

A la découverte de notre Galaxie

A large radio telescope dish is silhouetted against a dramatic sunset sky. The sun is low on the horizon, casting a warm orange glow. The sky is filled with scattered clouds, some of which are illuminated from below, creating a mix of blue, orange, and white. The foreground is dark, showing the silhouette of the telescope and some distant trees.

Marie-Hélène Grondin
Marianne Lemoine

Laboratoire de Physique des 2 Infinis
Université de Bordeaux

La voie Lactée

1 parsec (pc) = 3.26 années lumière = $3.1 \cdot 10^{16}$ m

Notre Galaxie est un disque fin de 25 kpc & ~ 300 pc d'épaisseur

Entouré par un halo de ~ 30 kpc

Le Soleil est situé à ~ 8 kpc du Centre Galactique

Densité moyenne $\sim 1 \text{ cm}^{-3}$; Champ magnétique : $B \sim 0.5 \text{ nT} = 5 \mu\text{G}$

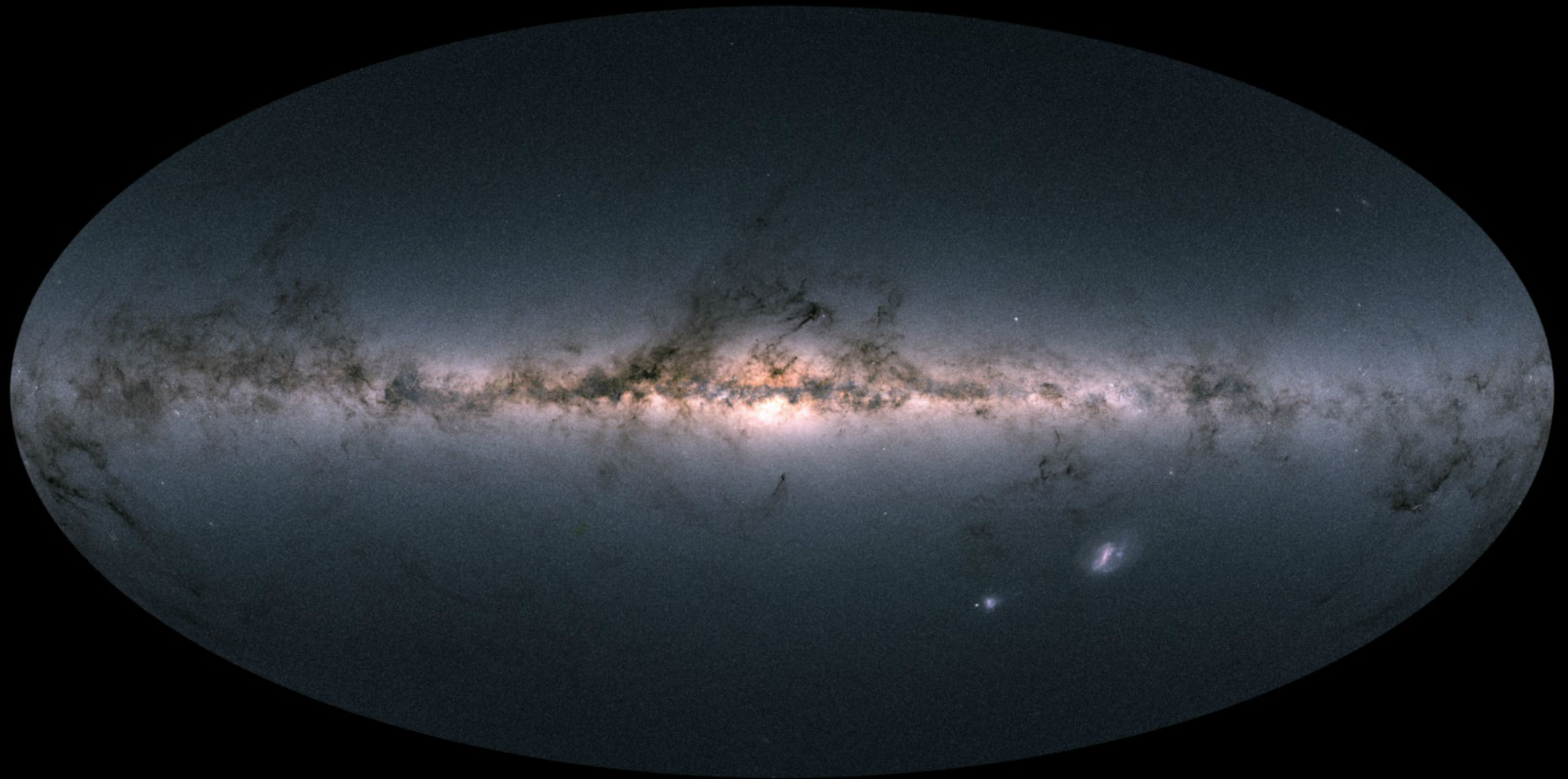
Densité moyenne dans les nuages moléculaires: $100\text{-}1000 \text{ cm}^{-3}$

25 kpc

8 kpc

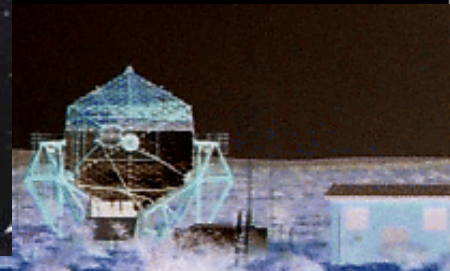


You are here
Vous êtes ici



CRÉDIT : ESA/GAIA/DPAC

La constellation d'Orion



Des étoiles toutes très différentes

Naine Rouge
0,08 - 0,4 masse solaire

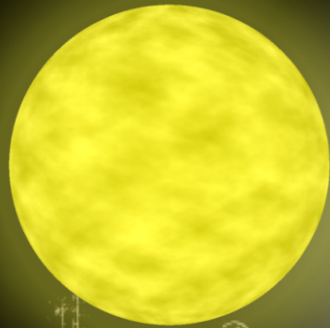


Etoile Solaire
~ 1 masse solaire
6 000°C

10 000°C

Géante Bleue
jusqu'à 100 masses solaires ?

