

# L'Astronomie à l'horizon des années 2020-2030

---

Denis Mourard

Institut National des Sciences de l'Univers

Observatoire de la Côte d'Azur

Bases mathématiques pour l'instrumentation et le  
traitement du signal en astronomie

Nice, 1<sup>o</sup> juin 2015

Les grandes thématiques et les grands instruments en développement en Astronomie au cours de la (voire des) prochaine(s) décennie(s)

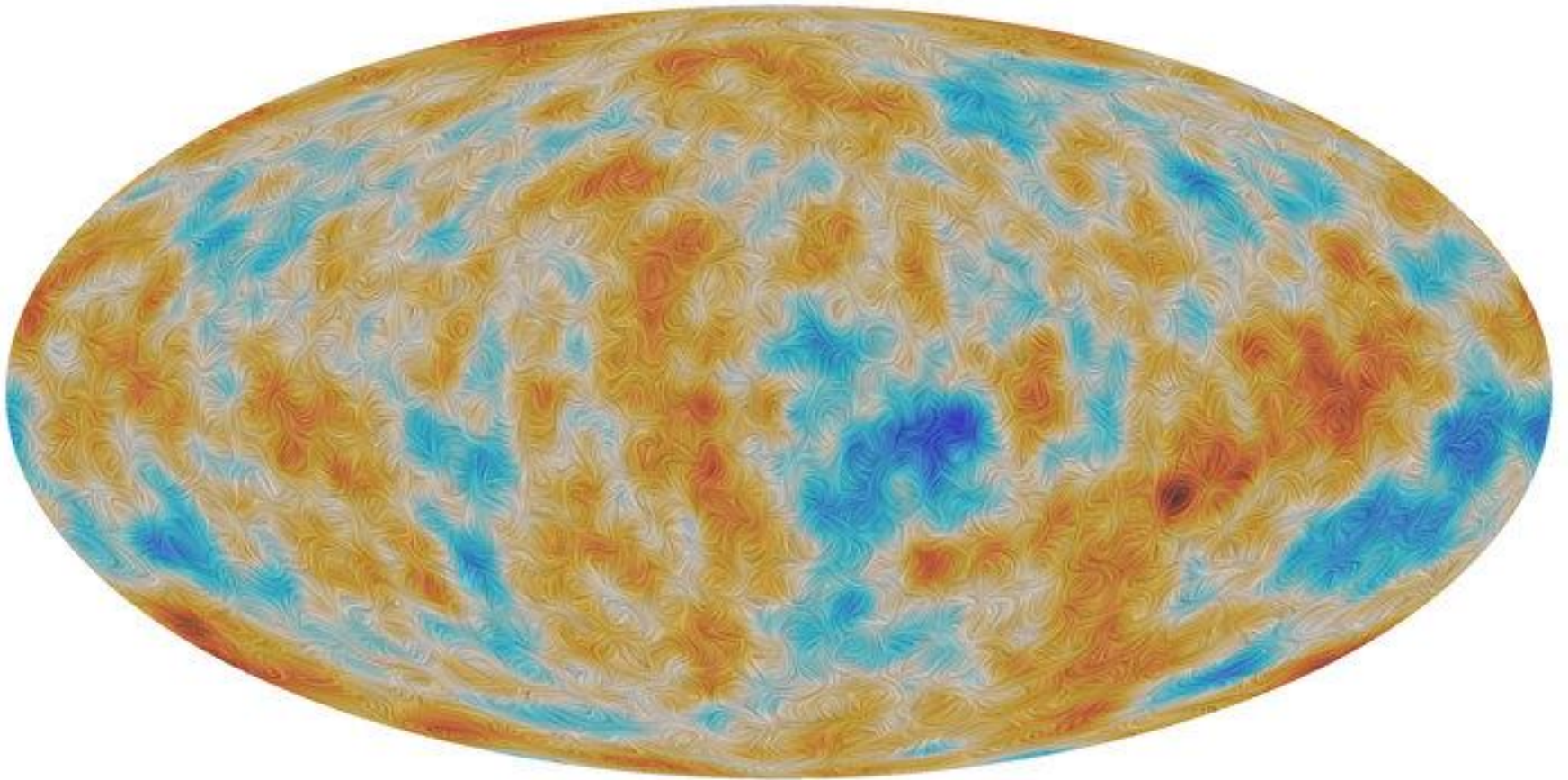
Panorama global de la science et des instruments de l'Astronomie de 2020 et au-delà



# Plan général

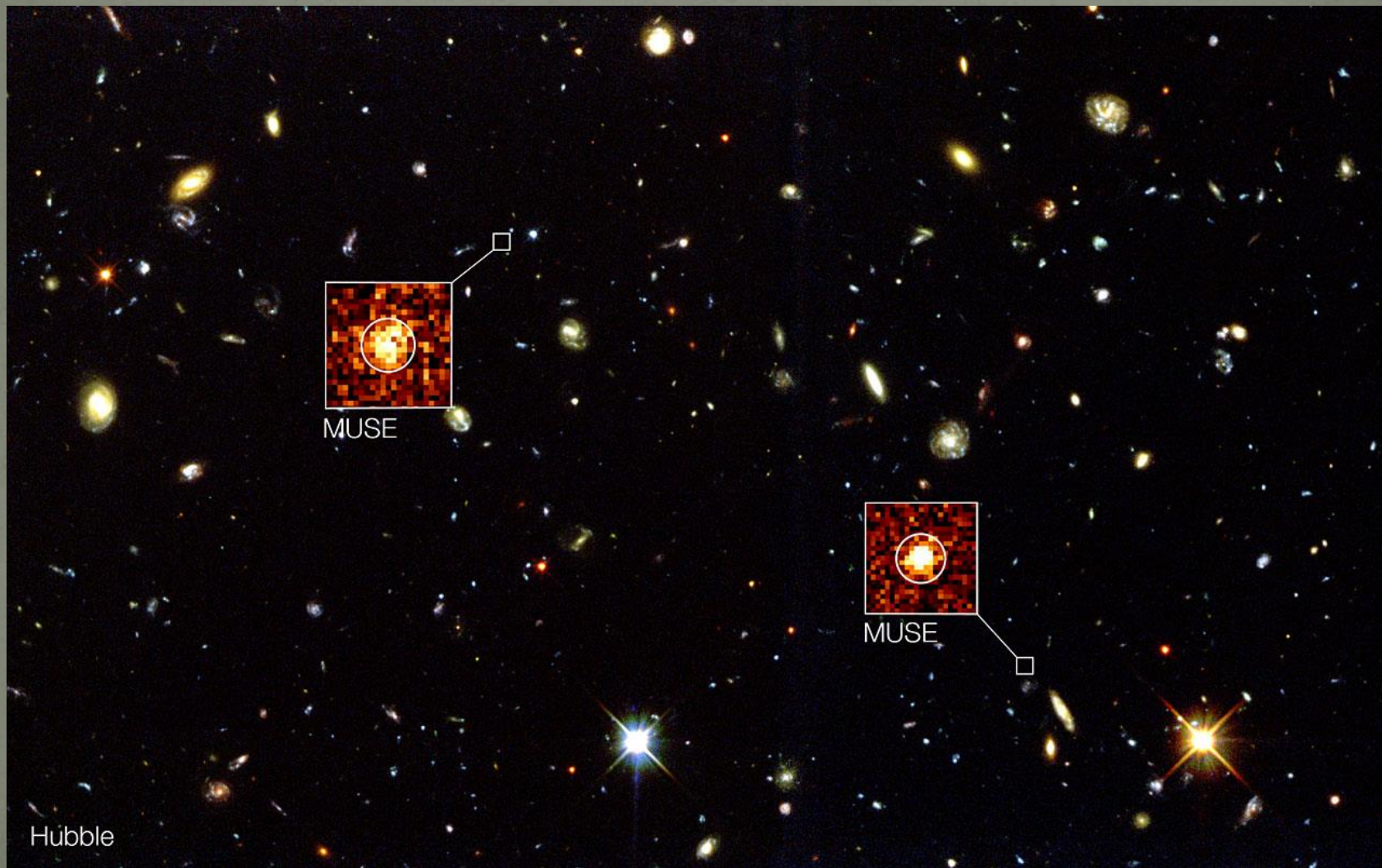
- Définition de l'astronomie
- Tour d'horizon des grandes questions
  - Au niveau français
  - Au niveau international
  - Les perspectives
- Les outils et méthodes de l'astronomie
  - Situation actuelle
  - Les perspectives
  - Les grands projets en cours
- Au-delà des perspectives, conclusion

