



**HAL**  
open science

## Une expérience de nouvelle génération pour la QCD au HL-LHC. (DéTECTEUR ITS-3 d'ALICE-2 et proposition d'expérience ALICE-3)

Iouri Belikov, Arthur Gal, Boris Hippolyte, Marc Imhoff, Christian Kuhn, Antonin Maire, Fouad Rami, Christelle Roy, Serhiy Senyukov, Yves Schutz, et al.

### ► To cite this version:

Iouri Belikov, Arthur Gal, Boris Hippolyte, Marc Imhoff, Christian Kuhn, et al.. Une expérience de nouvelle génération pour la QCD au HL-LHC. (DéTECTEUR ITS-3 d'ALICE-2 et proposition d'expérience ALICE-3). 2022. hal-03574877

**HAL Id: hal-03574877**

**<https://hal.science/hal-03574877>**

Preprint submitted on 15 Feb 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Une expérience de nouvelle génération pour la QCD au HL-LHC

Détecteur ITS-3 d'ALICE-2 et proposition d'expérience ALICE-3

Personne de contact :

Antonin MAIRE, IPHC Strasbourg  
antonin.maire[at]iphc.cnrs.fr / Annuaire IN2P3 : [lien](#)

Auteurs (ordre alphabétique) :

- Équipe ALICE IPHC : Iouri Belikov, Arthur Gal (doctorant), Boris Hippolyte, Marc Imhoff, Christian Kuhn, Antonin Maire, Fouad Rami, Christelle Roy, Serhiy Senyukov, Yves Schutz
- Équipe ALICE LPSC : Gustavo Conesa Balbastre, Julien Faivre, Rachid Guernane
- Théoriciens : Jean-Yves Ollitrault (IPhT)

Partenaires internationaux :

CERN, INFN, ...

Résumé

À l'horizon 2032, une expérience généraliste de nouvelle génération est proposée auprès du HL-LHC, ALICE-3. Exploitant une technologie de capteurs MAPS-Si ultra-fins, hyper-granulaires, souples et de grandes tailles, elle vise la détection et l'identification des particules chargées et photons jusqu'à de très basses impulsions transverses ( $p_T > 0,05 \text{ GeV}/c$ ), sur une grande plage de rapidité ( $y \in [-4 ; +4]$ ) et avec une lecture rapide ( $> 1 \text{ MHz}$ ). Le programme de physique s'étend de la mesure des sondes électromagnétiques de  $p_T$  ultra-bas à la physique de précision dans le secteur du charme et de la beauté.

Note :

Une contribution sur le volet instrumental a été soumise en correspondance auprès du (GT08 – Instrumentation) pour les perspectives In2p3 (contact : Iouri Belikov, IPHC Strasbourg).

# 1. Contexte initial : upgrades LS2 d'ALICE pour les Runs III et IV

L'expérience ALICE auprès du LHC est approuvée pour les 2 campagnes de prises de données à venir, les Runs III (2022-2025) et IV (2029-2031). L'expérience installe actuellement ses *upgrades* majeurs pour la dizaine d'années devant nous, avec notamment celui de sa chambre à projection temporelle avec des plans de lecture équipés de GEM (TPC-2) [1], et pour ce qui concerne des équipes françaises, les trajectomètres à base de capteurs silicium, celui aux rapidités à l'avant (MFT) [2] en amont du spectromètre à muons et celui aux rapidités centrales (ITS-2) [3].

L'ITS-2 est composé de 7 couches concentriques réparties en 2 groupes, les 3 couches internes ramassées à proximité du tube à vide ( $r_{\text{tube}} = 1,82$  cm) à des distances  $r_{L0} \approx 2,3$  cm,  $r_{L1} \approx 3,2$  cm et  $r_{L2} \approx 3,9$  cm et les 4 couches extérieures positionnées entre  $r_{L3} \approx 19,5$  cm et  $r_{L6} \approx 39,3$  cm. Le détecteur est un ensemble de capteurs pixelisés de technologie CMOS, suivant une architecture ALPIDE spécialement développée à cet effet. Les caractéristiques principales du détecteur sont listées dans la première colonne du Tab. 1. Un tel détecteur est instrumenté pour couvrir une plage de pseudo-rapidités au moins égale à  $|\eta| < 1,3$  (voir Tab. 1.1 in [3]) et augmentera d'ores et déjà l'efficacité de détection des particules chargées aux basses impulsions transverses (*ex* : à  $p_T = 0,1$  GeV/c,  $\varepsilon_{\text{tracking}}^{\text{ITS-1}}(h^\pm) \approx 10$  % contre  $\varepsilon_{\text{tracking}}^{\text{ITS-2}}(h^\pm) \approx 60$  %, voir Fig. 7.12 in [3]).

