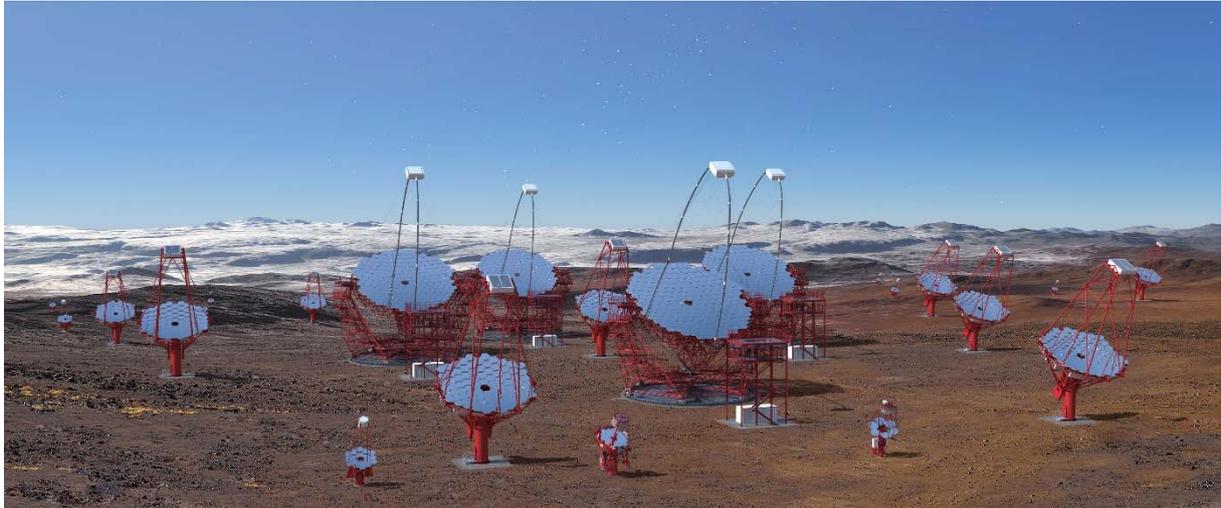


# Rayons Gamma Cosmiques

---

Conseil scientifique de l'IN2P3

2 février 2017



*Préparé par les collaborations HESS-France et CTA-France*

L'astronomie gamma au sol, à travers le développement et l'exploitation de télescopes Tcherenkov, a en France une histoire presque trentenaire, avec des participations significatives dans les expériences de premier plan du domaine, notamment THEMISTOCLE, ASGAT, CELESTE, CAT et aujourd'hui H.E.S.S. Le savoir-faire des équipes françaises est très reconnu dans la communauté, tant au niveau des instruments (en particulier pour les caméras) qu'au niveau des logiciels et méthodes d'analyse. Le succès des télescopes H.E.S.S. en est le témoin incontestable. Aujourd'hui, un projet mondial de nouvelle génération, CTA, est en préparation, avec la participation de nombreuses équipes françaises dont une fraction importante était également impliquée sur H.E.S.S. Après un bref point sur l'expérience H.E.S.S., ce document présente l'état d'avancement du projet CTA à l'IN2P3. Il abordera, à la demande du conseil, les points suivants :

- Point sur l'expérience HESS, durée d'exploitation restante
- Perspectives sur la transition de HESS vers CTA
- Point sur la situation de CTA, engagement IN2P3 dans les prototypes d'instruments et la pré-construction
- Perspectives sur la phase de construction et d'exploitation de CTA

## 1. Introduction

Avec la mise en service des télescopes Tcherenkov H.E.S.S., MAGIC et VERITAS, l'astronomie gamma des très hautes énergies (au-dessus d'environ 100 GeV) a connu au cours de la décennie 2000/2010 une véritable révolution. C'est ainsi que H.E.S.S. permet de détecter la nébuleuse du Crabe, une des sources les plus intenses du ciel, en 30 secondes de pose, là où 20 heures étaient nécessaires avec les premières observations de Whipple en 1989. Les observations ont révélé une richesse insoupçonnée de sources qui témoignent de l'accélération de particules dans des sites aussi divers que les environnements des trous noirs super-massifs, les nébuleuses de pulsars, les restes de supernovæ, les systèmes binaires galactiques, mais également les galaxies à flambée d'étoiles ou les galaxies radio. À ce jour, près de 180 sources au TeV (114 pour la seule expérience H.E.S.S.) ont ainsi été identifiées, dont 71 sources galactiques, 73 sources extragalactiques et 36 sources non identifiées, la plupart de ces dernières étant situées dans le plan galactique. Même si la percée instrumentale est impressionnante, la faiblesse des flux observés permet uniquement l'étude détaillée des objets les plus brillants du ciel. La majeure partie de l'Univers non-thermique échappe toujours à l'observation. Le Cherenkov Telescope Array (CTA) a pour ambition de franchir un nouveau pas, en proposant un observatoire ouvert avec des caractéristiques substantiellement meilleures par rapport aux instruments existants: un gain en sensibilité d'un ordre de grandeur (permettant de détecter une source 1000 fois moins brillante que la nébuleuse du crabe en 50 h d'observation) ; un élargissement du domaine spectral, de quelques dizaines de GeV à une centaine de TeV ; une amélioration de la résolution angulaire, atteignant  $\sim 2$  arcmin ; ainsi qu'un grand champ de vue et une vitesse de pointage améliorée (20 secondes pour les télescopes de grande taille), permettant l'étude des sources transitoires telles que les sursauts gamma. CTA aura un potentiel de découvertes considérable et devrait permettre de décupler le nombre de sources identifiées, ce qui permettra d'aborder des questions scientifiques telles que :

- Où et comment sont accélérées les particules de haute énergie dans notre Galaxie ?
- Dans quelle mesure ces particules façonnent-elles le milieu interstellaire ?
- Qu'est-ce qui fait des trous noirs des accélérateurs de particules ?
- Qu'est-ce que les rayons gamma de haute énergie nous apprennent sur les lois fondamentales de la physique ?

CTA étudiera l'origine des rayons cosmiques et leur impact sur le milieu interstellaire par l'étude des accélérateurs de particules galactiques. Il explorera la nature et la variété de l'accélération de particules autour de trous noirs supermassifs au travers de l'étude de la production et de la propagation des rayons gamma extragalactiques. CTA examinera la nature ultime de la matière et de la physique au-delà du modèle standard en recherchant les signatures de la matière noire et les effets de la gravité quantique.

CTA atteindra ces objectifs en combinant deux sites d'observations dans les hémisphères nord et sud, au sein d'un observatoire unique. Le site sud se situera à Paranal au Chili sur le territoire de l'*European Southern Observatory* (ESO) tandis que le site nord choisi est à Roque de los Muchachos à La Palma, dans les îles Canaries (Espagne). Chaque site sera équipé de plusieurs dizaines de télescopes Tcherenkov fournissant une sensibilité, une résolution angulaire et une couverture du ciel sans précédent dans la bande d'énergie de quelques dizaines de GeV à une centaine de TeV. Cette couverture est rendu possible par l'utilisation de plusieurs type de télescopes : quelques télescopes de grande taille (Large-size telescopes LST ; 23 mètres de diamètre) pour les basses énergies, plusieurs dizaines de télescopes de taille moyenne (Medium-size telescopes MST ; 12 mètres de diamètre) pour les énergies intermédiaires, et plusieurs dizaines de télescopes de petite taille (Small-size telescopes SST ; 4-6 mètres de diamètre) pour les hautes énergies. L'implémentation nominale prévue pour CTA, montrée Figure 1, consiste en 4 LST, 25 MST, 70 SST pour le site Sud et 4 LST, 15 MST pour le site nord.

Les petits télescopes, sensibles aux très hautes énergies, couvrent une surface plus étendue en raison de la faiblesse des flux au-delà de 10TeV, tandis que pour les grands télescopes, sensibles dans le domaine de la dizaine à la centaine de GeV, une petite surface suffit en raison de l'importance des flux.

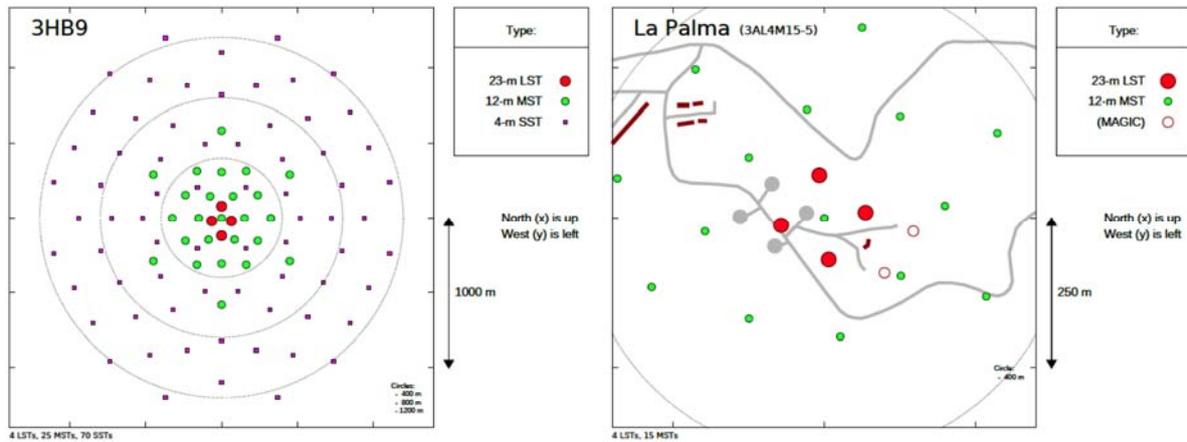


Figure 1 Implémentation des télescopes sur les sites Sud et Nord dans la configuration nominale.

Telescope	LST	MST	SST
Number North Array	4	15	0
Number South Array	4	25	70
Minimum Energy Range (TeV)	0.02-1	0.2-10	5-300
Effective Mirror Area (m <sup>2</sup> )	>330	>88	>3.5
Optical Time Dispersion (ns)	<0.5	<0.8	<1.5
Pixel Angular Size (degrees)	<0.11	<0.18	<0.25
Field of View (degrees)	>4.4	>7.0	>8.0
Readout Rate (kHz)	>7.5	>4.5	>0.3
Time for repositioning (s)	<50	<90	<90

Tableau 1 : Principales spécifications imposées pour la conception des différents types de télescopes de CTA.

CTA effectuera un balayage du plan Galactique avec une sensibilité jamais atteinte. Les observations combinées des deux sites permettront par ailleurs d'effectuer le premier relevé extragalactique (un quart du ciel) en rayons gamma très haute énergie. Ces observations dévoileront la richesse et la variété des accélérateurs cosmiques dans notre Galaxie et au-delà, et permettront de réaliser des études de populations.

CTA sera le premier instrument pour l'astronomie gamma de très hautes énergies qui sera ouvert à toute la communauté scientifique. Une fraction importante du temps d'observation sera distribuée à travers des appels à observations réguliers, et les données ainsi que les logiciels nécessaires pour leur analyse seront mis à disposition des observateurs. Toutes les données deviendront publiques après une période de typiquement un an. Elles seront archivées et rendues également accessibles depuis l'Observatoire Virtuel.

## 2. Point sur l'expérience HESS, durée d'exploitation restante et perspective sur la transition de HESS vers CTA

### Introduction

L'expérience H.E.S.S., inaugurée en 2002, a totalement révolutionné l'astronomie gamma au sol. Ses très nombreuses contributions, attestées par 148 publications à ce jour dans des revues à comité de lecture, dont 6 dans la revue *Science* et 4 dans la revue *Nature*, ont également été récompensées par l'octroi du prix Descartes de la commission européenne en 2006, et par celui du prix Rossi, décerné par l'*American Astronomical Society* en 2010. La bibliographie donnée en annexe à la fin de ce document donne un bref aperçu des sujets abordés. Les résultats emblématiques de H.E.S.S. comportent ainsi la première cartographie des régions centrales de la Galaxie, la première image au TeV d'un reste de supernova en coquille, la première détection d'un système binaire galactique au TeV, la première détection d'une galaxie à flambée d'étoiles au TeV, ainsi que, plus récemment, la première mise en évidence d'un « Pevatron », accélérateur cosmique capable d'accélérer des particules jusqu'au PeV. Sur les 181 sources gamma de très haute énergie référencées par le catalogue TeVCat, plus de la moitié (106) ont été ainsi découvertes par H.E.S.S. Les autres réseaux de troisième génération, MAGIC et VERITAS, n'en ont découvert respectivement que 35 et 21. Cette suprématie de l'expérience H.E.S.S. sur le domaine a tenu tout d'abord au choix d'une localisation optimale, près du tropique du Capricorne, permettant ainsi d'observer les régions centrales de la Galaxie (les plus denses) dans des conditions optimales. La conception du réseau, sa robustesse et la qualité des traitements de données développées au fil du temps ont apporté un gain supplémentaire en sensibilité qui a permis à H.E.S.S. de faire ainsi la différence. Au-delà des études de sources proprement dites, les mesures de H.E.S.S. ont également permis d'apporter des limites contraignantes sur la matière noire ou sur une éventuelle brisure de l'invariance de Lorentz, mais aussi de mesurer pour la première fois la transparence de l'Univers aux rayons gamma au TeV, révélant un fond diffus optique et infrarouge proche des limites inférieures obtenues par comptage de Galaxies.

Les résultats de H.E.S.S. ont ainsi levé le voile sur un Univers inattendu, peuplé d'une variété et d'une quantité d'accélérateurs cosmiques que personne ne soupçonnait il y a 15 ans. Ce faisant, H.E.S.S. a véritablement ouvert la voie au projet CTA, qui en est l'héritier et le prolongement naturel.

### Mise en service HESS-II

Après 10 ans d'exploitation de la première phase, la collaboration a inauguré en septembre 2012 le plus grand télescope d'imagerie Tcherenkov atmosphérique jamais construit, CT5, constitué d'un télescope de 28 m de diamètre et de 35 m de focale. Ce télescope, au seuil de  $\sim 20$  GeV, peut fonctionner soit de façon autonome (observation monoscopique) pour les événements de basse énergie, soit conjointement avec les autres télescopes (mode stéréoscopique-hybride). La mise en service de ce nouveau télescope a révélé des difficultés liées à l'exploitation d'un réseau hybride, et a nécessité un investissement extrêmement important des différentes équipes. D'un point de vue instrumental, tout d'abord, le nouveau télescope, bien qu'extrêmement performant, s'est révélé sensible à des facteurs aussi bien exogènes qu'endogènes : le passage d'une étoile filante dans le champ de vue pouvait ainsi, en multipliant le taux de déclenchement par 100 ou 1000, remplir instantanément les mémoires transitoires (FIFOs) et bloquer l'acquisition. La pression exercée sur les câbles et la connectique dans certaines positions d'observation introduisait également l'apparition d'instabilités. Une campagne de maintenance, fin 2016, a eu pour but de régler ces différents problèmes. Concernant la reconstruction et l'analyse, les principales difficultés résident dans le traitement des événements monoscopiques, enregistrés uniquement par CT5 : l'absence de vision stéréoscopique réduit considérablement (facteur  $\sim 20$ ) les capacités de discrimination entre cascades électromagnétiques et cascades hadroniques tout en réduisant la résolution angulaire. Ceci, combiné

à un taux de déclenchement plus élevé ( $\sim 1.4$  kHz contre environ 300 Hz pour les autres télescopes) fait entrer CT5 dans un régime dominé par les effets systématiques alors que H.E.S.S.-I restait entièrement limité par les fluctuations statistiques. L'ensemble des efforts déployés permet maintenant de contrôler la réponse de l'instrument au niveau de  $\sim 1\%$ , ce qui représente un résultat majeur. Néanmoins, même à ce niveau, du fait d'un rapport signal/fond nettement plus défavorable, la sensibilité de CT5 reste limitée par les fluctuations systématiques du bruit de fond hadronique, ce qui a conduit à une refonte des stratégies d'observation et d'analyse. Témoin du succès de ces efforts, la première publication H.E.S.S.-II a été acceptée en décembre 2016 par la revue *Astronomy & Astrophysics*, tandis de nombreux autres résultats sont en préparation. L'exploitation d'un réseau hybride, initiée par la collaboration H.E.S.S., sera sans aucun doute un défi pour CTA, qui devra combiner un nombre encore plus élevé de types de télescopes.

### Héritage HESS-I :

La collaboration HESS est actuellement impliquée dans un projet majeur de publication de l'héritage HESS-I. Ce projet, qui prendra la forme d'une édition spéciale d'*Astronomy & Astrophysics* courant 2017, comprendra 14 articles originaux, dont une mise à jour majeure de la cartographie des régions centrales de la galaxie à travers un article de plus de 70 pages, comportant pas moins de 78 sources gamma. Ce projet avance de façon satisfaisante, avec 4 articles déjà acceptés, 4 autres soumis et en cours de revue, et les 6 derniers en cours de finalisation. La carte de l'émission gamma des régions centrales de la Galaxie prévue pour cette édition spéciale est montrée en Figure 2.

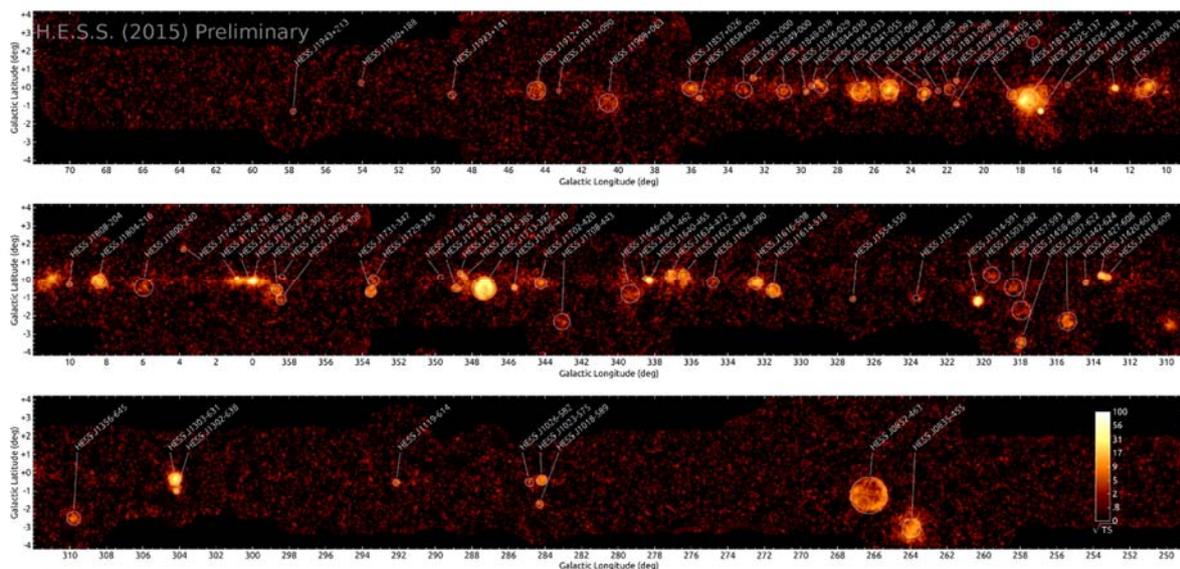


Figure 2 : Cartographie des régions centrales de la Galaxie avec HESS. Héritage HESS-I, Préliminaire.