30 000°C



**PLUS
CHAUD**

Voir le passé

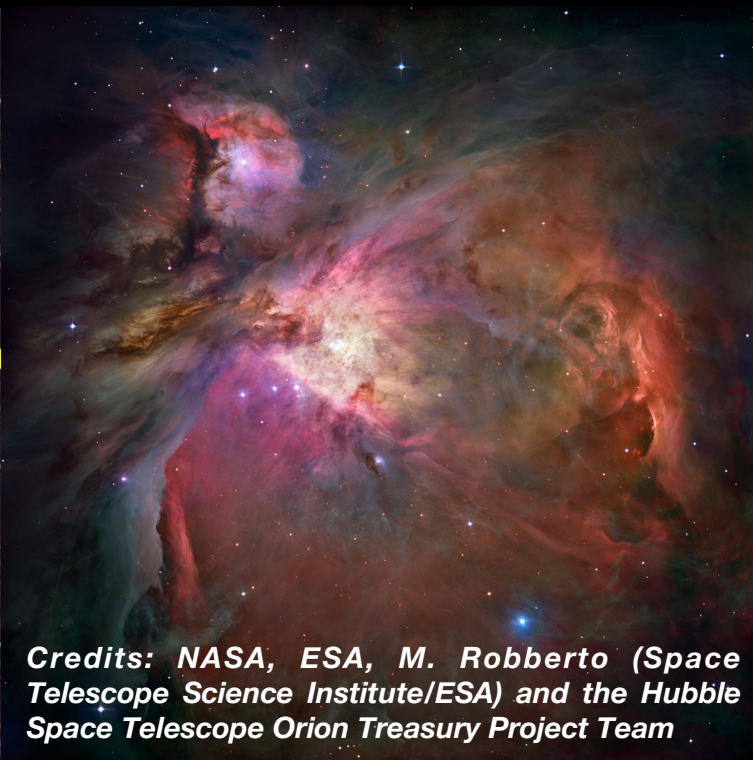
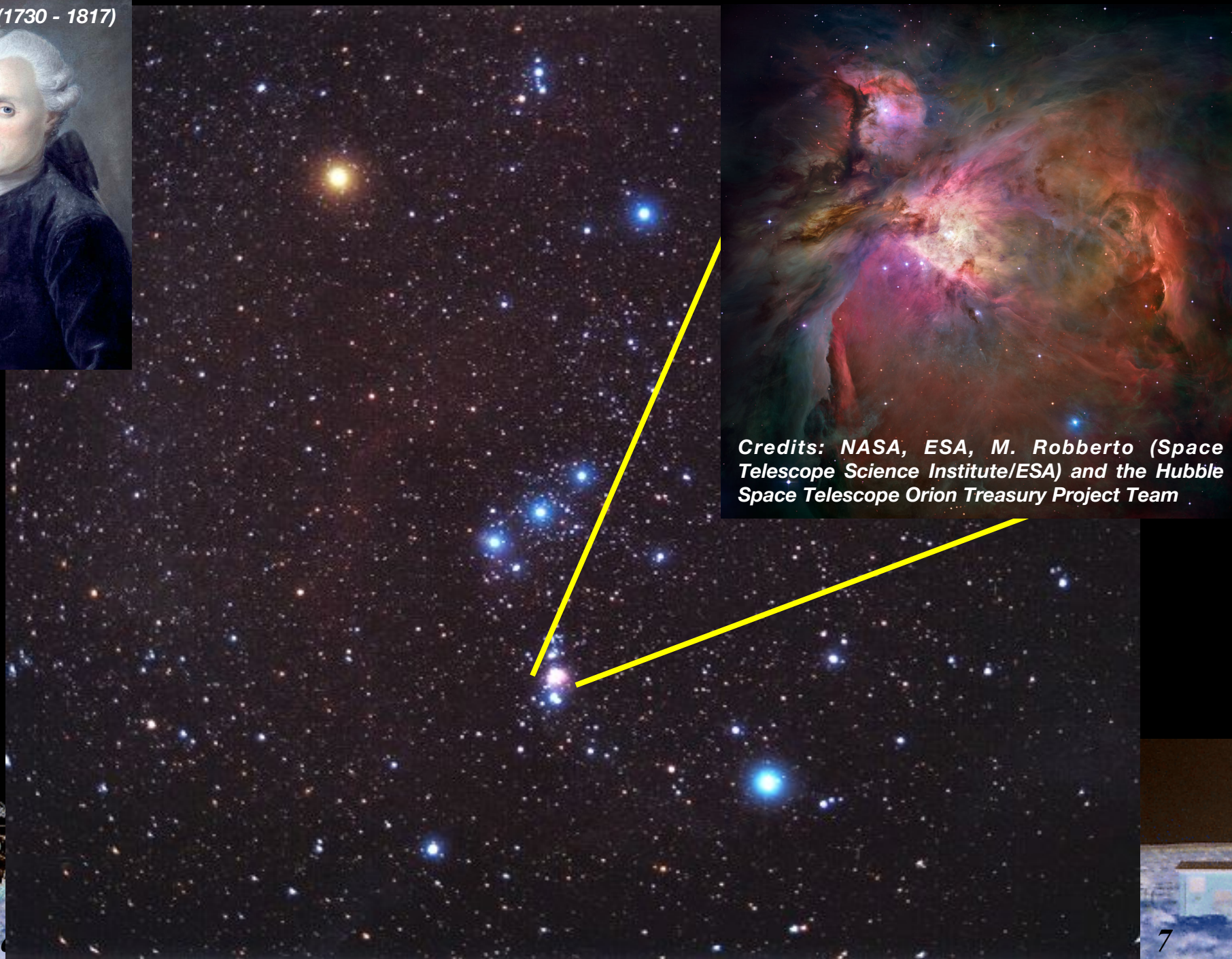
Vitesse lumière = 300 000 km/s

1 année lumière = 9461 milliards de km = 63 241 UA



La grande Nébuleuse d'Orion: M42

Charles Messier (1730 - 1817)

