

# dossier

## 40 ANS DE SCIENCE ET TECHNOLOGIES AU LAPP



Le Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules (LAPP) a récemment célébré son 40<sup>ème</sup> anniversaire. Plus de deux cents collègues, personnalités du monde politique, scientifique et industriel ont participé à une cérémonie le 14 octobre 2016 ; puis le LAPP a ouvert ses portes à plus de deux mille visiteurs lors de la Fête de la Science.



Giovanni LAMANNA,  
Directeur du LAPP

*"Ce succès mesure l'attractivité et le rôle de référence scientifique du LAPP pour la population de notre territoire. Cela nous conforte également dans notre ambition : contribuer à la diffusion des connaissances scientifiques pour tous",* précise Giovanni LAMANNA, Directeur du LAPP.

Créé en 1976, le LAPP est un laboratoire du CNRS de renommée internationale, un formidable moteur d'innovation technologique et une composante d'excellence de l'Université Savoie Mont Blanc. Près de 150 chercheurs, personnels techniques et administratifs, doctorants et visiteurs étrangers y travaillent.

Depuis sa création, le LAPP participe au CERN à des projets qui ont marqué l'histoire de la physique des particules. Aujourd'hui, il étudie aussi les astroparticules provenant du cosmos avec des expériences installées dans le monde entier et même sur la station spatiale internationale ! De l'infiniment grand à l'infiniment petit, les scientifiques du LAPP explorent les lois fondamentales de l'Univers. Le laboratoire a également une expertise scientifique et technique reconnue en microélectronique, électronique ultra-rapide, mécanique, mécatronique, modélisation, informatique embarquée, et big data scientifique qui donne lieu à des formations, à de nombreux contacts avec le tissu industriel environnant et les autres laboratoires de l'USMB et surtout à des collaborations à l'échelle mondiale.

Les découvertes récentes : celle du boson de Higgs auprès du LHC et celle des ondes gravitationnelles par la collaboration LIGO-Virgo viennent couronner toutes ces années de recherche !



Dossier réalisé  
par Frédérique CHOLLET et Edwige TOURNEFIER  
<http://lapp.in2p3.fr>

# 40 ANS D'AVENTURE SCIENTIFIQUE, TECHNIQUE ET HUMAINE

La cérémonie officielle d'anniversaire a permis de revenir sur ces 40 ans d'aventure scientifique, technique et humaine du LAPP, évoquant la grande et la petite histoire, mettant à l'honneur les découvertes, les hommes et les femmes, célèbres ou pas, qui ont marqué la vie du laboratoire, mais aussi, ces révolutions de l'informatique ou du système de recherche français qui ont bouleversé le monde, et surtout une certaine idée du "travailler ensemble".

"Laurent GIACOBONE, recruté à dix-huit ans par Marcel VIVARGENT est le plus ancien membre du LAPP encore en activité. Aujourd'hui il réalise de la mécanique d'extrême précision, de la bijouterie fine pour l'expérience Virgo. Son travail illustre ce qui a fait et fait encore la réputation du laboratoire : la qualité de ses personnels quelle que soit la corporation à laquelle ils appartient. Et pour que cette qualité s'exprime pleinement, il n'y faut qu'un seul ingrédient : travailler ensemble.

La physique des particules, par sa nature, est sans doute la science qui illustre le plus parfaitement le proverbe : l'union fait la force !" Philippe GHEZ.



Laurent GIACOBONE Marcel VIVARGENT

## De 1976 à aujourd'hui : Formidable succès du Modèle Standard

La création du LAPP se situe à une période charnière de la courte histoire (environ cent ans) de la physique des particules. Le Modèle Standard émerge en tant que théorie unifiée et donne une description globale de la matière à sa plus petite échelle, incluant les particules de matière et les médiateurs de leurs interactions et prédisant l'existence d'un nombre limité de nouvelles particules. De 1976 jusqu'à nos jours, les découvertes vont se succéder, renforçant peu à peu la confiance des chercheurs dans le Modèle Standard.

1976

Particules élémentaires				
Médiateurs		Matière		
Interaction	Particule Médiatrice	u up	c charme	?
faible	?	d down	s étrange	b beau
électromagnétique	$\gamma$ photon	e électron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
forte	?	$\nu_e$ neutrino électronique	$\nu_\mu$ neutrino muonique	?