### Jouvence HESS-I :

La collaboration HESS est actuellement engagée dans une opération de jouvence des caméras de HESS-I. Les buts de cette opération sont :

- Mettre à niveau une électronique conçue il y a environ 15 ans, pour laquelle les composants ne sont plus disponibles sur le marché, rendant la maintenance problématique.

- Optimiser le recouvrement avec CT5, en diminuant le temps mort et le seuil des 4 premières caméras, permettant ainsi de maximiser la fraction d'événements stéréoscopiques pour lesquels les effets systématiques sont sous contrôle.

Cette jouvence comporte deux étapes : d'une part le remplacement complet de l'électronique des caméras de HESS-I par une électronique moderne, développée par le groupe de DESY-Zeuthen, basées sur une transmission IP, et utilisant le chip NECTAr développé pour CTA, et d'autre part le renouvellement des guides de lumière (cônes de Winston), dont la transmission s'est dégradée après 10 ans de service, ce qui permettra d'abaisser d'environ 25 % le seuil en énergie des télescopes. La première partie de cette jouvence est en cours de finalisation : les 4 caméras ont été mises à niveau, sont calibrées, et entrent actuellement dans le programme d'observation. En ce sens, HESS sert actuellement de prototype au projet NectarCAM. Le second volet du projet (remplacement des guides de lumière) sera effectif au mois de février 2017, permettant un fonctionnement optimal du projet pendant les dernières années d'observation.

#### **Collaboration :**

Après une phase de croissance importante au cours des années 2000, les effectifs de la collaboration HESS se sont maintenant stabilisés au niveau de ~ 260 physiciens appartenant à 40 institutions scientifiques de 13 pays différents (Namibie, Afrique du Sud, Allemagne, France, Royaume-Uni, Irlande, Autriche, Pays-Bas, Pologne, Suède, Arménie, Japon et Australie), le dernier pays à avoir rejoint la collaboration étant le Japon. Pour la première fois depuis sa création, le consortium est depuis janvier 2016 dirigé par un Français, M. de Naurois (LLR, IN2P3).

#### **Implication de l'IN2P3:**

La collaboration Française représente une part très importante de l'investissement dans HESS, de l'ordre de 40 %. 10 laboratoires sont impliqués, dont 7 de l'IN2P3 (APC, CENBG, CPPM, LAPP, LLR, LPNHE, LUPM) pour un total d'environ 30 équivalents temps plein (ETP), laboratoires auxquels il faut ajouter deux laboratoires de l'INSU (IPAG et LUTH) et un du CEA (IRFU). Les équipes françaises ont notamment conçu et réalisé intégralement les 5 caméras de HESS, ainsi que le système de chargement/déchargement de la caméra de CT5. Elles contribuent également à l'effort de simulation, d'étalonnage, de reconstruction et d'analyse à travers des contributions originales et reconnues. Elles participent pleinement à l'exploitation scientifique sur des thématiques aussi diverses que : noyaux actifs de galaxies, pulsars, systèmes binaires galactiques, restes de supernova, recherche de matière noire, mesure du fond diffus optique et infra-rouge et recherche de brisure d'invariance de Lorentz.

#### **Calendrier des opérations sur site :**

Aucune date de fin d'exploitation pour HESS n'est actuellement fermement décidée. Plusieurs éléments sont néanmoins en cours de discussion :

- Le financement des groupes allemands est garanti jusque fin 2017, avec une demande de prolongement en cours d'instruction. Plusieurs institutions allemandes, dont la société Max Planck, ont affirmé leur volonté de soutenir HESS jusque fin 2019 et de se consacrer ensuite totalement à CTA.
- Le contrat de location du site expire en avril 2020. En cas de prolongation de l'exploitation au-delà, ce contrat devra être renouvelé, ce qui nécessite une autorisation du gouvernement Namibien. Le contrat de support avec le propriétaire du site devra être renouvelé au même moment.

- Enfin, les besoins en ressources humaines vont être de plus en plus difficiles à assurer à mesure du déploiement de CTA. La compétition pour les ressources, déjà effective, se renforcera au moment du démarrage de l'exploitation de CTA.
- La partie sud-africaine du consortium a exprimé le souhait de continuer à opérer HESS au-delà du démarrage de CTA. Ce souhait reste évidemment conditionné à l'obtention de ressources financières et humaines suffisantes, non garanties à l'heure actuelle, et à l'obtention des autorisations nécessaires.

L'ensemble des éléments ci-dessus concourent à une exploitation de l'instrument jusqu'à la fin de l'année 2019, suivie d'une transition « douce » avec CTA. En cas de retard dans la construction de CTA, une extension devra être envisagée, surtout dans le cas d'une poursuite de l'exploitation de *Fermi-LAT*, afin de garantir une continuité des observations gamma, cruciale pour les phénomènes transitoires. La question du démantèlement n'a pas été formellement abordée par les différentes agences de financement. Un premier devis, réalisé il y a deux ans, indiquait un coût résiduel de démantèlement modeste, de l'ordre de 40 000 €, car couvert en grande partie par le recyclage des matériaux de construction et en particulier de l'acier. Cette estimation dépendra de l'évolution du coût des matières premières. L'exploitation scientifique se poursuivra encore pendant quelques années après la fin des prises de données, afin de publier l'ensemble des résultats. Un soutien financier, notamment pour les réunions de collaboration, restera nécessaire pendant cette période.

### Perspectives de migration de Hess vers CTA

Le Tableau 2 montre qu'il existe un très fort recouvrement entre les chercheurs impliqués sur Hess et les chercheurs impliqués sur CTA. En ce qui concerne les permanents, le taux de recouvrement est même proche de 100%. On assistera donc vraisemblablement à une transition graduelle d'un projet vers l'autre entre ce jour et les années 2020.

Laboratoire	chercheurs sur HESS	chercheurs sur CTA		ETP chercheurs en 2016 sur CTA
		signataire de HESS	non signataire de HESS	
APC	10	7	3	2,6
CENBG	3	2	2	1,5
CPPM	3	3	1	2,75
IPNO	0	0	4	2,8
LAPP	8	7	1	4,6
LLR	9	5	1	1,8
LPNHE	8	5	0	1,4
LUPM	9	8	1	2,05
Total	50	37	13	19,5

Tableau 2 : Recouvrement entre les chercheurs de l'IN2P3 impliqués sur HESS et les chercheurs de l'IN2P3 impliqués sur CTA en 2016. (Chercheurs = permanents+ post-doctorants+ doctorants). Le taux de recouvrement est supérieur à 70%, et il est même supérieur à 90% si on ne considère que les chercheurs permanents. En 2016 l'implication moyenne des chercheurs de l'IN2P3 sur CTA était de 0,4 ETP/chercheur.

## 3. Point sur la situation de CTA

### Introduction et science

CTA est l'un des projets prioritaires dans la feuille de route ESFRI (*European Strategy Forum on Research Infrastructures*) depuis 2008, ainsi que les feuilles de route des coordinations européennes en Astrophysique (ASTRONET) et de l'Astroparticule (ASPERA, APPEC). CTA a également été classé comme un projet prioritaire dans la feuille de route d'Astronomie-Astrophysique aux États-Unis (*Decadal Survey 2010*). Les performances des deux sites de CTA en configuration nominale sont données de manière indicative en Figure 3.

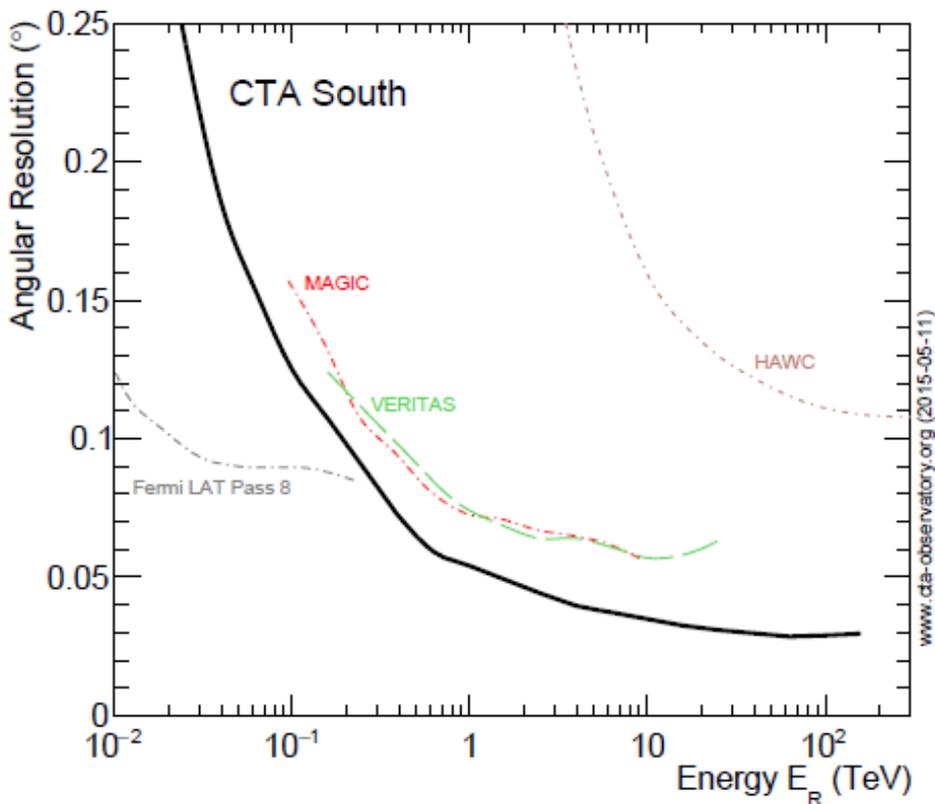
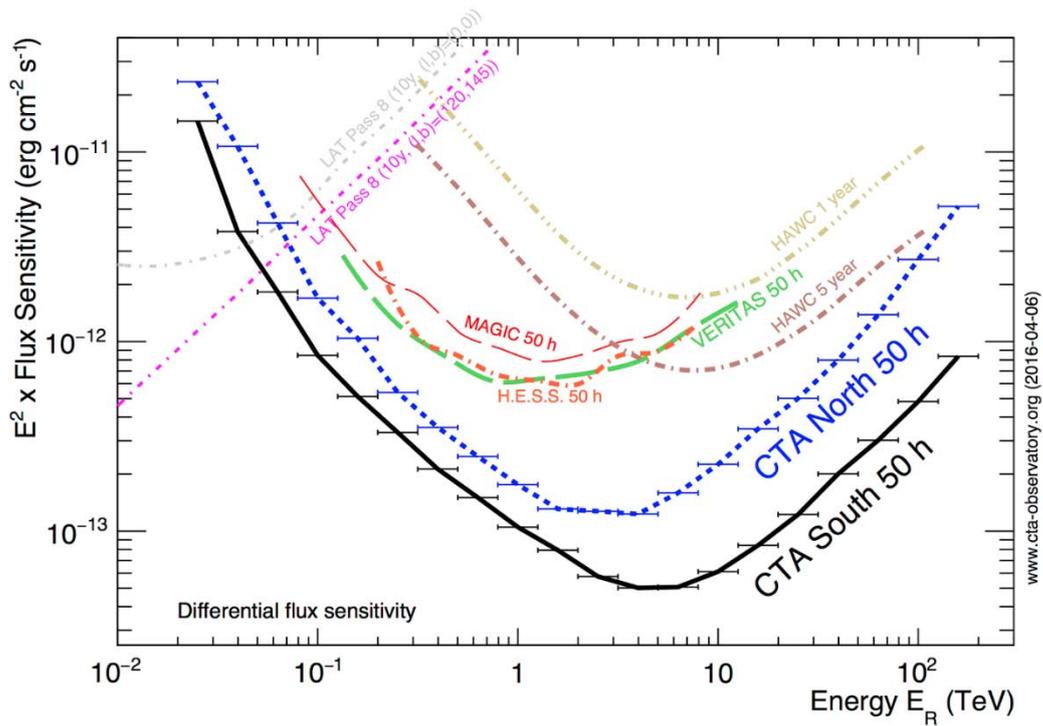


Figure 3 : Performances comparées de CTA et des autres expériences gamma existantes. En haut : sensibilité du réseau nominal à une source ponctuelle (5 déviations standard par bin en énergie). En bas : Résolution angulaire du réseau sud (rayon à 80% de confinement), celle du réseau nord étant comparable en configuration nominale.

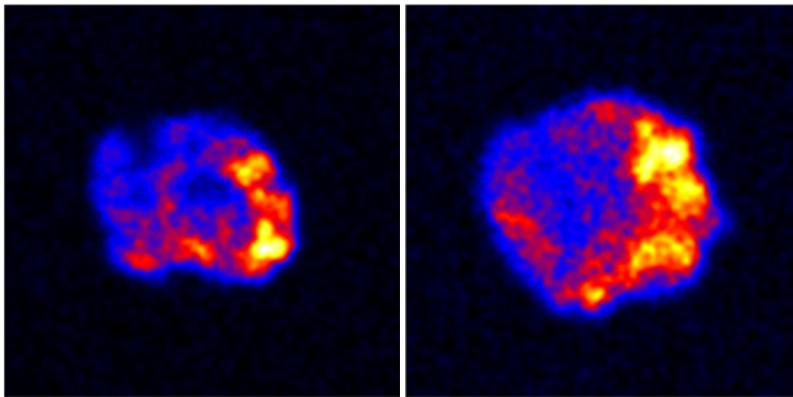
CTA transformera notre compréhension de l'Univers à hautes énergies et explorera des domaines de la physique d'importance fondamentale. Ce membre clé des observatoires astroparticules émergents

exploitera les synergies avec les ondes gravitationnelles, les observatoires neutrino et de rayons cosmiques, ainsi que les observatoires plus classiques des bandes électromagnétiques. CTA adressera une vaste gamme de problématiques portant sur l'astrophysique et au-delà, qui peuvent être regroupés en trois thèmes généraux.

### *Thème 1 : Comprendre l'origine et le rôle des rayons cosmiques relativistes*

- Quels sont les sites d'accélération de particules dans l'Univers ?
- Quels sont les mécanismes d'accélération de particules ?
- Quel rôle rétroactif jouent ces particules dans la formation d'étoiles et l'évolution des galaxies ?

Un des objets clé inclus dans le programme proposé par le consortium est le jeune et lumineux reste de supernova RXJ 1713-3946 (voir Figure 4). Le mécanisme d'émission prépondérant reste indéterminé par les observations actuelles, mais CTA pourra lever l'ambiguïté existant entre une émission dominée par des électrons ou des protons. CTA pourra en effet résoudre les sous-structures au sein du reste aux échelles pertinentes pour les processus d'accélération. Cet exemple illustre l'importance des observations jointes des MST et SST, permettant d'atteindre une résolution angulaire de quelques arcminutes.



*Figure 4 : Images simulées du jeune reste de supernova RX J1713-3946 pour deux scénarios d'émission (leptonique à gauche, hadronique à droite), montrant le pouvoir de discrimination de CTA entre ces deux hypothèses.*

### *Thème 2 : Sonder les environnements extrêmes*

- Quels sont processus physiques mis en jeu au voisinage des trous noirs et étoiles à neutrons ?
- Quelles sont les caractéristiques des jets relativistes, des vents et des explosions astrophysiques ?
- Quelle est l'intensité des champs radiatifs et magnétiques dans les vides cosmiques, et comment évoluent-ils avec l'âge de l'Univers ?

Le voisinage des trous noirs supermassifs qu'abritent les noyaux actifs de galaxies illustre ce champ d'exploration. L'accélération de particules pourrait survenir extrêmement près du trou noir, en particulier pour expliquer des temps de variabilité aussi courts que ceux indiqués en Figure 5, et se poursuivre jusqu'à des échelles de l'ordre du Mpc, où les jets s'épuisent parfois en lobes terminaux. Les noyaux actifs de galaxies sont vus comme l'un des sites privilégiés d'accélération au-delà de l'EeV, mais jusqu'ici il n'a pas été possible de trouver de preuve formelle des signatures hadroniques attendues des rayons cosmiques d'ultra haute énergie. L'étude des spectres et de la variabilité de ces objets, particulièrement impactée par les observations jointes des LST et MST, constituera un des axes majeurs du programme scientifique du consortium.

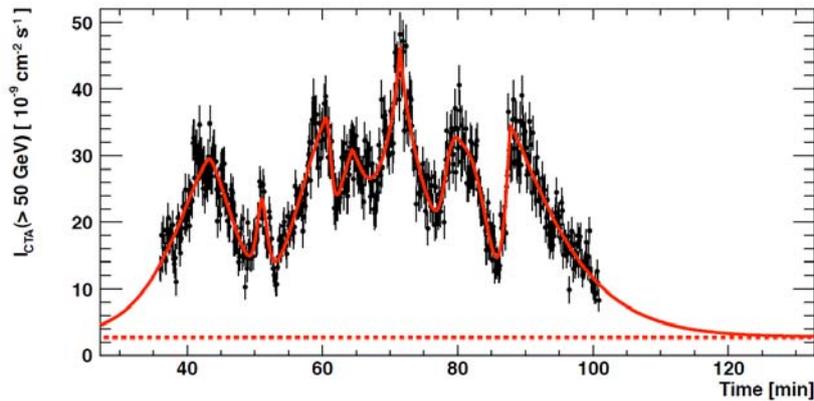


Figure 5 : Sonder les variations ultra-rapides des jets de galaxies actives : courbe de lumière de l'éruption de PKS 2155-304 observée en 2006 simulée pour CTA. De telles observations donnent accès à des échelles spatiales bien plus faibles que le rayon de Schwarzschild du trou noir.

### Thème 3 : Explorer les frontières de la physique

- Quelle est la nature de la matière noire ? Comment se distribue-t-elle dans la Galaxie et l'Univers proche ?
- La propagation des photons est-elle affectée par des effets de gravité quantique ?
- Est-ce que les particules de type axionique existent ?