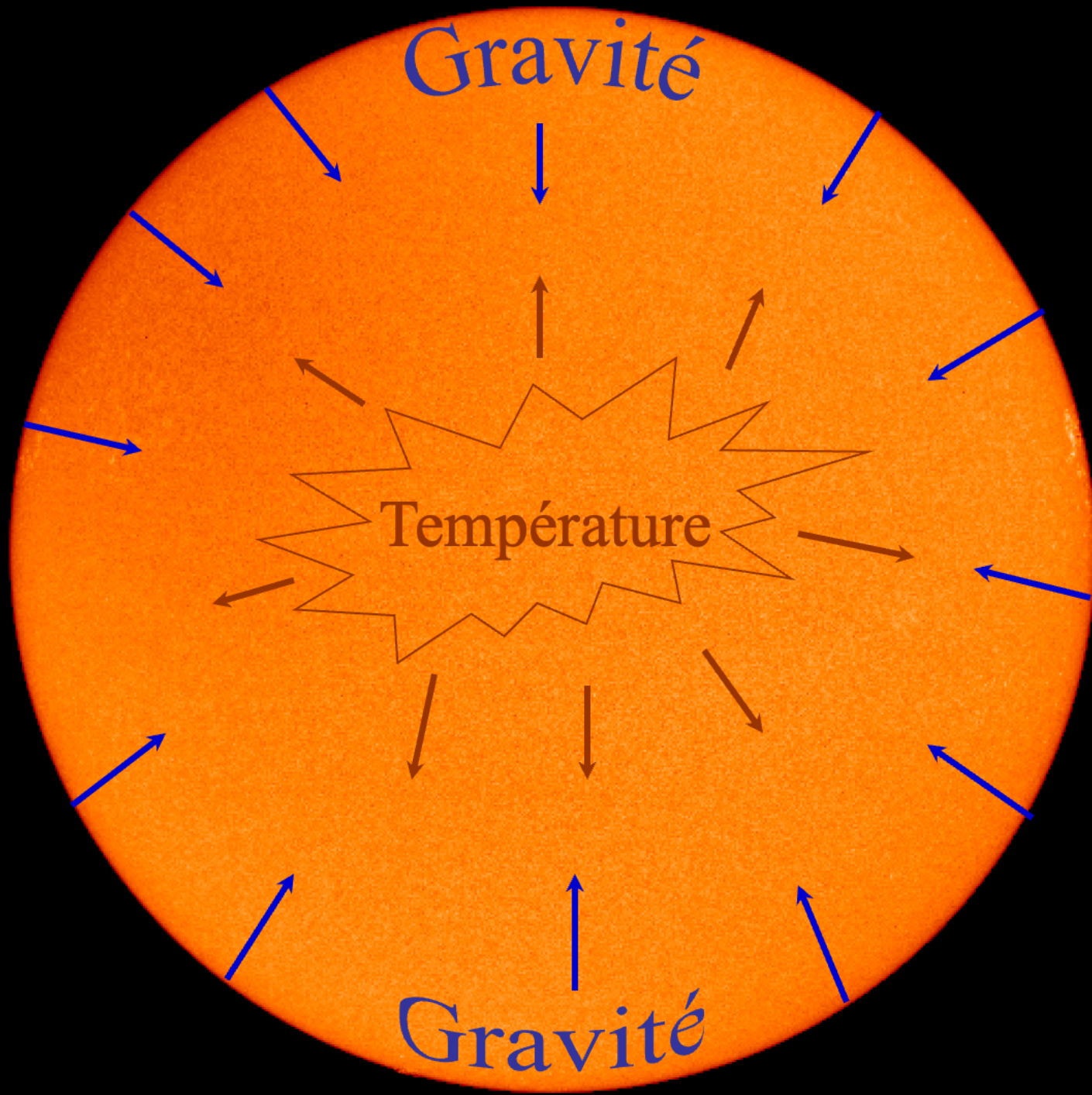


Credits: NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA) and the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team

La naissance des étoiles



Les nébuleuses diffuses : des pouponnières d'étoiles

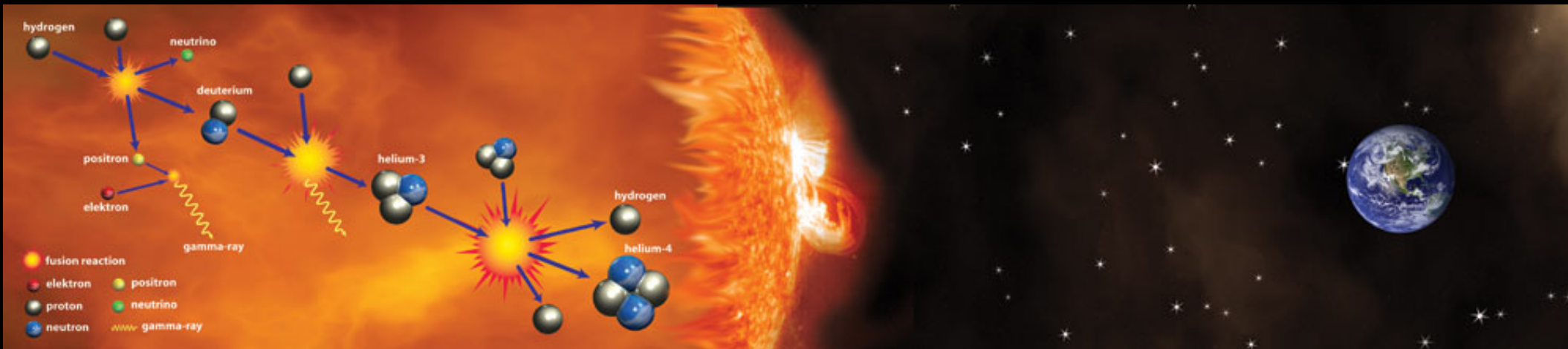


Energie fournie par la fusion thermonucléaire



La masse des produits finaux est inférieure à la somme des masses des noyaux fusionnés, la différence est transformée en énergie cinétique (puis en chaleur)