# PLANCK CMB

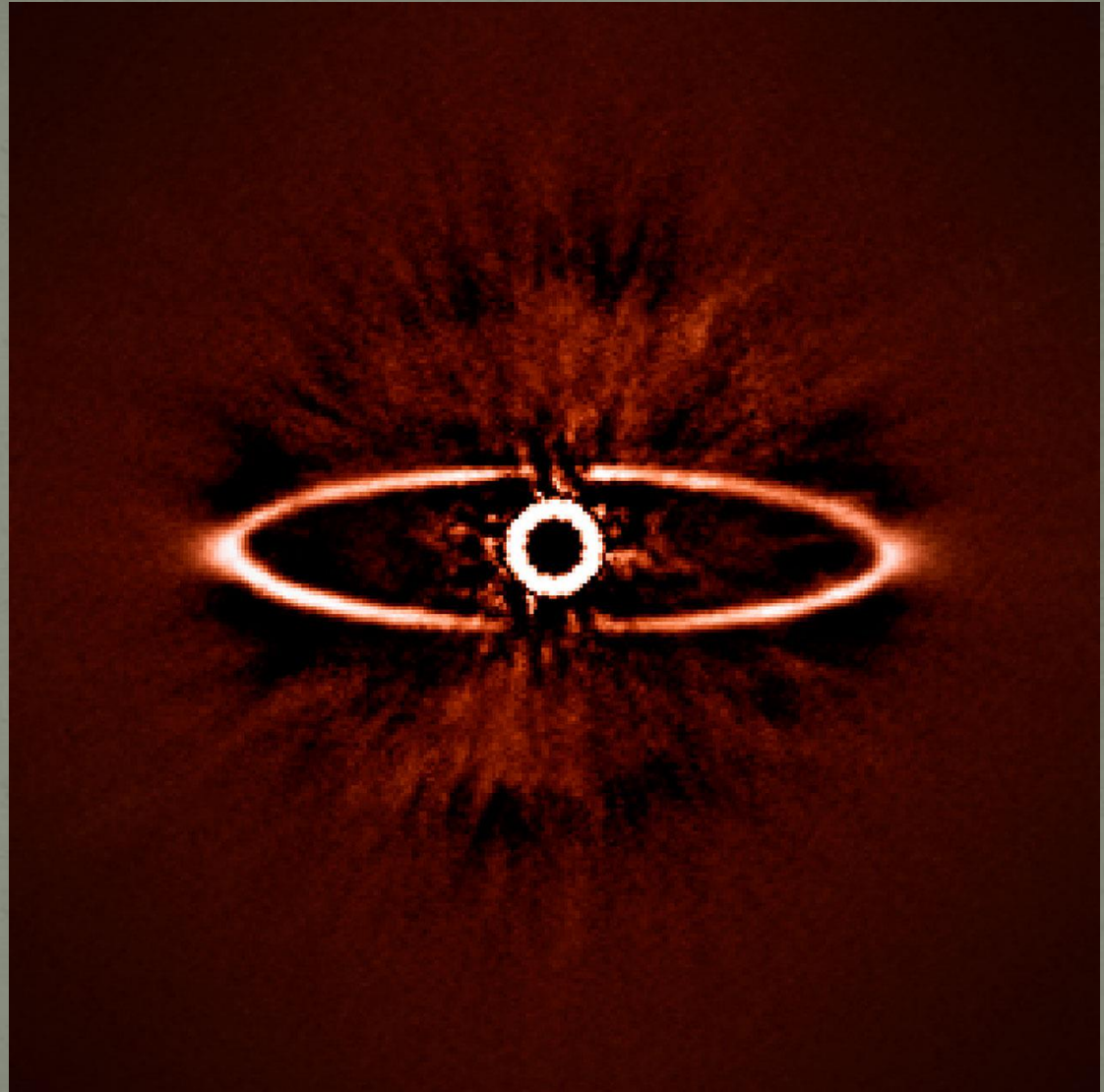




# MUSE

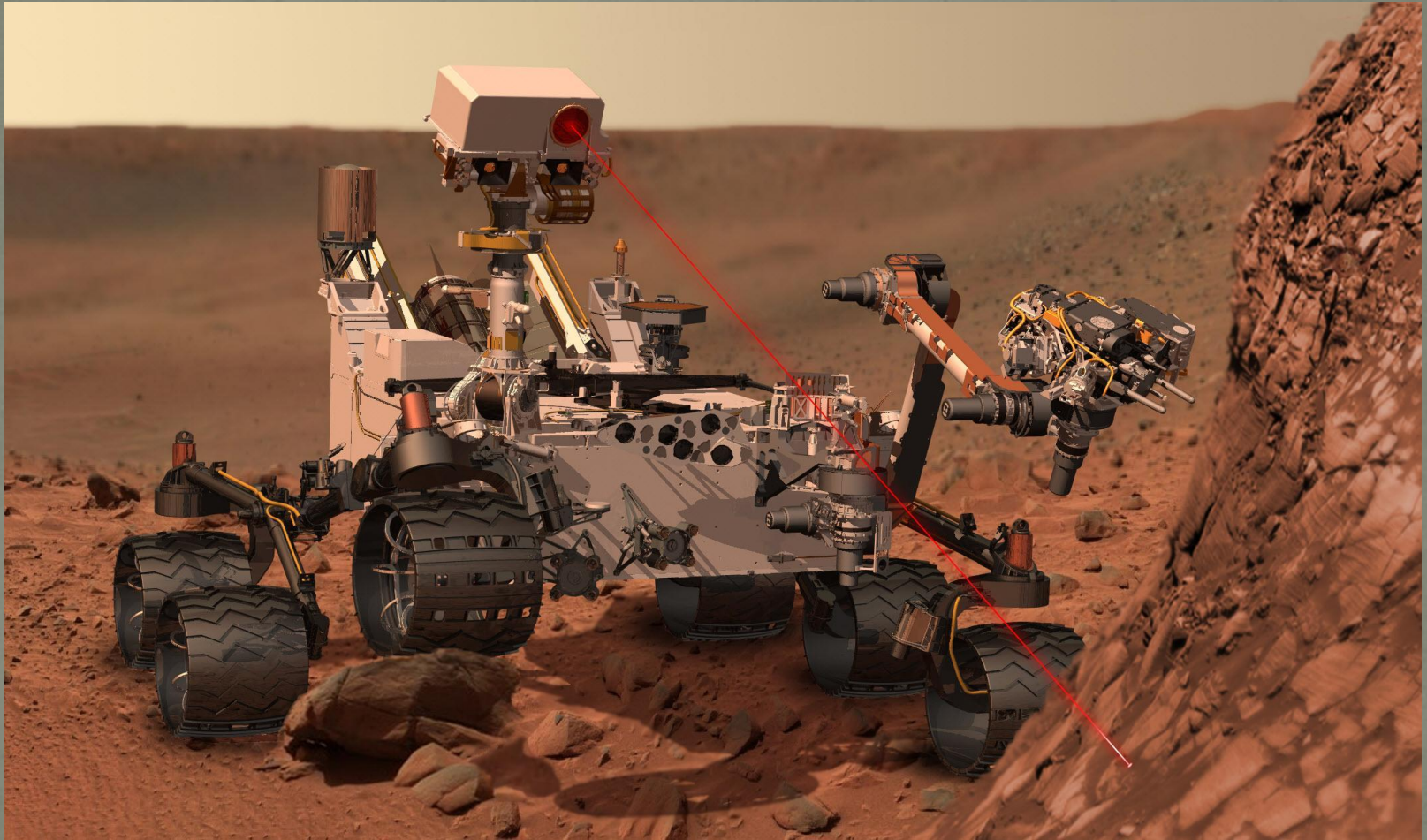


# SPHERE



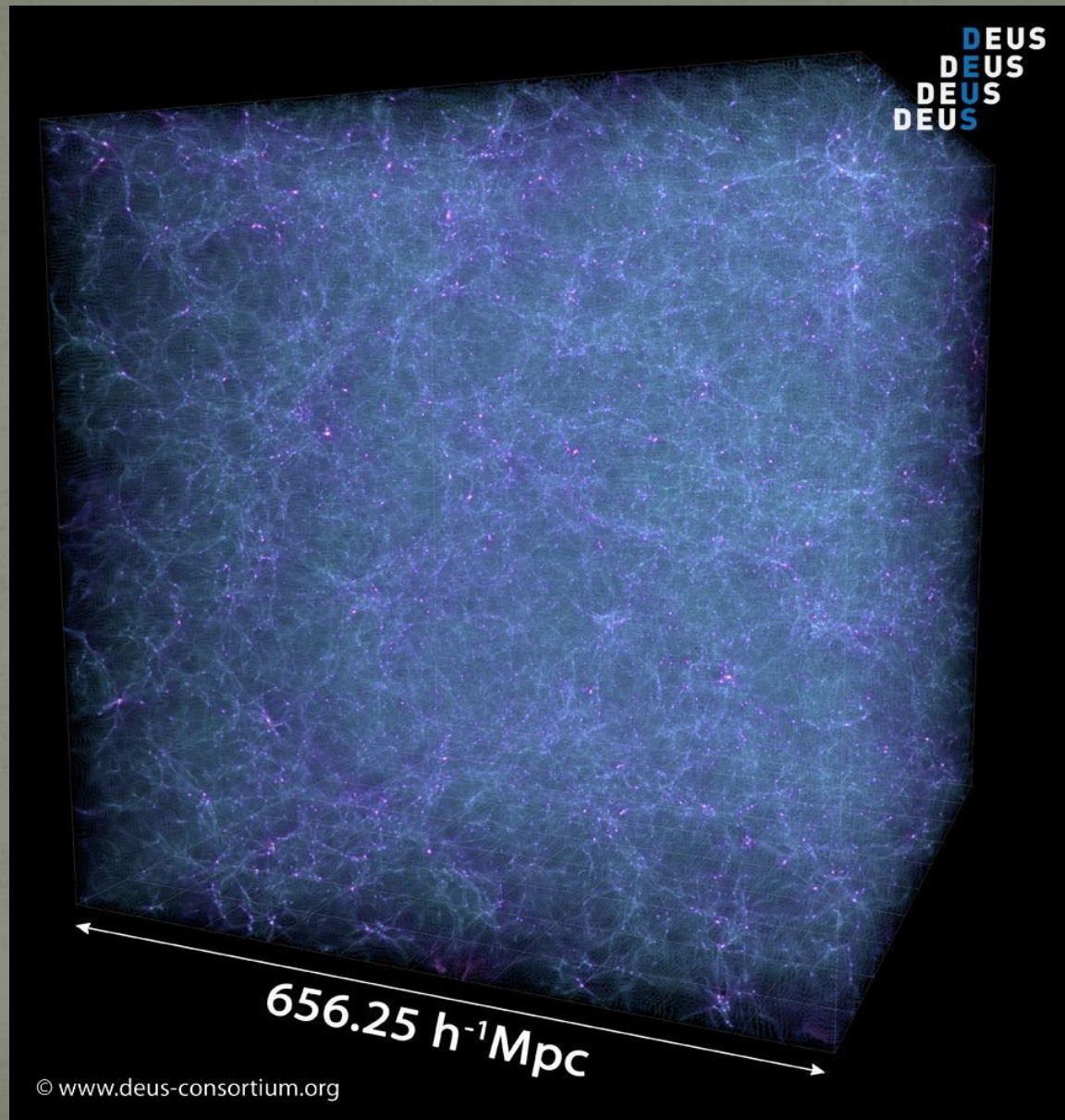


# CHEMCAM



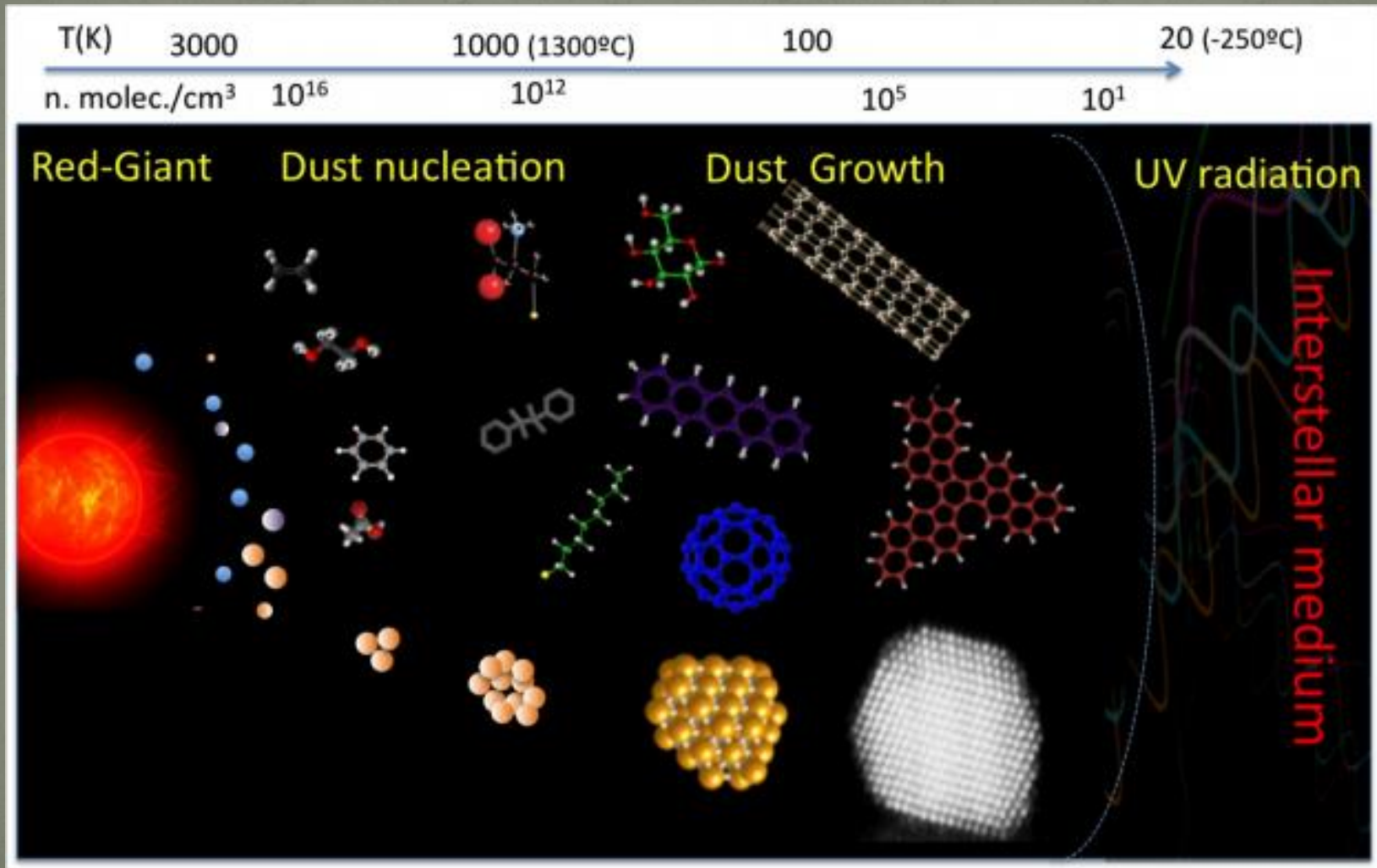


# DEUS





# NANOCOSMOS



# L'Astronomie selon le CNRS

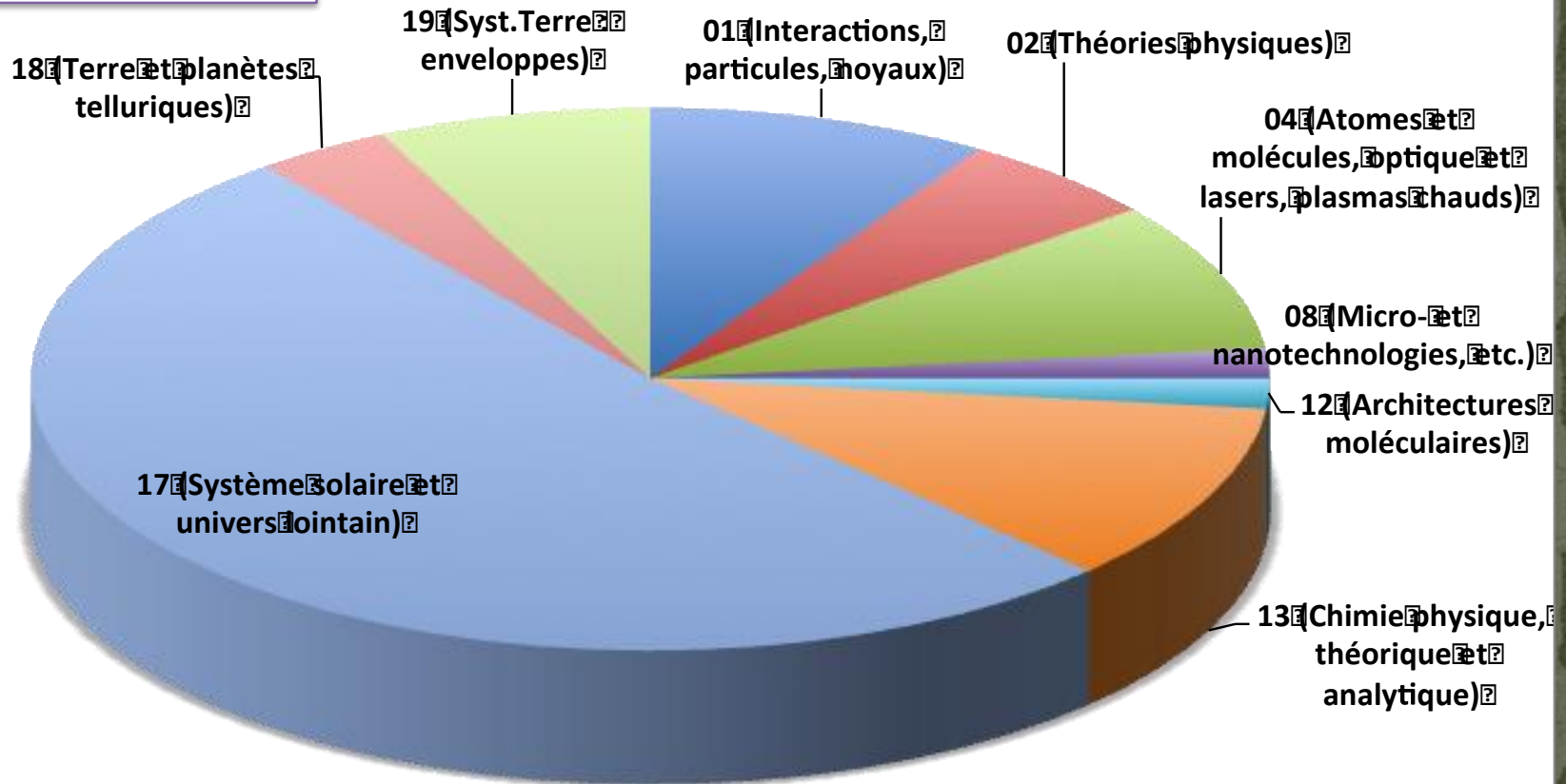
- Les grands thèmes de la S17: Système solaire et Univers lointain
  - Cosmologie, Univers primordial, origine et évolution des grandes structures de l'Univers et des galaxies
  - Astrophysique des hautes énergies, objets compacts, astroparticules, ondes gravitationnelles.
  - Physique et chimie des milieux interstellaires et circumstellaires
  - Origine, structure et évolution des étoiles et des systèmes planétaires, exoplanètes
  - Physique du soleil et de l'héliosphère, relations Soleil-Terre
  - Origine, évolution du système solaire, structure et dynamique de ses objets et de leurs enveloppes
  - Processus physiques en astrophysique
  - Systèmes de référence spatio-temporels
  - Instrumentation pour les grands observatoires au sol et dans l'espace
- Interdisciplinarité est une caractéristique forte de l'Astronomie



# Sections CNRS en interface

## Réponses sur

- 10 Laboratoires
- 18 Groupes de recherche
- 29 Personnes individuelles



# La prospective Européenne

- **ASTRONET Science Vision 2007 – 2014**  
[www.astronet.eu-org](http://www.astronet.eu-org)
- **Les 4 grandes questions**
  - Do we understand the extremes of the universe?
  - How do galaxies form and evolve?
  - What is the origin and fate of stars and planetary systems?
  - How do we fit in?



# Do we understand the extremes of the universe?

1. Measure the evolution of the dark-energy density with cosmological epoch, to search for deviations from a cosmological constant;
2. Test for a consistent picture of dark matter and dark energy using independent and complementary probes, thus either verifying General Relativity or establishing the need for a replacement theory;
3. Measure the polarization of the cosmic microwave background at scales of a few degrees, to search for the signature of relic gravitational waves;
4. Directly detect astrophysically-generated gravitational waves to measure strong-gravity effects, in particular arising from black-hole coalescence;
5. Make direct studies of regions near the event horizon of supermassive black holes in galactic nuclei, to test strong gravity and to understand how large-scale relativistic jets are launched.
6. Understand the astrophysics of compact objects and their progenitors, particularly the functioning of the supernova explosion and gamma-ray burst mechanisms;
7. Understand the origin and acceleration mechanism of cosmic rays and neutrinos, especially at the highest energies.

# How do galaxies form and evolve?

- Map the growth of matter density fluctuations in the early Universe, both during and after the Dark Ages;
- Detect the first stars, black holes, galaxies, gamma-ray bursts and supernovae, and thus establish the nature of the objects that reionized the Universe and discern the first seeds of galaxies; trace the reionization history of the Universe through coordinated observations of the IGM (in absorption and emission), the highest redshift galaxies and quasars;
- Determine the evolution of the galaxy cluster mass function and constrain the equation of state of the dark energy;
- Make an inventory of the metal content of the Universe over cosmic time, and connect its evolution to detailed models of star formation, and the subsequent metal production and ejection from galaxies by superwinds;
- Measure the metallicity of the warm-hot phase of the intergalactic medium in the local Universe and its contribution to the baryonic census;
- Measure the build up of gas, dust, stars, metals, magnetic fields, masses of galaxies and thus the evolution of the Hubble sequence with cosmic time and the connections between black hole and galaxy growth;
- Obtain a comprehensive census of the orbits, ages, and compositions of stars in our own Galaxy and the nearest resolved galaxies, aiming to produce a complete history of their early formation and subsequent evolution. This work will draw on current facilities (including those under construction) but will require new facilities covering the wavelength range from the low frequency radio to the gamma-rays.



# What is the origin and evolution of stars and planets?

- 1. Determine the initial physical conditions of star formation, including the evolution of molecular clouds, and the subsequent development of structures in general, and the formation and mass distributions of single, binary or multiple stellar systems and stellar clusters;
- 2. Unveil the mysteries of stellar structure and evolution, also probing stellar interiors;
- 3. Understand the life cycle of matter from the interstellar medium to the processing in stars and back into the diffuse medium during the last stages of stellar evolution;
- 4. Determine the process of planet formation, aiming for a full understanding of the timeline for the formation of planets and the chemical evolution of the material that will eventually end up in exo-planets;
- 5. Explore the diversity of exo-planets in a wide mass range from giants to Earth-like, to characterise the population of planetary systems in relation with the characteristics of their host stars;
- 6. Determine the frequency of Earth-like planets in habitable zones and push towards their direct imaging with the long-term goal of spectroscopic characterization including the detection of biomarkers in their atmospheres.

# How do we fit in?

- Utilise the vicinity of Solar System plasmas, in (i) the Sun, (ii) the heliosphere and (iii) planetary environments, to develop a detailed understanding of physical processes which apply to astrophysical phenomena;
- Develop a unified picture of the Sun and the heliosphere including the planetary environments, including a systems-level view of energy flow from the Sun to the Earth;
- Understand the underlying mechanisms for Solar variability and transient activity, the subsequent variability in the heliosphere and the resulting impacts on the Earth and other planetary environments;
- Understand the role of turbulence and magnetic fields in the evolution of the primordial nebula, the mechanism of particle growth, and the elemental and isotopic ratios in this nebula, and in Solar System bodies;
- Determine the dynamical history of planets, the composition of trans-Neptunian objects and asteroids, and the rate of large potential impactors in the near- Earth asteroid population; search for complex molecules in comets and study the link between comets and interstellar matter;
- Constrain the models of internal structure of planets and satellites and the origin of their internal heat, the surface-atmosphere interactions and the recycling mechanisms in the terrestrial planets and outer satellites;
- Understand the origin and evolution of Titan's atmosphere, searches for liquid water at the surface and subsurface of Mars, and for liquid water oceans below the surface of Europa and other outer satellites. Solar System research requires a wide range of complementing facilities which cover the full electromagnetic spectrum and probe a variety of space environments and planetary surfaces. These facilities are combined into groups of similar characteristics in this list.



# Les exercices de prospective

- Traditionnels en France AA depuis 30 ans
- En place au niveau européen depuis 10 ans
- Efforts de coordination au niveau mondial (ex. ALMA, programmes spatiaux): présence dans les US-DS, et récent forum mondial (EU, US, EAO) en cours de mise en place.
- We had the responsibility to **make the tough choices** for a world-class program under each of these scenarios, which we have done. At the same time, we felt the responsibility to **aspire to an even bolder future**. These are not contradictory responsibilities: an annual budget is a balance sheet, but **investment in fundamental research is a powerful expression that our culture and economy have greater potential in the long run**. Our society's capacity to grow is limited only by our **collective imagination and resolve to make long-term investments that can lead to fundamental, game-changing discoveries**, even in the context of **constrained budgets**.

# Est-ce bien raisonnable?

- Enjeux de la recherche pour la société:
  - Alimentation, eau
  - Energie durable, ressources naturelles
  - Santé, risques aléas
  - Qualité de vie
- Une place pour la recherche non finalisée, académique
  - Progrès de la connaissance
  - Patrimoine culturel
  - Développement de l'innovation



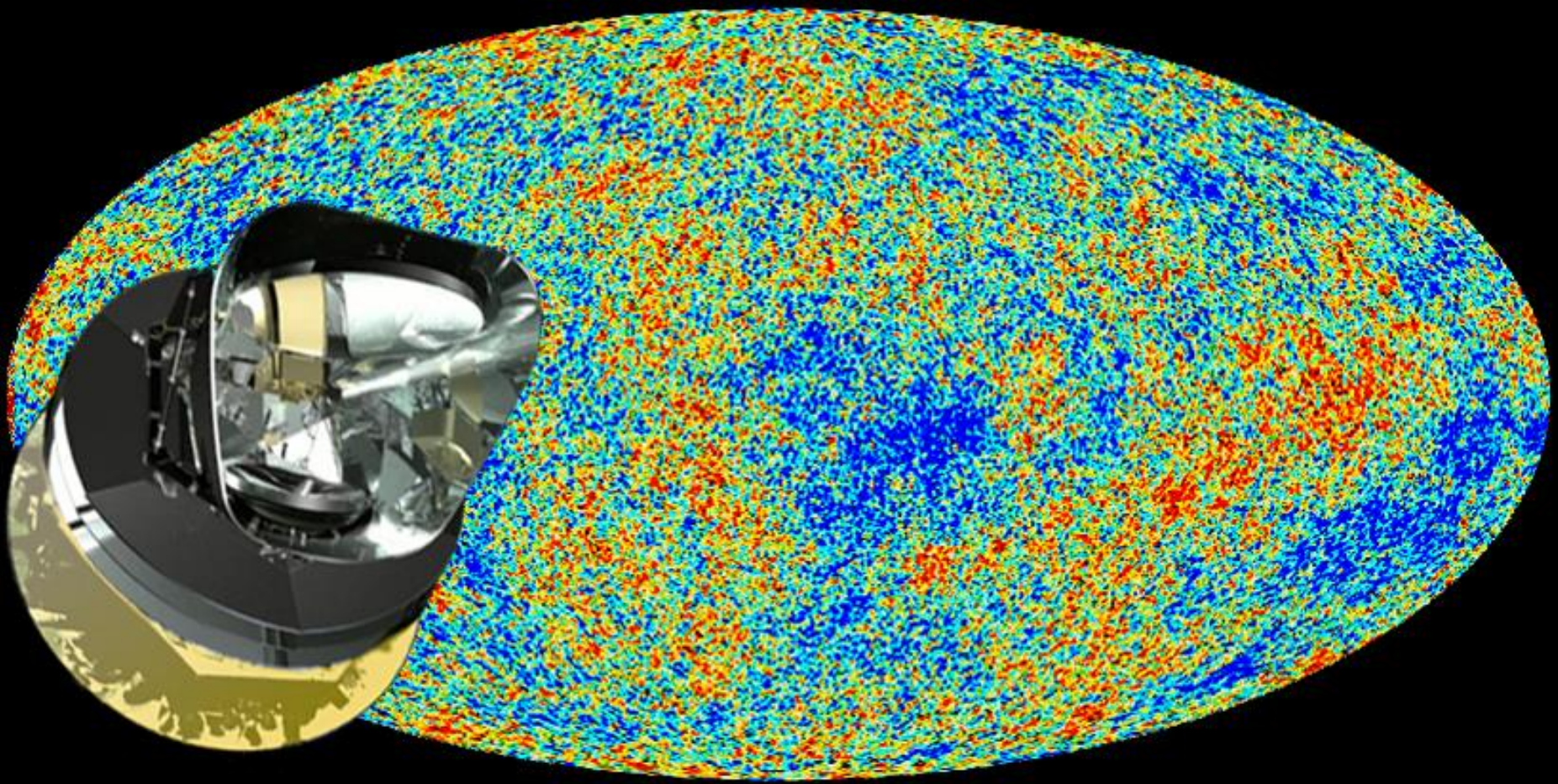
# Pavage de la discipline

- PNCG (Cosmologie & Galaxies)
- PNHE (Hautes Energies)
- PCMI (Chimie du Milieu Interstellaire)
- PNPS (Physique Stellaire)
- PNP (Planétologie)
- PNST (Soleil-Terre)
- AS GRAM (Gravitation Références Astronomie Métrologie)