Un espace considérable de découvertes en physique fondamentale est à la portée de CTA. Le long voyage des rayons gamma en provenance de sources extragalactiques, combiné à leur courte longueur d'onde, en fait une sonde privilégiée des fluctuations de métrique attendues dans certains scénarios de gravité quantique. CTA sondera ces phénomènes à une échelle caractéristique idéale : celle de Planck. Tout au long de leur voyage, les rayons gamma pourraient se coupler à d'autres particules légères en présence d'un champ magnétique : les particules de type axioniques, cousines des axions de QCD. Un peu comme pour les neutrinos, ces oscillations photons-axions pourraient induire des modulations spectrales et rendre l'Univers plus transparent que dans le cas classique. Chacun de ces effets pourrait constituer une découverte majeure, la nature de la matière noire n'étant pas des moindres. CTA atteindra la section efficace relique pour l'annihilation de particules massives faiblement couplées, comme indiqué en Figure 6. La complémentarité en énergie des télescopes de toutes tailles est ici la clé de voûte d'une recherche à bande large. Si les signatures de ces particules n'apparaissent pas dans les expériences de détection directe ou au LHC, les observations gamma constitueront le seul moyen de les chercher au cours de la prochaine décennie.

Les cas scientifiques et simulations discutés ci-dessus sont tirés du document Science with CTA, actuellement en revue interne à la collaboration. Cet article majeur de plus de 200 pages a vu de nombreuses contributions françaises, sept des dix programmes clés du consortium incluant au moins un éditeur tricolore (cinq éditeurs en moyenne par programme). Comme pour H.E.S.S., la communauté gamma française, à l'IN2P3 comme au sein des autres instituts, possède une forte visibilité sur les thématiques Galactiques, extragalactiques et de physique fondamentale.

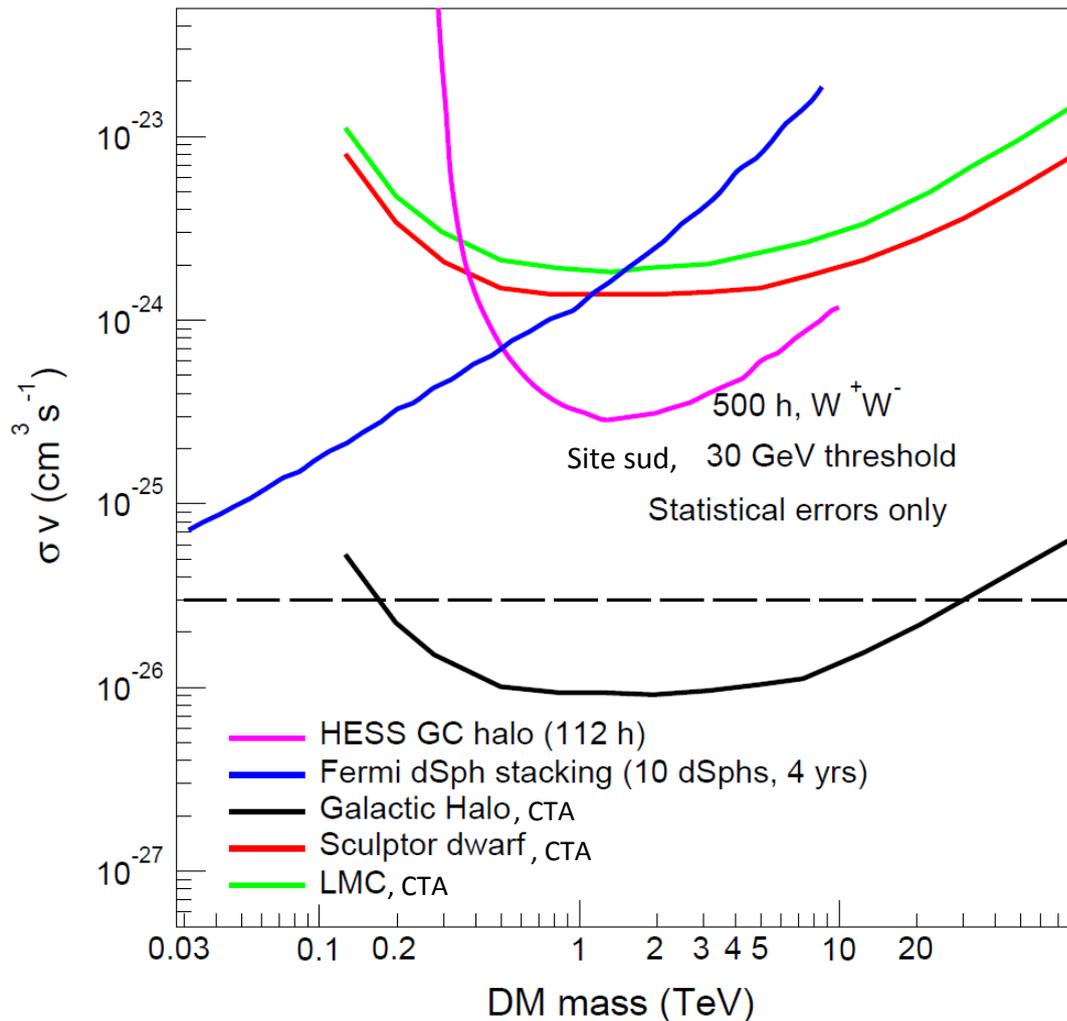


Figure 6 : Sensibilité de CTA à l'annihilation de particules massives faiblement couplées en fonction de leur masse (courbe noire pour le halo Galactique). La ligne horizontale en pointillés indique une valeur probable de la section efficace, correspondant à un reliquat thermique du big-bang.

### Collaboration

CTA sera une infrastructure à participation mondiale (Europe, Japon, Brésil, Inde, et éventuellement États-Unis), à forte composante européenne. CTA est développé par un consortium international impliquant aujourd'hui environ 1350 chercheurs et personnels techniques (correspondant à un peu plus de 450 ETP), appartenant à 210 laboratoires et 32 pays, avec comme principaux partenaires internationaux **l'Allemagne, la France, l'Italie, l'Espagne et le Japon**. Les autres pays membres du consortium CTA sont : l'Afrique du Sud, l'Argentine, l'Arménie, l'Australie, l'Autriche, le Brésil, la Bulgarie, le Canada, le Chili, la Croatie, les États Unis, la Finlande, la Grèce, l'Inde, l'Irlande, le Mexique, la Namibie, la Norvège, les Pays Bas, la Pologne, la République Tchèque, le Royaume Uni, la Slovénie, la Suède, la Suisse et l'Ukraine. La contribution de chaque pays, en ETP, est illustrée en Figure 7

Le projet a été lancé en 2007 par une série de réunions internationales, aboutissant à une phase préparatoire, financée par la Commission Européenne dans le cadre de son programme FP7 (octobre 2010 – août 2014 ; budget 5 M€). Le financement FP7 a essentiellement servi à structurer le projet, en le dotant d'un Project Office situé à Heidelberg (Allemagne), et à accompagner les travaux de prototypage nécessaire pour démontrer la faisabilité du projet. Les travaux de prototypage proprement dit sont financés sur des fonds des laboratoires membres du consortium.

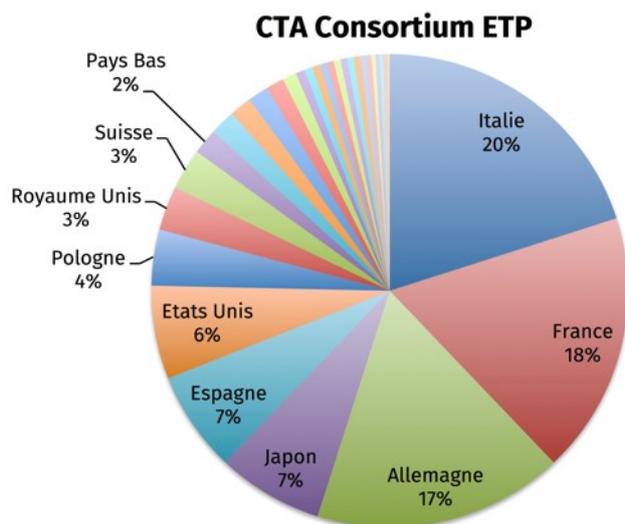


Figure 7 : Contribution relative en main d'œuvre (ETP) de chaque pays à la construction de CTA pour l'année 2016.

Avec la signature de la Déclaration d'Intérêt le 28 novembre 2012, le projet est entré dans la phase de pré-construction, phase qui est toujours en cours. La Déclaration d'Intérêt prévoyait trois revues : une *Science Performance and Preliminary Requirements Review*, qui a eu lieu en Q1-2013 ; une *Preliminary Design Review*, qui a eu lieu en Q4-2013 ; et une *Critical Design Review*, qui a eu lieu en Q2-2015. Cette dernière revue a permis entre autres de consolider et de valider le coût total de construction de CTA, qui est estimé à 295.3 M€, hors marges et main d'oeuvre, et 1469 hommes × années, soit un coût total (« consolidé ») de **398.2 M€**. Celui-ci est détaillé dans le *CTA Cost Book*.

Le coût annuel de fonctionnement de l'observatoire CTA (CTAO) est à ce jour estimé à **16 M€/an**. Le *CTA Cost Book* sera mis à jour en 2017 afin de coller au plus près à la réalité, à la lumière des plus récents développements des prototypes.

## Gouvernance

Une structure légale intérimaire de gouvernance de droit allemand (CTAO gGmbH) a été établie en juillet 2014, siégeant à Heidelberg (Allemagne), pour soutenir les activités du *Project Office* pendant la phase de pré-construction et notamment pour mener les négociations sur les sites. La structure finale de gouvernance (ERIC, autre gGmbH) sera définie fin 2017, après la mise en place des financements et la signature des accords internationaux. C'est le Conseil de cette gGmbH, formé de représentants des principaux pays actionnaires, qui remplace depuis 2016 le *Resource Board* comme organe de gouvernance du projet. L'Allemagne, l'Italie et la Suisse ont été les premiers actionnaires de la gGmbH intérimaire, rejoints récemment par l'Autriche, l'Espagne, le Japon, la République Tchèque et le Royaume Uni. La France est membre de la gGmbH depuis le printemps 2016, via l'adhésion du CNRS et du CEA qui en détiennent chacun une part (25 000€). Les organes de gouvernance de CTA sont composés du Conseil de la CTAO gGmbH et du *CTA Consortium Board*, réunissant les représentants des laboratoires du consortium. La France est représentée au Conseil de la gGmbH par deux personnes, l'une issue du CEA et l'autre du CNRS. La Figure 8 illustre l'organigramme de gouvernance du projet et le domaine de compétences respectives de la CTAO gGmbH et du consortium CTA. La contribution annuelle du CNRS au budget de la gGmbH est de 100 k€, dont 50 k€ de l'IN2P3 et 50 k€ de l'INSU.

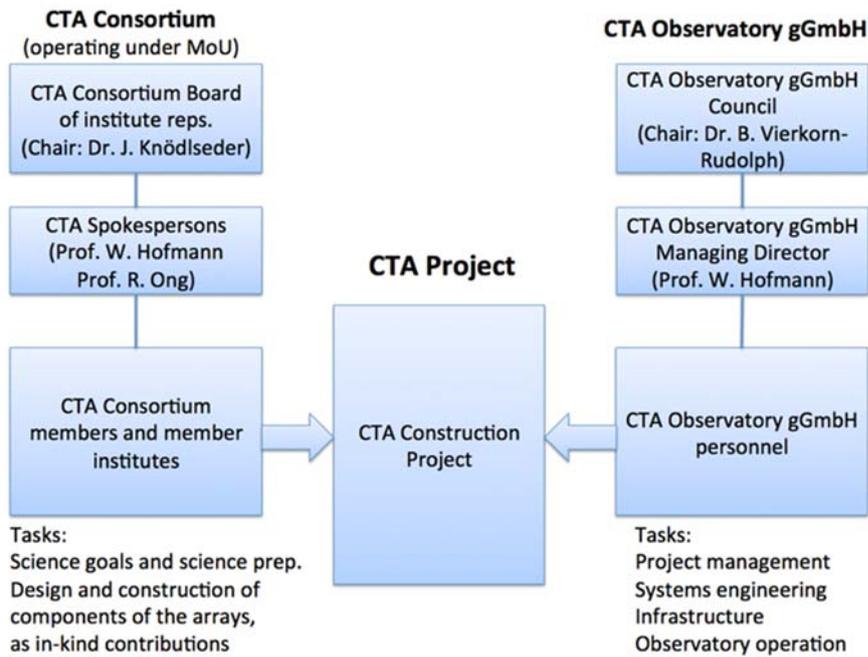


Figure 8 : Organigramme de gouvernance du projet (état : été 2015). A ce jour (décembre 2016), le chair du Conseil de la gGMBH est désormais Giampaolo Vettolani (vice chair Beatrix Vierkorn-Rudolph) et Ulrich Straumann a remplacé W.Hofmann comme managing director de l'observatoire.

## Sites

Après le choix des sites par le *Ressource Board* en 2015, le contrat d'accueil entre l'institut d'astrophysique des Canaries (IAC), gestionnaire du site espagnol, et CTA, a été signé le 19 septembre 2016 pour le site nord. À l'heure de la rédaction de ce document, le texte du contrat d'accueil pour le site sud avait été finalisé et sa signature était attendue après le conseil de l'ESO, fin 2016. L'état actuel des deux sites est présenté en Figure 9 (site nord) et la Figure 10 (site sud). Si de nombreuses infrastructures sont déjà présentes sur le site Nord, tout reste à construire (routes, électricité, etc.) pour aménager le site Sud.



Figure 9 Vue panoramique du site Nord de CTA prise en 2016. On distingue les deux télescopes de MAGIC au premier plan.



Figure 10 Vue panoramique du site Sud de CTA

En juin 2016, le Conseil de CTAO a d'autre part sélectionné Bologne comme quartier général de CTA, tandis que le centre de gestion des données scientifiques est attribué à DESY Zeuthen. Le quartier général, jusqu'alors implanté à Heidelberg, devrait déménager début 2017 à Bologne. Il sera en charge de la gestion et de l'administration du projet, de la coordination et du support technique, et fournira le support administratif aux responsables et utilisateurs de l'observatoire. Le centre de gestion des données scientifiques sera en charge du contrôle et de l'administration des transferts de données depuis les sites, du traitement et de l'archivage des données dans les centres de données CTA pour en garantir la qualité, la disponibilité et l'accès sécurisé. Il sera également en charge de la dissémination de ces données vers les observateurs, du support utilisateur et de la maintenance des logiciels.

### Financement et seuil d'implémentation

Fin 2015, le second appel pour les expressions d'intérêt (EoI) a eu lieu en vue de la construction de CTA. Cet appel était destiné à inventorier les contributions en espèces et en nature promises par chaque pays. Après négociations entre les laboratoires français participant, leurs instances dirigeantes et le comité de pilotage de CTA France (COFIL), les laboratoires français ont exprimé leur intention de contribuer à la construction de CTA à hauteur de 41.2 M€, somme normalisée aux estimations du *Cost Book*, dont 26.2 M€ en équipement et 15 M€ de fonds communs et de contribution en espèces. En y ajoutant les 277 ETP des personnels engagés dans la construction de CTA, avec un coût moyen de 70 k€/ETP, le coût consolidé de la contribution française est évalué à **60.6 M€**, à comparer au coût consolidé total du projet estimé à **398.2M€**.

La compilation des EoI de l'ensemble des partenaires, ramenée aux estimations de coûts et de main d'oeuvre du *CTA Cost Book*, a fait apparaître les promesses de contributions suivantes

- 212 M€ (soit 72% du coût total du projet, estimé à 295 M€)
- 1060 ETP (soit 71% des 1484 ETP nécessaires pour la construction)

À ce jour, un peu plus de 70% du financement nécessaire à la construction du projet nominal pourra être réuni, soit en coût consolidé **286 M€** sur 398.2 M€. Les promesses de financement pour les petits télescopes sont trop importantes (84 télescopes promis pour 70 dans la configuration nominale), tandis qu'il y a un déficit au niveau des télescopes de taille moyenne avec seulement 15 structures MST pour 31 caméras de deux types (40 dans la configuration nominale). Les promesses de financement pour les grands télescopes correspondent par contre approximativement à ce qui est nécessaire (7 LST + un LST de pré-production).

Le Conseil de CTAO a décidé de commencer la construction de CTA à partir d'un seuil d'implémentation qui assure des avancées scientifiques significatives par rapport aux instruments existants. Ce seuil a été défini à **250 M€** (coût consolidé) et est donc atteint. L'optimisation de la configuration seuil a été réalisée courant 2016, en focalisant le site nord sur les basses et moyennes énergies et le site sud sur les moyennes et hautes énergies. Ces études ont abouti aux recommandations du Tableau 3. Les

courbes de sensibilité relative correspondantes, en fonction de l'énergie, et les thèmes de recherche correspondants sont montrées Figure 11.

		CTA Baseline (€400M)	CTA Implementation Threshold (€250M)
Northern Array	Number of LSTs	4	4
	Number of MSTs	15	5
Southern Array	Number of LSTs	4	0
	Number of MSTs	25	15
	Number of SSTs	70	50

Tableau 3 : Nombre de télescopes sur chaque site préconisé pour une implémentation au seuil correspondant à un coût consolidé de 250M€, comparé à l'implémentation nominale.

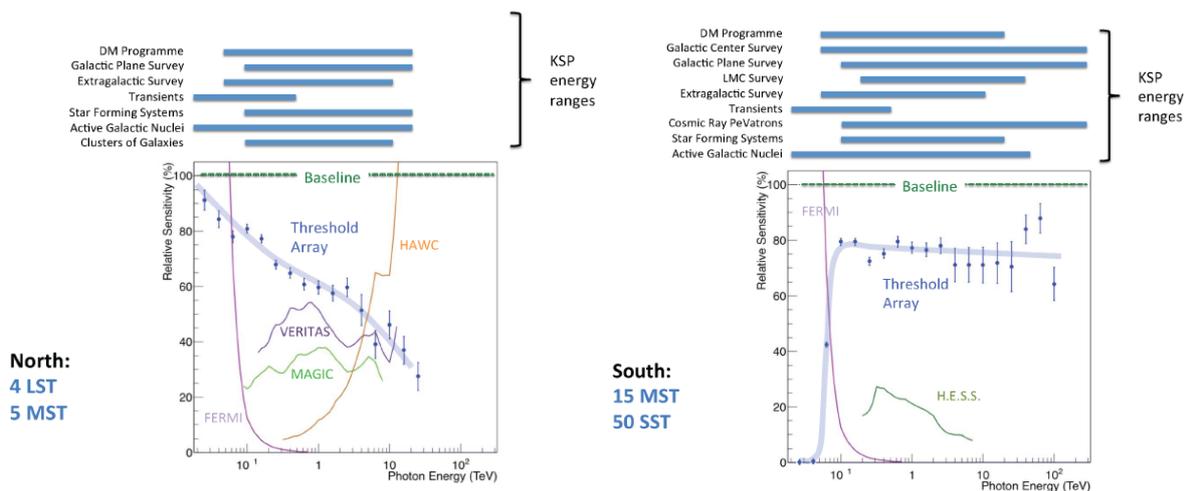


Figure 11 Sensibilité relative des réseaux nord (figure de gauche) et sud (figure de droite) dans la configuration seuil par rapport à la configuration nominale, en fonction de l'énergie des photons détectés. Dans la configuration seuil, le réseau nord est optimisé pour la détection des basses énergies (~80% de la sensibilité nominale en dessous de 200GeV) et le réseau sud pour celle des hautes énergies (~80% de la sensibilité nominale de 100GeV à 100 TeV).