Théorie d'Einstein: $E = Mc^2$



Luminosité du Soleil

Rayon $R = 7 \times 10^8 \text{ m}$

Température de surface $T = 5750 \text{ K}$

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

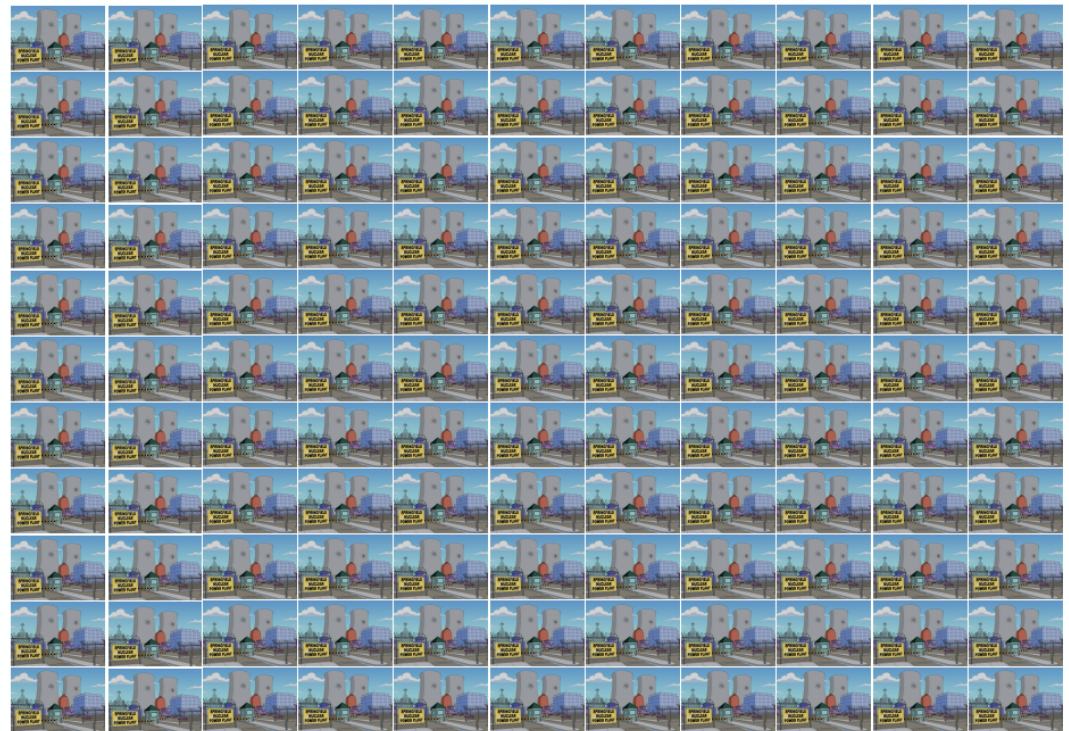
$$1 L_{\odot} \simeq 3.8 \times 10^{26} \text{ W}$$

Un million de milliard de fois la puissance totale des 450 réacteurs nucléaires sur Terre

