

## Résumé de la journée thématique Grands Accélérateurs

Dans le cadre de phase 2 du projet de refondation des laboratoires de la vallée d'Orsay, l'atelier "Participation à HL-LHC, HE-LHC (FCC), LHeC, ILC" a organisé le 6 mars 2018 une journée sur les futurs projets des grands accélérateurs de la physique des particules. Entre 25-30 personnes ont assisté à cette journée, dont la plupart du LAL et une participation plus restreinte de membre de l'IPNO et du LPT. Le but de la journée était d'aborder le rôle des labos de la vallée dans les futurs projets de la discipline et d'informer les effectifs des labos sur l'état des lieux des différents projets. Le programme complet de la journée est disponible à l'adresse suivante : <https://indico.in2p3.fr/event/17065/>

Cet atelier fait suite au groupe de travail sur la physique des particules auprès des accélérateurs lors de la phase 1 du projet de refondation. Il a pour but de dresser une liste des projets existants et des expressions d'intérêt individuelles et si possible de mettre en évidence les grands projets à caractère structurant pour une refondation. Un des points important ayant été souligné dans le groupe de travail de la phase 1 est que la communauté de physique des particules prévoit une mise à jour de la stratégie européenne en 2020. Cette stratégie aura probablement des conséquences significatives sur les engagements des laboratoires de la vallée dans les futurs projets .

### 1. Théorie et motivations de physique

Avec la découverte du boson de Higgs à approximativement 125 GeV, le modèle standard de la physique des particules est complet et il peut-être extrapolé à des échelles exponentiellement grandes. Il n'est cependant pas entièrement satisfaisant pour des raisons théoriques liées à la nécessité d'ajustements fins de ses paramètres. En particulier pour qu'il soit naturel, le modèle standard nécessite l'existence de nouvelle physique à l'échelle du TeV, échelle abondamment explorée par le LHC. Or aucun signal significatif de nouvelle physique n'a été observé jusqu'à présent. Le programme du LHC en est encore à ses débuts étant donné qu'à ce jour il a été collecté environ 1% des données de son programme complet. Les données du LHC peuvent encore réserver des surprises et s'il n'y a pas de nouveaux phénomènes observés de manière significative, des anomalies ont toutefois été observées. L'une d'entre elles attirant le plus l'attention de la communauté provient des mesures d'universalité des leptons dans la physique des saveurs sur LHC-b. Si celles-ci devaient se confirmer, elles constitueraient une piste intéressante pour la nouvelle physique et pourrait changer la stratégie des projets dans les prochaines années. La prise de données à SuperKEKB apportera aussi des éléments précieux sur cette problématique.

D'autres grandes questions actuelles se posent au modèle standard, impliquant la possible existence de nouvelle physique et en particulier l'existence de matière noire, la masse des neutrinos ou encore l'asymétrie baryonique dans l'univers observable. Mais aucune ne donne d'indication claire sur l'échelle à laquelle la nouvelle physique devrait se manifester.

Dans ce contexte nouveau, il devient essentiel de concentrer plus d'efforts sur les mesures de précision, et leurs interprétations cohérentes à l'aide de théories effectives. C'est un thème fondamental du programme du LHC à haute luminosité, mais aussi bien entendu de l'ILC et des autres projets de collisionneurs électron-positron (FCC-ee et CepC).

### 2. Détecteurs HL-LHC

La physique des particules auprès des accélérateurs a un programme bien défini jusqu'au début de 2035 grâce à LHC, HL-LHC et SuperKEKB.

Le groupe ATLAS du LAL compte s'engager sur trois projets, le trajectomètre ITK, le détecteur vers l'avant HGTD dédié aux mesures temporelles et l'électronique du calorimètre. ITK fait partie du planning d'ATLAS pour HL-LHC, HGTD est toujours en cours d'étude. Une décision sur HGTD sera prise dans le courant 2018.

Pour ITK, le LAL collabore étroitement avec le LPNHE et l'IRFU et le laboratoire va accueillir une station d'assemblage. Pour cela une infrastructure consolidée est nécessaire et une salle blanche sera montée dans la vallée. Jusqu'à 2025 le projet aura besoin d'environ 7 FTE chaque année dont la moitié d'ITA. Le projet HGTD est dans la phase de R&D avec une équipe d'environ 6 FTE (chercheur et ITA). Les besoins en RH et infrastructure n'ont pas été précisés lors de la journée thématique.