Il reste cependant à négocier avec les différents instituts partenaires comment redéployer les contributions pour aboutir au scénario souhaité. Tout financement supplémentaire au-delà des **250 M€** sera utilisé pour compléter CTA. Une évolution graduelle du seuil d'implémentation vers la configuration nominale est prévue, avec prioritairement l'ajout de 4 à 5 MST sur le site nord et d'au moins 2 LST sur le site sud. Il est prévu que les contributions en espèce et en nature des différents pays et instituts soient finalisées à travers la rédaction d'un *Memorandum of Understanding*, puis par la signature d'une convention internationale au troisième trimestre 2017. Le *Cost Book* sera révisé courant 2017 pour coller au mieux aux coûts réels résultant des dernières évolutions du projet.

### Calendrier et état d'avancement du projet

La Figure 12 montre un diagramme simplifié du schéma d'implémentation de l'observatoire. La phase de design et de pré-construction est en passe de s'achever. Elle a vu la construction et les tests de prototypes, la validation des principaux concepts techniques et la rédaction des *Technical Design*

Reports, qui ont été soumis à la *Critical design Review* en 2015. S'il n'existe qu'un seul concept pour les télescopes de grande taille et pour la mécanique des télescopes de taille moyenne, deux types de caméras ont été retenus pour les télescopes de taille moyenne (FlashCam et NectarCAM, voir section 4.b), et il existe également trois modèles différents de petits télescopes, à un seul miroir (SST-1M) ou à deux miroirs (ASTRI et GCT).

La phase de préproduction verra la construction et le déploiement d'environ 10% des télescopes (soit le LST1, deux ou trois MST équipés de FlashCam et de NectarCAM, et quelques petits télescopes de chaque type). À ce jour, seule la construction du LST1 a commencé, sur le site des Canaries. Elle devrait s'achever fin 2017 ou début 2018. Cette phase doit permettre de vérifier les schémas de production, de tester les télescopes en conditions réelles et de détecter les défauts éventuels à corriger avant la production de masse.

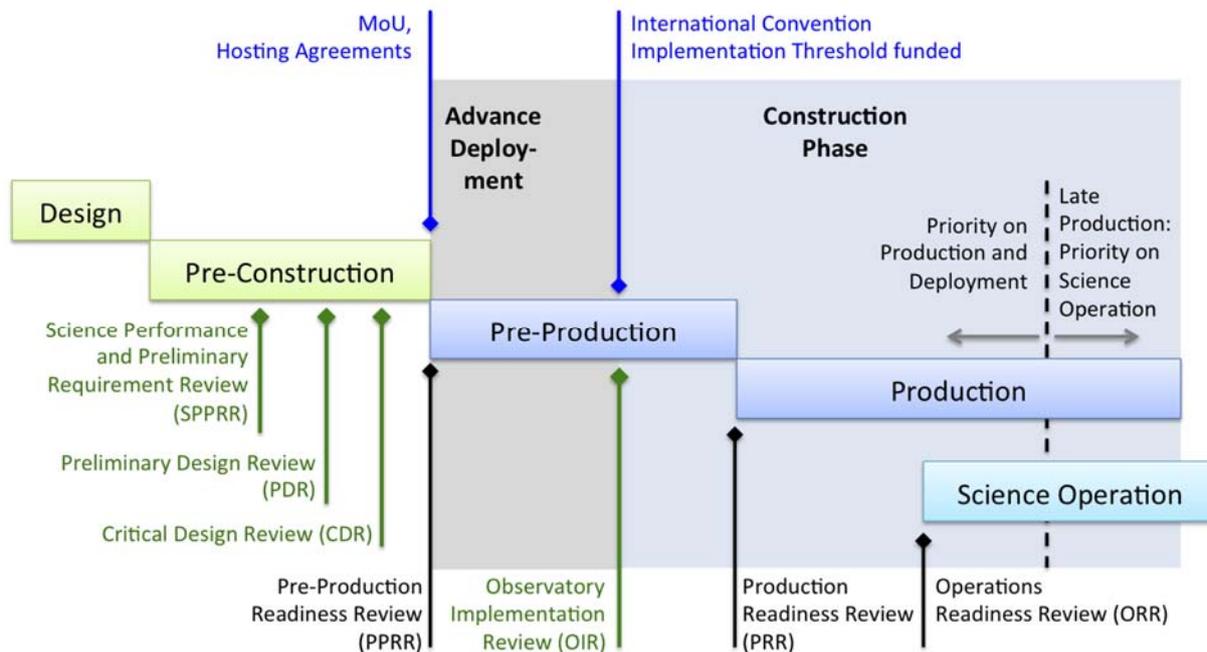


Figure 12 : schéma d'implémentation de CTA et revues associées.

## 4. Engagement IN2P3 dans les prototypes d'instruments et la préconstruction

### a. Présentation générale

Huit laboratoires de l'IN2P3 participent actuellement au développement de CTA : l'APC, le CENBG, le CPPM, le LAPP, le LLR, le LPNHE, le LUPM, et l'IPNO. En outre, quatre laboratoires de l'INSU et quatre services du CEA/IRFU sont également membres de CTA. Pour l'INSU, il s'agit du GEPI, de l'IPAG, de l'IRAP, et du LUTH (avec l'aide de la DT), pour l'IRFU, il s'agit du SAP, du SPP, du Sedi et du SIS. Les équipes IN2P3 de CTA comptent à ce jour environ **114 personnes** correspondant à **49 scientifiques** (permanents, post-doctorants et doctorants) **et 65 ingénieurs et techniciens**, pour un total de **46,5 etp**. La participation française est détaillée dans le Tableau 4, tandis que la répartition des ressources humaines entre IN2P3, INSU et CEA est illustrée par la Figure 13. La participation de l'IN2P3 représente 55 à 60% de la contribution française à CTA, selon que l'on compte en nombre de personnes ou en ETP. La participation française à CTA représente environ 17% des moyens humains du consortium CTA, évalués en ETP. A titre de comparaison, l'Italie représente 20% des ETP, l'Allemagne 18%, l'Espagne

8%, le Japon 7%, les USA 6%, la Pologne 4%, la Suisse et le Royaume uni un peu moins de 3% chacun et l'ensemble des autres pays un peu moins de 15%.

labo	chercheurs, postdocs et doctorants	Ingénieurs et Techniciens	Total	ETP chercheurs, postdocs et doctorants	ETP Ingénieurs et Techniciens	ETP Totales
APC/IN2P3	10	9	19	2,6	1,75	4,35
CEA/IRFU/Sap	13	1	14	4,1	0,1	4,2
CEA/IRFU/SEDI	0	14	14	0	5,4	5,4
CEA/IRFU/SIS	2	4	6	0,55	0,85	1,4
CEA/IRFU/SPP	6	0	6	3,5	0	3,5
CENBG/IN2P3	4	0	4	1,5	0	1,5
CPPM/IN2P3	4	3	7	2,75	1,9	4,65
IPAG /INSU	3	3	6	0,5	0,8	1,3
IPNO	4	6	10	2,8	1,38	4,18
IRAP/INSU	6	4	10	2,6	2,1	4,7
LAPP/IN2P3	7	18	25	4,6	10,4	15
LLR/IN2P3	6	14	20	1,8	3,25	5,05
LPNHE/IN2P3	5	10	15	1,4	4,38	5,78
LUPM/IN2P3	9	5	14	2,05	3,9	5,95
Observatoire de Paris/INSU	13	22	35	3,85	7	10,85
<b>Total général</b>	<b>92</b>	<b>113</b>	<b>205</b>	<b>34,6</b>	<b>43,21</b>	<b>77,81</b>
<b>in2p3</b>	<b>49</b>	<b>65</b>	<b>114</b>	<b>19,5</b>	<b>26,96</b>	<b>46,46</b>
<b>CEA</b>	<b>21</b>	<b>19</b>	<b>40</b>	<b>8,15</b>	<b>6,35</b>	<b>14,5</b>
<b>INSU+Obs Paris</b>	<b>22</b>	<b>29</b>	<b>51</b>	<b>6,95</b>	<b>9,9</b>	<b>16,85</b>

Tableau 4 : Chercheurs et ingénieurs impliqués dans CTA dans les laboratoires Français de l'IN2P3, du CEA et de l'INSU, en nombre de personnes (à gauche) et en ETP (à droite), en novembre 2016.

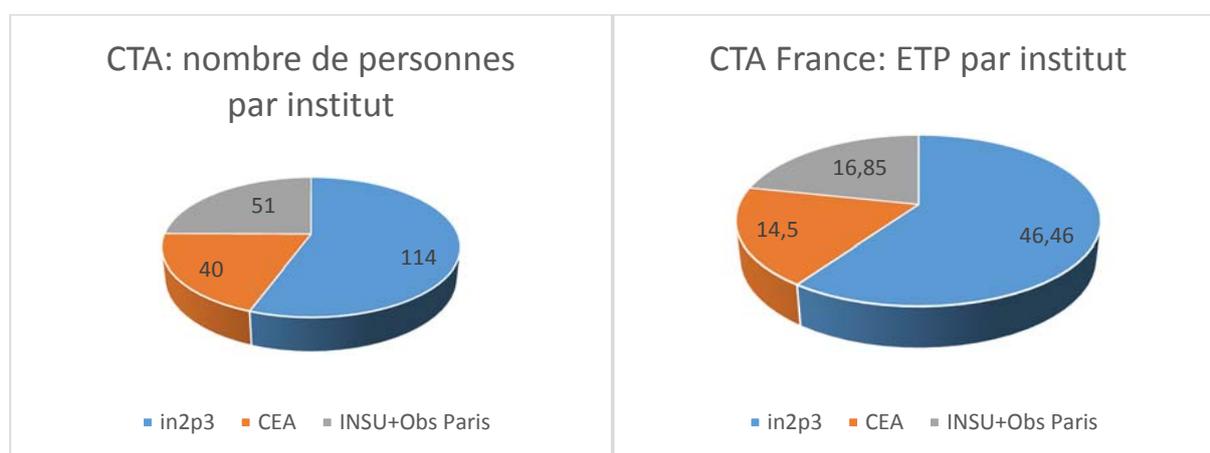


Figure 13 : Répartition des forces impliquées sur CTA en France entre l'IN2P3 (bleu), le CEA (rouge), l'INSU et l'observatoire de Paris (gris).

### Projets auxquels participe l'IN2P3

- La caméra NectarCAM, destinée à équiper une partie des MST, est un projet qui réunit la quasi-totalité des laboratoires français impliqués dans CTA dont 7 des 8 laboratoires de l'IN2P3. Fort de l'expérience acquise lors de la réalisation des caméras de H.E.S.S. et H.E.S.S. II, plusieurs laboratoires français ont initié en 2009 le projet NECTAR dont le but a été le développement d'un ASIC à mémoire analogique et qui a conduit à la construction d'un module de démonstration pour une caméra NectarCAM. Le projet NectarCAM est intégré à la structure de répartition du travail (WBS) du groupe MST de CTA. La responsabilité globale du MST incombe à Stefan Schlenstedt (DESY/Zeuthen) et l'activité NectarCAM à Jean-François Glicenstein (SPP, IRFU). Un autre concept de caméra MST est développé par des laboratoires allemands (FlashCam). Il est envisagé que les MST soient équipés des deux types de caméras (selon un rapport à définir).
- Plusieurs laboratoires français contribuent également aux travaux liés au Data Management, une activité sous responsabilité française (Giovanni Lamanna, LAPP, IN2P3), qui est organisée en 5 sous-produits dont 3 sous responsabilité française : Data model, Data pipelines (Karl Kosack, SAP, IRFU), Archives, Observer Access (Jürgen Knödseder, IRAP, INSU), et IC-infrastructures (Nadine Neyroud, LAPP, IN2P3). La production des simulations Monte Carlo de l'instrument sur la grille de calcul, et le développement du logiciel de gestion des ressources de calcul basé sur l'architecture DIRAC sont sous responsabilité de Luisa Arrabito du LUPM. En outre, le travail nécessaire à la mise à disposition des données via l'Observatoire Virtuel, une exigence de CTA, est aussi coordonné par la France (Catherine Boisson, LUTH, INSU). Les équipes françaises s'impliquent fortement dans la partie aval du traitement des données et de leur diffusion ce qui a pour conséquence de garantir le retour scientifique des investissements techniques d'une part, et contribuera à augmenter la visibilité des équipes au moment des premières publications et à plus long terme. Enfin, il est envisagé de proposer le centre de calcul à Lyon comme l'un des quatre centres de traitement des données CTA.
- Le LAPP a une contribution importante au projet LST à travers la conception de la structure mécanique haute (arches haubanées et support de caméra en fibre de carbone) et le développement du système mécatronique/informatique de pilotage et contrôle pour les télescopes de grande taille (responsable Armand Fiasson). Récemment, des contacts ont été pris entre l'équipe japonaise développant la DragonCAM (caméra équipant les LST) et l'équipe du CPPM développant l'assembleur d'événements de la Nectarcam. Les tests en cours montrent que ce dernier pourrait être adapté à la DragonCAM, impliquant donc également l'équipe du CPPM sur le projet LST.
- Le LUPM, en forte collaboration avec l'Université de Barcelone, supervise le développement d'un Lidar Raman pour la surveillance de l'atmosphère (responsable George Vasileiadis).

### Autres projets auxquels participe la France :

Deux autres activités sont présentes en France : le développement des miroirs pour les télescopes de taille moyenne par l'IRFU ; le prototypage d'un télescope de petite taille par l'Observatoire de Paris (projet GCT). Le projet GCT implique indirectement un laboratoire de l'IN2P3, le CPPM, dans le cadre des simulations de performances de CTA.

La répartition des moyens humains consacrés en 2016 au développement des différents projets est illustrée par la Figure 14, qui donne la répartition des etp d'une part pour l'IN2P3 et d'autre part pour l'ensemble de la communauté Française (IN2P3, INSU et CEA).

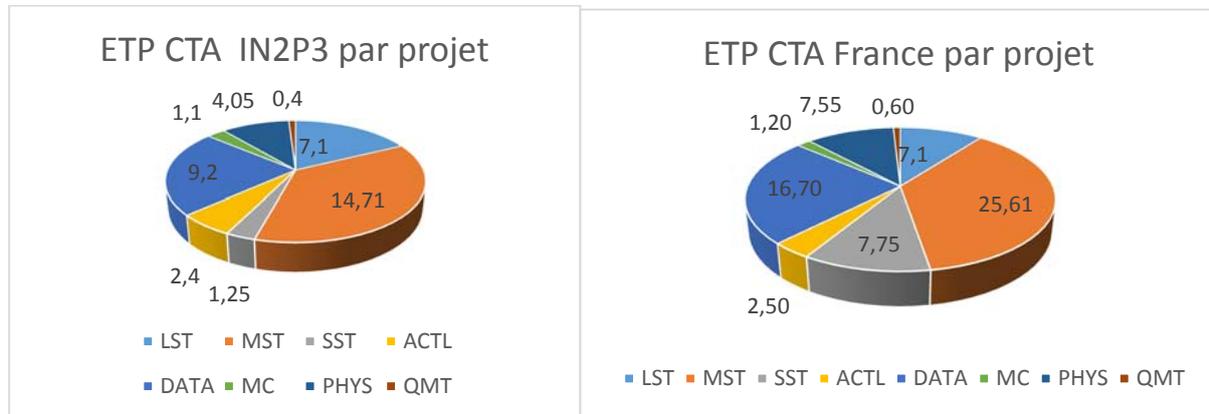


Figure 14 Répartition des ressources humaines (etp) de CTA IN2P3 et de CTA France entre les différents sous projets de CTA. Outre la physique, les principaux projets impliquant des équipes françaises sont, les télescopes de taille moyenne MST (Nectarcam et miroirs), le computing (DATA), les petits télescopes (SST) de type GCT et les grands télescopes (LST).