2016

Particules élémentaires				
Médiateurs		Matière		
Interaction	Particule Médiatrice	u up	c charme	t top
faible	$W^\pm Z^0$	d down	s étrange	b beau
électromagnétique	$\gamma$ photon	e électron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
forte	g gluon	$\nu_e$ neutrino électronique	$\nu_\mu$ neutrino muonique	$\nu_\tau$ neutrino muonique

$H^0$   
Higgs

Predictions du modèle standard (les "??" du tableau) en 1976 et le modèle standard aujourd'hui

- 1974 : Découverte du quark charmé
- 1976 : Découverte du lepton tau
- 1977 : Découverte du quark beau
- 1979 : Découverte (indirecte) du gluon
- 1983 : Découverte des bosons W et Z

- 1995 : Découverte du quark top
- 2000 : Observation directe (découverte) du neutrino tauique
- 2012 : Découverte du boson de Higgs-Brout-Englert

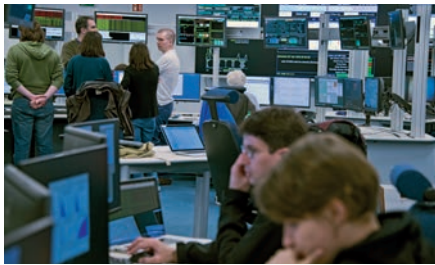
# LES EXPÉRIENCES AUPRÈS DES GRANDS ACCÉLÉRATEURS DU CERN

Le LAPP a une longue tradition de collaboration avec le CERN et joue un rôle porteur de la contribution de nos collectivités territoriales aux grands défis scientifiques et technologiques grâce aux soutiens du Conseil Régional et du Conseil Départemental de la Haute-Savoie (notamment via le programme PRAC et la convention LHC74). Le LAPP a participé à plusieurs générations d'expériences auprès des différents accélérateurs du CERN, contribuant à la conception et à la réalisation de grands instruments ou détecteurs, et de leurs équipements annexes : vide, refroidissement, métrologie, contrôle, lecture etc. Aujourd'hui, le laboratoire participe à ATLAS et LHCb, deux des quatre expériences du grand collisionneur de hadrons (LHC, Large Hadron Collider).

## Recherche de nouvelles particules

**ATLAS** étudie de nouveaux processus fondamentaux ainsi que la matière à l'échelle la plus petite jamais atteinte. Etudier les collisions de particules dans le détecteur ATLAS est un défi technique et scientifique sans précédent. Malgré sa grande taille (46 mètres) et sa complexité, cet instrument géant permet de faire des mesures très précises. Le LAPP a des responsabilités majeures dans la construction et l'opération du Calorimètre Electromagnétique à Argon Liquide.

**LHCb** est une expérience conçue pour explorer de façon précise les légères différences entre matière et antimatière et cherche à observer de nouvelles particules.



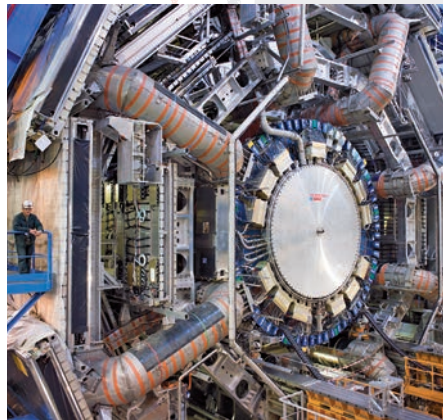
Salle de contrôle de l'expérience LHCb au CERN

© LHCb



Carte électronique LATOME

© LAPP-ATLAS



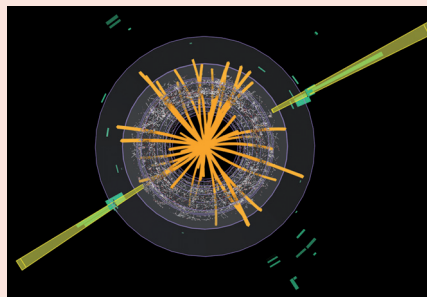
Détecteur ATLAS ouvert

© 2007 CERN

## Découverte du boson de Higgs

Le premier objectif scientifique du LHC était de mettre en évidence le boson de Higgs. Cette particule avait été prédite en 1964 pour expliquer la masse des autres particules et était activement recherchée depuis. L'annonce de la découverte de ce boson le 4 juillet 2012, a couronné plus de 20 ans de travail.

Èvènement à deux photons



© ATLAS.