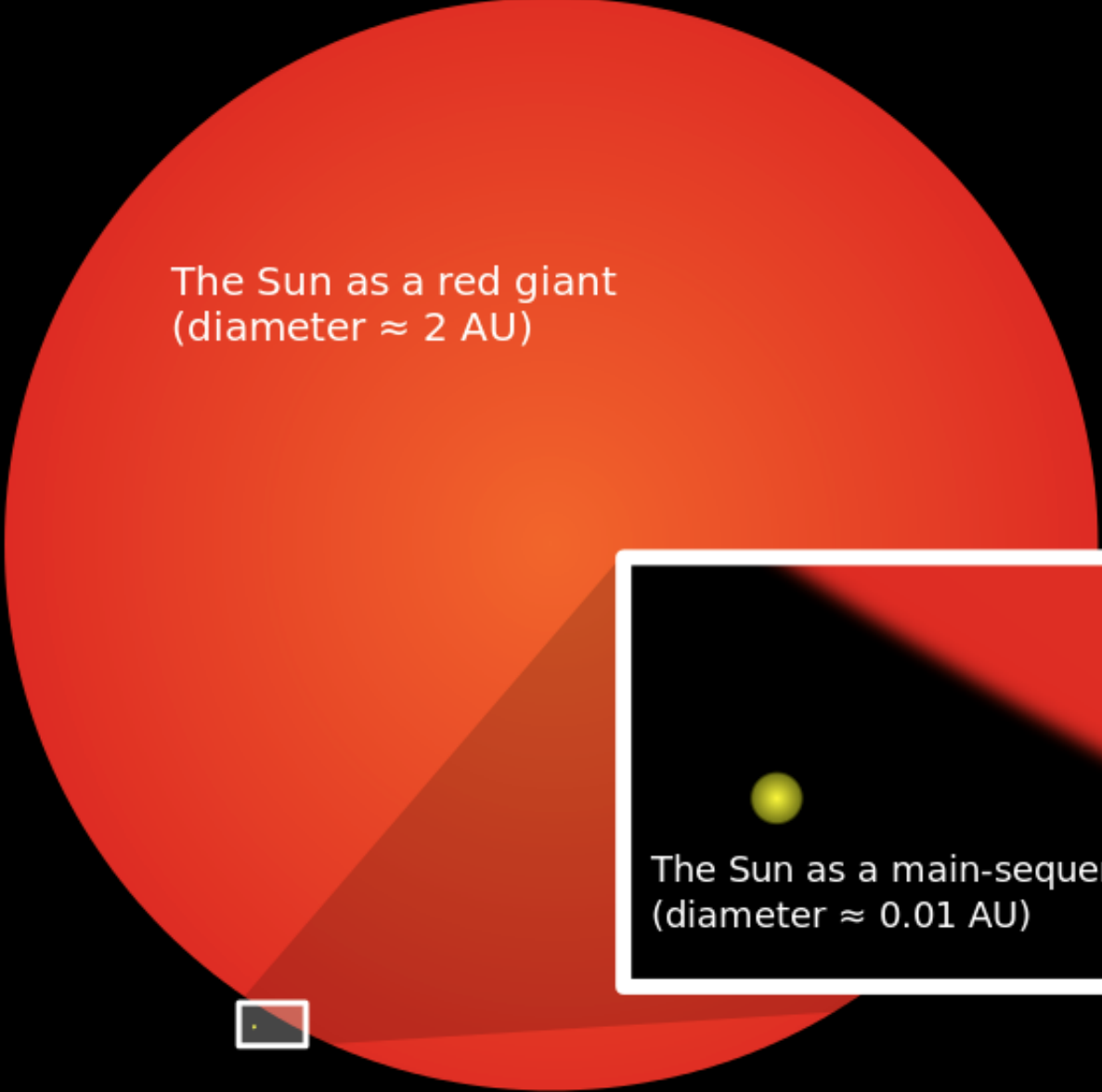
$$P \sim 4 \times 10^{11} \text{ W}$$



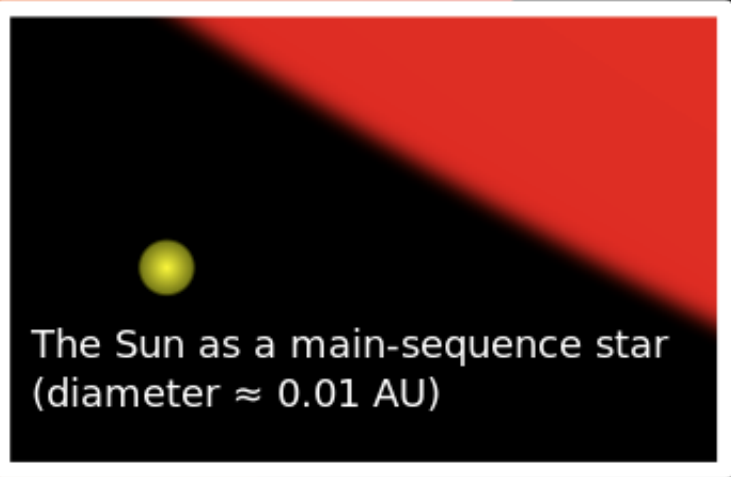
=



...



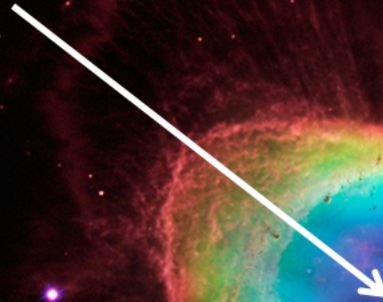
The Sun as a red giant
(diameter ≈ 2 AU)



The Sun as a main-sequence star
(diameter ≈ 0.01 AU)