### Financement des prototypes :

Au cours de ces dernières années, le financement annuel total attribué sous forme d'AP au projet CTA pour l'ensemble des laboratoires de l'IN2P3 impliqués oscillait en moyenne entre 200 à 300k€. A titre d'exemple, le budget 2016 était ainsi de 284k€, soit un ratio budget/ressources humaines de 7k€/etp, contre 19k€/etp pour les laboratoires du CEA : l'IN2P3 se distingue par des ressources humaines relativement abondantes, mais par un sous financement chronique. Les groupes ont donc dû faire des efforts importants pour trouver des financements extérieurs et c'est ainsi que L'ANR, les Labex, les régions ainsi que les universités ont participé activement au financement des travaux de prototypage de CTA à hauteur de ~ 2 M€ :

- ANR sur le projet NeCTAr pour le développement des mémoires analogiques pour les voies électroniques de CTA (étendant les développements réalisés dans le cadre de H.E.S.S. et de HESS-II), 500k€ ;
- ANR mission pour le projet NectarCAM, financé au niveau de 60k€ (regroupant les laboratoires APC, CPPM, IPAG, IRAP, IRFU, LAPP, LLR, LPNHE du CNRS et du CEA) ;
- Projet GATE, financé au niveau de 300k€ par la région Île de France (SESAME) (laboratoires APC, IRFU, LLR, LPNHE, LUTH du CNRS, du CEA et de l'Observatoire de Paris) ;
- Projet CHERENKOV pour l'optimisation GATE, financé au niveau de 93.5k€ par la région Île de France (DIM ACAV) ;
- Projet NectarE2E, financé au niveau de 40k€ par le Labex OCEVU (CPPM, IRAP) ;
- Concentrateurs de lumière, financé au niveau de 45k€ par le Labex OSUG@2020 (IPAG) ;
- Financement de 200k€ de l'université de Montpellier pour le développement d'un LIDAR Raman (LUPM) ;
- Financement de 24k€ BQR -U de Savoie pour « Test bench automatisme pour le drive system et l'array control de CTA » (LAPP) ;
- Financement de 30k€ BQR – U. Marseille pour développement des éléments optiques (CPPM) ;
- Financement CANEVAS de 709 k€ du Labex P2IO (regroupant les laboratoires IPNO, IRFU et LLR du CNRS et du CEA)

## Financement de la phase de construction:

La demande de budget qui a été présentée auprès du Haut comité des Très Grandes Infrastructures de Recherche (TGIR) pour financer la contribution française à CTA se situe autour de 50 M€ (Tableau 5). Sur cette contribution, environ 70% (35 M €) seront attribués aux financements des développements français en nature (*in kind*), tandis que le complément est une contribution en espèce (*in cash*) au financement du *Project Office*, à l'achat des composants communs et à la construction des infrastructures. La contribution en nature, détaillée par lots dans le Tableau 6, prend en compte des contingences de 25 % sur l'équipement ainsi que les besoins en CDD. Elle ne se compare donc pas directement à la somme résultant des réponses à l'Eol, qui ne recense pas les besoins en CDD et n'inclut pas les contingences. Certains coûts ont d'autre part dû être réévalués par rapport à l'estimation initiale du *CTA Cost book*. Ce financement sera réparti sur une durée de construction de 6 ans. La décision sur le financement TGIR de CTA est attendue au premier trimestre 2017, et si cette réponse est positive les premiers fonds devraient être disponibles début 2018. Plus de détails sur les engagements de la France et en particulier des laboratoires de l'IN2P3 sont donnés dans les paragraphes suivants.

Demande TGIR	
Contribution in-kind	36 763 643 €
Fonds communs	5 000 000 €
Contribution in-cash	10 000 000 €
<b>Somme demandé</b>	<b>51 763 643 €</b>

Tableau 5 : demande globale de financement pour CTA présentée devant le HC-TGIR.

Lot	Nombre	Equipement	ETP	% CDD	CDD	25% Contingences	Total
NectarCAM	1+15	15 929 281 €	139,18	23%	1 760 627 €	4 422 477 €	22 112 385 €
DATA		800 000 €	100,00	20%	1 100 000 €	475 000 €	2 375 000 €
GCT	2+22	4 967 252 €	22,31	10%	122 705 €	1 272 489 €	6 362 446 €
Miroirs	9	2 027 309 €	6,00	50%	165 000 €	548 077 €	2 740 386 €
LST	1+3	2 485 500 €	9,68	10%	53 240 €	634 685 €	3 173 425 €
<b>Total</b>		<b>26 209 342 €</b>	<b>277,17</b>	<b>21%</b>	<b>3 201 572 €</b>	<b>7 352 729 €</b>	<b>36 763 643 €</b>

Tableau 6 : détails par lots de la contribution en nature demandée au budget TGIR.

## b. Projet Nectarcam

La NectarCAM est une caméra modulaire pour les MST, qui couvrent le domaine spectral au cœur de CTA (voir Figure 15). L'importance de ces télescopes est parfaitement illustrée par leur contribution à la sensibilité, primordiale de  $\sim 100$  GeV à  $\sim 10$  TeV, impactant ainsi tous les cas scientifiques : Galactique, extragalactique et physique fondamentale.

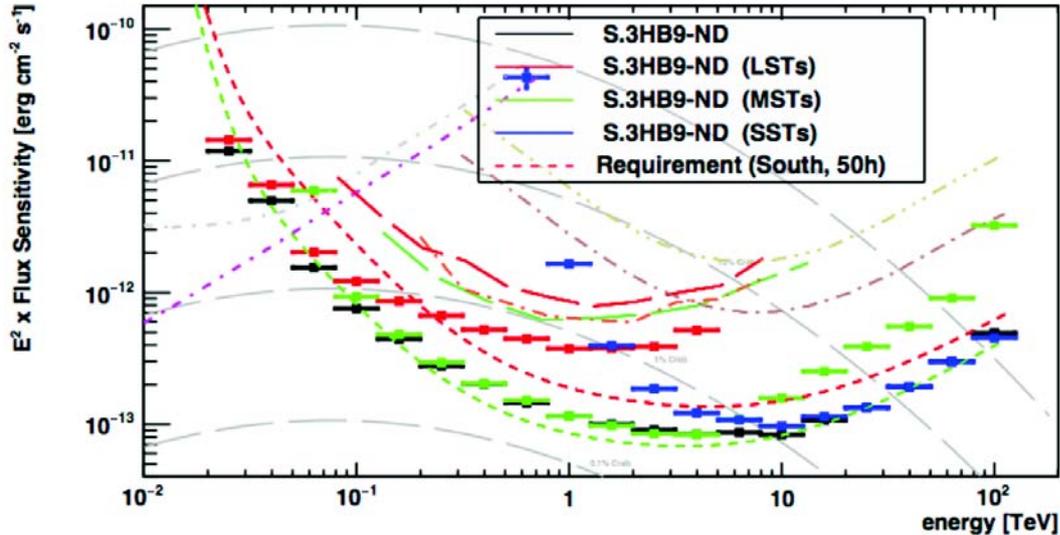


Figure 15 : Sensibilité du site sud pour une observation de 50h. Les contributions des LST, MST et SST sont respectivement représentées en rouge, vert et bleu. Préliminaire. Crédits : G. Maier, 2016.

Les télescopes MST ont un champ de vue de  $8^\circ$  comparé à  $5^\circ$  pour H.E.S.S.-I. En conséquence, les gerbes atmosphériques plus distantes seront visibles et la durée de signal dans la caméra sera plus longue, plusieurs dizaines de nanosecondes. Cela nécessite un nouveau design de l'électronique de lecture et du déclenchement. De plus, une résolution en temps de l'ordre de nanoseconde par pixel est souhaitée pour la reconstruction et la séparation photon-hadron. Tout en conservant l'expérience tirée des caméras de H.E.S.S., la caméra NectarCAM présente une innovation importante vers la précision et la fiabilité des observations.

La NectarCAM est développée par un consortium constitué de onze laboratoires et services français (IRFU, IN2P3 et INSU), avec des contributions significatives de l'Espagne et de l'Allemagne. Après concertation entre les directions des instituts impliqués, le comité de pilotage et les équipes travaillant sur le projet, il a été décidé lors de la signature des EoI de s'engager à fournir, si les financements nécessaires sont obtenus, 16 caméras (1 modèle de qualification et 15 modèles de série). Le financement TGIR demandé pour l'ensemble des laboratoires français impliqués (IN2P3 + INSU + CEA) est de 15.9 M€ hors marges, auquel s'ajoutent 1.8 M€ pour le financement des CDD nécessaires (32 ETP). Il est à noter que pour les 15 modèles de série, le financement des photomultiplicateurs ( $\approx 5$  M€) n'est pas inclus, la partie française souhaitant pour ceux-ci un financement sur fonds communs, discussion qui doit être formalisée au sein de CTA.

#### Description :

Chaque caméra est composée de 265 modules facilement extractibles. Chaque module est composé de 7 pixels, constitués d'un cône de Winston placé devant un photomultiplicateur et d'une carte électronique pour l'alimentation du tube et la pré-amplification du signal. Les 7 pixels sont contrôlés et lus à travers une carte interface qui se connecte à une carte d'acquisition équipée de 7 ASIC NeCTAr. Le signal de déclenchement est produit par coïncidence entre pixels et entre modules adjacents puis transite de module en module via la carte *backplane*. La carte d'acquisition effectue la numérisation des 7 signaux, et transmet les données au serveur de la caméra via la carte *backplane* et des commutateurs situés dans la caméra. La Figure 16 donne un aperçu des éléments d'un module de la NectarCAM.

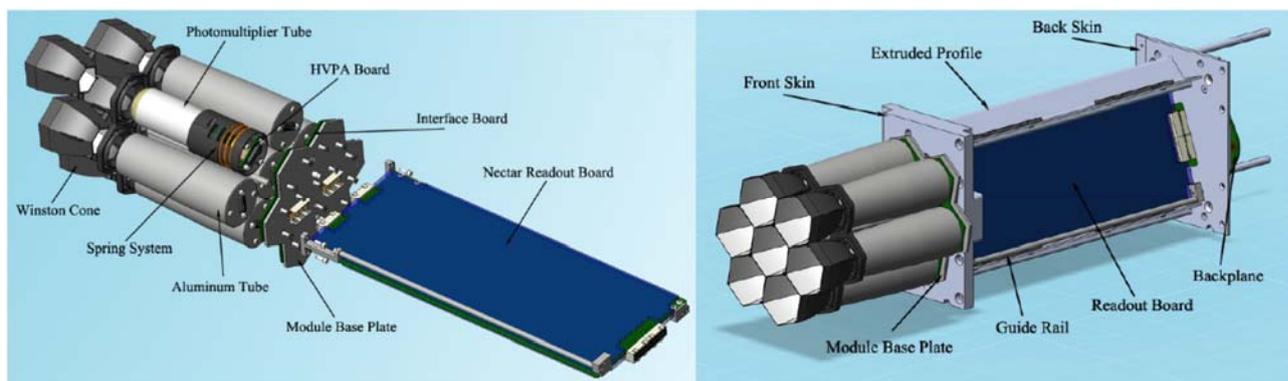


Figure 16 : Eléments d'un module de la NectarCAM (extrait de MST-TDR/141003, v4.1).

Une horloge en temps absolu est reçue par la carte UCTS (Unified Clock distribution & Trigger time-Stamping), qui implémente le protocole « White Rabbit » développé au CERN et date les déclenchements avec une précision d'une nanoseconde. Les modules sont insérés dans un support qui est fixé à un châssis tubulaire. L'électronique est refroidie par convection forcée d'air ; la chaleur est évacuée à travers des échangeurs thermiques air/liquide reliés à un refroidisseur placé au sol. La caméra est entièrement scellée par son enceinte et sa fenêtre d'entrée acrylique, et les pixels de la caméra sont protégés de la lumière du jour par un volet roulant. Les éléments de la NectarCAM sont présentés sur la Figure 17

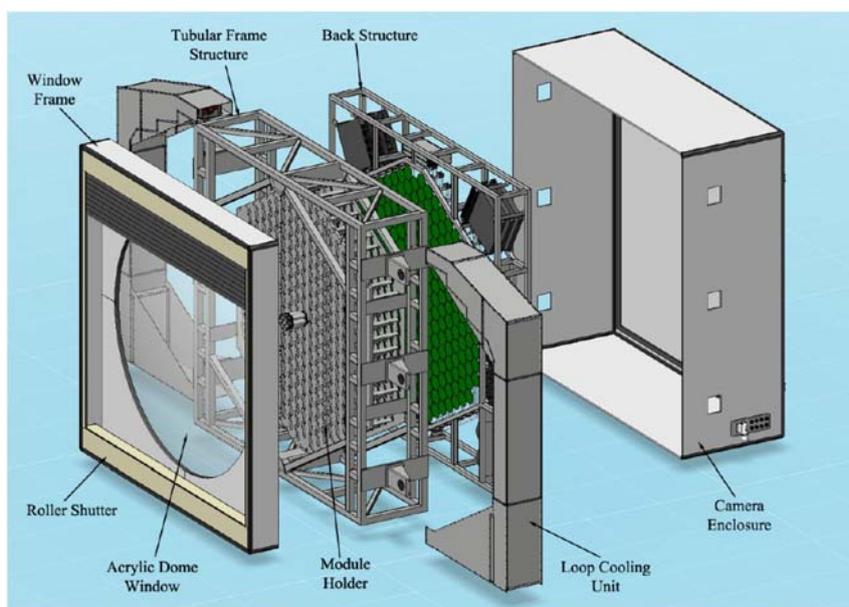


Figure 17 : Eléments de la NectarCAM (extrait de MST-TDR/141003, v4.1).

Au total, chaque NectarCAM comprend 1 855 pixels qui sont sensibles aux photons uniques, et qui sont équipés d'une chaîne de lecture échantillonnant les signaux à une fréquence de 1 GHz. Une large bande passante analogique supérieure à 250 MHz permet de mesurer la charge déposée en quelques nanosecondes, une fenêtre de temps optimale pour la réjection de la lumière de fond du ciel. La NectarCAM mesure 2,8 x 2,9 x 1,2 m<sup>3</sup>, pèse environ 1,9 tonnes et dissipe une puissance de 7 kW. Le coût total d'une caméra en production industrielle est estimé à 1,3 M€. La main-d'œuvre nécessaire pour produire une caméra de manière industrielle est estimée à 6,2 ETP. Il est prévu d'acquérir les éléments dans l'industrie et d'assembler, intégrer et tester les caméras dans un local dédié, mis en place à l'IRFU.

Notons également que le projet NectarCAM partage une part importante de son design avec la caméra LST :

- Toute la mécanique incluant le système de refroidissement est conçue et prototypée en collaboration avec les équipes de la CIEMAT.
- Les électroniques de contrôle basse fréquence et de déclenchement sont communes.

De plus, le plan focal de NectarCAM (cartes d'alimentation/préamplification, cartes d'interface, cônes de lumière, système d'étalonnage) est développé en vue d'équiper les caméras LST lors de la phase de production. A priori, les équipements de la caméra LST seront financés par le consortium LST, toutefois il pourra être envisagé de fournir l'équipement du plan focal français en échange de la fourniture des photomultiplicateurs japonais (Hamamatsu) à la France. Le projet FlashCam prévoit d'ailleurs aussi l'utilisation des cônes de lumière développés et produits en France.

Enfin, les interfaces externes de la caméra ont été définies conjointement avec l'équipe de FlashCam afin d'être compatibles avec les structures MST. Des éléments du contrôle de la caméra sont en commun entre les deux caméras. Grâce à cette compatibilité, les deux types de caméras pourront être installés sur les MST.

Description du lot	unité	Budget	RH (en etp)
UCTS, RAMS	APC	144 640 €	5,0
coordination, switches, server, software	CPPM	759 420 €	4,7
reflective target and calibration LEDS	IPNO	110 980 €	1,4
Monitoring et services	LAPP	456 498 €	12,6
Mécanique et calibration, assurance qualité	LLR	3 965 686 €	18,9
Electronique front end, Nectar module controller	LPNHE	3 563 079 €	9,2
calibration box	LUPM	77 085 €	3,2
<b>Sous Total in2p3</b>		<b>9 077 388 €</b>	<b>54,9</b>
équipement plan focal	IRAP	3 875 208 €	7,3
équipement plan focal	IPAG	599 517 €	2,4
Nectar ASIC, Cooling, Integration	IRFU	2 377 168 €	74,6
<b>Total Général Nectarcam France</b>		<b>15 929 281 €</b>	<b>139,2</b>

Tableau 7 Budget d'investissement nécessaire à la réalisation de 16 Nectarcam et principales responsabilités des différents laboratoires impliqués (Chiffrage de janvier 2016, synthèse des réponses françaises à l'EOI). Ce budget n'inclut ni les contingences, ni les frais de mission, ni les CDD. La répartition des coûts et des responsabilités entre laboratoires est susceptible d'ajustements mineurs.

### Laboratoires de l'IN2P3 impliqués

Les laboratoires de l'IN2P3 impliqués sur NectarCAM et leurs principaux engagements sont l'APC (système d'horloge), le CPPM (système d'acquisition), l'IPNO (étalonnage), le LAPP (système de contrôle commande de la caméra), le LPNHE (électronique d'avant plan), le LLR (mécanique, thermique, étalonnage et contrôle qualité) et le LUPM (sources de lumière). Les autres laboratoires français impliqués sont l'IRAP et l'IPAG (INSU) sur l'équipement du plan focal (photomultiplicateurs, électronique, cônes de Winston) et le CEA (production de l'ASIC Nectar, assemblage, intégration et

tests de la caméra, gestion du projet). Pour préparer l'intégration et les tests des caméras, le CEA a aménagé une zone d'intégration de 500 m<sup>2</sup>, située à la DRF/IRFU. Cette zone est équipée d'une chambre noire longue de ~ 16 m (distance focale des MST) permettant la calibration des gains dans les conditions de l'observatoire. Le Tableau 7 résume les principales responsabilités des différents laboratoires français dans le projet ainsi que le chiffrage du budget d'investissement correspondant (hors CDD, frais de mission et contingences) utilisé pour répondre aux Eol et préparer la demande TGIR. Organisation du projet

L'organisation du projet NectarCAM est illustrée en Figure 18. L'équipe de management du projet est constituée du coordinateur scientifique (Jean-François Glicenstein, IRFU), du chef de projet (Michel Fesquet, IRFU) et de l'ingénieur système (Julie Prast, LAPP). Avec l'équipe d'assurance produit (conduite par Sandrine Pavy du LLR), ainsi que les coordinateurs des 8 lots de travail, ils constituent le NectarCAM Project Committee qui se réunit chaque semaine pour piloter le projet.