# Fait saillant du PNCG

Avancées sur la caractérisation du modèle cosmologique avec le satellite Planck





# Grandes questions du PNCG



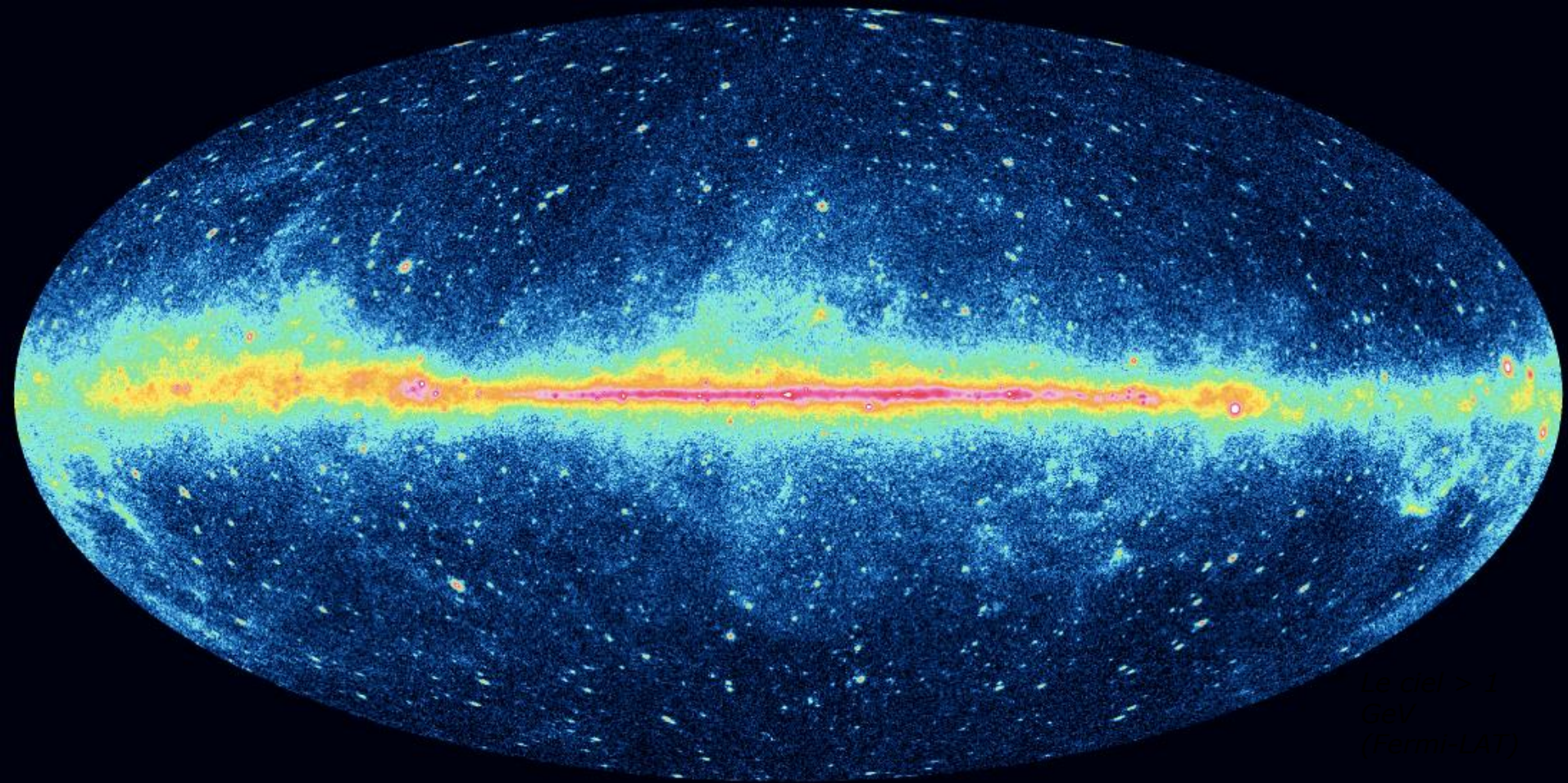
- Dans quel Univers vivons-nous?
- Quelle est l'histoire cosmique des baryons?
- Quels processus physiques dominant l'évolution des galaxies?
- Comment les galaxies du Groupe Local se sont-elles formées?



# Fait saillant du PNHE

## Moisson de données avec le satellite gamma FERMI

- forte implication dans catalogues (catalogue 2FGL : publication astro de 2012 la plus citée)
- impact majeur sur tout le domaine PNHE (pulsars, galaxies, MIS, AGN, sursauts gamma, novae, matière noire)





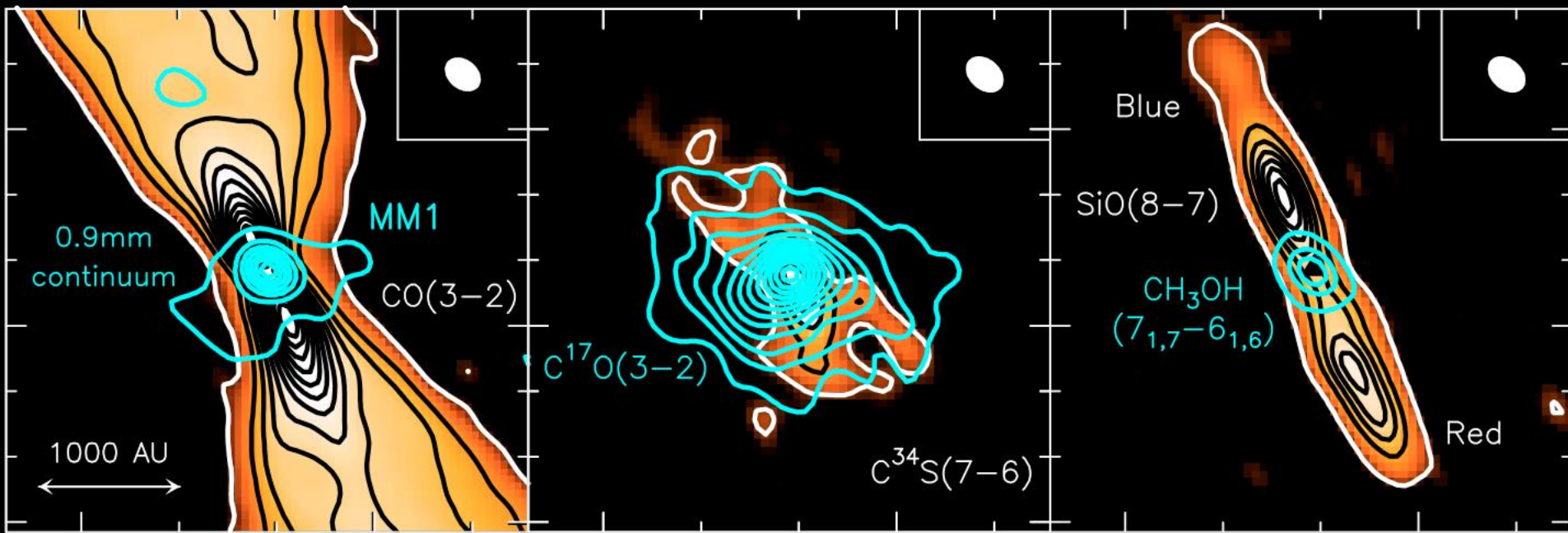
# Grandes questions du PNHE



- Quelle est la nature de la matière noire ?
- Quelle est l'influence des objets compacts sur leur environnement ?
- Comment explosent les astres ?
- Quelle est la nature, l'origine et le rôle des particules de haute à ultra-haute énergie ?
- Quel ciel nous révélera l'astronomie des ondes gravitationnelles et des neutrinos ?

# Fait saillant de PCMI

Nouvelles contraintes astrochimiques sur la dynamique de la formation stellaire (ALMA)



*Observations ALMA Cycle 0 de la protoétoile HH212, où chaque molécule trace une composante différente: flot bipolaire, jet, enveloppe, disque et «hot corino» (adapté de Codella, Cabrit et al. 2014, sous presse)*



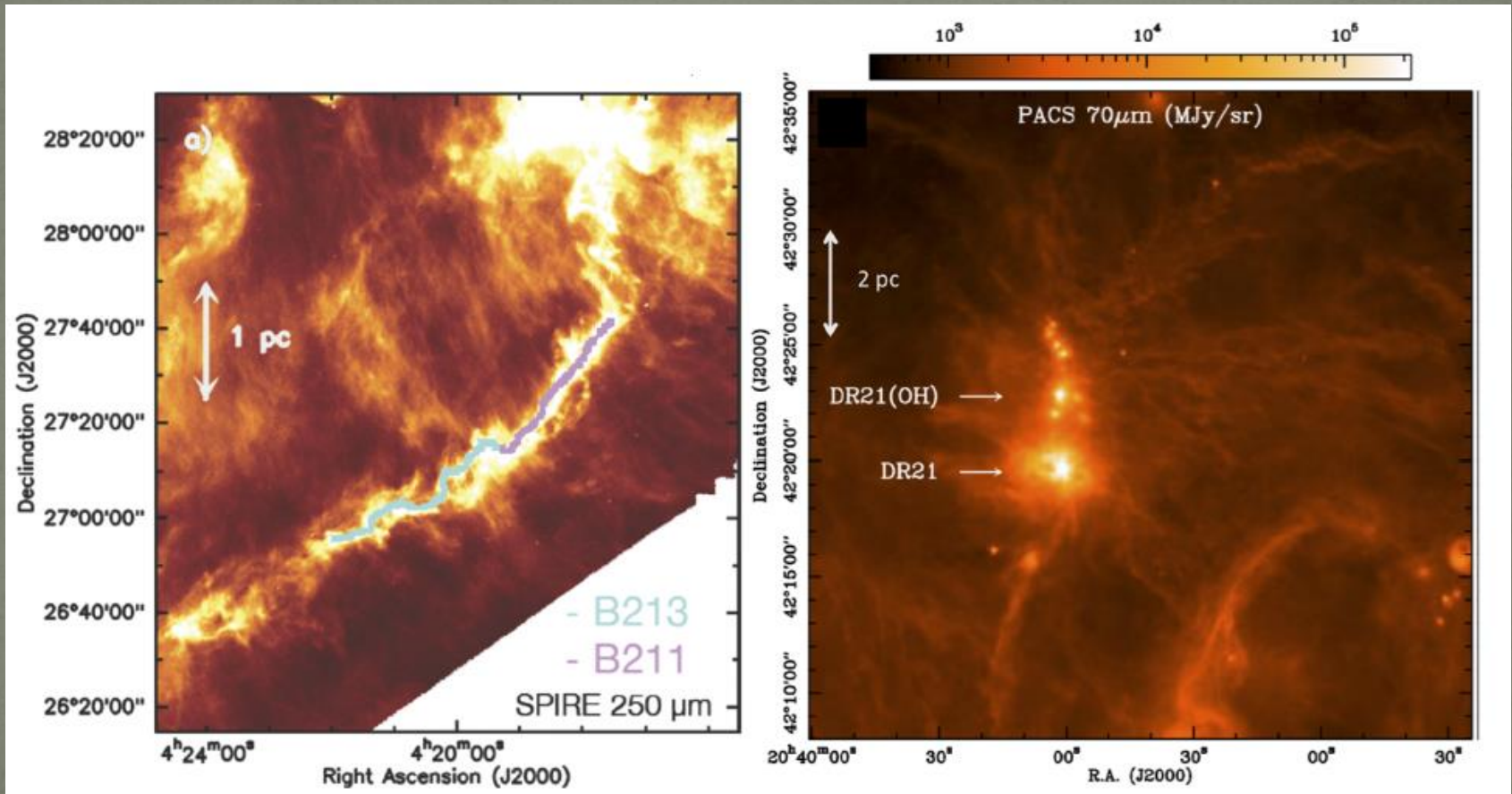
# Grandes questions de PCMI



- Quel est le moteur du cycle de la matière dans les galaxies ?
- Comment se forment les étoiles et les planètes ?
- Comment se forment les planétésimaux dans les disques protoplanétaires?
- Quelle est l'origine des molécules organiques complexes dans les régions de formation stellaire ?

# Fait saillant du PNPS

La genèse filamentaire et dynamique des étoiles et des amas stellaires  
(Herschel)





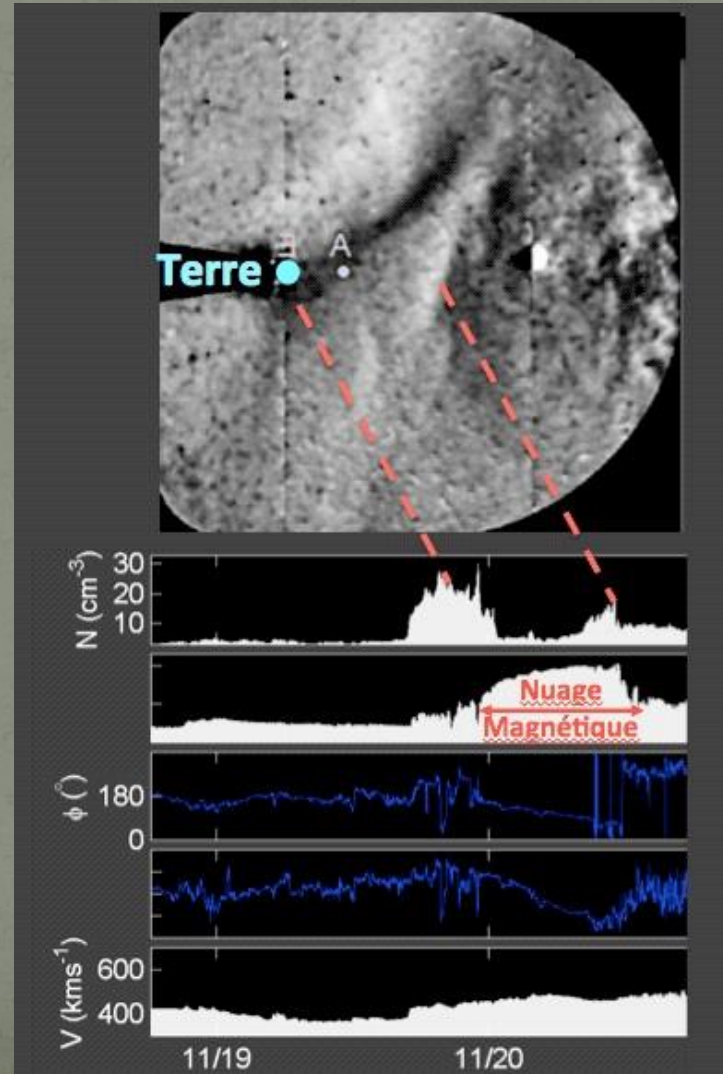
# Grandes questions



- Problème de la formation des étoiles :  
IMF (*origine des étoiles les plus massives*)  
Distinction étoile-planète (*limite planète - naine brune*)
- Evolution stellaire « non standard » :  
Processus de transport et d'extraction du moment cinétique  
(*astérosismologie*)  
Mécanismes de perte de masse  
Génération du champ magnétique et influence sur l'évolution stellaire  
Stades ultimes (*binaires X, supernovae, étoiles à neutrons, trous noirs*)
- Evolution stellaire dans le contexte du système étoiles-planètes  
(*grande diversité de configurations étoiles-planètes avec les nombreuses exoplanètes découvertes*)

# Fait saillant du PNST

Les éjections de matière provenant du Soleil sont structurées par un champ magnétique torsadé très intense (Stéréo)