# L'UNIVERS COMME LABORATOIRE

Depuis 25 ans le LAPP se consacre à l'étude des phénomènes cosmiques les plus violents de l'Univers en observant des messagers cosmiques tels que les rayons cosmiques, les rayons gamma ainsi que les ondes gravitationnelles.



AMS installé sur la station spatiale internationale.

© NASA

## A la recherche de la matière noire

**AMS** (Alpha Magnetic Spectrometer) est installé sur la station spatiale internationale depuis 2011, en orbite à 400 kilomètres d'altitude. En étudiant la composition du flux des rayons cosmiques de haute énergie qui arrivent sur Terre, l'expérience AMS cherche à en savoir plus, sur les sources de ces particules et peut-être éclaircir certains mystères de notre Univers : la raison de l'absence d'antimatière et la nature de la matière noire.

Le LAPP a entièrement réalisé l'un des instruments clés d'AMS. Plus de dix ans de travail ont été nécessaires, en partenariat avec les collaborateurs d'AMS, du CERN, de la NASA ou de l'ESA, pour faire face aux contraintes de l'espace : fiabilité, faible consommation électrique, compacité, légèreté, robustesse, résistance aux vibrations, radiations et variations de températures (entre  $-30^{\circ}\text{C}$  et  $+50^{\circ}\text{C}$ ).

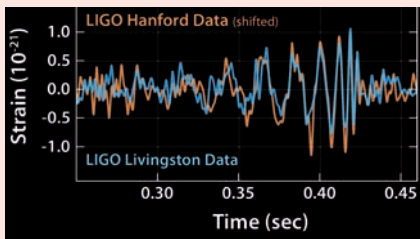


Câblage du calorimètre d'AMS.

© LAPP

## Observation des ondes gravitationnelles

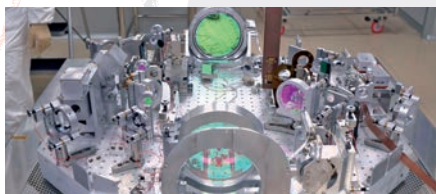
Les ondes gravitationnelles sont des déformations de l'espace-temps, prédites en 1916 par Albert Einstein, générées lors de cataclysmes cosmiques. La première détection directe d'une onde gravitationnelle a eu lieu le 14 septembre 2015 à 9h51 UTC. Les signaux enregistrés par les détecteurs LIGO provenaient d'une collision de deux trous noirs situés à 1,3 milliards d'années-lumière de la Terre.



**Virgo** est un interféromètre laser géant, capable de mesurer d'infimes perturbations dont la réalisation et l'exploitation tient de l'exploit. Situé à Pise, en Italie, il fait partie, avec les détecteurs américains LIGO, d'un réseau international d'observatoires d'ondes gravitationnelles. Le LAPP participe à la construction, à l'installation, aux réglages et à la surveillance de Virgo. Il est responsable de l'ensemble de détection du signal (bancs optiques, photodiodes de détection et électronique associée), de l'acquisition des données, de la synchronisation temporelle du contrôle du détecteur, et de l'étalonnage du signal mesuré.



Virgo - Vue du ciel.



Banc de détection du signal de l'interféromètre.

© LAPP-Virgo

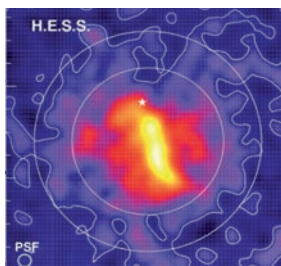
L'Astronomie Gamma a pour but d'identifier les origines du rayonnement cosmique, de mieux comprendre les phénomènes astrophysiques violents, de sonder la matière noire de l'Univers et de tester certaines lois fondamentales de la physique. Les rayons gamma sont issus d'interactions de particules accélérées à très haute énergie.

Aujourd'hui, l'exploration de ces rayons ouvre une nouvelle fenêtre sur le cosmos.



Système mécatronique et automatique de chargement et déchargement de la caméra H.E.S.S.

© LAPP



Vela X observée par H.E.S.S.

**H.E.S.S.** (High Energy Stereoscopic System) situé en Namibie, est composé de 5 télescopes :

4 télescopes possédant un miroir de 13,6 mètres de diamètre et un grand télescope de 28 mètres placé au centre. Avant la mise en service de l'expérience en 2003, le nombre de sources de rayons gamma s'élevait à une petite dizaine. Grâce à H.E.S.S., près de 80 sources s'ajoutent aujourd'hui à ce catalogue.