## 2. Objectifs de physique de long court, Runs IV et V

La physique dans le contexte des recherches sur le Plasma de Quarks et de Gluons (QGP) a besoin d'une appréhension la plus exhaustive possible de l'espace des phases : en impulsion, en rapidité ( $y$ ), en saveurs. Elle nécessite un budget de matière du détecteur le plus homogène et bas possible, une vaste couverture angulaire et un *vertexing* de plus en plus précis. Les développements instrumentaux exploitant les dernières avancées associées à la technologie CMOS<sup>1</sup> annoncent la possibilité d'un détecteur solide quasi immatériel, relativement rapide et hyper-granulaire. Cela en fait un détecteur de prédilection pour une exploration systématique de l'espace des phases pour les collisions hadroniques les plus prolifiques en multiplicité (AA) comme celles plus modestes (pA et pp). Quelques points saillants de physique peuvent illustrer ces considérations. Ils ont en commun la nécessité d'une grande finesse de détection et/ou précision statistique.

- **Évolution de la température au long de la collision AA** : accessible avec la radiation thermique de photons virtuels émis au fil de l'avancement de la collision, sous forme de di-électrons de basses masses ( $0 < m_{e^+e^-} < 2$  GeV/c<sup>2</sup>).
- **Nature de la transition de phase et des degrés de liberté dans le QGP** : mesures des moments d'ordres supérieurs ( $m_n$ ,  $n \in [2;6]$ ) de la production nette, intégrée en  $p_T$ , de baryons ( $\bar{p}$ -p, ...), de l'étrangeté ( $K^+$ - $K^-$ ,  $\bar{\Lambda}$ - $\Lambda$ , ...) à  $\mu_B = 0$  (Sec. 3.3 in [4]) ; cela quantifie les fluctuations événement par événement de nombres quantiques globaux, donnant accès à des comparaisons directes avec les prédictions *ab initio* de la QCD sur réseau vis-à-vis des transitions de phases (déconfinement et symétrie chirale) [5].

---

1 i) process de *stitching* permettant le déport du pilotage et de la DAQ sur la périphérie du capteur ; ii) un amincissement poussé en-dessous de 40  $\mu\text{m}$  permettant une incurvation du capteur lui-même ; iii) des pixels à très bas bruit (taux de faux  $< 10^{-7}$ ) de taille en-deçà des  $30 \times 30 \mu\text{m}^2$  offrant une résolution spatiale épurée et accrue ; iv) des avalanches induites par des simples photons dans des diodes SPAD, offrant des résolutions temporelles de  $O(10$  ps).