# Grandes questions du PNST

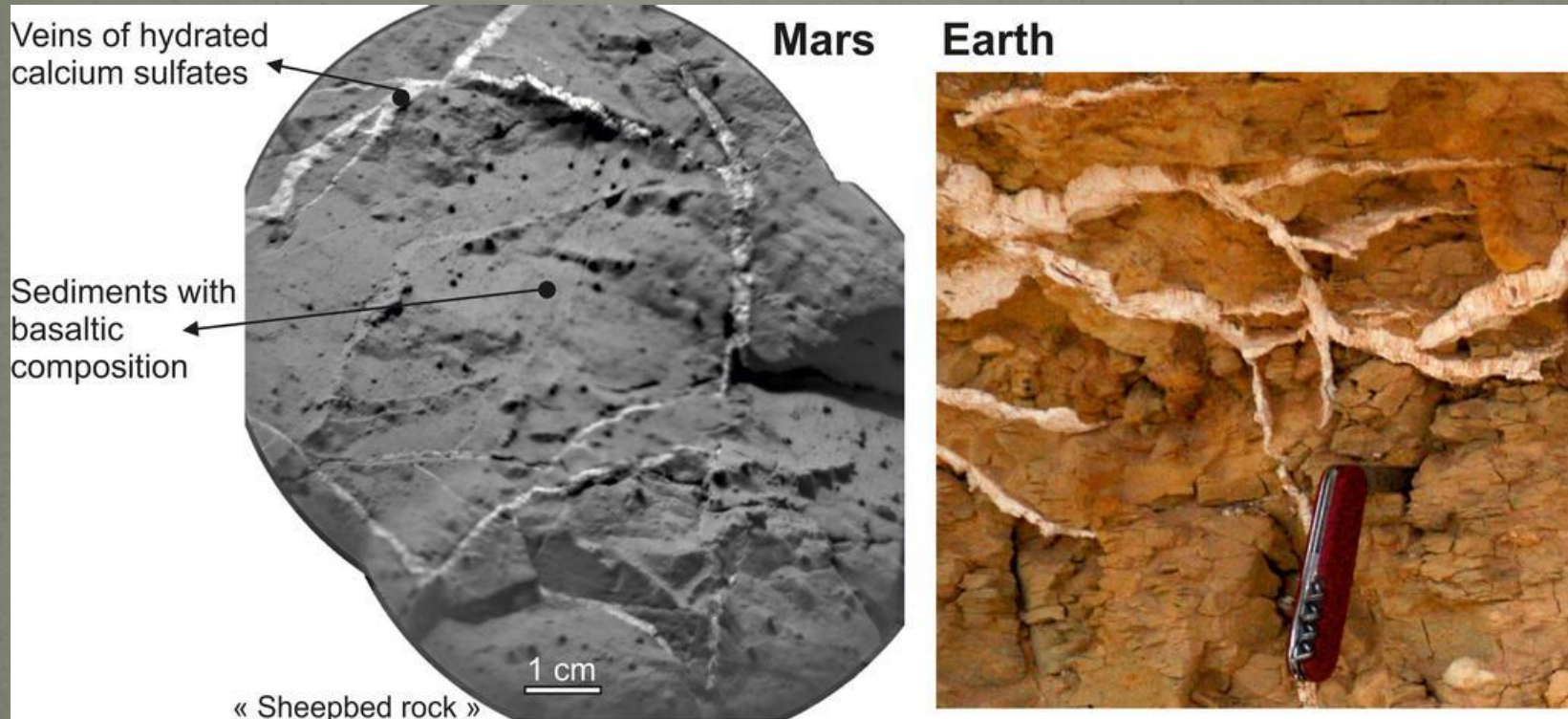
*Elles portent naturellement sur les mécanismes fondamentaux dans les plasmas astrophysiques*



- Génération et transport du champ magnétique du Soleil
- Couplage entre différentes régions de plasma
- Processus impulsifs et éruptifs de conversion d'énergie et du transfert d'énergie aux différentes échelles, caractérisation de la turbulence et des processus d'accélération de particules à de hautes énergies
- Effet du vent et de l'activité solaires sur l'environnement "plasma" de la Terre (magnétosphère, ionosphère) et celui des planètes
- Couplages de différents environnements "plasma" entre eux et avec l'atmosphère neutre
- Interaction entre héliosphère et milieu interstellaire

# Fait saillant du PNP

Analyse de la chimie du sol martien par Chemcam sur Curiosity  
(sédiments fluviaux et lacustres)





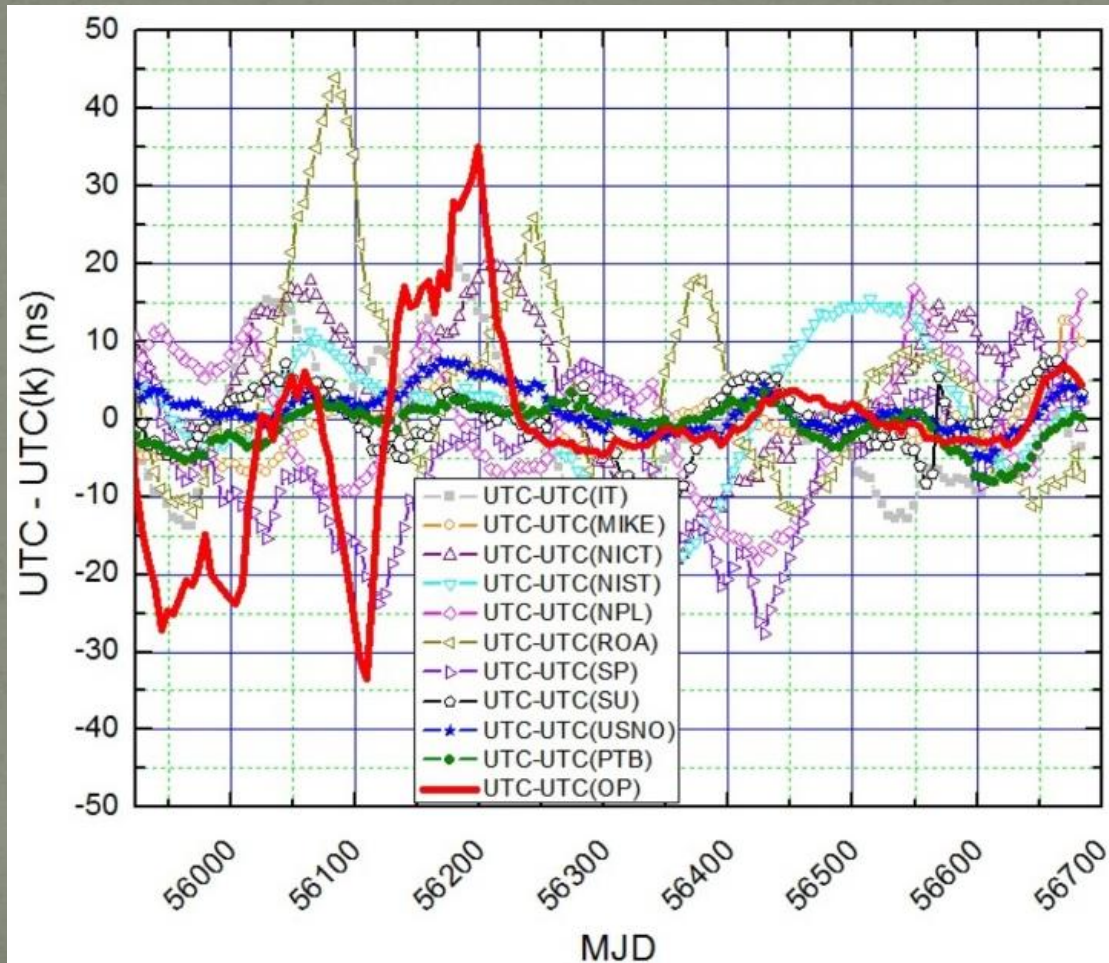
# Grandes questions du PNP



- Comprendre l'origine des systèmes planétaires  
*(Formation des premiers planétésimaux, continuum astéroïdes primitifs – comètes, formation des noyaux des planètes géantes, formations des atmosphères des planètes telluriques, diversité des systèmes planétaires)*
- Comprendre la structure et l'évolution des corps planétaires  
*(Processus physiques et chimiques, fonctionnement des magnétosphères, eau sur Mars, volcanisme de Vénus, évolutions comparées)*
- Quelles sont les conditions favorables à l'émergence de la vie ?  
*(origine de la matière organique, environnement passé et chimie prébiotique sur les planètes telluriques, environnements propices à la vie actuellement dans le système solaire comme les océans sub-surface des satellites glacés, exoplanètes habitables)*

# Fait saillant de GRAM

Haute précision atteinte par une fontaine atomique du SYRTE depuis juillet 2013 qui contribue au pilotage du Temps Universel Coordonné (UTC)





# Grandes questions de GRAM



- L'hypothèse d'équivalence d'Einstein est elle un principe exact de la physique ?
- La relativité générale est elle la bonne théorie métrique de la gravitation ?
- Les lois de la gravitation sont elles vérifiées en champ fort ?
- Que verra-t-on en ouvrant la fenêtre sur l'Univers que sera l'observation directe des ondes gravitationnelles ?

# Qu'est ce que l'interdisciplinarité?

- Une thématique scientifique fédératrice mobilisant plusieurs outils scientifiques

Et/ou

- Une multiplicité d'applications scientifiques utilisant un nombre limité d'outils (techniques expérimentales, modélisations...)
- Ici : uniquement pour des applications liées à l'Astronomie  
- Astrophysique



# Thématiques interdisciplinaires

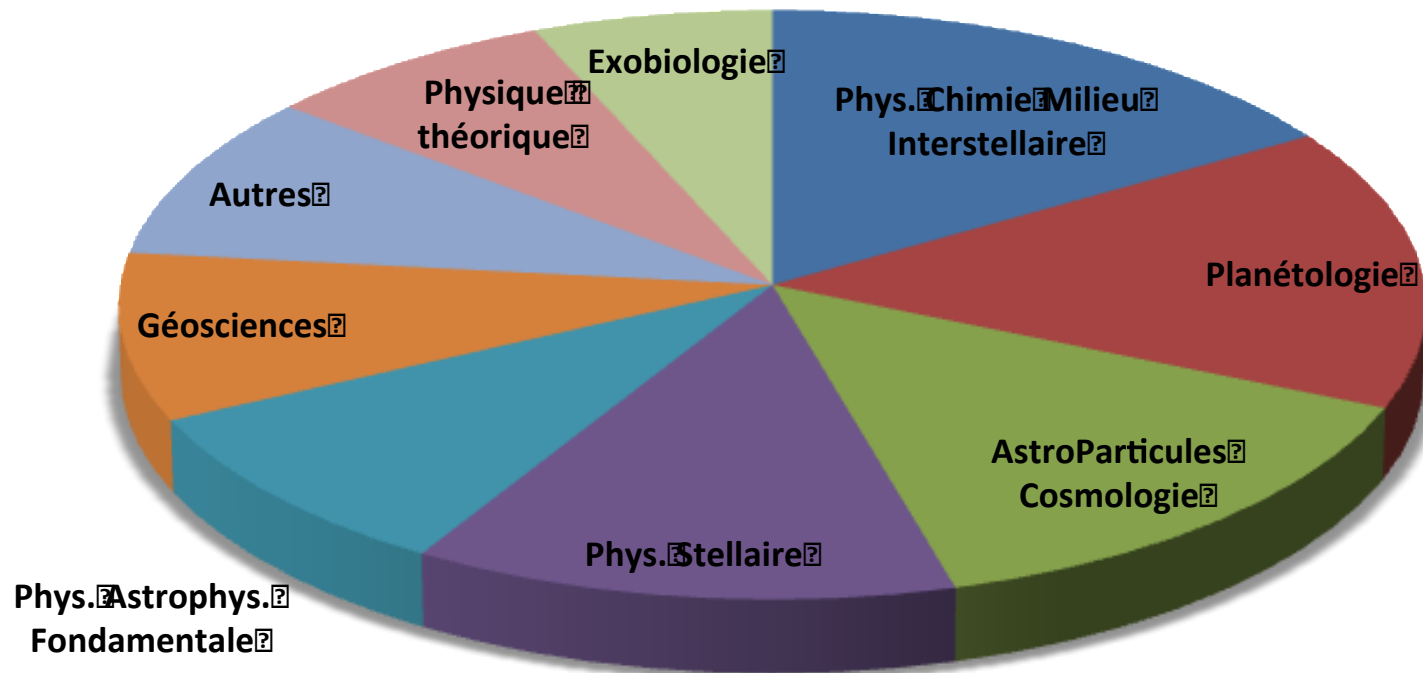
Réponses sur

- 10 laboratoires

- 18 groupes de recherche

- 29 personnes individuelles

## Répartition des activités



# Thématiques interdisciplinaires développées depuis plus de 10 ans

- Astroparticules et cosmologie
- Physico-chimie et processus astrophysiques
- Astrostatistique et astroinformatique
- Planétologie / sciences de la terre externe et interne
- Chimie théorique
- Exobiologie



# Consolidations de nouveaux domaines

- Physique fondamentale (type AS GRAM)
- Physique fondamentale / Plasmas / MHD : numérique et expériences
- Masses de données
- Instrumentation, composants
- Mathématiques appliquées
- Exoplanètes
- Météorologie de l'espace
- Climatologie/Sciences de l'environnement

# Du système solaire aux systèmes stellaires

**Thématiques naturellement aux interfaces (PNP, PNPS, PNST) - (INSU, INP, INC)**

- Processus de formation du système solaire
  - Dynamique interne et évolution des planètes
  - Physique stellaire
  - Habitabilité des planètes
- 
- ⇒ Interactions A&A, sciences de la Terre, géophysique, physique de l'atmosphère
  - ⇒ Analyse de données, théorie, expérimentations, cosmochimie
  - ⇒ Fort input des missions spatiales (Cassini/Huygens, Venus Express, Mars Express, MSL, MESSENGER, GRAIL, Dawn, Apollo...)



# Astrophysique et Univers primordial

- **La physico-chimie du milieu interstellaire (MIS):** (PCMI, PNPS) - (INP, INC, IN<sub>2</sub>P<sub>3</sub>, INSIS et INSU)
  - Phase gazeuse
  - Poussière interstellaire
  - Interactions gaz-grains
- **Astroparticules** (PNHE, PNCG, et PNPS + ex PID) (INSU, IN<sub>2</sub>P<sub>3</sub>, INP, CEA)
  - Phénomènes astrophysiques induits par des particules et noyaux standard ou exotiques à basse et haute énergie, ou par des environnements extrêmes
- **Cosmologie, matière noire, énergie noire** (PNCG – PEPS PTI) - (INSU, IN<sub>2</sub>P<sub>3</sub>, INP et CEA)
  - Structure à grande échelle de l'espace-temps (e.g. PLANCK : INSU, IN<sub>2</sub>P<sub>3</sub>, INP et CEA )

# Systemes de référence, mécanique céleste et spatiale

- **AS GRAM + PNP, PNHE et PNCG**
  - Géodésie spatiale
  - Systemes de référence spatio-temporels
  - Mécanique céleste et spatiale
  - Physique fondamentale notamment gravitationnelle
- **Métrologie temps-fréquence, atomes froids, ingénierie (INP, INSIS)**
- **Étude de la Terre (INSU/Terre Solide et INSU/Océan-Atmosphère)**
- **Ondes gravitationnelles, tests de la gravitation (INSIS, IN<sub>2</sub>P<sub>3</sub>, INP)**
- **Mathématiques (INSMI)**



# Perception de l'A&A en sciences humaines

- **Thématiques générales :**
  - Histoire et philosophie des sciences
  - Sociologie des institutions
- **Interactions A&A :**
  - programme transversal : historiens et physiciens "rôle de la précision et de l'instrumentation dans le développement des sciences"
  - étude historique des archives des divers observatoires en France
  - étude de la professionnalisation du métier d'astronome depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle dans le cadre des recherches sociologiques

# Petit retour sur l'école BASMATI...

- La modélisation, qui encapsule **l'information étudiée** sous la forme d'équations mathématiques,
- et son extraction à partir de données consistant en une série d'opérations mathématiques, conditionnée au modèle d'acquisition des données et à celui de l'information à extraire.



# ALMA





# ESO Paranal





# CFHT et Maunakea

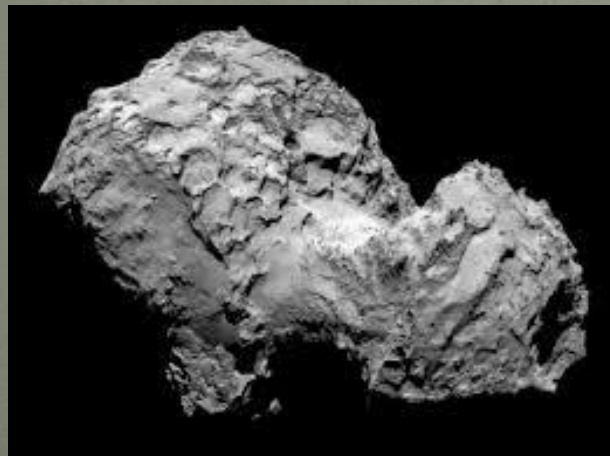
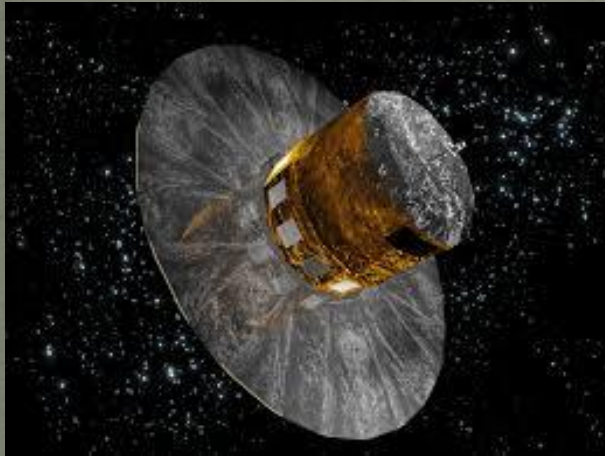


# IRAM





# Missions spatiales



# Les méthodes de l'Astronomie

## « lire l'Univers, le comprendre »

- Observer
- Explorer directement
- Comprendre les données
- Simulations numériques, développements théoriques
- Astrophysique de laboratoire



# Observer l'Univers

- Projets instrumentaux de plus en plus ambitieux
- Elargissement du spectre observable
  - Dans le domaine photonique
  - Dans le domaine non photonique:
    - Astroparticules
    - Ondes gravitationnelles
- Instruments de plus en plus dédiés à des programmes ciblés: tendance proche de la physique des particules

# Performances des Grands Equipements

- Sensibilité
- Haute résolution angulaire
- Capacité de grand champ
- Couverture en longueur d'onde; résolution spectrale
- Dynamique, contraste
- Complémentarité spectroscopie et champ de vue
- Résolution et couverture temporelle



## Feuille de route des infrastructures

- High-Energy astrophysics, Astroparticle Astrophysics and Gravitational Waves
- Ultraviolet, optical, infrared and radio/mm Astronomy
- Solar telescopes, solar system missions, laboratory studies
- Theory, computing facilities and networks, Virtual Observatory
- Education, recruitment and training, Public outreach

# Les grands moyens INSU/AA

- Moyens lourds existants : état et évolution
  - Les moyens d'astronomie de l'INSU sur le territoire national
    - Station de Nançay, T193 de l'OHP, TBL du Pic du Midi
    - Systèmes de référence espace/temps (Métrologie temps-fréquence, Télémétrie laser, VLBI)
  - Les moyens de l'astronomie de l'INSU en sociétés internationales
    - International LOFAR Telescope – CFHT – THEMIS – IRAM (30m, Plateau de Bure) – ESO (La Silla Paranal, VLT, ALMA, APEX, E-ELT) – Radars ionosphériques (SuperDARN, EISCAT)
  - Autres moyens d'observation
    - L'astronomie au dôme C – CHARA / Mont Wilson – WEAVE / WHT – tickets d'entrée
  - L'astronomie des astroparticules
    - Auger – CODALEMA – H.E.S.S. – Virgo
- Nouveaux moyens lourds à 5-10 ans
  - Infrastructures de type TGIR
    - MSE – CTA – SKA – KM3NeT – EST
  - Participation à des infrastructures multilatérales
    - LSST – CCAT