Le LAPP est investi à tous les niveaux de ce projet : traitement des données, électronique embarquée de la caméra, système mécatronique d'asservissement.

**CTA** (Cherenkov Telescope Array), est le futur observatoire pour l'astronomie gamma. Il sera constitué de deux sites, au Chili et en Espagne, regroupant plusieurs dizaines de télescopes de différentes tailles afin d'explorer plus profondément l'espace extragalactique.

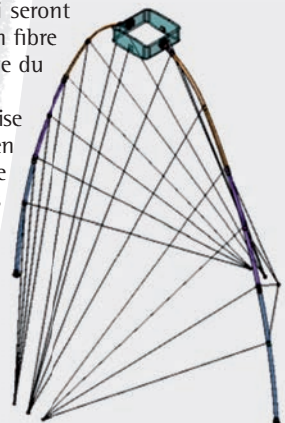
**Design et Stabilisation active d'une arche de grand télescope**, le LAPP

est impliqué dans la conception des télescopes de grande taille qui seront le cœur du réseau CTA. Il a conçu l'arche haubanée de 30 mètres, en fibre de carbone qui soutiendra la caméra, ainsi que le système de pilotage du télescope et l'électronique de contrôle de la caméra.

Depuis 2011, un partenariat de recherche est établi avec l'entreprise française LORIMA à Lorient, spécialisée dans la construction de mâts en matériaux composites pour les bateaux de course (tels ceux du Vendée Globe). Les éléments de cette arche doivent répondre à des exigences strictes de géométrie, robustesse et poids. Défi relevé avec succès en 2016 !

Le laboratoire réalise aussi l'étude du comportement dynamique et l'asservissement actif de ces nouvelles grandes structures légères, dans une double optique d'optimisation des performances et des coûts des futurs télescopes. Il participe également au développement du logiciel de contrôle des télescopes.

Enfin, il joue un rôle majeur dans les différents aspects ayant trait à la gestion, au traitement et au stockage des quelques gigaoctets de données générées chaque seconde.



Vue de l'arche de grand télescope CTA en fibres de carbone.

© LAPP

## PHYSIQUE DES NEUTRINOS

**Mystérieux, difficilement décelables... ils soulèvent toujours autant de questions.** Mais une chose est sûre : non, ils ne voyagent pas plus vite que la lumière. Le temps où les neutrinos étaient pris en **flagrant délit d'excès de vitesse** est révolu. Les neutrinos, particules élémentaires de très faible masse et de charge électrique nulle, traversent aisément la matière sans laisser de trace. Ils présentent des propriétés tout à fait étonnantes et ne cessent d'intriguer les chercheurs. Ils se déclinent en trois types appelés "saveurs" (électronique, muonique et tauique) et ils peuvent passer d'une saveur à l'autre par un phénomène appelé "oscillation". Ce phénomène a été étudié par l'expérience OPERA dans le laboratoire souterrain du Gran Sasso en Italie, à partir d'un faisceau issu du CERN ayant parcouru plus de 700 km. Aujourd'hui, le LAPP est impliqué dans trois projets basés dans le sillon Alpin qui abordent des questions fondamentales non résolues.

**Le neutrino est-il sa propre antiparticule ?** Le projet SuperNEMO dans le Laboratoire Souterrain de Modane tentera de répondre à cette question en recherchant un type de radioactivité qui serait extrêmement rare (la double désintégration bêta sans émission de neutrino).

**Existe-t-il une quatrième saveur de neutrino ?** L'expérience STEREO étudiera très précisément les antineutrinos issus du réacteur nucléaire de recherche de l'Institut Laue-Langevin à Grenoble, pour y déceler des oscillations qui seraient la preuve de l'existence d'un quatrième type de neutrino (neutrino stérile).

**Les antineutrinos se comportent-ils différemment des neutrinos ?** Le futur détecteur géant DUNE, dont un prototype va être installé au CERN, étudiera les différences entre neutrinos et antineutrinos.