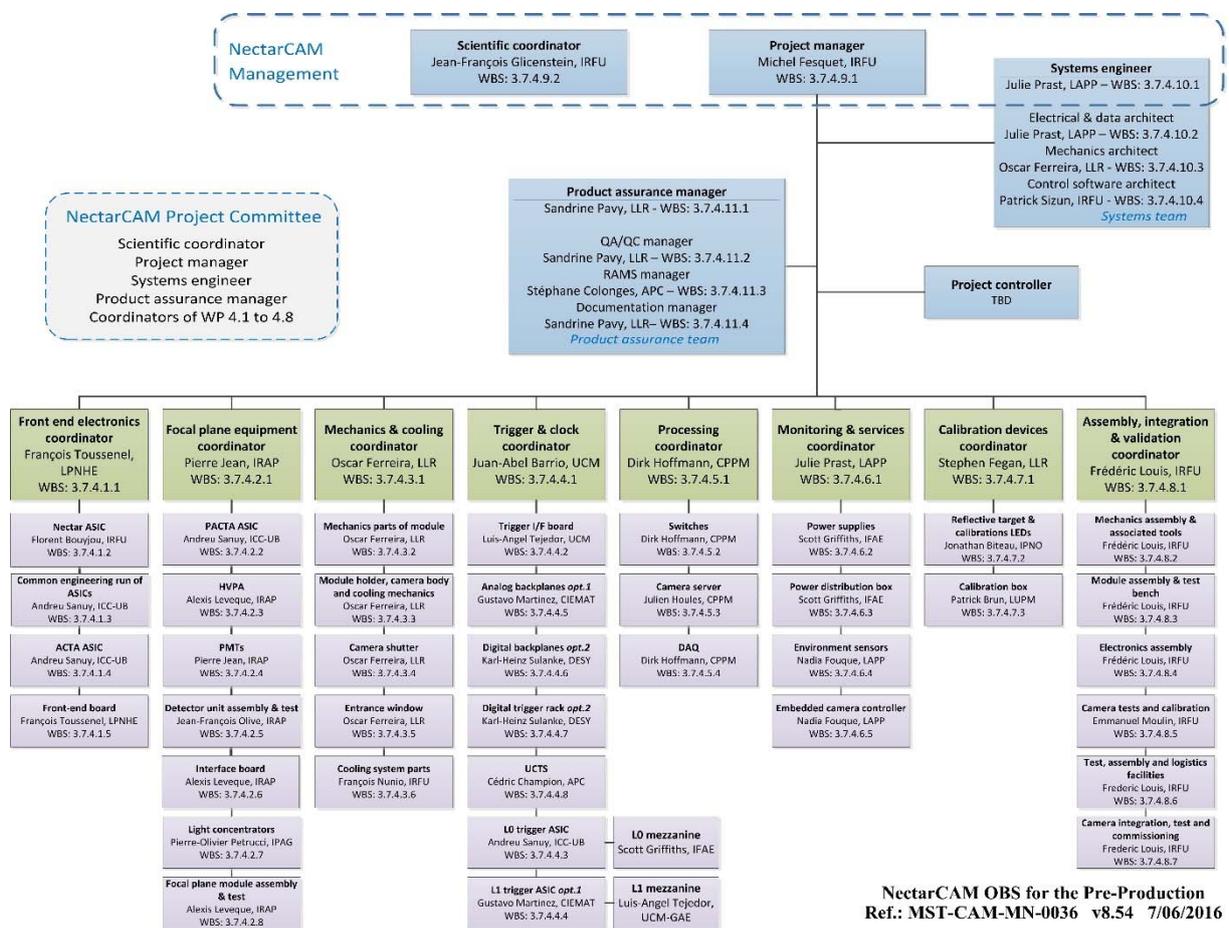


Figure 18 : Organisation du projet NectarCAM (Version du 7-6-2016)

Les contributions étrangères à la NectarCAM représentent 7% du coût d'une caméra de production et se situent dans les lots suivants :

- Coordination du lot « Trigger and clock » (UCM-GAE, Espagne), comprenant 7 sous-lots ;
- Fourniture des cartes backplane et de l'ASIC de déclenchement L1, si une architecture analogique est retenue (CIEMAT, Espagne) ;
- Fourniture de l'ASIC de déclenchement L0 (UB, Espagne) ;

- Fourniture des cartes backplane et du système de déclenchement, si une architecture digitale est retenue (DESY, Allemagne) ;
- Participation à l'électronique de distribution du temps (DESY, Allemagne) ;
- Fourniture de la carte interface pour le système de déclenchement (UCM-GAE, Espagne) ;
- L'ASIC de pré-amplification PACTA et l'ASIC d'amplification ACTA (UB, Espagne) ;
- Les alimentations basses tension et le coffret électrique de la caméra (IFAE, Espagne).

Le projet NectarCAM est un des trois sous-projets du projet MST (voir Figure 19). Le projet MST est dirigé par un Project Board, responsable du management du projet, incluant la coordination des sous projets et l'intégration système.



Figure 19 : Organisation du projet MST

### Calendrier et financement

Le plan de développement de la NectarCAM est divisé en 3 phases:

- la phase de pré-construction (2012 – mi-2016), dédiée au prototypage ;
- la phase de pré-production (mi-2015 – 2018), dédiée à la construction des bancs de tests et des outils d'assemblage, ainsi qu'à la construction d'une première caméra (modèle de qualification) ;
- la phase de production, dédiée à la production des 15 caméras.

Durant la première phase, les différents prototypes réalisés ont permis de valider les choix de conception: modules NectarCAM (*validation de l'électronique et des performances de détection*), caméra à 5 modules (*validation des interfaces entre les modules*), prototype thermique (*validation de la régulation de température de l'électronique*) et démonstrateur à 19 modules (*validation globale avant construction de l'exemplaire de qualification, et décision sur l'architecture de déclenchement*). Le démonstrateur, une mini-caméra équipée de 19 modules, a été assemblé à l'automne 2015 et est testée intensivement à l'IRFU. Les résultats de ces tests doivent permettre de choisir, début 2017, entre une architecture de déclenchement analogique ou digital.

Le projet entre désormais en phase de pré-production, avec pour objectif la construction d'un modèle de qualification de la caméra monté sur un télescope de taille moyenne, sur le site nord. Cette étape permettra de démontrer que la NectarCAM satisfait le cahier de charges, mais aussi de formuler et de valider les procédures à utiliser lors de la production industrielle. Dans cette phase seront également produits les bancs de test ainsi que les outils d'assemblage pour la production industrielle. Le coût de production du modèle de qualification et des équipements associés (bancs de tests, outils d'assemblage) est estimé à un peu plus de 2.1M€ (hors main d'œuvre). La phase de pré production se terminera par une production readiness review, qui validera le passage à la phase de production.

Les budgets des instituts ne permettent pas à eux seuls de financer dans les délais nécessaires la construction d'un prototype coûtant plus de 2M€. A titre de comparaison, le budget annuel (équipements et missions) attribué ces dernières années par l'IN2P3 à ses laboratoires pour l'ensemble

des développements sur CTA oscillait entre 200 et 300k€, soit au mieux un budget d'équipement de 100k€/an pour NectarCAM. Début 2016, le projet NectarCAM a obtenu un financement de 709k€ (dont 459 k€ d'équipement) dans le cadre de l'appel d'offres « projets emblématiques » du Labex P2IO. Ce financement permettra, avec les financements complémentaires des différents instituts impliqués et des Labex OCEVU et OSUG2020, la construction d'une caméra équipée d'environ ¼ de ses modules, qui pourrait être installée sur site début 2019. A l'IN2P3 les laboratoires concernés sont le LLR et l'IPNO, et l'argent reçu permettra en particulier de financer toute la mécanique de la caméra. Pour avoir une caméra complète, les ¾ des modules restant doivent encore être financés. Si le financement de tout ou partie du modèle de qualification est bien prévu dans la demande TGIR, l'argent de ce dernier ne commencera à être disponible que début 2018. Afin d'arriver à la réalisation d'un modèle complet pour la fin 2018, la piste d'éventuels financements de partenaires étrangers (Allemagne, Espagne) paraît peu probable et une avance faite par l'IRFU, l'IN2P3 ou l'INSU sur anticipation des fonds TGIR pourrait être nécessaire. Sous réserve de l'obtention des financements nécessaires dans les temps, le calendrier envisagé pour la réalisation du modèle de qualification est montré Figure 20.

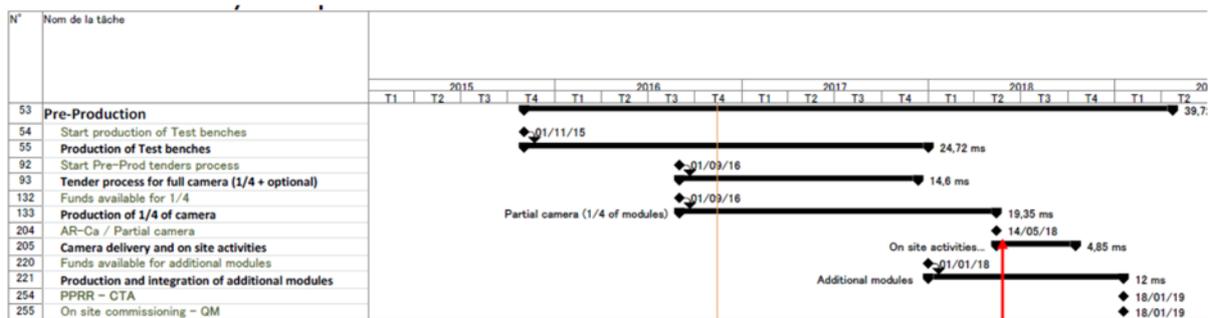


Figure 20 : Calendrier prévisionnel pour la réalisation du modèle de pré production (M.Fesquet, Novembre 2016)

Un effort de structuration est également en cours pour la mise en place d'un consortium qui gèrera la construction de l'ensemble télescope+ caméra puisqu'il ne s'agit pas seulement de fournir une caméra, mais un télescope complet. Une première réunion avec les partenaires impliqués (IAC, Desy Zeuthen) a eu lieu à Saclay le 16/12/2016 avec comme objectif de déboucher sur un protocole d'accord dans le courant du premier trimestre 2017. La construction d'un exemplaire de pré production MST équipé d'une NectarCAM complète pourrait ainsi être achevée sur le site de La Palma pour le printemps 2019.

Le calendrier envisagé à ce jour pour la phase de production est de 3 caméras en 2019, puis 4 caméras pendant chacune des 3 années suivantes.

### c. Projet LST

Le projet LST a pour but la construction de quatre télescopes pour chaque site de l'observatoire CTA. Il est développé au sein d'un consortium international, composé d'équipes françaises (LAPP), allemandes (MPI), japonaises, espagnoles (IFAE, CIEMAT, UCM-GAE) et italiennes (INFN), partenaires naturels de l'IN2P3. L'objectif de la collaboration LST est de construire des télescopes de grande taille dont la structure légère permet un pointé rapide du télescope afin de suivre des alertes. Étant donnée la forte décroissance des flux de gamma avec l'énergie, la gamme sondée par les LST permet en effet de détecter au plus vite les phénomènes transitoires. Un prototype de ces grands télescopes, le LST1, est en cours de production et sera installé dès 2017 sur le site nord à La Palma. En raison du nombre limité de télescopes LST et leur prix relativement élevé (≈ 9 M€), il a été décidé que ce prototype serait, après éventuelles modifications, le premier grand télescope du réseau CTA pour le site nord. Un schéma des LST est montré Figure 21.

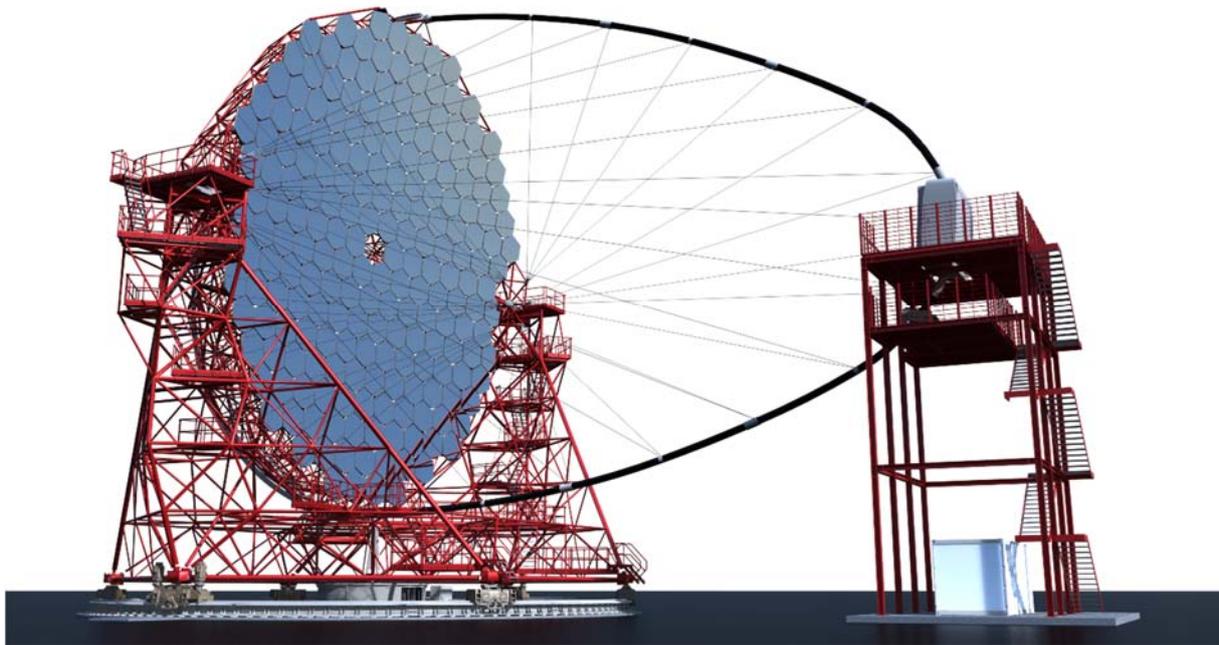


Figure 21 : Schéma des grands télescopes (Crédit: Gabriel Pérez, IAC (Espagne))

### Organisation du projet

L'organisation du projet LST est illustrée dans la Figure 22. Le projet a deux coordinateurs (Masahiro Teshima, Allemagne/Japon ; Juan Cortina, Espagne) et deux chefs de projets (Daniel Mazin, Japon ; Francesco Dazi, Allemagne). Ensemble avec l'assurance qualité et un ingénieur système ils constituent le Project Office du projet LST situé au Max-Planck-Institut für Physik à Munich, Allemagne. Le projet s'est doté d'un Steering Committee qui est chargé de définir le planning et les ressources du projet LST, qui gère l'allocation des ressources humaines, et qui prend des décisions stratégiques et financières. Les membres du Steering Committee représentent les pays qui participent à la construction des LST.

Le projet est divisé en 6+2 lots de travail, avec Site/INFRA et Software and Data Analysis existant uniquement pendant la phase de prototypage. Le lot Auxiliary Systems est sous responsabilité française (Armand Fiasson, LAPP). De plus, les lots Camera Support Structure et Drive Control System, sous-lots de Mechanical System et Auxiliary Systems respectivement, sont sous responsabilité française (Guillaume Deleglise et Inocencio Monteiro, LAPP).

### Contribution Française :

Outre la collaboration sur les composants communs aux caméras LST et NectarCAM, la contribution française au consortium LST est représentée par un seul laboratoire, le LAPP, qui pourrait être rejoint par le CPPM si la solution développée par ce dernier pour l'assembleur d'événements de la NectarCAM est retenu pour équiper également la DragonCAM des LST. L'équipe du LAPP est en charge du système mécanique de support de la caméra qui comprend la structure d'arche haubanée et la mécanique externe (support) de la camera. Ces éléments sont réalisés en fibre de carbone, qui assure un rapport poids/résistance optimal. L'arche a une portée de 24m ( focale du télescope) et doit supporter la caméra, d'une masse d'environ 2T. Les services techniques du LAPP ont réalisé le design de l'arche en collaboration avec une entreprise française, LORIMA. Cette entreprise basée en Bretagne est un des

leaders pour la fabrication de mats en matériaux composites, solution retenue pour les mats de l'arche et le cadre de caméra. Un partenariat avec cette entreprise a été mis en place, incluant un financement de 278k€ de la région Bretagne pour soutenir l'effort de recherche et développement de LORIMA pour ce projet. Ce financement intervient sous forme d'un prêt qui devra être remboursé par l'entreprise si elle décroche le marché des séries.

Compte tenu des difficultés pour l'IN2P3 à financer l'intégralité du projet, en particulier au niveau du prototype (LST1) qui, en raison de son calendrier, n'a pas pu faire l'objet d'une demande de financement sur TGIR, un accord a été conclu avec la section de Padoue de l'INFN pour partager la production de l'arche haubanée. Le LAPP assure la production des éléments du mat et du cadre de caméra, réalisées par l'entreprise LORIMA, tandis que l'INFN assure la production des haubans.

Fort de l'expertise en mécanique de l'IN2P3, et de l'expérience acquise dans diverses expériences dont HESS-II, le LAPP a également pris en charge l'architecture mécanique du système de moteurs de chaque LST et du pilotage et contrôle des sous-réseaux des LST. Ce projet est basé sur des composants en vente libre de SIEMENS, dont l'ensemble des moteurs utilisés pour le déplacement des télescopes et leurs modules de contrôles. L'équipe du LAPP conçoit également le contrôleur de la caméra, qui est identique pour la NectarCAM et la caméra LST. Enfin, l'équipe du LAPP est impliquée dans la partie logiciel de contrôle global de ces télescopes.

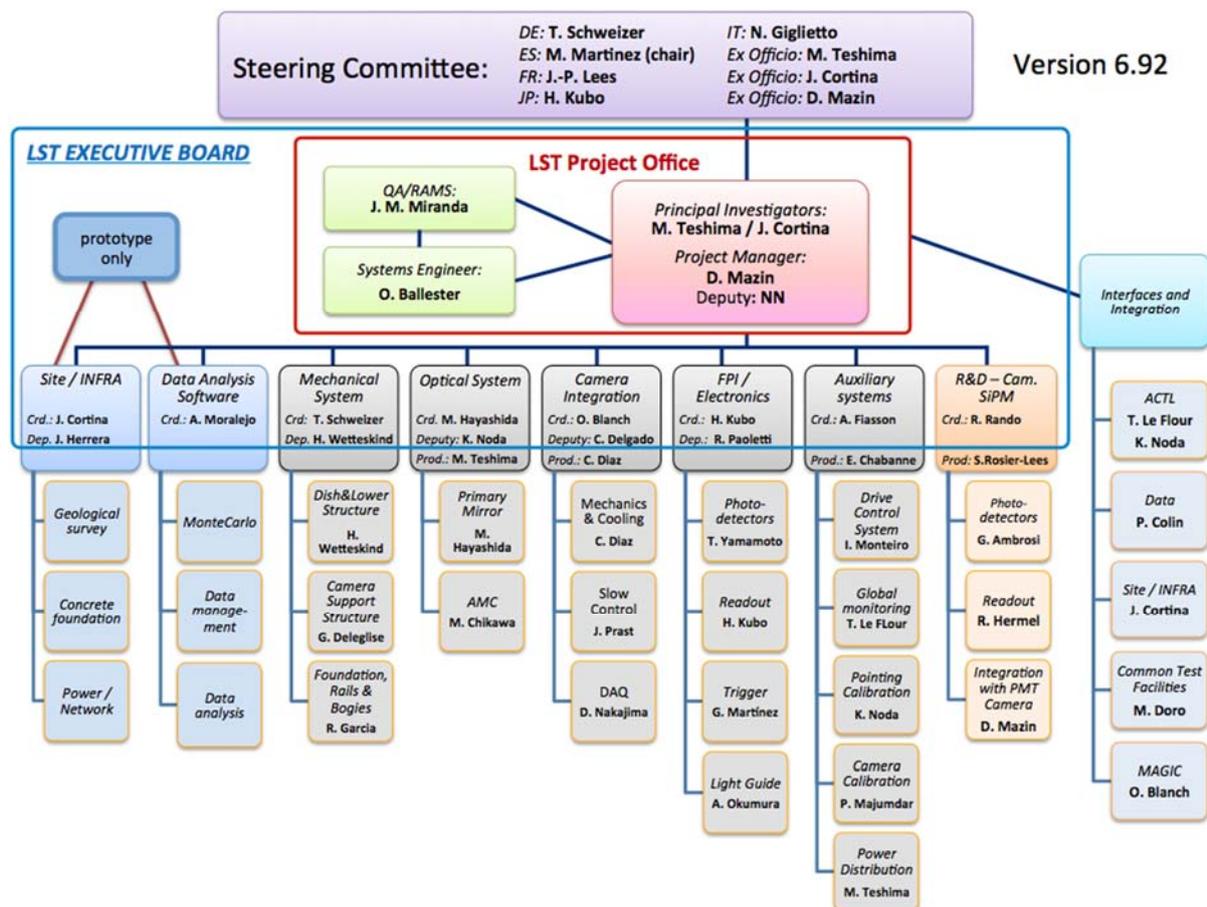


Figure 22: diagramme d'organisation du projet LST

## Engagements et financement

Suite à l'arbitrage du COPIL, la contribution que la France s'est engagée à fournir lors de la signature des Eol pour le projet LST est la suivante :

- Les mâts et cadres de caméra des arches pour les quatres LST du site nord ;
- Les systèmes de contrôle des moteurs pour les quatres LST du site nord;
- Le contrôle basse-fréquence (*embedded camera controller & sensor board*) pour les huit caméras des LST.