# Les moyens d'astronomie de l'INSU sur le territoire national

## *Station de Nançay*

OSUs : Observatoire de Paris et OSUC (48 personnes sur le site)

- Radio-Télescope de Nançay (NRT)
  - Monitoring pulsars, HI galaxies proches [1,4 GHz] , suivi activité comètes (OH) [1,7 GHz]
  - 120 k€/an + 5,5 ETPs 15-20 articles / an
  - Évolution : FAN (Focal Array Network)



# Les moyens d'astronomie de l'INSU sur le territoire national

## *Station de Nançay*

- **Radiohéliographe de Nançay (NRH)**
  - Activité coronale, soutien aux missions spatiales (SOHO, STEREO)
  - 25 k€/an + 6,5 ETPs 9 articles / an
- **Météorologie de l'espace (ORFEES / FEDOME)**
  - Couronne solaire [130-1000 MHz] → surveillance activité solaire (projet FEDOME)





# Les moyens d'astronomie de l'INSU sur le territoire national

## *T193 de l'OHP*

OSU : Pytheas (48 personnes impliquées)

- T193
  - 110 k€/an + 9 ETPs
  - 45 articles / an (~20 SOPHIE, ~20 Archives ELODIE, ~5 CARELEC et instruments visiteurs)
  - Actions en cours (efficacité, sécurité, fiabilisation), projets jouvence SOPHIE, caméra photométrique, nouveau spectro-imageur MISTRAL



# Les moyens d'astronomie de l'INSU sur le territoire national

## *TBL du Pic du Midi*

OSU : OMP (23 personnes impliquées)

- TBL

- 150 k€/an + 15 ETPs ITA + 5 CNAP + 3 ETP observateurs de service
- 12 articles / an (Narval)
- 240 nuits d'observation par an → atteindre 320 nuits / an

- Narval

- Spectropolarimétrie haute résolution : magnétisme stellaire, interactions étoile-planète
- Évolution : Neo-Narval → précision 3 m/s
- Programme : magnétisme stellaire ; exoplanètes autour d'étoiles actives ou évoluées
- 500 k€ + 8 ETP



# Les moyens d'astronomie de l'INSU sur le territoire national

## *TBL du Pic du Midi*

- SPIP

- Spectropolarimètre haute résolution en IR, copie de SPIRou (CFHT)
- Programme : exoplanètes de faible masse autour des naines M ; influence du champ magnétique sur la formation stellaire et planétaire
- 4,5 M€ + 10 ETP (financement régional)



# Les moyens d'astronomie de l'INSU sur le territoire national

## *Systemes de référence espace/temps*

OSUs : Observatoire de Paris, THETA, OCA, OASU

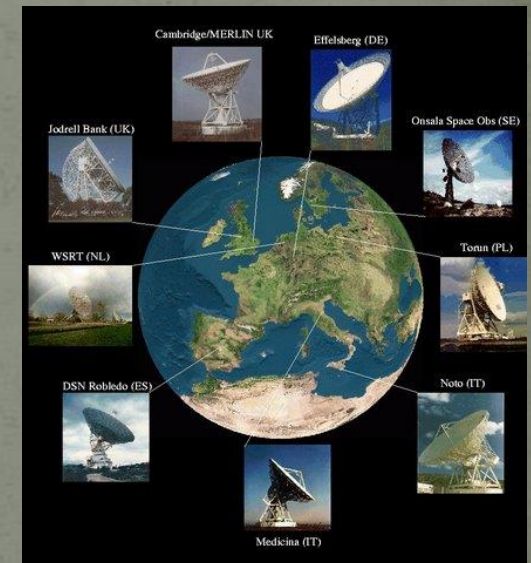
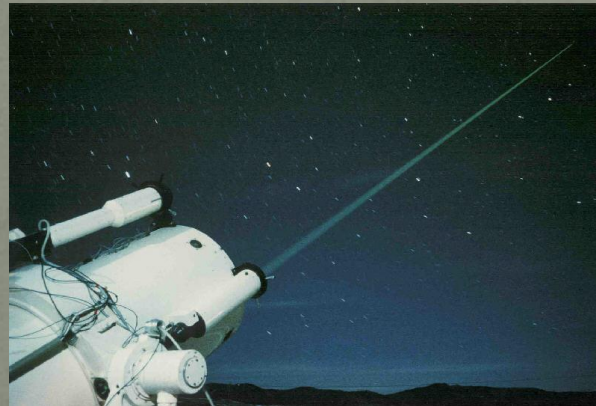
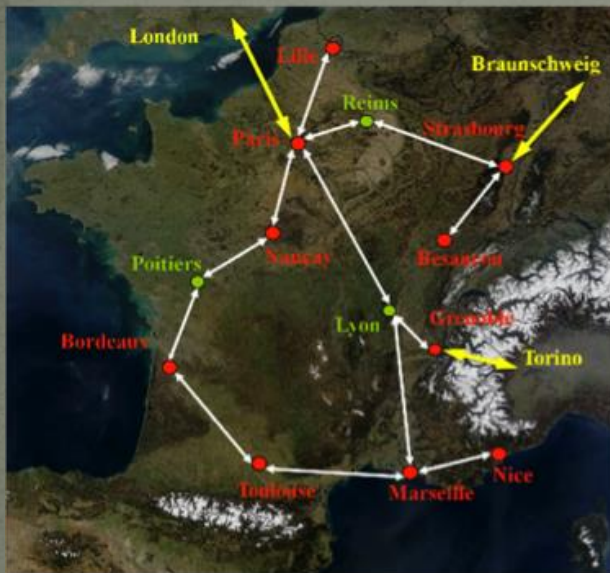
- **Métrologie temps-fréquence**
  - Réseau temps-fréquence (moyen national) : réalisation et maintenance des références nationales, contribution au temps atomique international
  - Évolution : REFIMEVE+ (comparaison d'horloges à distance par fibre optique)
  
- **Télemétrie laser**
  - Géodésie spatiale, réalisation des systèmes de référence spatiaux, comparaison d'horloges à distance (T2L2)
  - Évolution : diversification de l'utilisation de MEO (Calern) ; projet de station mobile avec le CNES



# Les moyens d'astronomie de l'INSU sur le territoire national

## *Systemes de référence espace/temps*

- Interférométrie à très longue base (VLBI)
  - Repères de référence terrestre et céleste
  - Implication de la France dans l'IVS : analyse et archivage des données
  - Projet : Installation antenne VLBI à Tahiti pour le nouveau réseau d'observation VGOS



# Les grands moyens INSU/AA

- Moyens lourds existants : état et évolution

- Les moyens d'astronomie de l'INSU sur le territoire national

- Station de Nançay, T193 de l'OHP, TBL du Pic du Midi
    - Systèmes de référence espace/temps (Métrologie temps-fréquence, Télémétrie laser, VLBI)

- Les moyens de l'astronomie de l'INSU en sociétés internationales

- International LOFAR Telescope – CFHT – THEMIS – IRAM (30m, Plateau de Bure) – ESO (La Silla Paranal, VLT, ALMA, APEX, E-ELT) – Radars ionosphériques (SuperDARN, EISCAT)

- Autres moyens d'observation

- L'astronomie au dôme C – CHARA / Mont Wilson – WEAVE / WHT – tickets d'entrée

- L'astronomie des astroparticules

- Auger – CODALEMA – H.E.S.S. – Virgo

- Nouveaux moyens lourds à 5-10 ans

- Infrastructures de type TGIR

- MSE – CTA – SKA – KM3Net – EST

- Participation à des infrastructures multilatérales

- LSST – CCAT



# Les moyens d'astronomie de l'INSU en sociétés internationales

## *International LOFAR Telescope (ILT)*

Fondation regroupant les consortia nationaux contribuant à LOFAR (Pays-Bas, Allemagne, Suède, Royaume-Uni, France, Pologne en 2015)

### ● LOFAR

- Interféromètre bandes  $dm$  et  $m$  (30-250 MHz) : ~50 stations ; domaines scientifiques variés (cosmologie, physique solaire, etc.)
- En France: 1 station, 5% du temps, 94 k€/an + 1 ETP (+ moyens généraux de Nançay)
- 10 articles à participation française en 2013
- Évolution en cours : NenuFAR
  - Extension de la station française de LOFAR : composante de LOFAR Europe + instrument « stand alone »
  - 4,5 M€ + 80 k€/an de fonctionnement



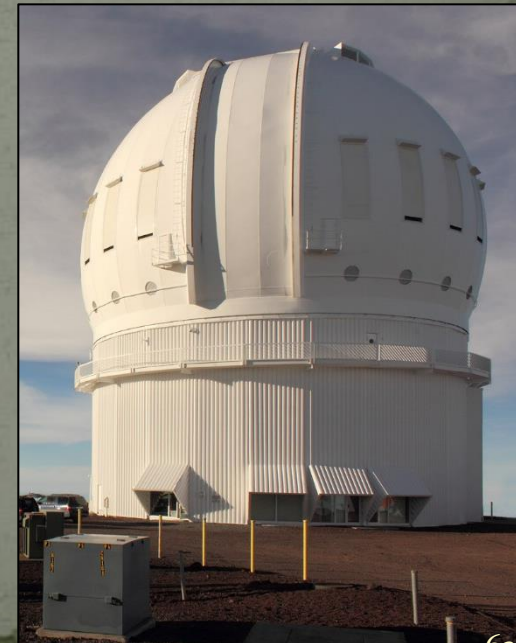
# Les moyens d'astronomie de l'INSU en sociétés internationales

## CFHT

Canada (NRC, 42,5%), France (CNRS, 42,5%), U. Hawaï (15%)

Site d'Hawaï à disposition du CFHT jusqu'en 2033

- Imageurs grand champ MegaCam et WIRCam ; spectro-polarimètre visible ESPaDOnS
  - CFHTLS puis divers grands programmes (30 à 60 % du temps)
  - Part française : 2,3 M€ / an
  - 120-130 articles/an (60-65 à participation française)
  - Évolutions à court et moyen terme : spectro-polarimètre IR SPIRou (2017), remise à niveau MegaCam, GRACES (couplage ESPaDOnS – Gemini)





# Les moyens d'astronomie de l'INSU en sociétés internationales

## THEMIS

France (CNRS), retrait de l'Italie en 2009

- THEMIS (Spectro-polarimétrie haute résolution et multi-raies)
  - Couplage magnétique photosphère-chromosphère ; champ magnétique protubérances
  - 200 k€ / an + 4 ETP depuis 2010 (100-120 jours d'observation par an)
  - 5 articles/an depuis 2010
  - Évolution en cours :
    - Développement d'une OA (670 k€ dans le cadre de l'I3 SOLARNET) ; arrêt des campagnes en 2015
    - Négociations avec l'Espagne pour reprise de THEMIS équipé de l'OA, dédié polarimétrie



# Les moyens d'astronomie de l'INSU en sociétés internationales

## IRAM

France (CNRS, 47%), Allemagne (MPG, 47%), Espagne (IGN, 6%)

- IRAM

- Observatoires *mm* « généralistes » : 30 m Pico Veleta et interféromètre du Plateau de Bure ; vaste communauté intéressée (PNP, PNCG, PNPS, PCMI)
- Part française : 6 M€ / an
- 150-200 articles/an

- 30 m

- Caméra bolométrique NIKA2 en construction
- R&D en cours sur caméras hétérodynes



# Les moyens d'astronomie de l'INSU en sociétés internationales

## IRAM

- Plateau de Bure / NOEMA
  - NOEMA : extension de 6 à 12 antennes ; ligne de base E-O allongée de 0,8 à 1,6 km ; bande d'analyse étendue de 8 à 32 GHz
  - Assure un leadership à la communauté IRAM dans le domaine *mm*
  - Coût total : 43 M€ ; Pour la France : Phase I (+ 4 antennes) en cours : 15 M€ ; Phase II : ~4 M€



# Les moyens d'astronomie de l'INSU en sociétés internationales

## ESO

14 états membres + Chili + Pologne+Brésil

### • ESO

- Le plus gros TGIR de notre communauté ; 30% de l'astronomie mondiale
- Observatoires de La Silla, Paranal (VLT) et Chajnantor (ALMA)
- Part française : 17% soit 22 M€ / an + contribution instruments et développement infrastructures
- Forte participation française à la construction des instruments
- 800 articles/an (tous pays et instruments)

### • La Silla

- Sciences « de niche »
  - 3,6 m : HARPS ; programmes de recherche de planètes extrasolaires
  - NTT : Appel à idées en cours de conclusion
- Arrêt du financement ESO des coûts d'opération prévu en 2020-2021





# Les moyens d'astronomie de l'INSU en sociétés internationales

## ESO

### ● VLT (Paranal)

- Premières lumières de MUSE et SPHERE
- Upgrade VISIR en cours et développements programmés : CRIRES+ (2017 ?), ESPRESSO (2017 ?), ERIS (2019 ?)
- Projet : MOONS [→ 2019]
  - Spectro MOS 0,8-1,8  $\mu\text{m}$ , 1000 fibres, champ 0,1 degré<sup>2</sup>, R=5000 ou 20000 : archéologie galactique, évolution des galaxies, cosmologie
  - Possibilité de suivi pour Gaia et Euclid
  - 5,7 M€ hardware ; pour la France : 300 k€ + 45 FTE

### ● VISTA (Paranal)

- Projet : 4MOST [→ 2019 ?]
  - Spectro MOS visible 2400 fibres, champ 4 degré<sup>2</sup>, R=5000 et 20000 : science galactique et extragalactique
  - Suivi des sources Gaia, mais arrive un peu tard ...
  - 18 M€ ; pour la France : 16 FTE



# Les moyens d'astronomie de l'INSU en sociétés internationales

## ESO

- Paranal : VLT
  - Arrivée prochaine de GRAVITY et MATISSE (2015, 2017)
  - Réflexion ESO en cours pour définir des priorités au-delà
    - Extension visible ?, imagerie ? etc.





# Les moyens d'astronomie de l'INSU en sociétés internationales

## ESO

### • ALMA

ESO, NRAO (Etats-Unis), NAOJ (Japon)

- 60% des antennes et 6 bandes de fréquences actuellement disponibles ; pleinement opérationnel en 2016
- 3 AO depuis 2011 : facteur de pression 8-10 sur propositions européennes (PI français pour 6% des propositions acceptées)
- Rôle important de l'ARC ALMA pour les utilisateurs

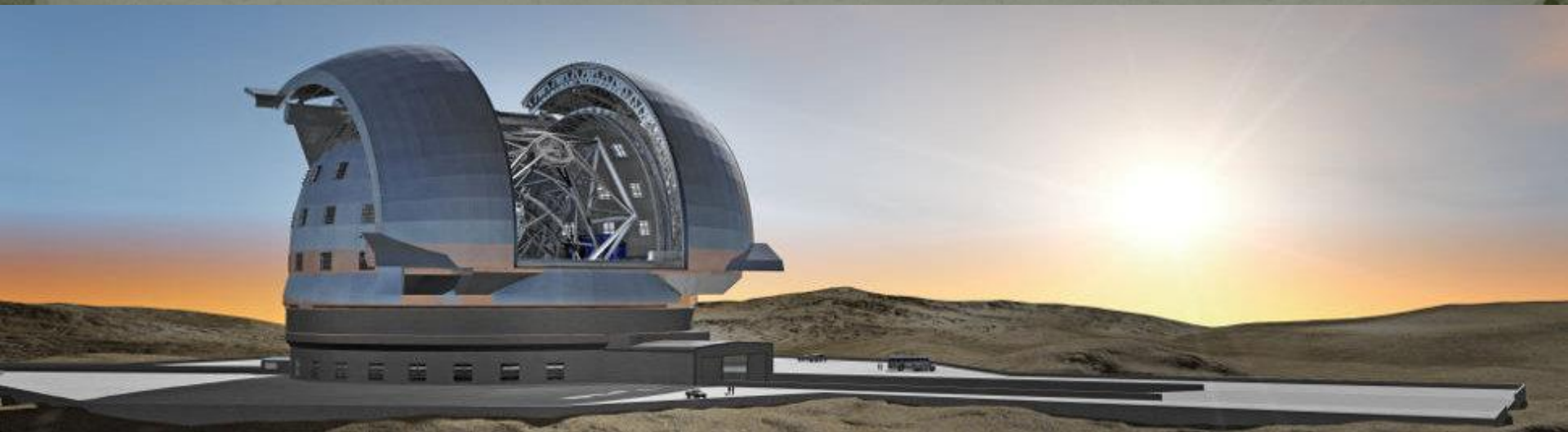


### • APEX

MPIfR (Bonn, 50%), Obs. Onsala (Suède, 23%), ESO (27%)

- Télescope sub-mm de 12 m
- Structure du milieu interstellaire, formation stellaire
- Caméra bolométrique ARTEMIS développée par le CEA (→ temps garanti important)

# ESO E-ELT





# Les moyens d'astronomie de l'INSU en sociétés internationales

## *Radars ionosphériques*

- SuperDARN

11 pays (États-Unis, Canada, Japon, France, Royaume Uni, etc.)