- **Hydrodynamique aux limites relativistes** : à  $y \approx 0$ , un tel détecteur doit offrir la possibilité de mesure des harmoniques de Fourier pour les hadrons non-identifiés,  $v_n(h^\pm)$ , jusqu'à des  $p_T$  faiblement relativistes,  $p_T < 0,05 \text{ GeV}/c$  ( $\beta^{\pi^\pm} \approx 0,34$ ). Repousser les limites basses de la mesure correspond à une avancée majeure pour la compréhension du *bulk* (à  $|\eta| < 0,8$ ,  $\sqrt{s_{NN}} \text{ O}(\text{TeV})$ , 10 % de la production  $h^\pm$  est situé entre  $[0 ; 0,2] \text{ GeV}/c$ , 70 % entre  $[0 ; 0,5] \text{ GeV}/c$ ) ; cela permet une mesure sans extrapolation aux bas  $p_T$  et de suivre l'entrée de l'hydrodynamique d'un secteur non-relativiste vers celui relativiste (comportement d'abord linéaire puis quadratique des  $v_n(h^\pm)$  avec les  $p_T$  croissants).
- **Interactions entre les partons durs et les constituants du milieu** :
  - modifications intra-jets (*jet shapes, jets structures*, reconstruits à l'aide des particules chargées) avec des incertitudes systématiques fortement réduites (<2-5%) grâce à une forte granularité et un accès aux traces qui composent les jets jusqu'à des bas  $p_T^{\text{trace}}$ .
  - di-jets étiquetés en saveurs (reconstruction complète des mésons lourds dans les jets) en vue de mesures sur les pertes d'énergie du charme et de la beauté.
- **Quarks lourds (c,b) face à la collectivité** :
  - section efficace totale du charme pour  $p_T > 0$  et  $y < 3-4$  [mésons et baryons :  $D^0(c\bar{u})$ ,  $D^+(c\bar{d})$ ,  $D_s^+(c\bar{s})$ ,  $\Lambda_c^+(udc)$  et quarkonia  $c\bar{c}$  [ $\eta_c$ ,  $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$ ,  $\chi_{cJ}$  ...]
  - exploration des baryons (multi-)charmés (et étranges en surcroît) [ $\Lambda_c^+(udc)$ ,  $\Xi_c^+(usc)$ ,  $\Xi_c^0(dsc)$ ,  $\Omega_c^0(ssc)$ ,  $\Xi_{cc}^{2+}(ucc)$ , ...,  $\Omega_{ccc}^{2+}(ccc)$ ] et des baryons beaux [ $\Lambda_b^0(udb)$ , ...]. L'objectif est notamment de tester les mécanismes de recombinaison des quarks charmés et leur sensibilité au milieu (hydrodynamisation, équilibration chimique, thermalisation / coefficients de transport). Un tel objectif exige une augmentation drastique de la signification du signal reconstruit et de la précision spatiale (paramètre d'impact des traces, notamment) pour reconstruire des topologies de désintégration de plus en plus complexes, allant typiquement de 2 à 6 corps.

### 3. Projets à tir et calendrier

Le programme de physique précédent va de pair avec un programme instrumental. Ce duo est pensé en 2 étapes, avec le projet ITS-3 [6] (Run IV) faisant office de démonstrateur pour valider la stratégie des couches les plus internes de l'expérience « ALICE-3 » [8] (Run V).

#### 3.1 - ITS-3, upgrade ALICE des 3 couches internes pour le Run IV (2029-31)

Le projet ITS-3 [6] a pour objet le remplacement des 3 couches les plus internes de l'ITS-2 avec des capteurs CMOS souples et de grande taille ( $O[15 \times 10 \text{ cm}^2]$ ), placés à des distances  $r_{l0} \approx 1,8 \text{ cm}$ ,  $r_{l1} \approx 2,4 \text{ cm}$  et  $r_{l2} \approx 3,0 \text{ cm}$  de l'axe du faisceau, autour d'un tube à vide de dimension encore réduite ( $r_{\text{tube}} = 1,60 \text{ cm}$ ). La couverture en  $\eta$  sera la même que pour le Run précédent, en lien avec les 4 couches extérieures demeurant celles de l'ITS-2 [1]. Les caractéristiques principales de l'ITS-3 sont résumées dans le Tab. 1, il s'agit notamment d'un détecteur avec un budget de matière réduit à 0.07 %  $x/X_0$  par couche. Un tel upgrade permettra par exemple de réelles avancées sur le terrain de l'identification des baryons  $\Lambda_c^+$  ( $c\tau = 60 \mu\text{m}$ ) et des mésons  $D_s^+$  ( $c\tau = 150 \mu\text{m}$ ) avec une signification, dans les collisions Pb-Pb les plus centrales (0-10 %), supérieure à 25 quel que soit le  $p_T > 2 \text{ GeV}/c$  ( $\approx 4$  fois la signification attendue avec ITS-2, voir Fig.13 in [6]) et une reconstruction

jusqu'à  $p_T \approx 0-1$  GeV/c. Le projet ITS-3 bénéficie à l'heure actuelle d'un avis positif du LHCC (voir compte-rendu de la 139<sup>e</sup> session de septembre 2019 [7]).