Les financements correspondant et les ressources humaines nécessaires sont détaillés dans le Tableau 8. Il est à noter que les mâts et cadres sont un développement unique. Si à l'avenir les LST initialement prévus venaient à être construits sur le site sud (deux télescopes à minima), la France serait très certainement sollicitée pour les fournir car il n'existe pas de projet alternatif.

Description du lot	Nombre	Budget	RH (en etp)
transport et installation	1	78 000 €	1,0
Support de Caméra	1	160 000 €	
Arches	1	360 000 €	
Controleur Camera	1	24 000 €	0,5
Drive Control System	1	96 600 €	3,0
<b>Total LST1</b>		<b>718 600 €</b>	<b>4,5</b>

Description du lot	Nombre	Cout unitaire	RH (en etp)
Transport et installation	3	93 500 €	0,92
Support de Caméra	3	130 000 €	
Arches	3	270 000 €	
Controleur Camera	7	24 000 €	0,50
Drive Control System	3	279 000 €	1,14
<b>Total</b>		<b>2 485 500 €</b>	<b>9,68</b>

Tableau 8 : Engagements de la France (LAPP) pour l'exemplaire de présérie (en haut) et les exemplaires de série (en bas) des LST, et budget associé (chiffrage de janvier 2016, synthèse de la réponse du LAPP à l'EOI) Ce budget n'inclut ni les contingences, ni les CDD.

## Planning et point sur l'état d'avancement de la contribution française à LST1

La construction de LST1 a démarré en 2016 avec l'achèvement des fondations. Si les difficultés administratives (autorisations administratives et taxes) qui ont jusqu'à présent freiné la construction se résolvent, la construction de LST1 devrait suivre le planning de la Figure 23 et être achevée fin 2017 ou début 2018. Quant à la construction des LST2, 3 et 4, il est prévu qu'elle s'étende sur les années 2018, 2019, et 2020.

Le point le plus important pour la contribution française aux LST est la réalisation des arches. Celles-ci sont financées par un partenariat entre l'IN2P3, le LAPP, LORIMA et la région Bretagne (voir Tableau 9). La production de ces éléments a commencé début 2016, pour une installation sur site prévue à l'automne 2017. D'ores et déjà, 3 des 8 éléments des arches ont déjà été produits. Si le budget de construction proprement dit a déjà été bouclé, l'achat et la réalisation de l'outillage nécessaire à l'installation fait l'objet d'une demande de 80k€ au budget 2017.

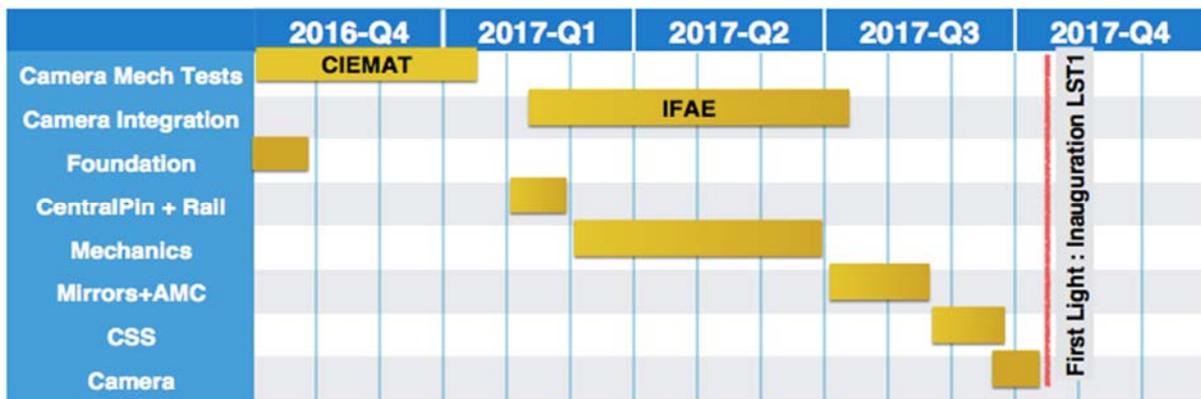


Figure 23 Planning de construction du LST1 (date d'actualisation novembre 2016)

Région Bretagne	278 500 €
Fonds Propres du LAPP	80 000 €
AP IN2P3	241 500 €
<b>Total</b>	<b>600 000 €</b>

Tableau 9 Schéma de financement des arches du prototype LST1

En ce qui concerne le système de pilotage (« Drive ») du LST1 une bonne partie des financements nécessaires n'ont pu être assurés pour acheter les éléments qui relevaient de la responsabilité du LAPP. Ces éléments ont pu être achetés par les partenaires étrangers mais une partie du travail de préparation (câblage, programmation, tests), qui aurait pu être fait au laboratoire, ne pourra l'être que sur site, augmentant d'autant le nombre et la durée des missions d'installation qui seront nécessaires. Le montant des missions nécessaires pour l'installation des arches et des drive du LST1 est d'ailleurs une source d'inquiétude car il représente une somme conséquente par rapport à l'enveloppe budgétaire CTA-France attendue de l'IN2P3 en 2017.

#### d. Data Management

Le système de gestion des données de l'Observatoire CTA doit répondre aux exigences d'un observatoire ouvert à la communauté internationale: il doit permettre d'assurer la qualité des données et de leur diffusion et en garantir un traitement fiable. La **Figure 24** montre l'arbre des produits du projet Data Management qui est organisé aujourd'hui selon cinq lots: Data Model, Pipelines, Archive, Observer Access et IC Infrastructure. A l'exception des Archives, la communauté française contribue actuellement à tous les lots, toutefois pour la phase de construction elle souhaite se concentrer sur Pipelines, Observer Access et IC Infrastructure.

Les Pipelines comprennent les logiciels nécessaires pour convertir les données brutes en données de haut niveau (en particulier des listes d'événements) qui vont être distribuées aux observateurs pour l'analyse scientifique (voir **Figure 25**). Ce produit inclut la création d'un Framework puis l'implémentation des différentes chaînes de traitement nécessaires au traitement des données (étalonnage, reconstruction, analyse, simulations Monte Carlo, traitement sur site et hors site).

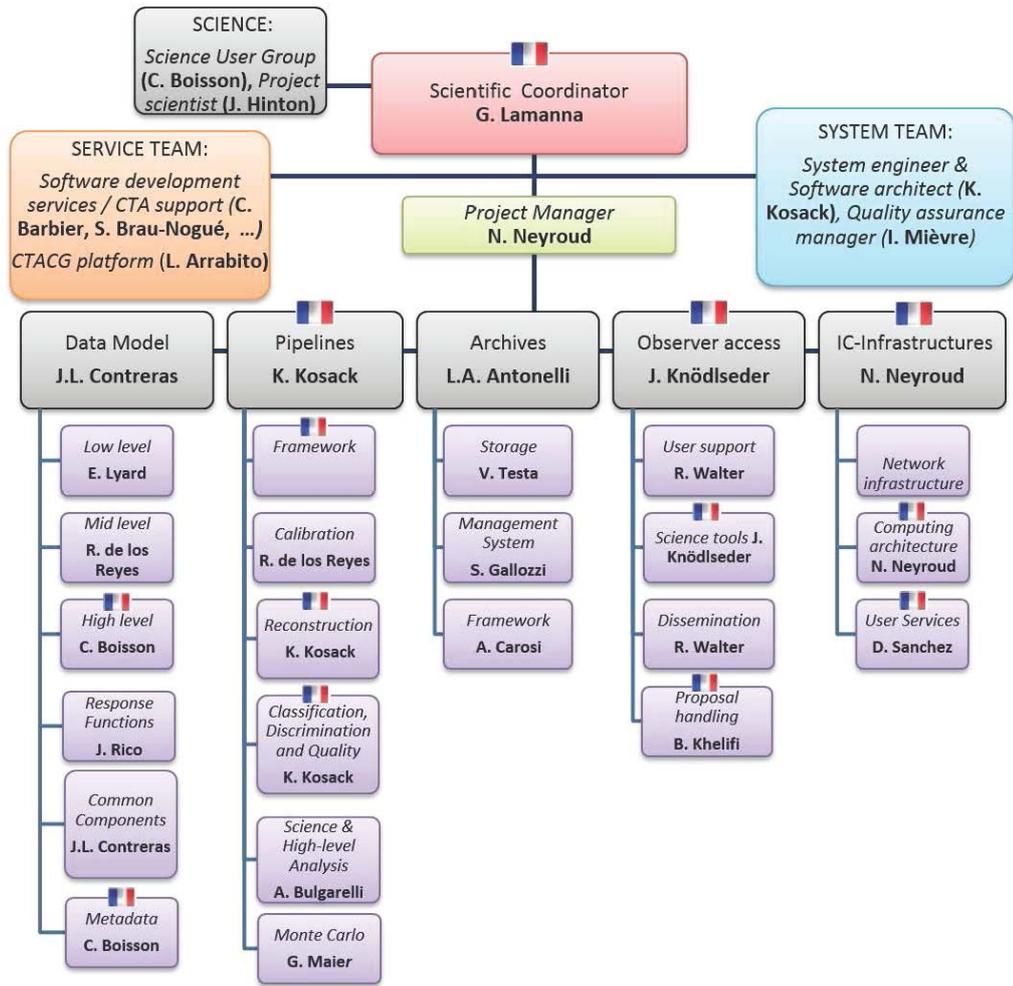


Figure 24 : Organisation DATA Management

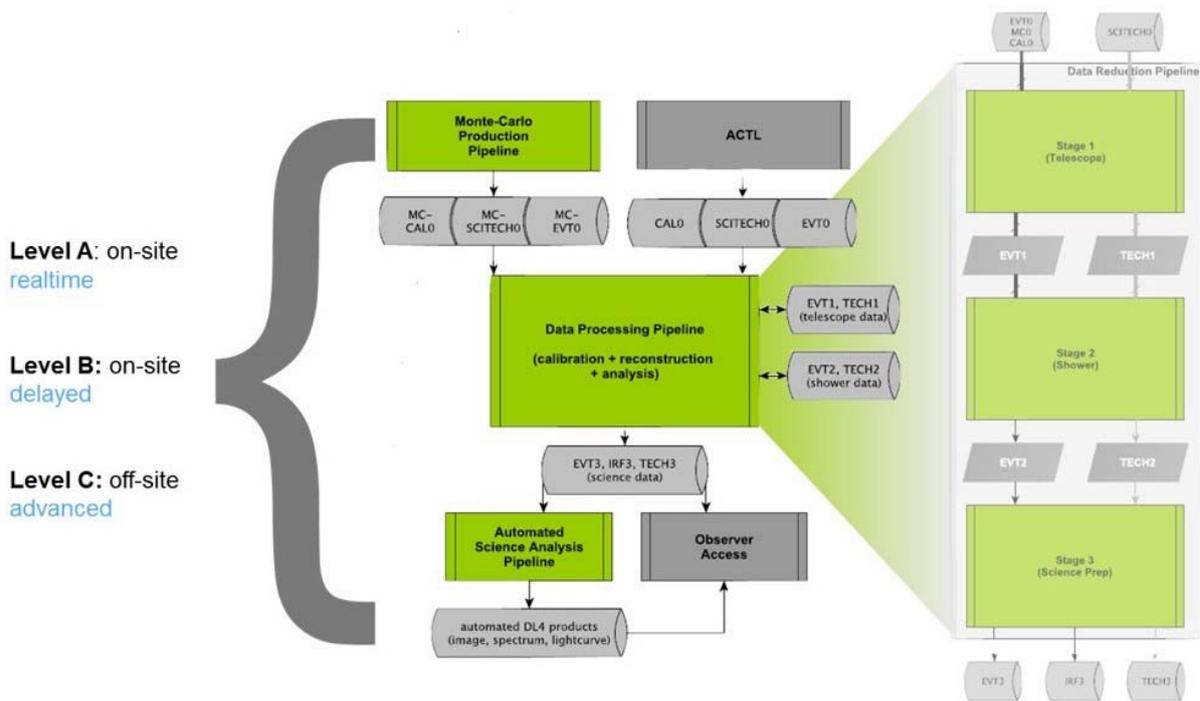


Figure 25 : Synoptique des pipelines CTA

Le lot Observer Access comprend tous les outils et services dont un observateur a besoin pour analyser les données de CTA. Ceci inclut le support aux utilisateurs (*User Support*), les logiciels d'analyse scientifique (*Science Tools*), la distribution des données, des logiciels et des documents ("*Dissemination*"), et le système logiciel nécessaire pour la gestion des propositions ("*Proposal Handling*"). La **Figure 26** illustre le lien entre ces produits.

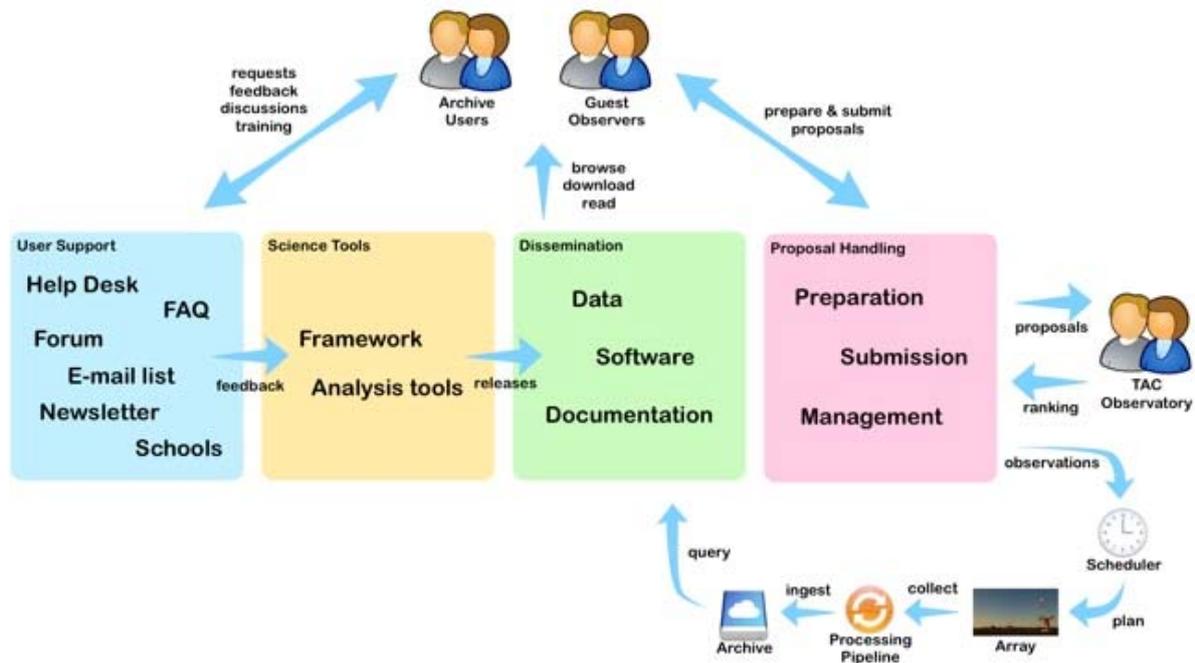


Figure 26 : Les services et outils du produit Observer Access.

Le lot IC Infrastructure comprend tous les composants nécessaires pour implémenter et exécuter les chaînes de traitement des données CTA hors site. Ceci inclut des logiciels, le *middleware*, le *hardware* et des services nécessaires pour assurer le bon fonctionnement du projet (*authentication & authorization, ticketing system, etc.*). Le *CTA computing model* décrit dans le TDR, propose le calcul hors site pour CTA distribué entre 4 centres de calcul (voir **Figure 27**).