Pour LHC-b, les considérations sur une contribution à la phase HL-LHC sont en cours mais encore dans un état prématuré. Les études évoquent une technologie granulaire pour le calorimètre électromagnétique de LHC-b avec du tungstène comme matériau absorbant afin répondre au besoin de produire des gerbes compactes. Pour le matériau sensible un scintillateur ou du silicium sont étudiés. L'intérêt commun dans la physique des ions lourds crée un "pont" entre le LAL et l'IPNO ce qui ouvre la voie vers une collaboration pour une réalisation d'un calorimètre par les laboratoires de la vallée.

### 3. Futurs collisionneurs circulaires au CERN, le projet FCC: FCC-hh, HE-LHC, FCC-eh/LHeC et FCC-ee

L'absence de l'IN2P3 et en particulier des laboratoires de la vallée à la construction de HL-LHC est constatée et tout doit être mis en œuvre pour que cela ne se reproduise pas. Le prochain projet de collisionneur au CERN sera intensivement discuté d'ici 2020 dans le contexte de la mise à jour de la stratégie Européenne de la physique des particules. Dans ce cadre et autour du projet EuroCirCol, la collaboration FCC s'est structurée, auquel le LAL et l'IPNO participent de façon active.

Le projet FCC inclut :

- FCC-hh ciblant une énergie dans le centre de masse de 100 TeV avec le défi de la réalisation des aimants supraconducteurs à 16 T dans un tunnel de 100 km qui est le projet phare ;
- FCC-ee comme étape intermédiaire à différentes énergies et intensités pour les e-/e+ pour l'étude du : Z à ultra-haute précision, le W, le Higgs et le top au seuil de production de paires ;
- HE-LHC qui utilise la même technologie d'aimants à 16 T que FCC-hh mais dans le tunnel du LHC ;
- FCC-eh avec le LHeC, pour faire des collisions électrons-protons à l'aide d'un ERL (Energy Recovery Linac) avec plusieurs passages dans le LINAC supraconducteur, technique qui reste à être démontrée.

Dans ce contexte, le LAL et l'IPNO participent au design et à l'évaluation des performances du système de collimation pour FCC-hh. La collimation, avec les points d'interaction, est un des systèmes les plus critiques, car l'énergie stockée est 20 fois plus élevée qu'auprès du LHC. Un CDR est en cours de rédaction et il sera publié à la fin de 2018. Ce CDR sera le document de base pour les étapes ultérieures de ce projet aux multiples volets.

En parallèle, le LAL et l'IPNO participent aussi de façon très importante au développement de la technologie ERL. Les laboratoires sont actifs dans le positionnement comme porteurs du projet PERLE (Powerful Energy Recovery Linac for Experiments) pour démontrer la technique du multi-passage à fort courant. Le projet doit en outre s'élargir par un soutien au niveau international.

La participation dans le projet FCC pourrait s'élargir grâce aux compétences avérées que l'IPNO dispose sur la production des modules cryogéniques démontrée lors de ses participations aux projets comme SPIRAL2, ESS et MYRRHA. Les modules cryogéniques sont dans certains cas réalisés en proche collaboration avec l'IRFU. D'autre part, l'expérience du LAL sur les positrons pourrait aussi être cruciale pour l'optimisation de la production pour FCC-ee.

En conclusion la recherche française pourrait s'appuyer sur ce réseau pour positionner la France au premier plan au sein du projet FCC.

### 4. Le projet ILC

La découverte du boson de Higgs constitue une motivation forte pour la construction d'un collisionneur électrons-positrons à une énergie de l'ordre de 1 TeV. Il existe des études pour les collisionneurs circulaires à la LEP, CEPC et FCC-ee, qui bénéficieront d'une haute luminosité aux basses énergies mais seront limités dans

leur portée en énergie et dans leur versatilité. Des machines linéaires ILC et CLIC avec des faisceaux polarisés sont capables de couvrir toute la gamme d'énergie entre la masse du boson de Z et éventuellement plusieurs TeV.

La proposition la plus mûre est le collisionneur ILC basée sur des cavités supraconductrices. Le LAL soutient le projet depuis deux décennies à plusieurs niveaux et ses membres font régulièrement partie des comités de pilotage divers. Depuis 2013 le Japon étudie la possibilité d'accueillir l'ILC. Ces études doivent aboutir courant 2018 et il est attendu que le gouvernement Japonais exprime ensuite sa position sur le projet. Les comités internationaux sont très favorables à une réalisation rapide de l'ILC avec une énergie initiale dans le centre de masse de 250 GeV. L'avis du gouvernement japonais sera une donnée essentielle lors de la mise à jour de la stratégie européenne.