### 3.2 - Proposition d'expérience, ALICE-3, pour le Run V (>2032)

Arrivée à l'orée du *Long Shutdown 4* et aux limites de ses capacités (luminosités instantanées, acceptance, ...), l'expérience ALICE-2 mettra fin à ses opérations. Une nouvelle expérience internationale (*A Next Generation of Heavy-Ion Experiment* [8]) est proposée auprès du HL-LHC à partir du Run V. Continuation naturelle de l'expérience ALICE-2 mais au potentiel allant au-delà du seul champ de l'interaction forte, le point d'ancrage majeur est la couverture des très basses impulsions transverses. Équipée à 100% de technologies silicium, une telle expérience se veut un détecteur compact instrumenté sur une plage continue de rapidité allant de  $y = -4$  à  $y = +4$  et vise la détection à partir de  $p_T < 50$  MeV/c jusqu'à des  $p_T$  suffisamment élevés ( $p_T > 10$  GeV/c).

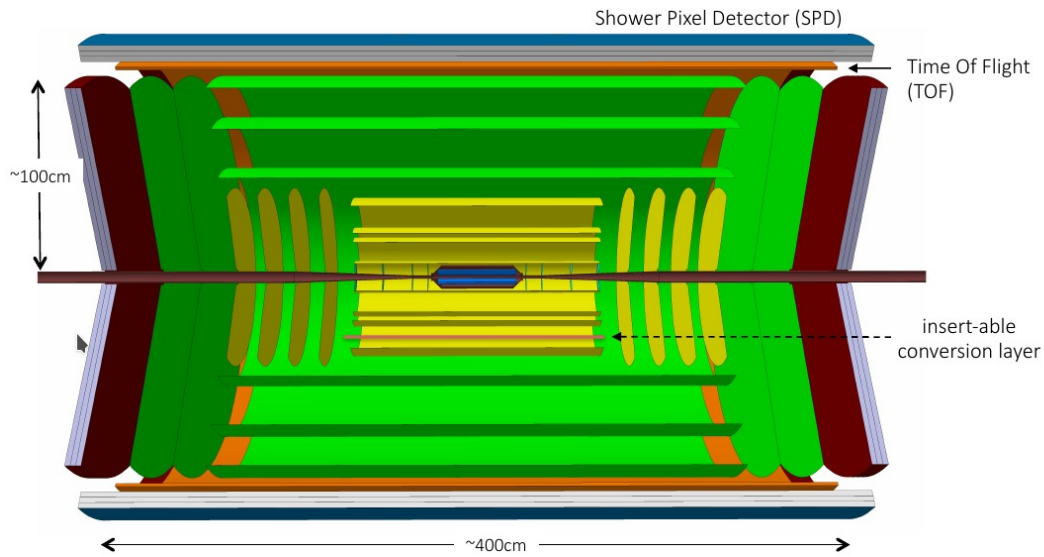
Une identification de particules sera fournie par l'entremise d'un détecteur temps de vol (à base de capteurs à avalanche simple photon, ayant une résolution temporelle de  $\approx 20$  ps) et un détecteur de pied de gerbe (calorimètre feuilleté pixellisé CMOS) pour l'identification des  $e^\pm/\gamma$ , y compris sur une frange ultra-basse de quantités de mouvement [ $p_T \approx 0,1$  GeV/c]. Une telle expérience est conçue pour l'étude des collisions pp, pA et AA et sera capable de fonctionner sous des luminosités instantanées de l'ordre de  $10^{34}$  cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> (taux d'événements  $\geq 1$  MHz, > 20 fois le taux prévu pour ALICE Run IV). Voir les caractéristiques principales présentées dans le Tab. 1.

*Tableau 1* – Caractéristiques principales des différents détecteurs silicium envisagés. Les données en italique concernent les couches externes ( $\geq L3$ ) des trajectomètres lorsqu'elles diffèrent des couches internes (L0 à L2).