### Contribution Française

La proposition française inclut :

- Une contribution significative aux Pipeline en particulier le "framework" et la participation au développement des algorithmes de reconstruction et d'analyse;
- la maîtrise d'œuvre du lot "Proposal Handling" System et une contribution significative aux "science tools";
- la maîtrise d'œuvre du lot IC-Infrastructure et dans les sous-produits la maîtrise d'œuvre du lot Resource Management System (CTA-DIRAC)
- la proposition de fournir, avec le CC-IN2P3, l'un des quatre centres de calcul de CTA pour un accès facilité aux données brutes et une participation aux coûts d'opération;

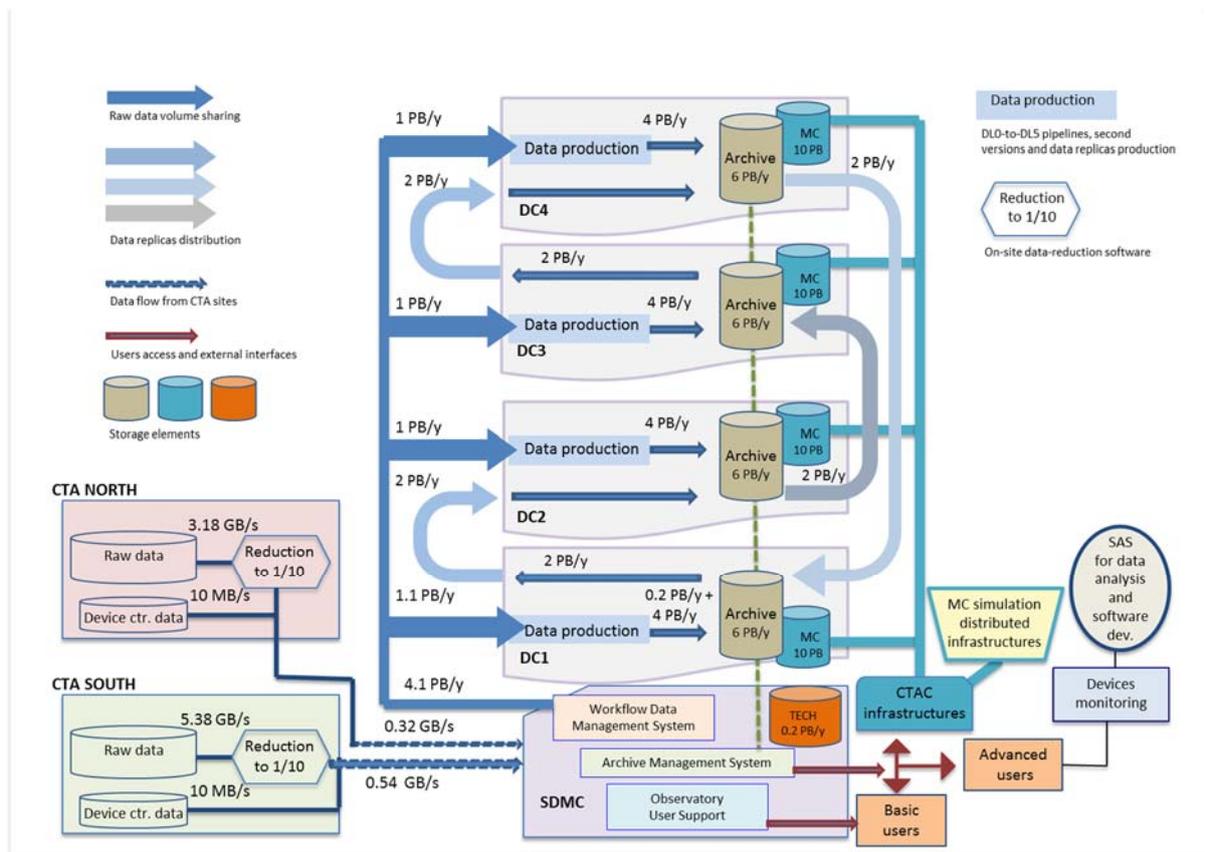


Figure 27: Synoptique de la gestion des données CTA.

La proposition est en cohérence avec les investissements depuis 2008 dans le projet Data Management. Giovanni Lamanna (LAPP) coordonne le projet Data Management au niveau CTA. Karl Kosack (IRFU) est coordinateur du lot Pipeline et mène de front avec des collaborateurs français et internationaux le design et le prototypage des logiciels. Trois laboratoires français travaillent aujourd'hui sur ce lot (LAPP, IRFU, LUPM) avec la volonté de l'APC, du CENBG et du LPNHE de rejoindre cette activité. Jürgen Knödseder (IRAP) est coordinateur du lot Observer Access et a initié avec son laboratoire le développement des Science Tools ; les Science Tools sont aujourd'hui développés sous sa maîtrise d'œuvre comme un développement collaboratif, essentiellement avec des partenaires étrangers. Pour la phase de construction, l'APC, le CENBG, le LPNHE, le LUTH et l'IRFU souhaitent se joindre à l'activité. L'équipe du LUTH travaille également sur un prototype du système de distribution des données, tandis que l'équipe de l'APC travaille sur un prototype du système de gestion des propositions.

Nadine Neyroud (LAPP) est coordinatrice du lot IC Infrastructure et joue un rôle central dans la définition du "CTA computing model". Le LUPM travaille depuis plusieurs années sur la gestion des ressources pour un calcul distribué, en utilisant le système DIRAC. De plus, le Centre de Calcul de l'IN2P3 fournit déjà depuis deux ans une plateforme collaborative de développement logiciel (dépôt de code, forge, intégration continue, contrôle de la qualité) pour toute la communauté CTA internationale et Luisa Arrabito (LUPM) coordonne depuis 2013 la production de données Monte-Carlo sur la grille EGI avec des ressources internationales de plus de 20 nœuds de grille et une participation importante des ressources informatiques françaises de GRIF, du LAPP, du CPPM et du Centre de Calcul. Les activités CTACG (CTA Computing Grid) initiées par le LAPP avec le soutien de l'IN2P3 en 2008,

représentent actuellement environ 126 Million de HS06 exécutés en 2016 (35% en France) et 2,8 Poctet de stockage pour CTA (environ 30% en France).

## Planning

La livraison des logiciels Pipeline est prévue pour mi-2018 afin d'assurer le traitement des données issues des premières télescopes sur site. Pour cette même raison, une première version des Science Tools et les logiciels nécessaires pour opérer le centre de calcul sont à livrer pour le programme "Early science" (2018 ou 2019). La livraison du système de gestion des propositions, de la diffusion des données et du support aux utilisateurs est prévu pour Q1-2021 sous l'hypothèse qu'un premier "Announcement of Opportunity" pour des observateurs est lancé en septembre 2021 avec un début du programme ouvert en 2022.

### e. Lidar (LUPM)

Le LUPM est responsable de la mise au point d'un lidar de type Raman pour le monitoring de l'atmosphère sur site, dans la continuation du travail réalisé avec un lidar élastique sur le site de HESS depuis bientôt dix ans.

Pour l'observation des rayons gamma de très haute énergie par technique Tcherenkov, l'atmosphère est le calorimètre du détecteur : sa composition influe directement sur le développement des cascades électromagnétiques et sur la quantité de lumière Tcherenkov produite puis transmise au sol. Les limites actuelles sur la connaissance de l'atmosphère lors des prises de données Tcherenkov sont responsables d'incertitudes systématiques de l'ordre de 20% sur les paramètres scientifiques reconstruits (flux, indice spectral). Les Lidars de type Raman permettent de déterminer avec une grande précision l'épaisseur et la composition moléculaire des couches d'aérosols présents dans l'atmosphère de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres d'altitude. Des mesures de type Raman rendront possibles la création de modèles d'atmosphère conformes aux prises de données Tcherenkov, avec pour objectif à la fois la réduction significative des incertitudes systématiques des analyses scientifiques de haut niveau à moins de 5%, et l'amélioration du cycle utile des télescopes via la récupération de lots de données qui seraient autrement écartés pour cause d'atmosphère non-standard.

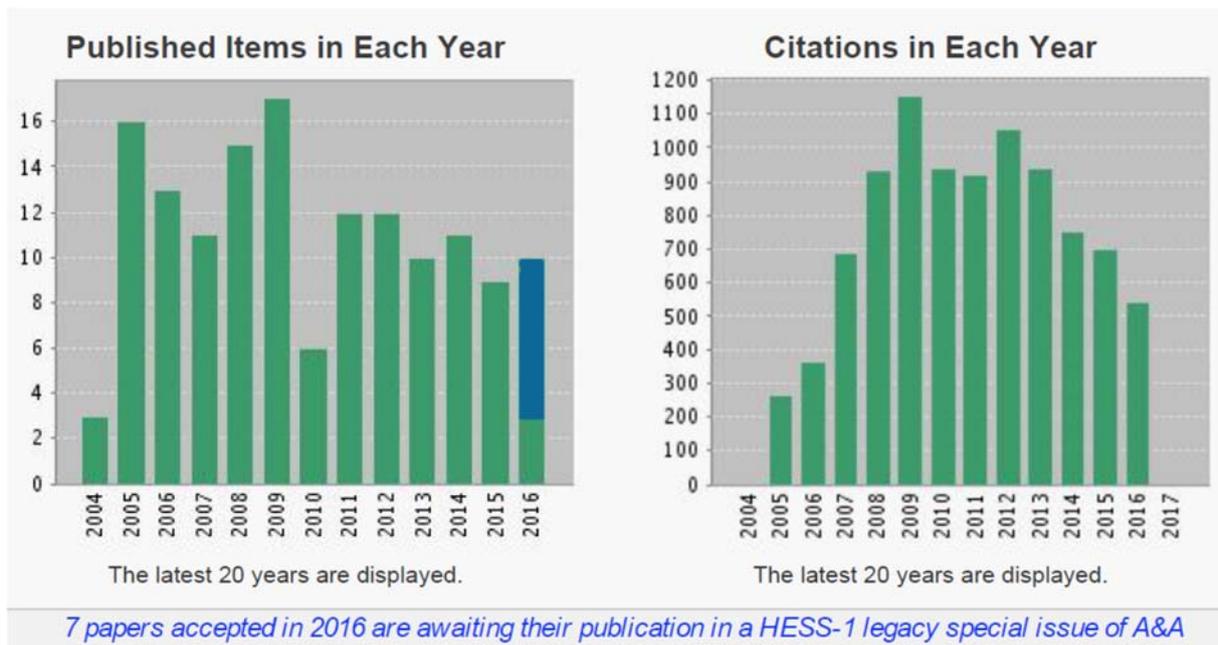
George Vasileiadis (LUPM) est le responsable technique de la partie française de ce projet auquel contribue aussi l'IPNO, et qui est réalisé en collaboration étroite avec l'Université Autonome de Barcelone (UAB). Le Lidar français est du point de vue matériel aujourd'hui quasiment complet : il reste cependant à concevoir et réaliser l'interface mécanique qui permettra à la fois le support du laser, son système d'alignement et la connexion par fibre optique du point focal du miroir au tube photo--multiplicateur permettant la lecture du signal. L'objectif affiché est de finaliser au plus tôt l'instrument afin de pouvoir faire les premiers tirs en conditions réelles dès le printemps 2017 à Montpellier même, puis de discuter avec nos collègues espagnoles de l'implantation du lidar sur le site de La Palma pour une phase de test en conditions réels dès 2018.

## 5. Conclusion

Alors que l'exploitation scientifique de Hess devrait se poursuivre jusqu'à l'horizon 2020 et bénéficier pour les années de fonctionnement restantes de la jeunesse des caméras de Hess1, l'observatoire CTA se met graduellement en place et en apparaît comme le successeur naturel. Les années 2012/2016 ont vu le développement des divers prototypes, le choix des sites et du design des télescopes, ainsi que la

structuration de la collaboration. La participation française à CTA est importante (environ 18% de la collaboration) et bien structurée. A l'IN2P3, trois projets techniques sont clairement identifiés : le développement de la nectarcam, projet phare fédérant la quasi-totalité des laboratoires de l'in2p3 participant, la conception des arches et du système de pilotage des LST, et l'implication très importante dans le data management. Il n'y a pas de problème majeur dans les développements techniques menés dans nos laboratoires à ce jour, et les différents projets sont en cours de passage de la phase de prototypage à celle de pré-production. Les physiciens de la communauté gamma française sont également actifs au sein d'une majorité des programmes scientifiques clés du consortium et, dans le prolongement de leurs activités d'analyse sur HESS, possèdent une forte visibilité sur les thématiques Galactiques, extragalactiques et physique fondamentale. Si les financements attendus se concrétisent, tout est donc en place pour une participation couronnée de succès à la construction et à l'exploitation scientifique de l'observatoire CTA.

## Annexe : publications de H.E.S.S.



La figure ci-dessus, extraite avec web of science, montre le nombre de publications de H.E.S.S. chaque année depuis les premières publications en 2004 (en éliminant les papiers techniques signés par un sous-ensemble de la collaboration ainsi que quelques errata). La distribution des 140 publications répertoriées en fonction des revues est donnée dans la table ci-dessous :

Revue	Nombre de publications	proportion
ASTRONOMY & ASTROPHYSICS	92	65,7%
ASTROPHYSICAL JOURNAL	12	8,6%
PHYSICAL REVIEW LETTERS	8	5,7%
MNRAS	6	4,3%
SCIENCE	6	4,3%
PHYSICAL REVIEW D	5	3,6%
ASTROPARTICLE PHYSICS	4	2,9%
NATURE	4	2,9%
ASTROPHYS. JOURNAL LETT.	3	2,1%
<b>TOTAL</b>	<b>140</b>	

Liste des 10 articles de HESS publiés dans Nature ou science, du plus récent au plus ancien :

**Acceleration of petaelectronvolt protons in the Galactic Centre,**

HESS Collaboration, NATURE Volume: 531 Issue: 7595 Pages: 476-+ Published: MAR 24 2016

**The exceptionally powerful TeV gamma-ray emitters in the Large Magellanic Cloud,**

HESS Collaboration, SCIENCE Volume: 347 Issue: 6220 Pages: 406-412 Published: JAN 23 2015

**Detection of Gamma Rays from a Starburst Galaxy**

HESS Collaboration, SCIENCE Volume: 326 Issue: 5956 Pages: 1080-1082, Published: NOV 20 2009

## Radio Imaging of the Very-High-Energy gamma-Ray Emission Region in the Central Engine of a Radio Galaxy

Group Author(s): VERITAS Collaboration; VLBA 43 Ghz M87 Monitoring Team; HESS Collaboration; et al. SCIENCE Volume: 325 Issue: 5939 Pages: 444-448 Published: JUL 24 2009

## Fast variability of tera-electron volt gamma rays from the radio galaxy M87

By: Aharonian, F.; Akhperjanian, A. G.; Bazer-Bachi, A. R.; et al.  
SCIENCE Volume: 314 Issue: 5804 Pages: 1424-1427 Published: DEC 1 2006

## A low level of extragalactic background light as revealed by gamma-rays from blazars

By: Aharonian, F; Akhperjanian, AG; Bazer-Bachi, AR; et al.  
NATURE Volume: 440 Issue: 7087 Pages: 1018-1021

## Discovery of very-high-energy gamma-rays from the Galactic Centre ridge

By: Aharonian, F; Akhperjanian, AG; Bazer-Bachi, AR; et al.  
NATURE Volume: 439 Issue: 7077 Pages: 695-698 Published: FEB 9 2006

## Discovery of very high energy gamma rays associated with an X-ray binary

By: Aharonian, F; Akhperjanian, AG; Aye, KM; et al.  
SCIENCE Volume: 309 Issue: 5735 Pages: 746-749 Published: JUL 29 2005

## A new population of very high energy gamma-ray sources in the Milky Way

By: Aharonian, F; Akhperjanian, AG; Aye, KM; et al.  
SCIENCE Volume: 307 Issue: 5717 Pages: 1938-1942 Published: MAR 25 2005

## High-energy particle acceleration in the shell of a supernova remnant

By: Aharonian, FA; Akhperjanian, AG; Aye, KM; et al.  
NATURE Volume: 432 Issue: 7013 Pages: 75-77 Published: NOV 4 2004

### Liste des 10 articles de HESS les plus cités :

	2013	2014	2015	2016	2017	Total	Average Citations per Year
Use the checkboxes to remove individual items from this Citation Report or restrict to items published between 1900 and 2017 Go	938	750	700	546	0	9250	660.71
<input type="checkbox"/> 1. <b>The HESS survey of the inner galaxy in very high energy</b> By: Aharonian, F; Akhperjanian, AG; Bazer-Bachi, AR; et al. ASTROPHYSICAL JOURNAL Volume: 636 Issue: 2 Pages: 777-797 Part: 1 Published: JAN 10 2006	26	20	22	9	0	378	31.50
<input type="checkbox"/> 2. <b>Observations of the crab nebula with HESS</b> By: Aharonian, F.; Akhperjanian, A. G.; Bazer-Bachi, A. R.; et al. ASTRONOMY & ASTROPHYSICS Volume: 457 Issue: 3 Pages: 899-915 Published: OCT 2006	37	40	26	31	0	376	31.33
<input type="checkbox"/> 3. <b>A low level of extragalactic background light as revealed by gamma-rays from blazars</b> By: Aharonian, F; Akhperjanian, AG; Bazer-Bachi, AR; et al. NATURE Volume: 440 Issue: 7087 Pages: 1018-1021 Published: APR 20 2006	35	27	21	10	0	369	30.75
<input type="checkbox"/> 4. <b>Energy Spectrum of Cosmic-Ray Electrons at TeV Energies</b> By: Aharonian, F.; Akhperjanian, A. G.; Barres de Almeida, U.; et al. Group Author(s): H E S S Collaboration PHYSICAL REVIEW LETTERS Volume: 101 Issue: 26 Article Number: 261104 Published: DEC 31 2008	35	33	27	14	0	355	35.50

<input type="checkbox"/>	5.	<b>An exceptional very high energy gamma-ray flare of PKS 2155-304</b>	43	33	31	29	0	351	31.91
		By: Aharonian, F.; Akhperjanian, A. G.; Bazer-Bachi, A. R.; et al. ASTROPHYSICAL JOURNAL Volume: 664 Issue: 2 Pages: L71-L74 Part: 2 Published: AUG 1 2007							
<input type="checkbox"/>	6.	<b>High-energy particle acceleration in the shell of a supernova remnant</b>	24	18	16	9	0	325	23.21
		By: Aharonian, F.; Akhperjanian, AG; Aye, KM; et al. NATURE Volume: 432 Issue: 7013 Pages: 75-77 Published: NOV 4 2004							
<input type="checkbox"/>	7.	<b>Discovery of very-high-energy gamma-rays from the Galactic Centre ridge</b>	21	13	23	16	0	319	26.58
		By: Aharonian, F.; Akhperjanian, AG; Bazer-Bachi, AR; et al. NATURE Volume: 439 Issue: 7077 Pages: 695-698 Published: FEB 9 2006							
<input type="checkbox"/>	8.	<b>Probing the ATIC peak in the cosmic-ray electron spectrum with HESS</b>	38	33	23	11	0	255	28.33
		By: Aharonian, F.; Akhperjanian, A. G.; Anton, G.; et al. ASTRONOMY & ASTROPHYSICS Volume: 508 Issue: 2 Pages: 561-564 Published: DEC 2009							
<input type="checkbox"/>	9.	<b>Very high energy gamma rays from the direction of Sagittarius A</b>	9	5	13	8	0	251	17.93
		By: Aharonian, F.; Akhperjanian, AG; Aye, KM; et al. ASTRONOMY & ASTROPHYSICS Volume: 425 Issue: 1 Pages: L13-L17 Published: OCT 2004							
<input type="checkbox"/>	10.	<b>A new population of very high energy gamma-ray sources in the Milky Way</b>	11	8	6	4	0	231	17.77
		By: Aharonian, F.; Akhperjanian, AG; Aye, KM; et al. SCIENCE Volume: 307 Issue: 5717 Pages: 1938-1942 Published: MAR 25 2005							