L'état avancé de la préparation s'est traduit récemment par une visite d'une délégation japonaise en France et en Allemagne en janvier 2018. Les membres du LAL jouent un rôle important à la rédaction d'un plan d'action européen qui esquisse la contribution européenne au projet ILC.

#### 4.1 ILC – Accélérateur

En 2017 le projet XFEL a été mis en opération à DESY en Allemagne. La technologie pour cette source de rayons X est la même que pour l'ILC ; le projet XFEL s'est appuyé sur des idées développées pour l'ILC. Le projet XFEL donne donc une grande crédibilité pour la réalisation de l'ILC. Pour donner un ordre de grandeur le XFEL représente approximativement 7% de l'ILC.

Pour XFEL le LAL était en charge du conditionnement des coupleurs qui assurent le transfert de la puissance HF aux cavités accélératrices supraconductrices de l'accélérateur. Environ 800 coupleurs ont été conditionnés entre 2011 et 2016 au LAL.

L'ILC prévoit d'être équipé de 16000 coupleurs semblables. Bien qu'il soit probable que tous les coupleurs ne soient pas conditionnés au LAL, cela impliquerait néanmoins une extension importante de l'infrastructure existante. L'accent devra être mis sur la fiabilisation de la chaîne du conditionnement.

Les coupleurs sont des sous-systèmes des modules cryogéniques qui hébergent les cavités accélératrices supraconductrices dans une enceinte refroidie à la température de l'hélium liquide. Pour le XFEL les modules cryogéniques ont été assemblés au CEA/Saclay. Pour les besoins de l'ILC, il peut être envisageable que les laboratoires de la vallée s'associent à la production des modules cryogéniques. Une telle contribution demanderait une coordination avec des partenaires proches, notamment avec le CEA Saclay (le DACM de l'IRFU).

En plus et pendant les dernières années le LAL a eu un rôle proéminent dans la démonstration de la technique de correction de chromaticité locale dans un « ILC like BDS » à ATF2 au KEK, ainsi que dans l'obtention de tailles nanométriques des faisceaux au point d'interaction avec une stabilité de l'ordre du nanomètre. La participation du LAL à ATF2 est complétée par le test de plusieurs diagnostics comme: IP-BPMs, Diamond sensors, système de collimation et OTR/YAG, ainsi que par des études de l'effet du vide dans l'anneau ATF. Ces contributions permettraient aux laboratoires de la vallée de proposer des contributions substantielles aux diagnostics, le « tuning » et l'opération du futur ILC.

Le LAL a développé aussi des compétences fortement reconnues sur la production de rayons X à haute intensité. Des photons fournis par un laser sont « stockés » dans une cavité optique de haute finesse. Cette technologie connaît de nombreuses applications dans plusieurs domaines de recherche. Par la diffusion Compton, les rayons X peuvent être utilisés par un polarimètre ou alors pour la production des positons polarisés. Ces techniques ont été testées à ATF et seront testées dans une future proche à ThomX et ELI - NP.

Dans la partie accélérateur, le projet ILC fait partie d'une collaboration plus large le « Linear Collider Collaboration (LC) » qui coordonne depuis 2013 les deux études des futurs collisionneurs linéaires: l'ILC et le CLIC. Le LAL participe aussi de façon active à certaines études de CLIC notamment pour l'obtention de « very-low beta » également testé à ATF2 ainsi qu'aux études de « High-Gradient Normal Conducting » RF linac technologie formant la base du collisionneur CLIC et qui est applicable de plus en plus dans d'autres domaines comme les X-Band FELs (XLS-Compact EU Design Project) et les LINACs pour la radiothérapie.

## 4.2 ILC - Détecteur

Depuis 15 ans, le LAL est engagé dans la R&D pour un calorimètre silicium-tungstène hautement granulaire. Cette R&D est menée en proche collaboration avec des partenaires nationaux (le LLR et le pôle OMEGA dans le périmètre Paris-Saclay) et internationaux comme DESY, le CERN et le KEK dans la collaboration CALICE et les projets européens comme AIDA-2020.

Actuellement les travaux techniques portent sur l'assemblage des couches d'un détecteur ainsi que sur le développement de l'électronique numérique. En total 8000 couches avec environ 10000 canaux chacune sont prévues pour le détecteur final. L'enjeu est l'espace très contraint pour l'intégration des composants. Les travaux en cours vont permettre de se positionner pour prendre la responsabilité pour ces sujets pendant la construction d'un détecteur auprès de l'ILC. Pour cela un besoin d'environ 15 FTE (ITA) pendant 10 ans entre environ 2020 et 2030 a été formulé.

