expériences pompe *as* - sonde *as*, physique atomique en champs extrêmes et ultracourts, interaction laser-plasma, matière dense et tiède HEQ). Les premières preuves de FEL basés sur l'accélération plasma en 2020 sont un tournant qui annonce des développements majeurs pour (i) descendre en longueur d'onde (de 27 nm à moins d'un nanomètre), (ii) atteindre la saturation du FEL, et même (iii) implémenter des techniques avancées permettant le contrôle de la cohérence du rayonnement produit. Ce développement de FEL plasma devra être couplé à des progrès sur l'accélération plasma, pour atteindre des **brillances et des qualités extrêmes, des fortes charges, des hautes énergies, et une fiabilité accrue**.

Les avancées dans ce domaine ont déjà permis de comprendre les mécanismes sous-jacents à ces sources mais les problèmes restant à résoudre vont ouvrir des axes de recherche à l'horizon 2030. Un exemple emblématique est la perspective d'application à un collisionneur : l'accélération d'**anti-particules** dans un plasma est-elle possible et compatible avec les prérequis d'un collisionneur ? Peut-on contrôler les instabilités qui peuvent apparaître à des efficacités énergétiques et des qualités

élevées ? Peut-on réaliser un accélérateur **multi-étage** sans compromettre la qualité du faisceau ? Le potentiel applicatif **des ions et des neutrons entrerait dans une nouvelle dimension en s'approchant du GeV** et des jets relativistes. Il reste encore à explorer le passage à un régime d'accélération par pression de rayonnement (qui est attendu pour ces énergies relativistes), et à élucider les conditions d'existence de régime d'accélération mixte. Avec nos systèmes laser les plus puissants, quelles **intensités extrêmes peut-on générer avec un miroir plasma** par refocalisation des harmoniques et compression temporelle, et **quelle énergie d'électrons peut-on obtenir sur un seul étage** en dépassant les limites dites de diffraction et de déphasage de l'accélérateur laser-plasma ? Ces questions sont fondamentales pour comprendre dans quelle mesure ces systèmes laser, sources et accélérateurs pourront répondre aux besoins de l'application QED en champ fort. A ces questions de physique s'ajoutent des questions d'autres natures : les systèmes lasers pourront-ils monter en cadence et en puissance moyenne pour satisfaire les besoins de ces applications ? À quel gain peut-on s'attendre en déployant des approches d'ingénierie et d'**IA** pour améliorer le contrôle, la stabilité et les performances ? A ce titre, **la R&D laser reste une priorité**, en partenariat avec les industriels, notamment en explorant d'autres technologies (Yb:YAG, OPCPA, post-compression). Les forces françaises en **haute cadence** laser (e.g. projet LAPLACE) doivent permettre le développement pionnier d'approches IA pour les sources et accélérateurs plasma. Enfin, on peut esquisser quelques frontières particulièrement importantes pour 2030 : s'approcher du GeV pour les ions et les neutrons, aller bien au-delà des 10 GeV pour les électrons, démontrer une intensification par plusieurs ordres de grandeur par miroir plasma, obtenir des brillances faisceau dépassant largement celles des sources et accélérateurs conventionnels. De telles avancées auront un impact majeur en ouvrant largement le champ applicatif, tout particulièrement pour l'astrophysique de laboratoire, la QED et le FEL.

Pour atteindre de tels objectifs, les efforts de recherche doivent s'accompagner de développements instrumentaux. Un besoin commun à la plupart des approches est le développement de **cibles avancées**, en se dotant de la capacité de produire de telles cibles à des coûts abordables. Sur les systèmes laser, la première priorité est la fiabilisation et la montée en qualité, en métrologie laser, en diagnostics, et en fonctionnalités, pour être en mesure d'exploiter à leur plein potentiel nos installations. Un challenge majeur sera notamment de garantir un contraste suffisant tout en augmentant les éclaircissements laser sur cible solide. L'augmentation de la complexité des expériences souligne également le **besoin de systèmes dédiés**. Enfin, il est crucial de ne pas engager toutes nos ressources dans une seule direction, et à ce titre plusieurs directions doivent être poursuivies en parallèle : la **haute cadence** d'une part, la **fiabilisation et montée en qualité** de chaîne laser >1 PW-fs, se doter d'**installations hybrides** mêlant laser kJ-ns et PW-fs ou mêlant laser et accélérateur, et commencer une réflexion sur la science que pourrait permettre une **installation très haute puissance** (>10 PW-fs).

Transverse à toutes les approches de sources et accélérateurs plasma est l'articulation entre physique et ingénierie, et entre expérience et théorie/simulations. Sans s'opposer à l'approche physique discutée ci-dessus, l'aspect **ingénierie** est amené à monter en puissance (e.g. projet PALLAS), pour rester compétitif sur le plan international et pour transformer des preuves de principe en prototype, voire même en machine accessible aux utilisateurs, ce qui est au cœur du projet européen EuPRAXIA. La **démonstration d'une application** des sources et accélérateurs plasma à son plein potentiel, au-delà de la preuve de principe et en dehors du domaine plasma est un objectif prioritaire pour 2030 afin de valider le potentiel de ce champ thématique.

Électrodynamique quantique en champ fort

Le domaine de l'électrodynamique quantique (QED) en champ fort (SFQED) caractérisé de manière générale par l'interaction entre des champs EM ultra intenses (dits « forts ») et des photons ou de la matière (particules chargées, cible plasma), est en plein essor grâce aux nouvelles installations expérimentales laser de classe >10 PW-fs, et parfois combinées avec des accélérateurs de particules. Ce régime peu étudié en laboratoire associe simultanément des processus relativistes et quantiques, tous cruciaux pour comprendre fondamentalement l'interaction matière-rayonnement. Grâce à ces

Sources et Accélérateurs Plasma

(Sébastien Corde)

Créer des **sources innovantes** et des **accélérateurs de particules** (e^- , e^+ , ions, neutrons) et rayonnement (X, gamma) avec lasers intenses et plasmas

Horizon 2030

- Explorer les pistes vers la haute énergie ($>10\text{GeV}$ pour électrons), haute brillance/qualité et forte charge (ex : 1nCoulombs , $<10\text{ nm}$ emittance) → **compacité**
- Accélération d'anti-particules, multi-étage, paramètres d'un collisionneur, comment approcher ces questions ?
- Horizon du GeV pour les ions et neutrons, jets relativistes
- Intensité extrêmes par refocalisation/compression sur miroir plasma

dilué

solide



Sources et Accélérateurs Plasma

(Sébastien Corde)

Créer des **sources innovantes** et des **accélérateurs de particules** (e^- , e^+ , ions, neutrons) et rayonnement (X, gamma) avec lasers intenses et plasmas

Horizon 2030

- Explorer les pistes vers la haute énergie ($>10\text{GeV}$ pour électrons), haute brillance/qualité et forte charge (ex : 1nCoulombs , $<10\text{ nm}$ emittance)
- Accélération d'anti-particules, multi-étage, paramètres d'un collisionneur, **comment approcher ces questions ?**
- Horizon du GeV pour les ions et neutrons, jets relativistes
- Intensité extrêmes par refocalisation/compression sur miroir plasma

dilué

solide

Enjeux Instrumentaux

- Cibles avancées
- Systèmes dédiés
- Haute cadence (100Hz)
- IA et ingénierie (diag.)
- Fiabilisation/montée en qualité (e.g. APOLLON)
- Installation hybride (kJ-ns et PW-fs)



Merci pour votre attention