## RECHERCHE, INNOVATION ET TECHNOLOGIES

Les services techniques du laboratoire conçoivent et réalisent des instruments toujours plus performants, capables de fonctionner dans des environnements extrêmes. Le service mécanique mène des projets à caractère pluridisciplinaire nécessitant de l'instrumentation, de l'automatisme, des simulations thermomécaniques et dynamiques avancées, du vide, des systèmes de refroidissement, du contrôle vibratoire, des matériaux composites, etc. Les électroniciens conçoivent des systèmes complexes permettant la lecture bas bruit et faible consommation des capteurs, la numérisation des signaux, leur traitement numérique rapide par des systèmes à base de composants programmables ou processeurs, et finalement l'envoi des données vers le système d'acquisition de l'expérience. En informatique, les activités vont du développement de code embarqué à la simulation numérique et aux calculs scientifiques, en passant par l'administration Systèmes et Réseaux, la mise en œuvre des moyens de calcul, sans oublier le développement de logiciels, au cœur des systèmes d'acquisition de données et de supervision des expériences.

### Métrologie et Contrôle Vibratoire au nanomètre.

Le LAPP développe un capteur adapté à la mesure et au contrôle des vibrations naturelles du sol avec un niveau de bruit très faible, sur une plage de fréquences allant de 0,15 Hz à 250 Hz. Une équipe intervient sur différents sites expérimentaux en France, en Europe et au Japon pour effectuer des mesures de cohérence et pour modéliser les déplacements du sol. Ce capteur breveté a été spécialement conçu pour la stabilisation active des grands instruments scientifiques, notamment les futurs accélérateurs linéaires, mais est adaptable à d'autres applications.



© ATF2-KEK

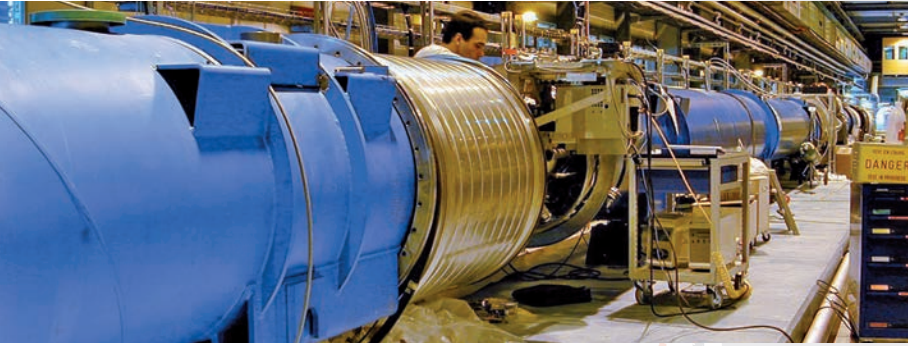
Démonstrateur d'un futur accélérateur au Japon.



© LAPP

Capteur de vibration LAViSta.

## Hier, le LAPP réalisait les premières interconnexions du prototype LHC.

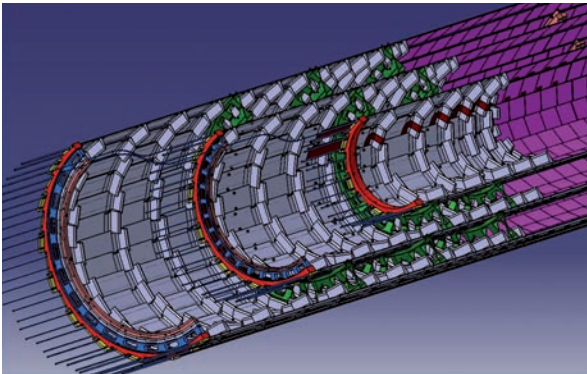


© LHC74 - CERN

Premiers tests de soudure d'interconnexions avec des machines MECASONIC (Haute-Savoie).

## Aujourd'hui, le laboratoire étudie un "modèle alpin" pour un futur détecteur d'ATLAS.

Les programmes R&D d'amélioration des expériences du CERN, ATLAS et LHCb, vont s'étaler sur les dix prochaines années, pour suivre la montée en puissance du LHC et maximiser le potentiel de physique accessible.



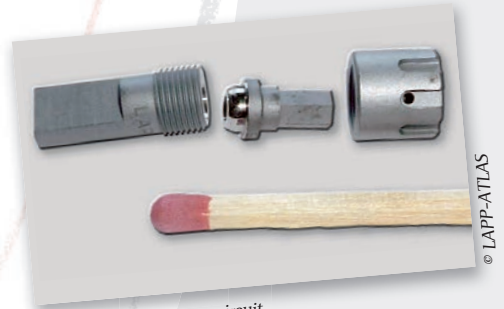
© LAPP - © ATLAS Collaboration

Modélisation d'un futur détecteur de traces.