Le Soleil après sa mort

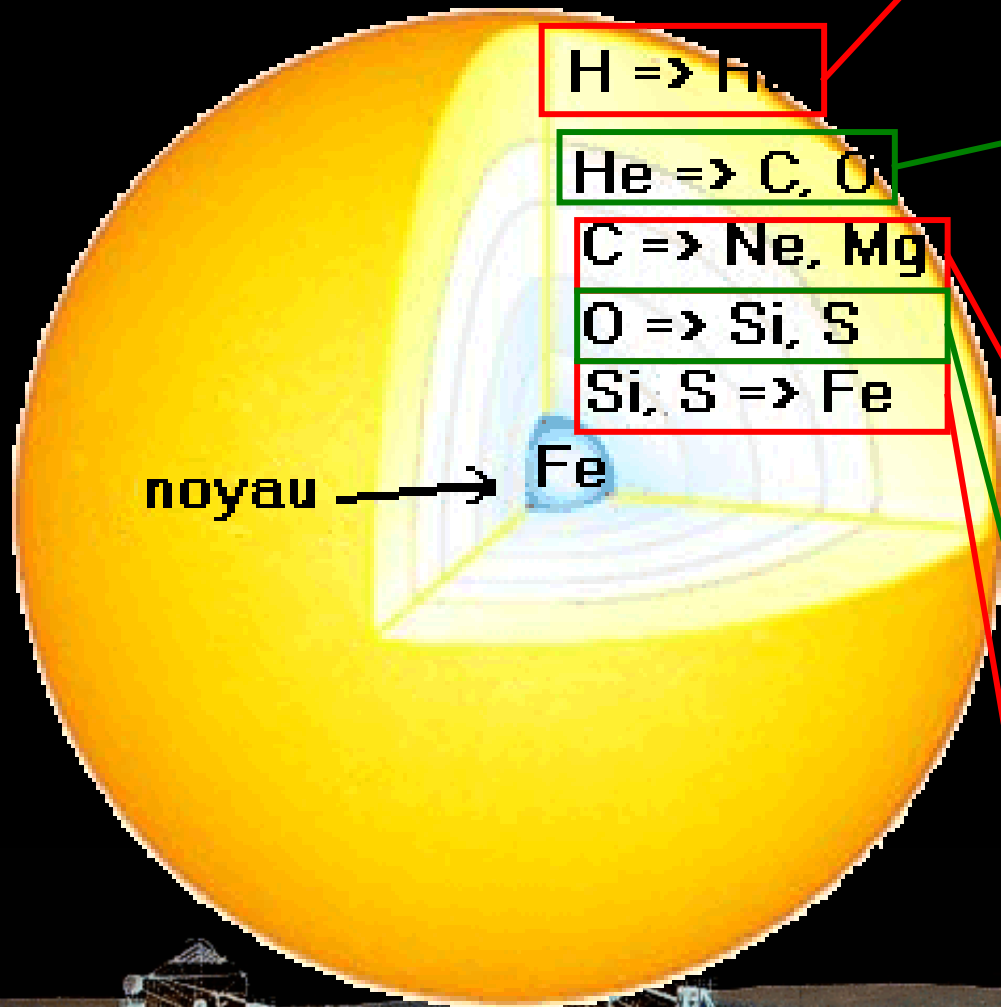
Naine blanche
cadavre de l'étoile



Les nébuleuses planétaires : des étoiles mortes



Étoile de 25 fois la masse du soleil



15 millions de degrés

7 millions d'années

100 millions de degrés

500.000 ans

500 millions de degrés

600 ans

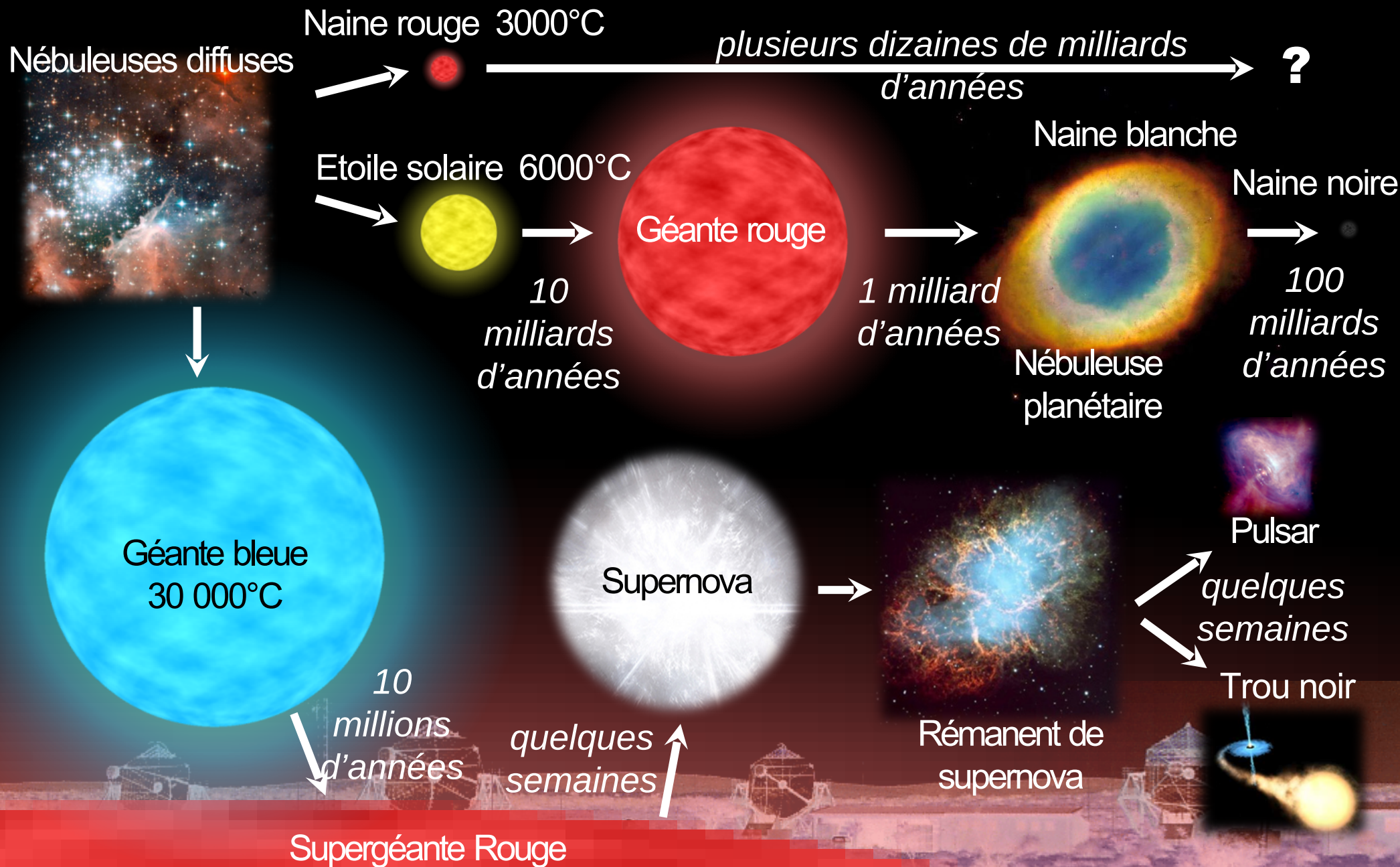
2 milliards de degrés

6 mois

3 milliards de degrés

1 jour

Les étoiles de la naissance à la mort



Lorsqu'une étoile géante disparaît...



Supernova

Supernova à effondrement de coeur



Supernova

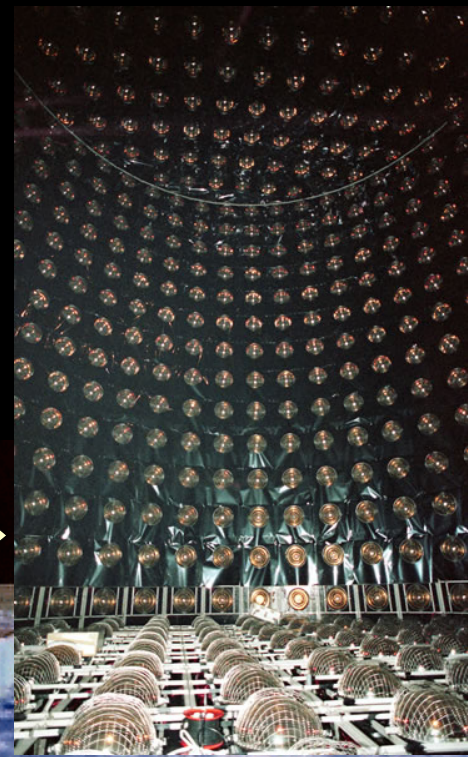
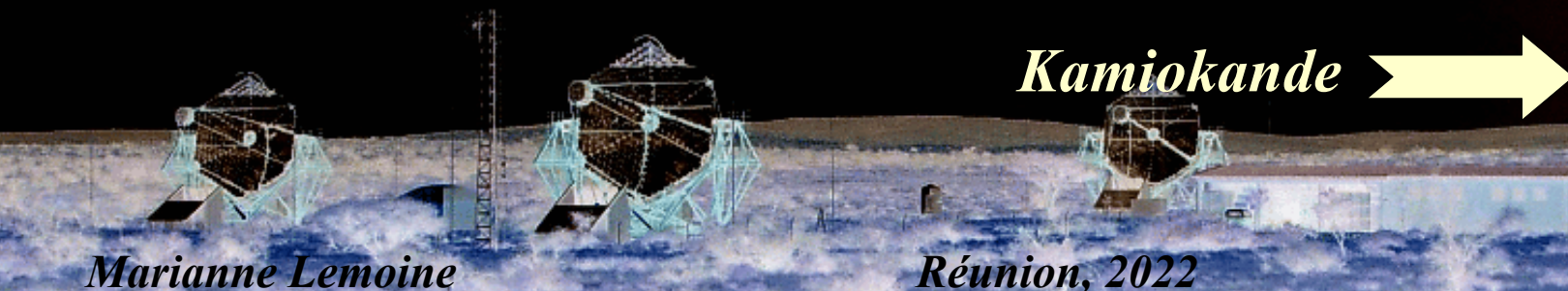