- Étude à grande échelle de l'électrodynamique horizontale de l'ionosphère
- France responsable d'une antenne aux îles Kerguelen : 30-35 k€/an [IPEV et PNST]
- 1 article/an sur 2009-2013 avec participation française

- EISCAT

Norvège, Suède, Finlande, Chine, Japon, Royaume Uni

- Caractérisation locale de la thermodynamique ionosphérique verticale
- 12 k€ en 2014 pour statut d'affilié (accès aux données du programme commun)
- 1,4 article/an sur 2009-2013 avec participation française (2 ETP)
- Évolution : nouveau réseau phasé EISCAT-3D [2016-2018]  
→ données volumétriques, météorologie de l'espace

Communautés réduites mais rôle actif (maintenance antenne, modélisation)



# Les grands moyens INSU/AA

- Moyens lourds existants : état et évolution
  - Les moyens d'astronomie de l'INSU sur le territoire national
    - Station de Nançay, T193 de l'OHP, TBL du Pic du Midi
    - Systèmes de référence espace/temps (Métrologie temps-fréquence, Télémétrie laser, VLBI)
  - Les moyens de l'astronomie de l'INSU en sociétés internationales
    - International LOFAR Telescope – CFHT – THEMIS – IRAM (30m, Plateau de Bure) – ESO (La Silla Paranal, VLT, ALMA, APEX, E-ELT) – Radars ionosphériques (SuperDARN, EISCAT)
  - Autres moyens d'observation
    - L'astronomie au dôme C – CHARA / Mont Wilson – WEAVE / WHT – tickets d'entrée
  - L'astronomie des astroparticules
    - Auger – CODALEMA – H.E.S.S. – Virgo
- Nouveaux moyens lourds à 5-10 ans
  - Infrastructures de type TGIR
    - MSE – CTA – SKA – KM3Net – EST
  - Participation à des infrastructures multilatérales
    - LSST – CCAT



# Les moyens d'astronomie de l'INSU en sociétés internationales

## *Concordia / Dôme C*

France (IPEV), Italie (PNRA)

- QUBIC

- Interférométrie bolométrique : mesure des modes B primordiaux de polarisation du CMB (même créneau que BICEP 2 mais technique instrumentale différente)
- Large collaboration internationale à PI français (APC)
- 2,7 M€ pour le 1<sup>er</sup> module (150 GHz), + 5 x 1,7 M€ pour les suivants

## Autres moyens d'observation

- WEAVE / WHT [→ 2017]
  - MOS, caractéristiques et objectifs semblables à 4MOST / VISTA
  - Seul MOS de l'hémisphère nord à l'horizon de Gaia ; fortes priorités PNCG et PNPS
  - 7,7 M€ hardware (18 M€ consolidés) ; pour la France : 1,1 M€ + 12 FTE



- Tickets d'entrée
  - Réflexion sur rapport coût / retour scientifique
    - HESS, EISCAT, SDSS-III (BOSS, SEGUE 2, APOGEE), SDSS-IV/eBOSS, DESI, LSST
    - Coût du ticket très variable d'une collaboration à l'autre, contribution en nature fréquente
  - En général, impact scientifique important



# Les grands moyens INSU/AA

- Moyens lourds existants : état et évolution

- Les moyens d'astronomie de l'INSU sur le territoire national

- Station de Nançay, T193 de l'OHP, TBL du Pic du Midi
    - Systèmes de référence espace/temps (Métrologie temps-fréquence, Télémétrie laser, VLBI)

- Les moyens de l'astronomie de l'INSU en sociétés internationales

- International LOFAR Telescope – CFHT – THEMIS – IRAM (30m, Plateau de Bure) – ESO (La Silla Paranal, VLT, ALMA, APEX, E-ELT) – Radars ionosphériques (SuperDARN, EISCAT)

- Autres moyens d'observation

- L'astronomie au dôme C – CHARA / Mont Wilson – WEAVE / WHT – tickets d'entrée

- L'astronomie des astroparticules

- Auger – CODALEMA – H.E.S.S. – Virgo

- Nouveaux moyens lourds à 5-10 ans

- Infrastructures de type TGIR

- MSE – CTA – SKA – KM3Net – EST

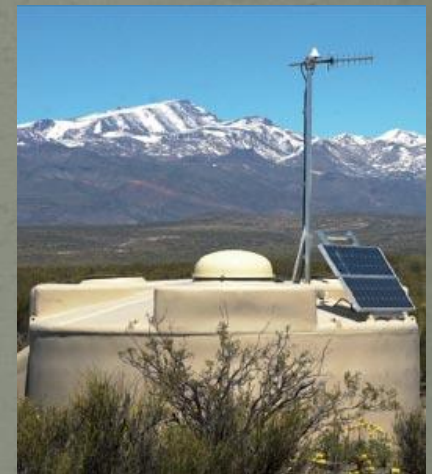
- Participation à des infrastructures multilatérales

- LSST – CCAT

# L'astronomie des astroparticules

## ● AUGER

- Le plus grand détecteur de rayons cosmiques d'énergie extrême ( $> 10^{18}$  eV)
  - Des résultats importants : coupure GZK, indication de la présence d'anisotropies, etc.
- Large collaboration mondiale (500 physiciens) avec la France (IN2P3) à 10%
- 2 M€/an    7 articles/an à participation française
- Développements instrumentaux (2015-2023) : 10 M€



## ● CODALEMA / EXTASIS

- Rayons cosmiques d'énergie extrême : observation du signal radio des gerbes atmosphériques ; expérience installée à Nançay depuis 2002
- Évolution en cours :
  - Augmenter la sensibilité de CODALEMA
  - Projet EXTASIS (signal de « mort subite » des gerbes)
  - 750 k€ + 16 ETP (2014-2017)



# L'astronomie des astroparticules

- H.E.S.S.

- Réseau de 5 télescopes : Photons gamma 50 GeV – 100 TeV
- Collaboration > 200 membres : Allemagne, France
  - En France : 40 chercheurs IN2P3 et CEA, 7 chercheurs INSU
- 300 k€/an                                      12 articles/an
- Évolution : arrivée de H.E.S.S.-II en 2012, jouvence H.E.S.S.-I → fonctionnement jusqu'à CTA



# L'astronomie des astroparticules

## ● VIRGO

- Détection ondes gravitationnelles
- Collaboration France (CNRS), Italie (INFN) + Hongrie, Pays-Bas, Pologne
  - En France : 40 ETP IN2P3, 9 ETP INSIS, 4 ETP INSU
- Contribution française : 4,5 M€/an 12 articles / an
- Évolution : Advanced Virgo
  - Augmenter la sensibilité d'un ordre de grandeur → 2021
  - Devrait conduire aux premières détections dès 2018 (coalescence objets compacts)
  - 22 M€ + 460 ETP ; part française : 10 M€ + 110 ETP
- Collaboration LIGO (US) et KAGRA (Japon)





# Les grands moyens INSU/AA

- Moyens lourds existants : état et évolution

- Les moyens d'astronomie de l'INSU sur le territoire national

- Station de Nançay, T193 de l'OHP, TBL du Pic du Midi
    - Systèmes de référence espace/temps (Métrologie temps-fréquence, Télémétrie laser, VLBI)

- Les moyens de l'astronomie de l'INSU en sociétés internationales

- International LOFAR Telescope – CFHT – THEMIS – IRAM (30m, Plateau de Bure) – ESO (La Silla Paranal, VLT, ALMA, APEX, E-ELT) – Radars ionosphériques (SuperDARN, EISCAT)

- Autres moyens d'observation

- L'astronomie au dôme C – CHARA / Mont Wilson – WEAVE / WHT – tickets d'entrée

- L'astronomie des astroparticules

- Auger – CODALEMA – H.E.S.S. – Virgo

- Nouveaux moyens lourds à 5-10 ans

- Infrastructures de type TGIR

- MSE – CTA – SKA – KM3NeT – EST

- Participation à des infrastructures multilatérales

- LSST – CCAT

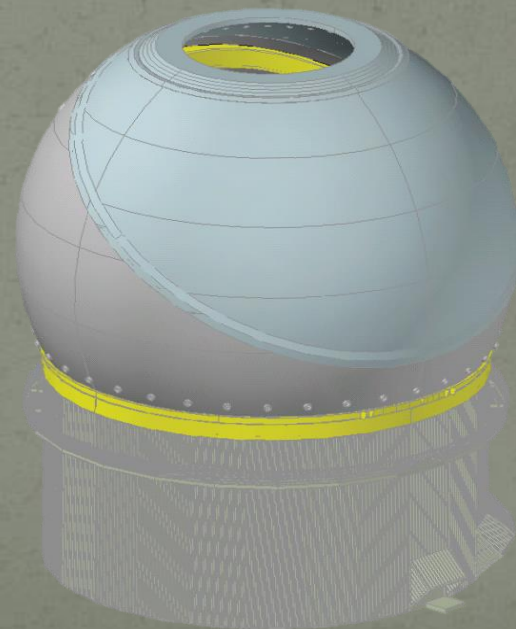
# Les nouveaux moyens lourds de l'astronomie à 5-10 ans

## *Maunakea Spectroscopic Explorer*

### CFH + nouveaux partenaires

- MSE

- Télescope de 10 m dédié relevés spectroscopiques de type MOS [→ 2025-2026]
  - 1,5 degré<sup>2</sup>, 3200 fibres, R~2000, ~ 6500 et ~20.000
- « Univers faible » (intérêt PNCG, PNPS, PCMI) : étoiles faibles, parties externes de la Galaxie, structure 3D du milieu interstellaire, suivi sources faibles Gaia et Euclid
- Mise en place d'un « project office » en 2014
  - Plan de construction
  - Recherche de nouveaux partenaires





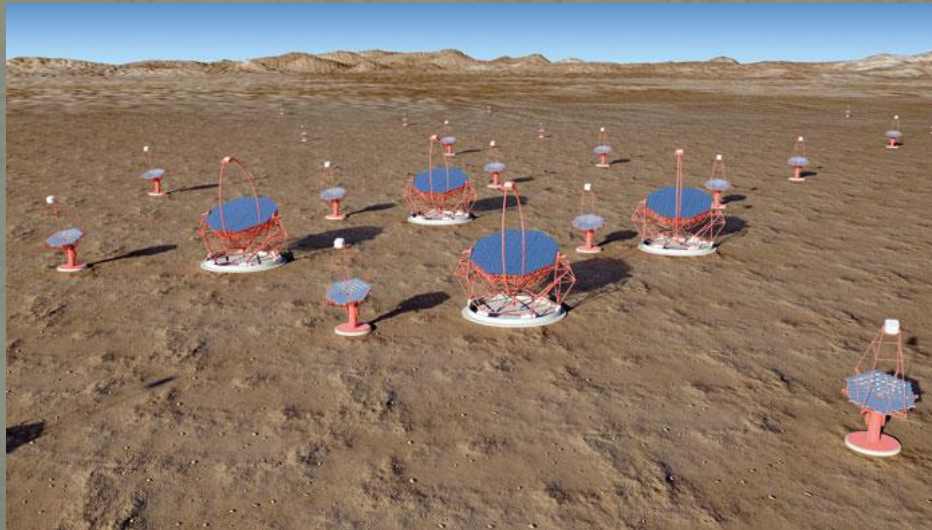
# Les nouveaux moyens lourds de l'astronomie à 5-10 ans

## CTA

25 pays (Allemagne, France, Italie, etc.)

- CTA

- Observatoire rayons  $\gamma$  : 2 réseaux de télescopes à imagerie Cherenkov (Nord et Sud) [→ 2020]
  - Successeur de H.E.S.S. ; sensibilité x 10, bande d'énergie élargie, meilleure résolution angulaire
- Origine des rayons cosmiques, accélération des particules dans les sources énergétiques, etc.
- En France : 12 laboratoires dont 4 INSU (15 ETPs sur un total de 65)



# Les nouveaux moyens lourds de l'astronomie à 5-10 ans

## SKA

Consortium de 11 pays (« board ») + 1 pays observateur (France)

- SKA

- Interféromètre radio *m* et *cm* de surface collectrice 1 km<sup>2</sup> [SKA1 → 2023 ; SKA2 → 2030]
  - Priorité ASTRONET , un changement d'échelle majeur dans la radioastronomie, un défi pour la technologie de l'information
- Thématiques scientifiques variées (surtout PNPS et PNCG) : cosmologie, époque de la ré-ionisation, astrophysique galactique et extragalactique (relevés continuum et HI), etc.
- Communauté française montant en puissance ; participation à des démonstrateurs (EMBRACE, AAIR)



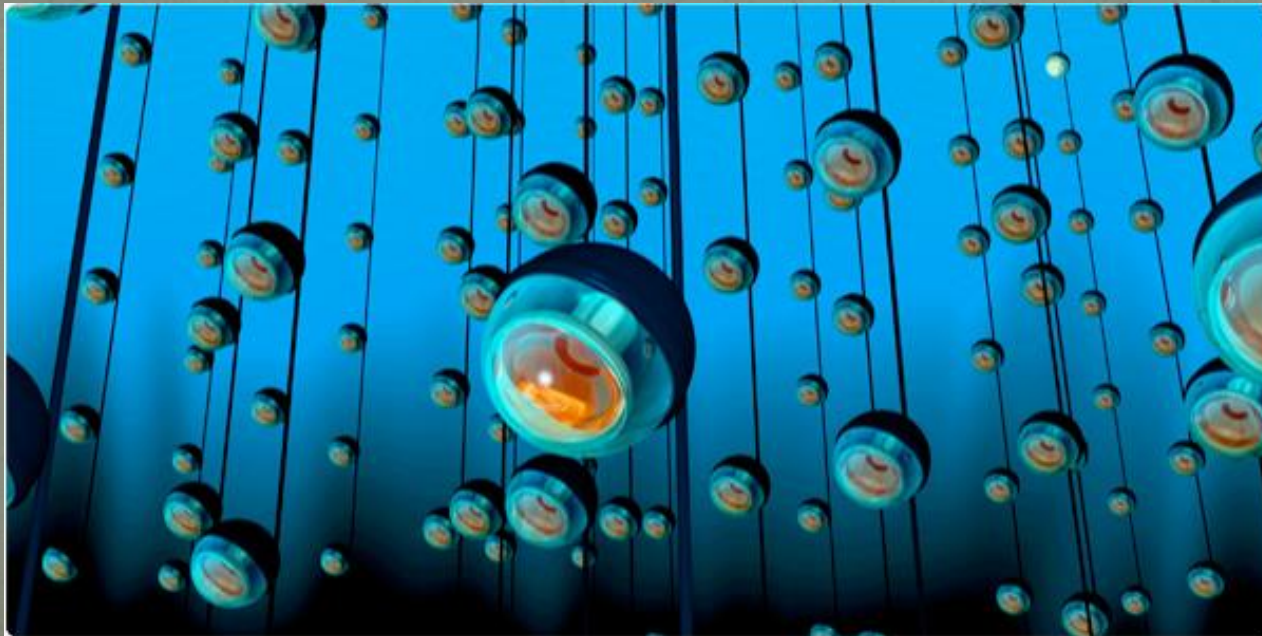


# Les nouveaux moyens lourds de l'astronomie à 5-10 ans

## *KM3NeT*

40 laboratoires en Europe (France, Italie, etc.)

- KM3NeT
  - Détection sous-marine de neutrinos [→ 2020]
    - Suite de ANTARES ; 600 lignes de détection sur 3 sites ; volume équivalent 3-4 km<sup>3</sup>
  - Sources galactiques (restes Supernovae ou micro quasars)
  - 20 ETP annuels en France



# Les nouveaux moyens lourds de l'astronomie à 5-10 ans *EST*

14 instituts européens impliqués dans la design study (Espagne, Allemagne, Italie, France, etc.)

- EST

- Télescope solaire de 4 m [→ 2022 ?]
  - MCAO + spectro-imagerie polarimétrique multi-raies
- Couplage photosphère-chromosphère, émergence du flux magnétique à la surface, chauffage de la chromosphère et de la couronne, etc.
- Design study (UE : 3,2 M€) achevée en 2011, I3 SOLARNET depuis 2013 (OA THEMIS)





# Les grands moyens INSU/AA

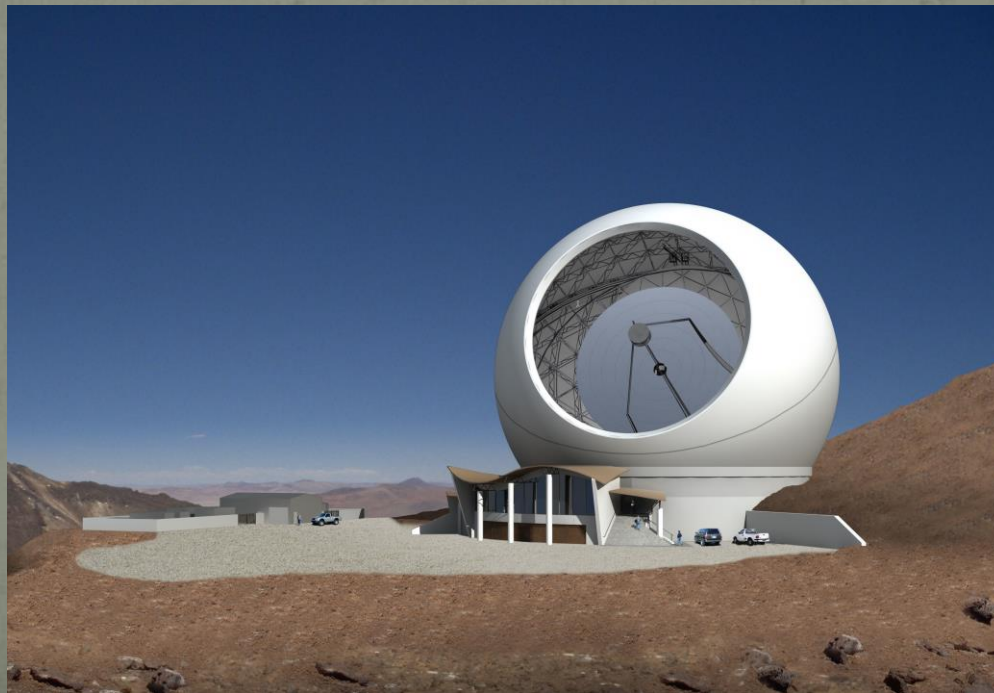
- Moyens lourds existants : état et évolution
  - Les moyens d'astronomie de l'INSU sur le territoire national
    - Station de Nançay, T193 de l'OHP, TBL du Pic du Midi
    - Systèmes de référence espace/temps (Métrologie temps-fréquence, Télémétrie laser, VLBI)
  - Les moyens de l'astronomie de l'INSU en sociétés internationales
    - International LOFAR Telescope – CFHT – THEMIS – IRAM (30m, Plateau de Bure) – ESO (La Silla Paranal, VLT, ALMA, APEX, E-ELT) – Radars ionosphériques (SuperDARN, EISCAT)
  - Autres moyens d'observation
    - L'astronomie au dôme C – CHARA / Mont Wilson – WEAVE / WHT – tickets d'entrée
  - L'astronomie des astroparticules
    - Auger – CODALEMA – H.E.S.S. – Virgo
- Nouveaux moyens lourds à 5-10 ans
  - Infrastructures de type TGIR
    - MSE – CTA – SKA – KM3Net – EST
  - Participation à des infrastructures multilatérales
    - LSST – CCAT

# Les nouveaux moyens lourds de l'astronomie à 5-10 ans

## CCAT

Consortium d'universités USA, Canada et Allemagne

- CCAT
  - Radiotélescope sub-mm de 25 m [→ 2019]
    - Imagerie continuum grand champ ( $1^\circ$ ) + spectroscopie haute résolution spectrale et spatiale
  - Formation et évolution des galaxies, formation stellaire, disques, TNOs
  - Communauté française très développée dans ce domaine, savoir-faire technologique et scientifique



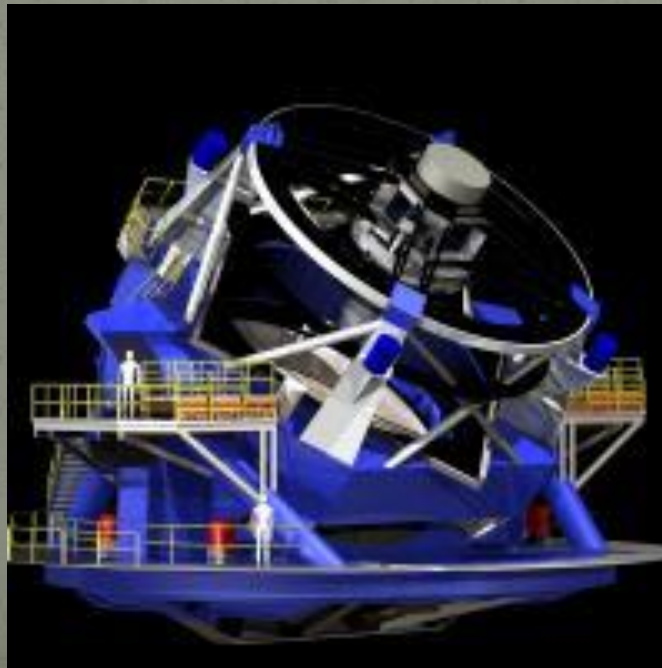


# Les nouveaux moyens lourds de l'astronomie à 5-10 ans

## LSST

Grand consortium USA – Europe (UK, France, etc.)