Des travaux de simulation et de prototypage par des entreprises du bassin annécien (INITIAL, ZAMMA) sont là pour concrétiser ce nouveau "modèle alpin".

## Système de refroidissement CO<sub>2</sub>.

Pour améliorer le refroidissement CO<sub>2</sub> du détecteur interne d'ATLAS, une équipe du LAPP a conçu un raccord ultracompact en titane répondant à des exigences expérimentales sévères en termes d'étanchéité, résistance aux radiations, encombrement, maniabilité, et surtout fiabilité. La production en petite série et la qualification ont été réalisées dans la vallée de l'Arve, par le CETIM-CTDEC et DMD-Eurofluid. Ces raccords sont aujourd'hui installés au cœur d'ATLAS.



Raccord en titane pour circuit de refroidissement CO<sub>2</sub>.

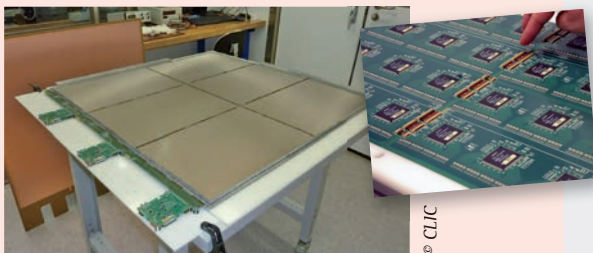
© LAPP-ATLAS

## Une nouvelle génération de détecteurs gazeux

La technologie des accélérateurs apporte une contribution importante à la santé (radiothérapie, imagerie médicale) et au monde industriel (stérilisation, durcissement de semi-conducteurs, modification des propriétés de surface des métaux...). Il en va de même pour les détecteurs de particules qui trouvent beaucoup d'applications en radioprotection, contrôle non destructif, sécurité du territoire. Il en existe une grande variété, tous basés sur des principes physiques différents pour être parfaitement adaptés aux mesures à effectuer (énergie, temps de passage ou position des particules...). Les chambres à fils, inventées par Georges Charpak, sont capables d'enregistrer avec précision la trajectoire des particules en collectant les électrons d'ionisation produits dans le gaz. La résolution spatiale est alors étroitement liée à l'espacement entre les fils qu'il est techniquement difficile de diminuer en dessous de 1 mm. Pour cette raison, le LAPP s'intéresse aujourd'hui aux détecteurs gazeux à microstructures ou MPGD (Micro Pattern Gaseous Detectors) qui sont nés dans les années 90 suite aux développements de la photolithographie.

Une équipe a mis au point une technique de fabrication qui permet d'embarquer une électronique directement sur le détecteur et ainsi de concevoir de futurs calorimètres avec une très grande granularité.

*Six cartes-détecteur prototypes avec leur électronique sur l'envers.*



## Modélisation et calcul scientifique

Les recherches du LAPP posent aussi des défis majeurs dans le développement de la modélisation et du calcul scientifique. Dans le cadre du projet ASTERICS H2020, le LAPP pilote des développements logiciels et des solutions de calcul haute performance pour les expériences de physique des astroparticules, d'astronomie et de cosmologie.



**Grilles LCG et CTACG** Afin de répondre aux besoins de calcul et de stockage des expériences du LHC, la grille LCG (LHC Computing Grid) a été mise en œuvre par la communauté de la physique des particules. Plus d'une centaine de centres de calcul dans le monde participent à cette grille et notamment le LAPP à travers sa plateforme MUST. Le LAPP a aussi su fédérer une dizaine de pays dans le projet de grille de calcul CTACG (CTA Computing Grid) afin de répondre aux besoins de calcul et de stockage de l'expérience CTA dans sa phase préparatoire.

**MUST** La plateforme MUST, méso-centre de calcul et de stockage, a été mise en œuvre par le LAPP et l'Université Savoie Mont Blanc afin de répondre aux besoins de calcul et de stockage des chercheurs, et cela quelles que soient les disciplines scientifiques. Hébergée dans une salle de 180m<sup>2</sup> de la Maison de la Mécatronique, cette plateforme répond à la fois aux besoins de calcul HPC (High Performance Computing) et HTC (High Throughput Computing), en permettant l'exécution de plusieurs milliers de tâches de calcul simultanément, mais aussi aux problématiques des grands volumes de données et de leur gestion.