Energie libérée: 3×10^{46} J

Neutrinos: 99%

Energie cinétique: 1%

Rayonnement électromagnétique: 0.1%



Estimations énergétiques

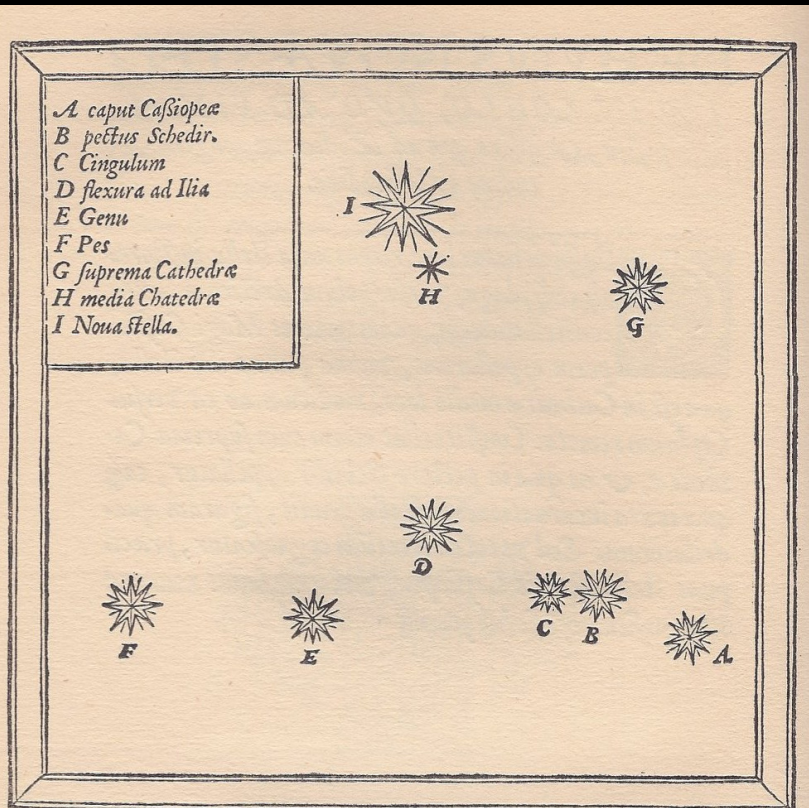
- ❑ Energie d'un micro-onde de 1kW utilisé pendant 1 minute: 60 kJ
- ❑ Energie dégagée par le bombardement d'Hiroshima: 6×10^{13} J
- ❑ Energie dégagée par la plus puissante bombe nucléaire jamais testée, la bombe Tsar Bomba: 2×10^{17} J
- ❑ Energie dégagée par la collision d'une météorite de 10km dans le Golfe du Mexique: 5×10^{23} J
- ❑ Energie cinétique dégagée par une supernova: 10^{44} J
- ❑ Energie dégagée par le Soleil en 10 milliards d'années: $1,2 \times 10^{44}$ J



Un reste de supernova historique

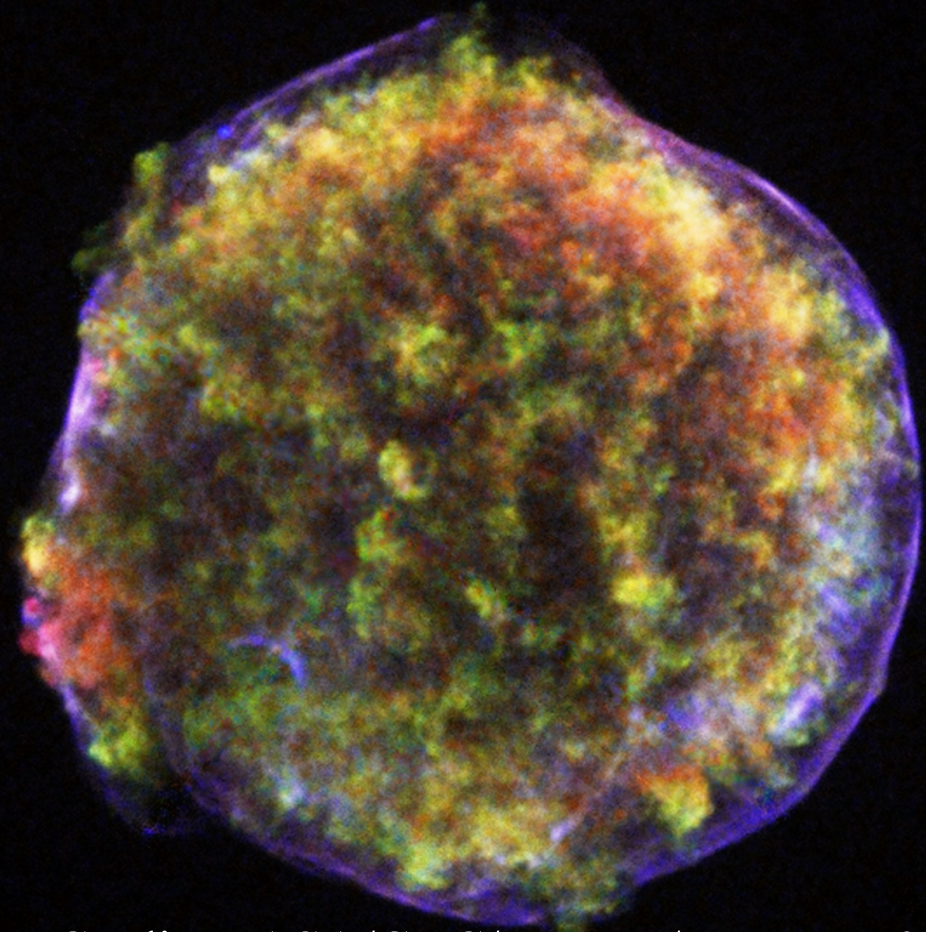
SN 1572 (également appelée Supernova de Tycho)

=> Révolution en Astronomie; développement des catalogues



A caput Cassiopeæ
B pectus Schedir.
C Cingulum
D flexura ad Ilia
E Genu
F Pes
G suprema Cathedra
H media Chatedra
I Nona stella.