- LSST
  - Télescope 8 m dédié au sondage du ciel entier profond pendant 10 ans [→ 2022]
    - Caméra grand champ (10 degré<sup>2</sup>), 6 bandes de 0,3 à 1,1  $\mu\text{m}$  : monitoring 2 fois / semaine →  $M \sim 25$
  - Matière et énergie noire, grandes structures, ciel transitoire, système solaire
  - Communauté INSU intéressée : PNCG (suivis Euclid et Gaia) et PNP (TNOs et astéroïdes)



# Les lasers de puissance

Créer des états extrêmes de la matière, hautes densités – T :

- **statiques** (ETL, équations d'état mélanges planétaire)
- **dynamiques** (échelle mésoscopique et macroscopique, lois d'échelle nécessaire, étude des écoulements supersoniques et couplage avec le rayonnement, évolution stellaire)

Moyens français et européens :

LULI2000, [1-2] kJ - 1,5 ns, Palaiseau (Laserlab, planeto / chocs-jets)

PALS, 1 kJ - 0,3 ns, Prague (Laserlab, Extreme Light Infrastructure, jets chocs radiatifs)

LMJ/PETAL, 30 kJ - 3 ns en 2017 (à terme 1,3 MJ) avec 3,5 kJ –

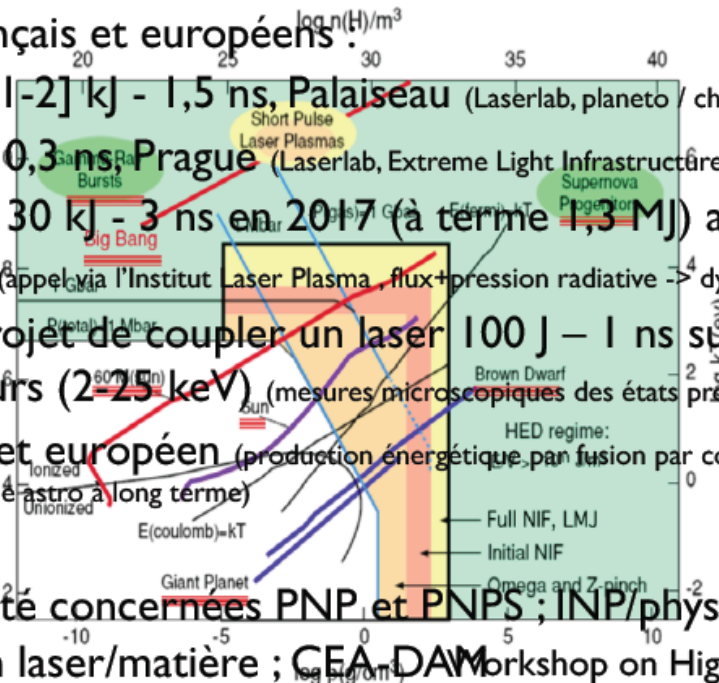
[0,5-10] ps (appelé via l'Institut Laser Plasma, flux + pression radiative -> dynamique et instabilités)

Eu-XFEL, projet de coupler un laser 100 J – 1 ns sur source de rayons X durs (2-25 keV) (mesures microscopiques des états produits)

HiPER, projet européen (production énergétique par fusion par confinement inertiel mais ouvertures possible astro à long terme)

Communauté concernées PNP et PNPS ; INP/physique de

l'interaction laser/matière ; CEA-DAM Workshop on High Energy Density Laboratory Physics Research Needs





# Sources de rayonnement



**SOLEIL** : centre de rayonnement synchrotron français.  
 TGIIR pluridisciplinaire au service de ≠ communautés scientifiques.  
 Gamme spectrale étendue  
 Lignes avec des problématiques astrophysiques.

DESIRS	DISCO	AILES	SMIS
5-40 eV	1-21 eV	8-1000 cm <sup>-1</sup>	1-100 microns
Spectre interstellaire VUV, irradiation polarisation linéaire et circulaire, production matière organique par photochimie	Photoionisation, dichroïsme circulaire, et microscopie par photoluminescence UV lointain. métrologie de détecteurs spatiaux et l'irradiation d'objets variés. Photochimie & spectroscopie d'absorption dans le VUV de films, solides, gaz	spectroscopie de molécules transitoires observées. Dvpt techniques hétérodyne pour l'ultra-haute résolution nécessaire à l'analyse rotationnelle et ou rovibrationnelle des observations (e.g.ALMA).	Analyse de composition de grains extraterrestres à la limite de diffraction, hétérogénéité des météorites. Intérêt marqué pour l'analyse des matériaux collectés extraterrestres
INSU/INP/IN2P3/CEA	INSU/INP/IN2P3/CEA	INSU/INP/IN2P3/CEA	INSU/INP/IN2P3/CEA
PNP, PCMI	PNP, PCMI	PCMI, PNP, PNPS	PCMI, PNP

Presque l'équivalent d'une à deux lignes à temps plein pour l'astrophysique de laboratoire

# European Synchrotron Radiation Facility

40 stations expérimen., large spectre de thématiques.

ID21	ID16A et B
Micro-spectroscopie X et infrarouge. faisceau X (2-9keV), monochromatique, et submicronique (0.2×0.8µm <sup>2</sup> ), couplée à un microscope infrarouge. Cartographies microfluorescence X: composition élémentaire de grains extraterrestres collectés et processus de collecte (e.g. aerogel sur les collecteurs Stardust).	coherent imaging techniques and X-ray fluorescence microscopy. hard X-ray nano-analysis : X-ray fluorescence, X-ray absorption spectroscopy, X-ray diffraction and 2D/3D X-ray imaging
l'ESRF, l'INSU, l'IN2P3, le CEA et l'ANR	l'ESRF, l'INSU, l'IN2P3, le CEA et l'ANR
PNP/PCMI	PNP/PCMI

## ***Pôle analytique de Spectroscopie Raman (LGL)***

Instr. national INSU, Raman in situ en conditions extrêmes.

Evolution minéral. et thermique (météorites), hautes pression (simulation d'intérieur de corps planétaires). INSU, ANR (LABEX LIO). La communauté bénéficiaire PNP.

## **Centre Commun de Spectroscopie (Université de Lille I).**

Instr. national INSU, µscopie électronique conventionnel appliquée à des problématiques astrophysiques et planétologiques.

Etude des microstructures et la nano-chimie des météorites, poussières cométaires et interplanétaires.



# Sources de particules énergétiques

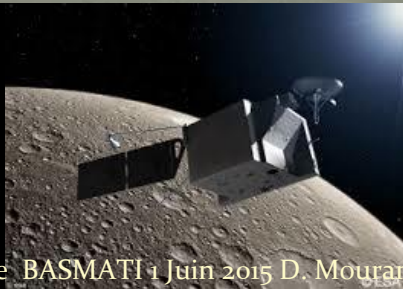
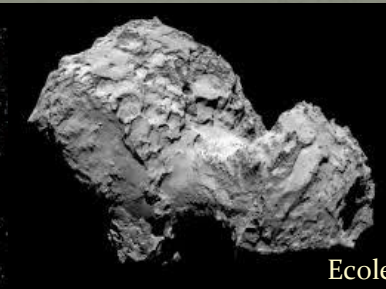
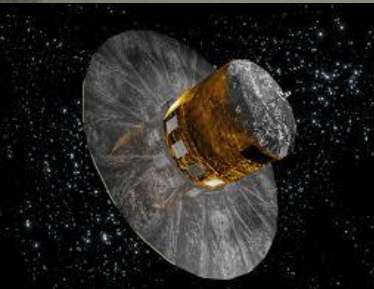
<b>GANIL</b>	<b>Tandem-ALTO</b>
faisceaux d'ions (Carbone-Uranium) énergies du keV au GeV	e- 30-50MeV, p+ 5-30 MeV, < I à 300 MeV, moléc. (m<200, 30MeV), agrégats (C60, C70, Au~50MeV)
Effet des CR sur les grains interstellaires : FTIR, XY-TOF-SIMS, collisions ions multichargés, études de stabilité, fragments ou agrégats froids analysés par TOFMS après interaction avec le faisceau d'ions.	Qualif. Électroniques, optiques et détecteurs du spatial. rayonnements cosmiques du MIS, rapports de branchement astrophysiques / sections efficaces nucléaires d'intérêt pour la physique stellaire.
EU (réseaux SPRITE, nano-IBCT), CEA, CNRS (INP), Univ. de Caen UCBN, ENSICAEN, ANR	IN2P3, puis CNES, contrats européens, ANR, ONERA, INSU au travers des PNs, CEA.
PCMI, PNP	PNPS, PCMI, PNHE
<b>NanoSIMS (instr. national)</b>	<b>Sonde Ionique (instr. national)</b>
Imagerie ionique / composition isotopique.	micro-sonde ioniques IMS I270 et IMS I280HR2
Imagerie ionique de la matière extra-terrestre et sa composition isotopique. Evolution et modèles de la matière primitive dans le système solaire jeune. Caractériser et dater l'origine des échantillons terrestres et extraterrestres, décrire leurs conditions de formation et les processus géologiques ou extraterrestres qui les ont affecté.	
Muséum – Région IdF – Ministère - INSU	INSU, ministère (CPER), de la région Lorraine, et de l'ANR via les EQuipex et Labex.
PNP	PNP



# “LIEN AVEC LA PROSPECTIVE SPATIALE”

## 2015-2020

---





# Le lien des activités Sol et Espace: enjeux

- L'ASTRONOMIE SPATIALE EST ALIMENTÉE PAR L'ASTRONOMIE AU SOL ET VICEVERSA
- SYNERGIE ENTRE MISSIONS SPATIALES ET AU SOL => **COMPLEMENTARITÉ**
- ROLE CLÉ DE L'INSU => **ACTIVITÉS DE PRÉPARATION ET D'ACCOMPAGNEMENT**



Longueur d'onde, grands relevés, radars, haute résolution spatiale (interférométrie) et spectrale, couverture et continuité temporelle...



Longueur d'onde, affranchissement de la turbulence atmosphérique, couverture du ciel, observations in situ, collection d'échantillons....

COMPLÉMENTARITÉ

Observations complémentaires, expériences de laboratoire, modèles et calculs

PRÉPARATION ET ACCOMPAGNEMENT

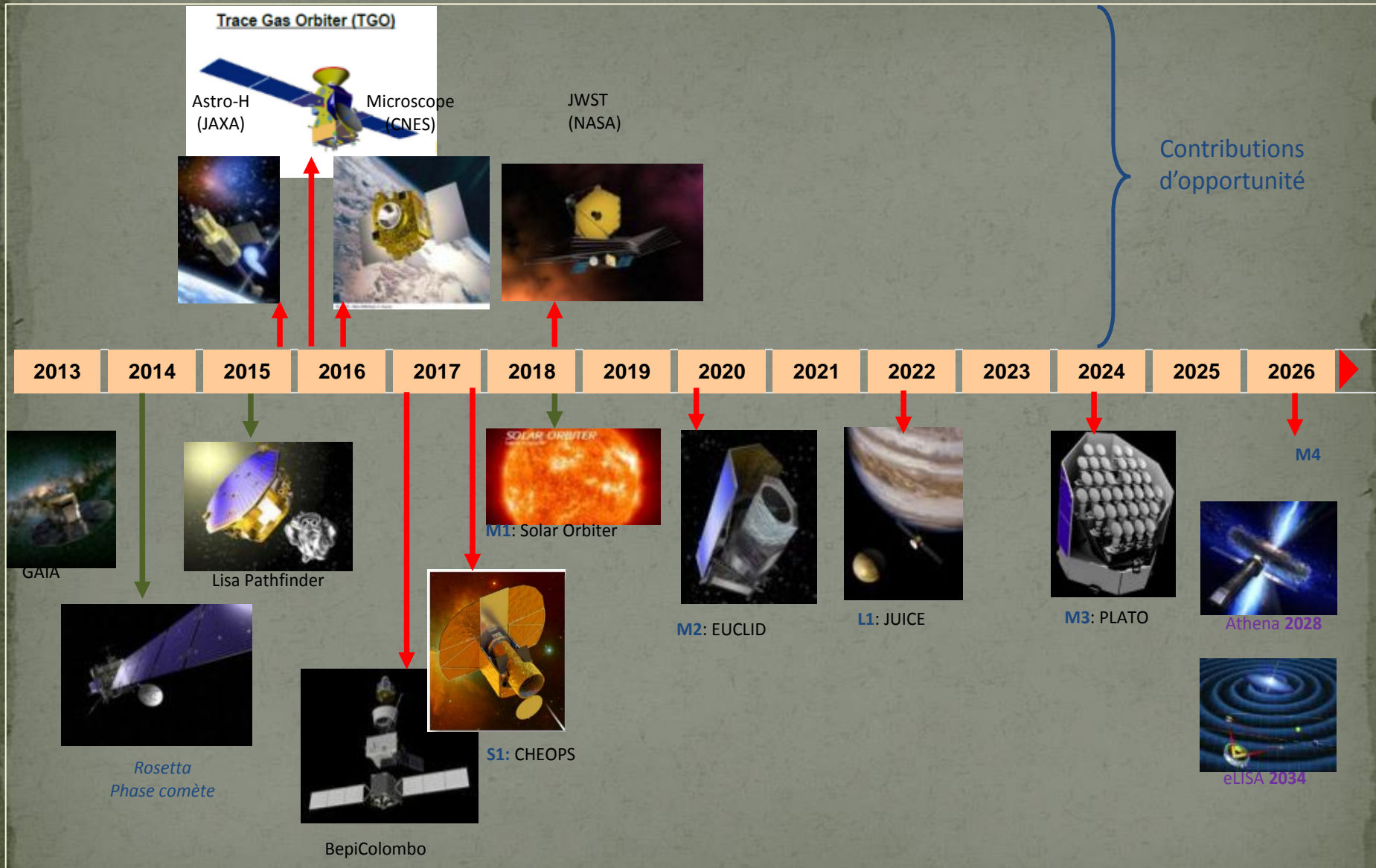
PS: La moitié des publications « françaises » 2012-2013 présentent des résultats observationnels nouveaux, dont ~2/3 sont majoritairement issus des données spatiales (source: Hameury 2014).

# Cadre des missions spatiales de la période 2015-2020 et au-delà

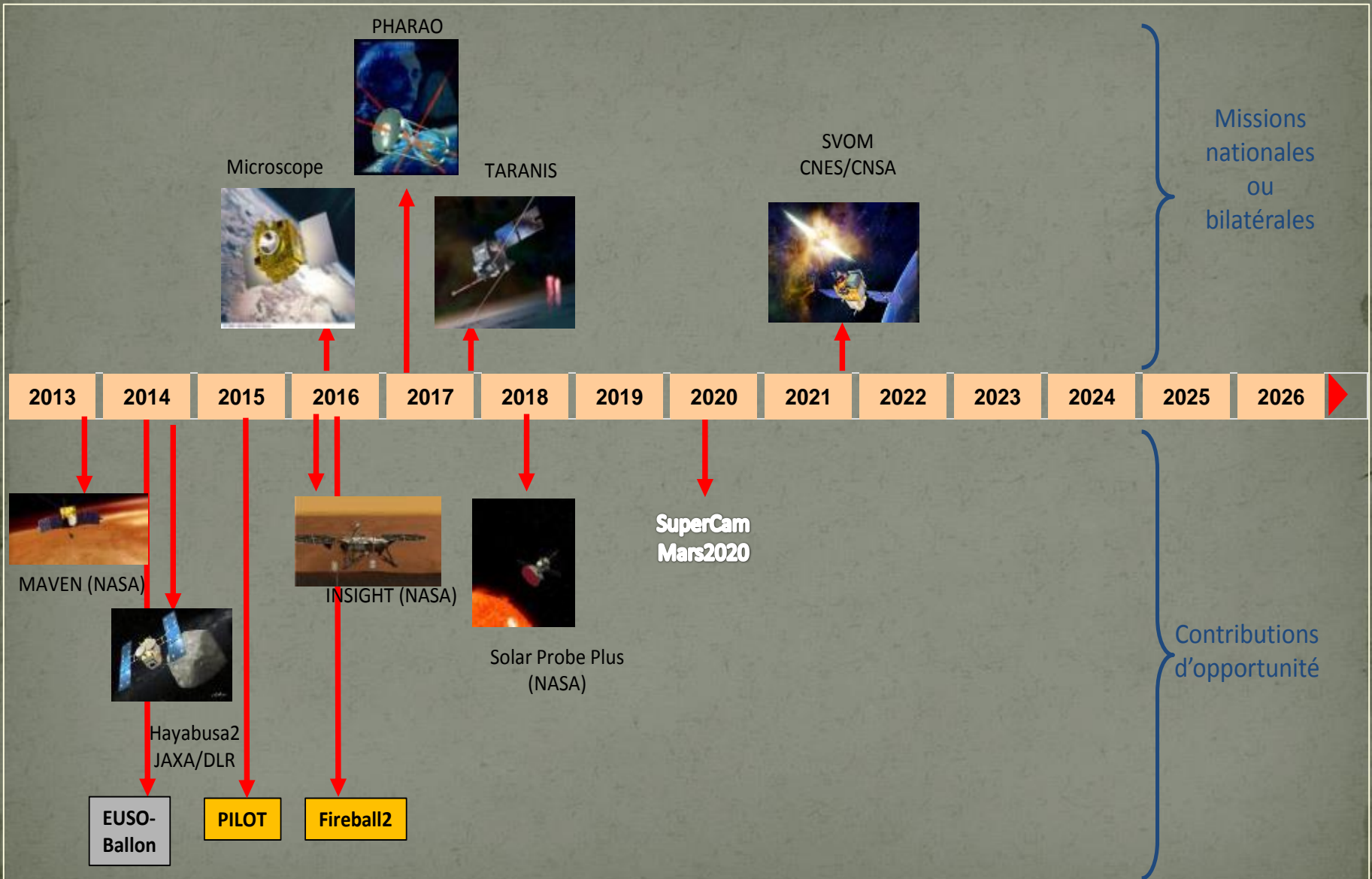
Missions du programme obligatoire de l'ESA					
GAIA	2013	ROSETTA	2014*	LISA-pathfinder	2015
BepiColombo	2016	Solar Orbiter (M1)	2017	CHEOPS (S1)	2018
JWST	2018	Euclid (M2)	2020	JUICE (L1)	2022
PLATO (M3)	2024	M4 (à sélectionner)	2026	ATHENA (L2)	2028
eLISA (L3)	2034				
Missions du programme Exploration de l'ESA					
ExoMars <sup>5</sup>	2016/18				
Missions multilatérales ou CNES					
MAVEN <sup>1</sup>	2013	Microscope <sup>2, 4</sup>	2014	TARANIS	2016
InSight <sup>1</sup>	2016	ACES/PHARAO <sup>2</sup>	2016	Solar Probe Plus <sup>1</sup>	2018
Mars2020 <sup>1</sup>	2020	SVOM <sup>3</sup>	2021		
<b>Astronomie et Astrophysique</b> <b>Système Solaire</b> <b>Soleil-Héliosphère-Magnétosphère</b> <b>Physique Fondamentale</b> Notes : en collaboration avec 1- NASA ; 2- ESA ; 3- CNSA ; 4- DLR ; 5- Roskosmos					