	ITS-2 [3]	ITS-3 [6]	ALICE-3 [8]
Période LHC	Run III + IV (2022-31)	Run IV (2029-31)	$\geq$ Run V (>2032)
Nombres de couches	3+4	3 (+4 ITS-2)	<i>O(3+7)</i>
$R_{\text{tube}}$	1,82 cm	1,6 cm	1,6 ou 2,9 <sup>2</sup>
$r_{L0} / r_{L1} / r_{L2} \dots r_{\text{Last}}$ (cm)	2,3 / 3,2 / 3,9 ... 39,3	1,8 / 2,4 / 3,0 ... 39,3	1,8 / ... $\approx 100$
Champ magnétique $B_{\text{solénoïde}}$	0,2 ou 0,5 T	0,2 ou 0,5 T	0,2 à 2 T
Matière par couche ( $x/X_0$ )	0,3 % à 0,8 %	0,07 % à 0,8 %	0,05 % à 0,5 %
Taille d'un pixel ( $\mu\text{m}^2$ )	$\approx 30 \times 30$	$\approx 15 \times 15$ (+ $30 \times 30$ )	$\approx 10 \times 10$ (+ $30 \times 30$ )
Résolution temporelle	$\geq 2-5 \mu\text{s}$	2-5 $\mu\text{s}$	$\leq 1 \mu\text{s}$
Résolution spatiale	5 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$	$\approx 3-5 \mu\text{m}$
Couverture en $\eta$	$ \eta  < 2,0$ à 1,3	$ \eta  < 2,0$ à 1,3	$ \eta  < 4,0$
$\varepsilon_{\text{tracking}}(p_T(h^\pm) = X \text{ GeV}/c)$	1    0,1    0,05	1    0,1    0,05	1    0,1    0,05
	98 %    60 %    10 %	98 %    75 %    20 %	98 %    75 %    20 %
Coûts totaux (R&D + Constr.)	$\approx 10$ MCHF	5,3 MCHF	$\approx 80-100$ MCHF
Nb d'instituts / Nb de pays	30 / 16	30 / 16	(>399 signataires)

2 Les 3 premières couches pourraient être localisées dans un tube à vide élargi, au plus près du faisceau lui-même.

ANNEXE :



*Figure 1* – Vue de l'expérience ALICE-3 (version 2019-déc), enchâssée dans un aimant solénoïdal (non représenté ici). Le tonneau central, couvrant  $|\eta| < 1.4$ , est composé d'un trajectomètre interne (IT, bleu), ici placé à l'intérieur du tube à vide, d'un trajectomètre externe (OT, jaune et vert), un temps de vol (TOF, orange) et un détecteur de gerbe d'électrons (SPD, bleu). Deux bouchons (trajectomètres + SPD) viennent étendre la gamme en  $\eta$  jusqu'à  $\eta = \pm 4$ . Figure reprise directement de [8].

## 4. Références

- [1] ALICE Collaboration. *Upgrade of the ALICE Time Projection Chamber - Technical Design Report*. CERN Document Server (2013). [CERN-LHCC-2013-020](#).
- [2] ALICE Collaboration. *Muon Forward Tracker - Technical Design Report*. CERN Document Server (2015). [CERN-LHCC-2015-001](#).
- [3] ALICE Collaboration. *Upgrade of the Inner Tracking System - Technical Design Report*. *J. Phys. G* 41 (2014) 087002. [CERN-LHCC-2013-024](#).
- [4] Z. Citron *et al.* *HL-LHC Yellow Report -WG5 : Future physics opportunities for high-density QCD at the LHC with heavy-ion and proton beams*. CERN-LPCC-2018-07. [arXiv:1812.06772](#)
- [5] Frithjof Karsch. *Critical behaviour and net-charge fluctuations from LQCD*. CPOD 2018 proceedings. [arXiv:1905.03936](#)
- [6] ALICE Collaboration. *Lettre of Intent for an ALICE ITS Upgrade in LS3*. CERN Document Server (2019). [CERN-LHCC-2019-018](#).
- [7] LHCc. *Minutes of the 139<sup>th</sup> LHCc session*, 10-12 Septembre 2019. [CERN-LHCC-2019-010](#) ; LHCC-139.  
Voir également <http://committees.web.cern.ch/lhcc/minutes.html>.
- [8] F. Antinori, A. Morsch, L. Musa *et al.* *A next-generation LHC heavy-ion experiment*. « *EoI ALICE-3* », [arXiv:1902.01211](#)