Le groupe a également la responsabilité de l'intégration du détecteur ILD. Cet engagement gagnera de l'envergure lors de la préparation et la réalisation d'un détecteur à l'ILC.

## 5. Discussion instrumentation détecteur

Lors d'échanges durant la journée thématique il a été noté que l'engagement des "jeunes" physiciens sur l'instrumentation n'est pas à un niveau satisfaisant. La perte d'expérience en instrumentation parmi les chercheurs est susceptible de nuire à la compréhension profonde des données enregistrées et sur la capacité de concevoir des futures expériences. Par ailleurs, l'affectation à plusieurs projets en parallèle a été déplorée. Ces affectations multiples ne permettant pas une intégration optimale aux projets dont la complexité croît de manière significative. L'envergure et les échelles de temps des grands projets sont sans doute en partie responsables de cette tendance.

Une suggestion sur un éventuel développement d'un pôle de compétences accompagnant les projets de R&D visant à renforcer les compétences en instrumentation a été faite.

## 6. Conclusions

La journée thématique a souligné la volonté et la capacité des laboratoires de la vallée à se positionner comme constructeurs pour des composants importants des futurs projets de la physique des particules. Les futurs engagements dépendent fortement des décisions prises lors de la mise à jour de la stratégie européenne qui coïncide avec la présente discussion sur la refondation. Le LAL figure parmi les huit grands laboratoires de la physique des particules en Europe et le directeur du LAL fait partie du « European Strategy Group » qui va rédiger les conclusions du processus de la mise à jour de la stratégie européenne. Chaque engagement doit relever d'une coordination avec les tutelles et les partenaires "historiques" en France. En cas de réalisation, les grands projets et les contrats internationaux devront assurer les crédits récurrents qui seront au bénéfice de la vie scientifique des laboratoires actuels ou d'une nouvelle structure.

La journée thématique a permis d'identifier certaines synergies à plus ou moins long terme pouvant structurer un projet de refondation. Au niveau des accélérateurs en particulier, une coordination étroite entre le LAL et l'IPNO pourrait permettre de positionner les laboratoires de la vallée parmi les grands acteurs pour la construction des futurs projets accélérateurs : FCC et LC, en vue de la forte complémentarité d'expertises (e-/e+ / protons) des deux départements.

Sur les autres sujets les affinités sont plus difficiles à discerner. Concernant l'instrumentation, la journée thématique a recensé peu d'intérêt des groupes des autres laboratoires de la vallée de joindre les expériences de la physique des particules sur accélérateurs. Comme l'avait souligné le Groupe de Travail sur la physique auprès des grands Accélérateurs durant la phase I, si les enjeux scientifiques sont essentiellement centrés sur le LAL des intérêts communs existent, en particulier dans la physique des ions lourds à LHC-b.

Bien que la journée fut focalisée sur les engagements dans l'ILC et des futurs projets au CERN, les autres projets potentiels, tels que CepC en Chine, sont suivis avec grand intérêt.



## Appendice A

Components	SCRF				NCRF	HLRF	SC Mag.		NC Mag.	Vac.	Optics	Others
	HG	HQ	CRYO	CRAB			NB3Tn	CRYO				
FCC-hh			✓	✓			✓	✓		✓		Integr.
HE-LHC			✓	✓			✓	✓			Coll.	
FCC-eh/LHeC			✓									
FCC-ee	✓	✓	✓			✓			✓		IRs	Integr./Pos.
ILC	✓	✓									IRs	Pos.
CLIC					✓	✓			✓		IRs	

Table 1 : Résumé synthétique des technologies clés pour les futurs grands accélérateurs et les compétences disponibles dans les laboratoires de la vallée, marquées en rouge.

## Appendice B

Components	Matériaux Sensibles				Electronique			Mécanique	Integration Détecteur
	Semi. Cond.	Opt.	Gas	Gas Nob./liqu.	Analog.	Num.	Trigger		
ATLAS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
LHCb	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
ILD	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓
CALICE	✓	✓	✓		✓			✓	✓

Table 1: Résumé synthétique des technologies clés pour les détecteurs au sein des grands accélérateurs et les contributions actuelles des laboratoires de la vallée (i.e. du LAL), marquées en rouge.