# Programme obligatoire ESA



# Programme multilatéral du CNES





Mission	RECOMMANDATION	P	Moyens sol (INSU)
<b>Gaia</b>	Soutien à WEAVE au WHT Soutien à MSE pour >2020 Mobilisation de la communauté exoplanètes	Po Po P1	<i>OHP : SOPHIE</i> <i>VLT : VIMOS, MUSE, HAWKI, X-SHOOTER, SPHERE, MATISSE, CRIRES, ERIS, UVES, MOONS VLTi, VST</i> <i>VISTA : 4MOST</i> <i>CFHT : ESPADONS, SITELE, SPIROU, MSE</i> <i>TBL : NARVAL, NeoNARVAL, SPIP</i> <i>WHT : WEAVE</i> <i>E-ELT : EPICS, CAM, HIRES, MOS</i> <i>IRAM : NOEMA, NIKA2</i> ALMA, LOFAR, SKA
<b>JWST</b>	Mise en place d'un groupe de coordination	P1	
<b>Euclid</b>	Mise en place d'un relevé de l'hémisphère nord avec Megacam au CFHT Sondage spectroscopique de 100000 galaxies	Po	
<b>CHEOPS</b>			
<b>PLATO</b>	Définir une stratégie pour le suivi sol (requis aussi par l'ESA)	Po	
<b>SVOM</b>	Garantir l'accès à au moins un télescope robotique à action rapide de la classe du mètre équipé d'une caméra panchromatique	Po	
<b>ROSETTA</b>	Soutien aux expériences de laboratoire		RT Nancay, IRAM : 30m et NOEMA, ALMA, VLT
<b>JUICE</b>			
<b>TARANIS</b>	Soutien aux campagnes observations sol/ballons	P1	Sol & ballons
<b>BepiColombo, Solar Orbiter, Solar Probe Plus</b>	Soutien des pôles thématiques et instruments au sol	P1	NRH, EST SuperDARN, EISCAT
<b>MAVEN, InSight, Mars2020, ExoMars</b>	Soutien aux expériences de laboratoire		Expériences de laboratoires
<b>MICROSCOPE</b>	Soutien des laboratoires de physique fondamentale		
<b>ACES</b>			Horloges au sol
<b>L2 (ATHENA)</b>	Mobilisation de la communauté	P2	
<b>L3 (eLISA)</b>	Mobilisation de la communauté et participation à VIRGO	P2	Advanced Virgo
<b>Herschel, PLANCK, CoRoT, XMM, CASSINI, T2L2, MSL, STEREO, THEMIS, SWARM</b>			Soutien à l'exploitation scientifique

# La pyramide du calcul intensif (1)

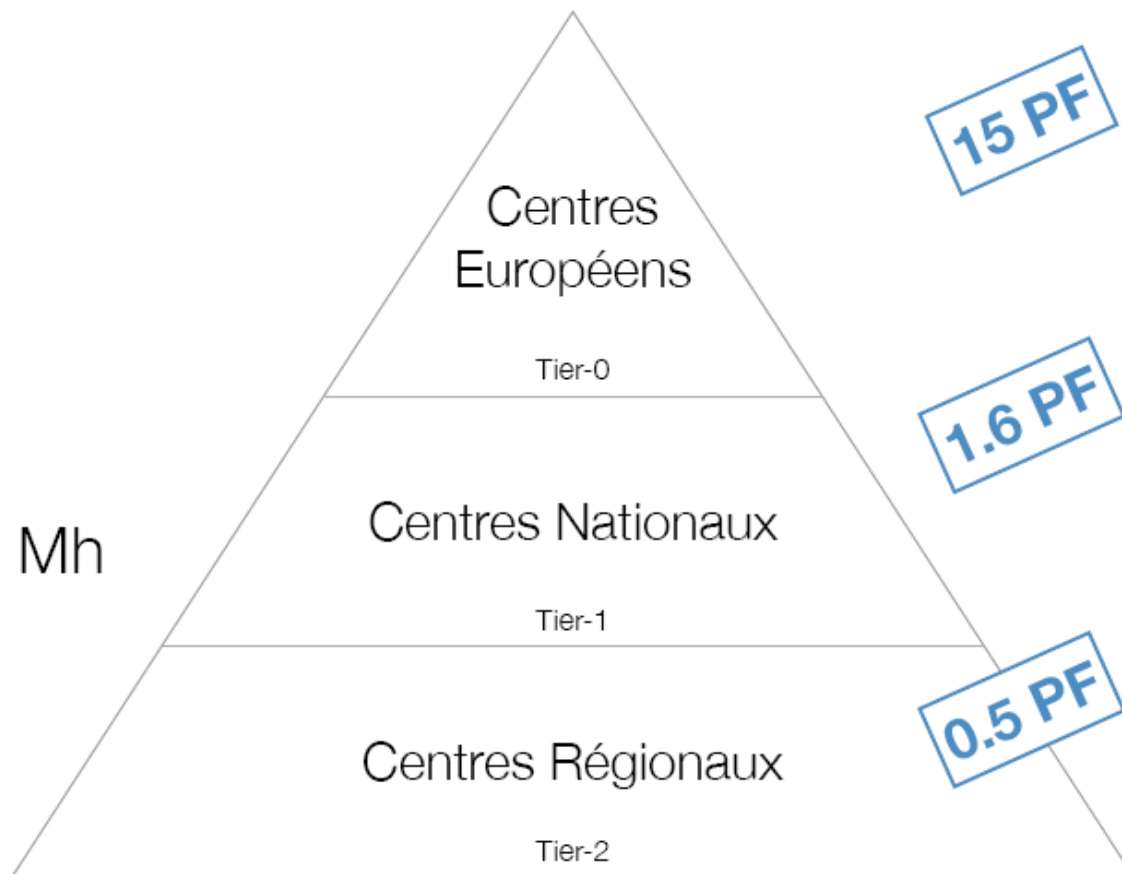
PRACE

**Tier-0** : 3-30 Mh

DARI

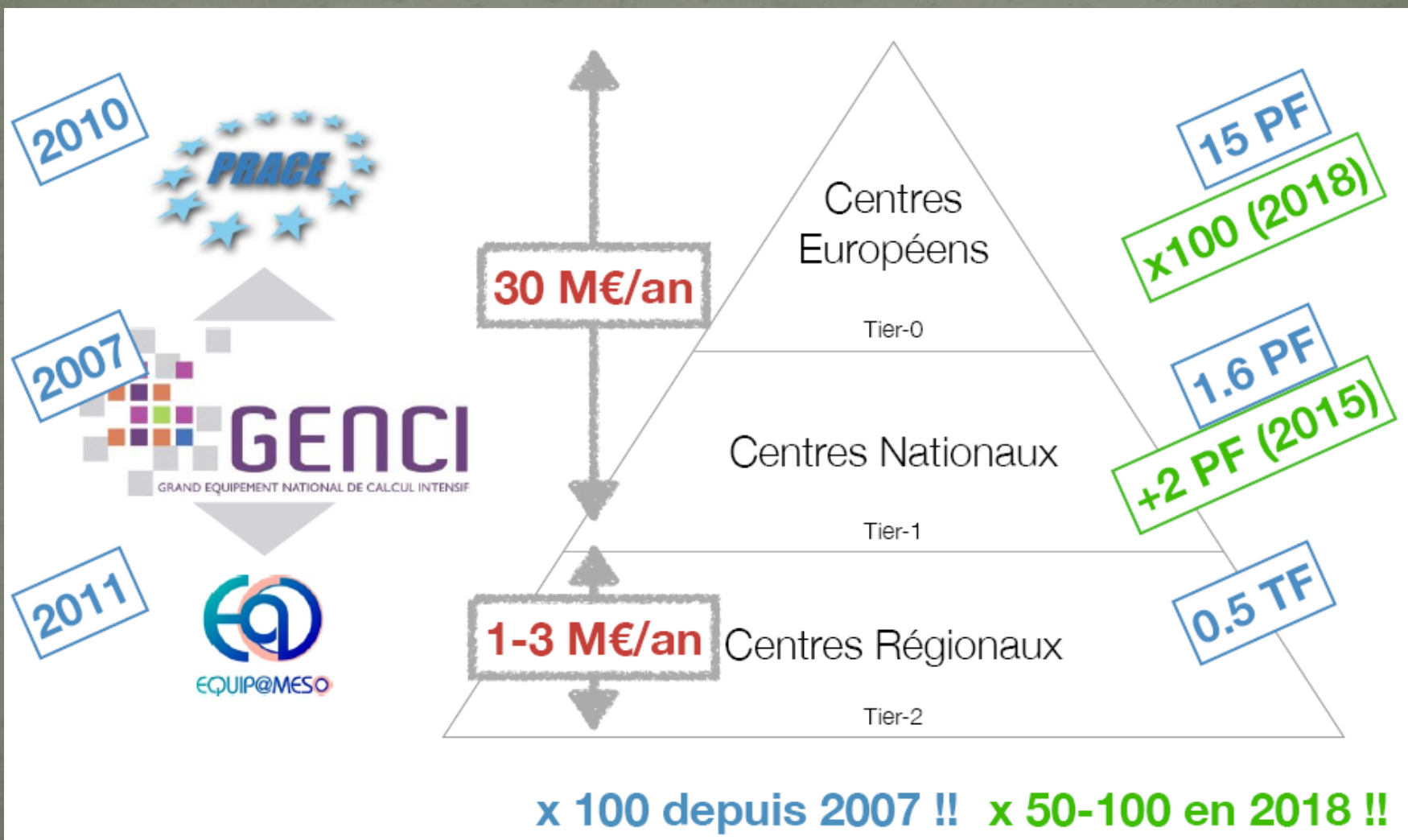
**Tier-1** : 300 kh - 3 Mh

**Tier-2** : < 300kh



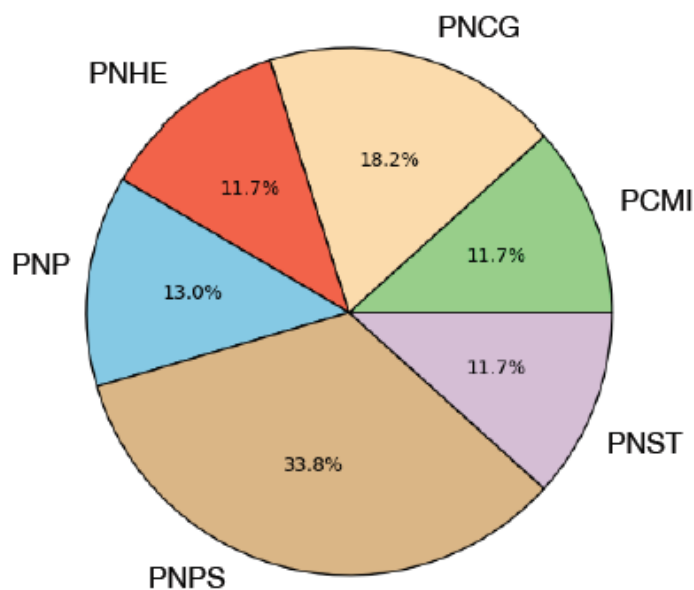


# La pyramide du calcul intensif (2)



# Calcul intensif et INSU/AA

La communauté INSU-AA utilise **5 à 10% du temps offert à tous les niveaux**. Cela produit ~70 publications / an.



## Usages variés :

Mémoire partagée / mémoire distribuée

Emergence des GPGPU

Gros consommateurs (> 10 Mh) **et** communauté importante de petits consommateurs (< 1 Mh)

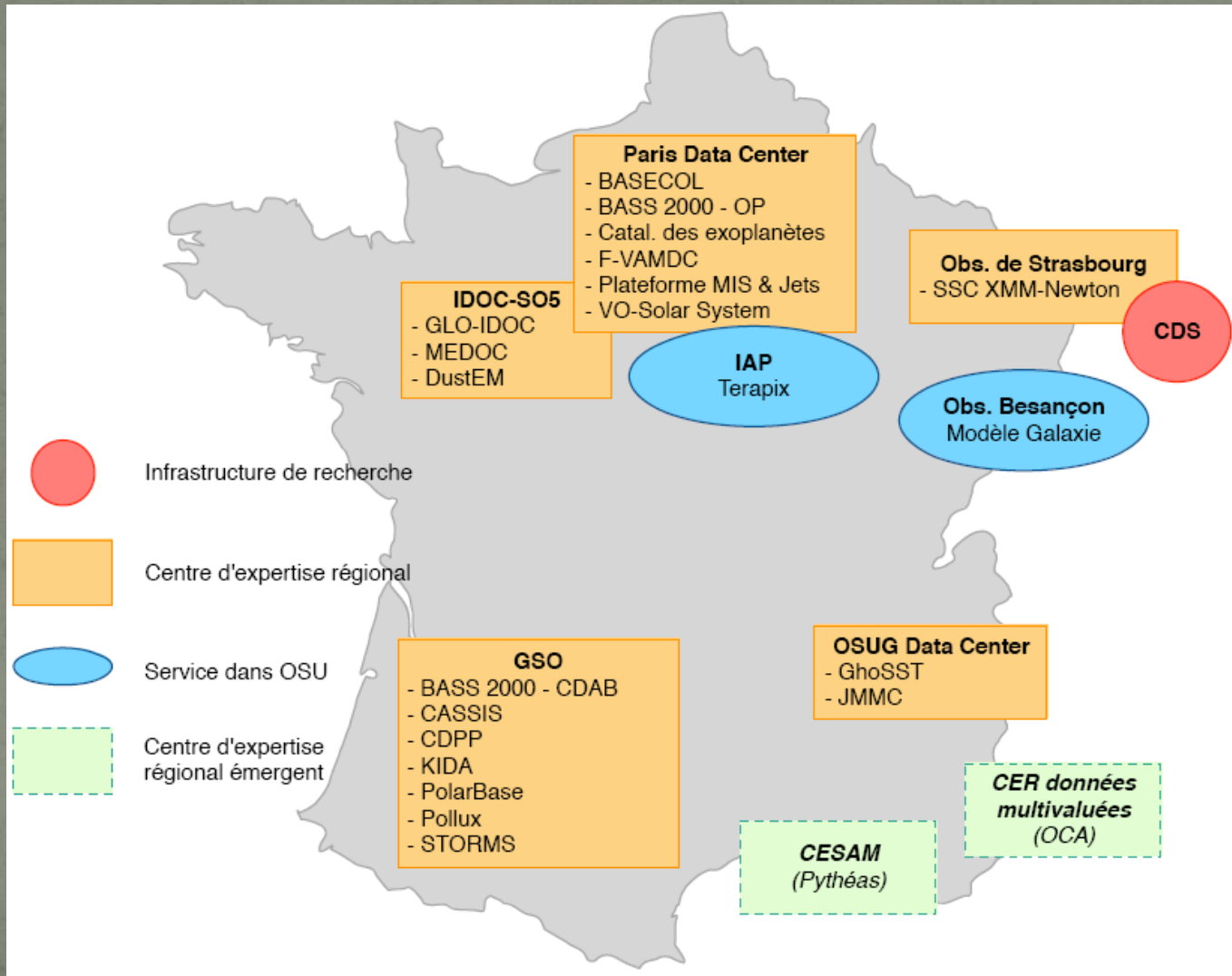
**La pyramide HPC mise en place par GENCI ces 5 dernières années répond très bien à la diversité des usages de notre communauté.**



# Les centres de données

- assembler et/ou produire une collection de données pérennes de haute qualité et à forte valeur ajoutée
- garantir une valorisation scientifique maximale des données
- diffusion des données et métadonnées sans restriction et selon standards internationaux s'il y en a
- “curation” des données et mise à jour permanente

# Carte de France et services





# Au-delà de ces grands projets...

- Importance de conserver de l'énergie pour la créativité et l'invention à destination des générations à venir de jeunes chercheurs.
- Des quantités considérables de données existent:
  - Développement de nouveaux concepts: les observatoires virtuels
  - Développement logiciel pour croiser l'information contenue dans les catalogues différents.
- Effort important vers le public
  - Formation, communication
  - Accès aux télescopes (Hands on Universe, La Main à la Pâte...)



# Conclusion

- **Les prospectives sont des exercices dynamiques : accord entre scientifiques et agences**
- **Favoriser l'imagination pour être à la fois dans la prospective et la combattre pour mieux la dépasser: innovation, R&D, recherche conceptuelle...**
- **Grande source de problèmes mathématiques (modèle d'acquisition des données et modélisation de l'information): idées nouvelles bienvenues!**