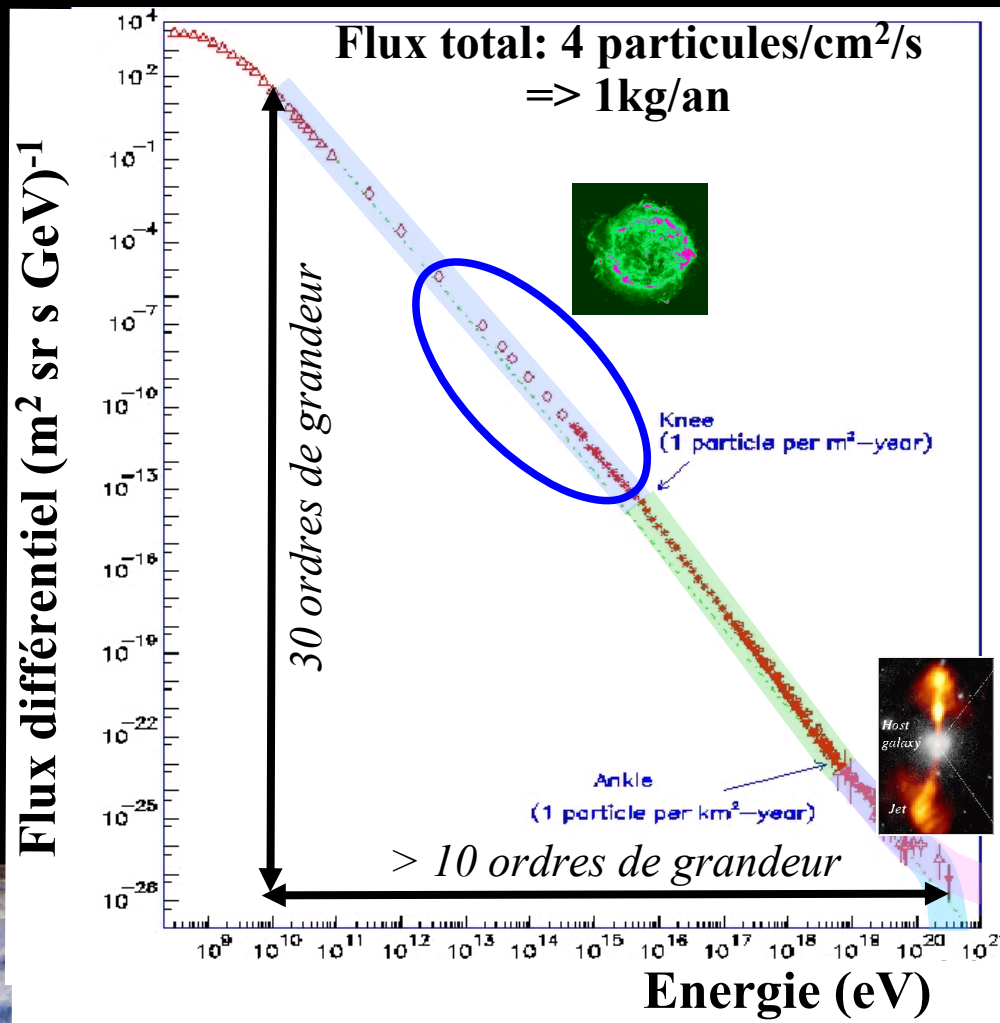
*Distantiam verò huius stelle à fixis aliquibus
in hac Cassiopeiæ constellatione, exquisito instrumento,
& omnium minorum capacj, aliquoties obseruavi. In-
ueni autem eam distare ab ea, quæ est in pectore, Schedir
appellata B, 7. partibus & 55. minutis : à superiori
verò*



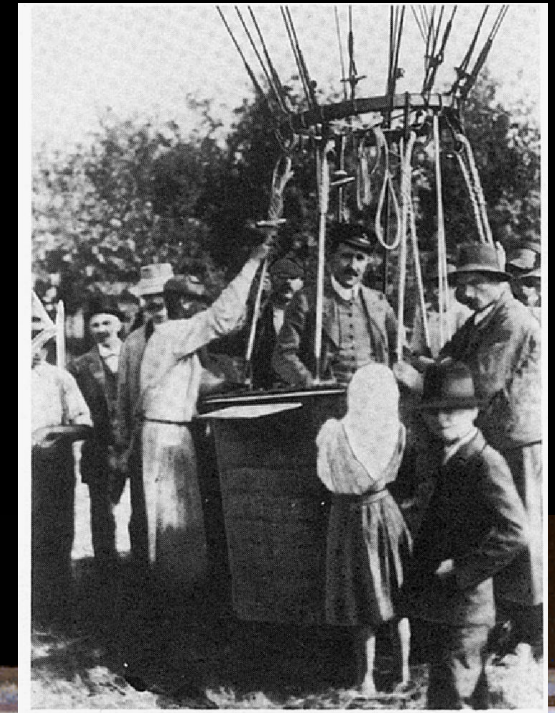
Credit: NASA/CXC/Rutgers/J. Warren &
J. Hughes et al.

Le rayonnement cosmique

- ❑ Découvert en 1912 (Victor HESS)
- ❑ 10 ordres de grandeur en énergie, 30 en flux
- ❑ Composition: 99% de noyaux & 1% d'électrons
- ❑ Origine toujours inconnue



Vol en ballon
Victor Hess, 1912



Les vestiges de supernovae : accélérateurs cosmiques

- **Rayons cosmiques chargés**: diffusion sur les champs magnétiques galactiques
=> **perte de l'information directionnelle**
- **Rayons gamma**: produits sur les sites d'accélération des RCs
=> **information sur le site d'accélération**

Un candidat excellent :
Les vestiges de supernovae

Problème non résolu depuis 1912 !



**Rayons cosmiques
chargés**

Les Pulsars

Découverte surprise en 1967 par Jocelyn Bell & Anthony Hewish (LGM-1)

Aujourd'hui : > 2700 pulsars connus

Pulsar = « étoiles à neutrons, hautement magnétisées, en rotation rapide »

=> Comparable à un phare (faisceau balayant le ciel périodiquement)

Les étoiles à neutrons naissent de l'explosion d'étoiles massives.

Objets les plus denses de l'univers, après les trous noirs.

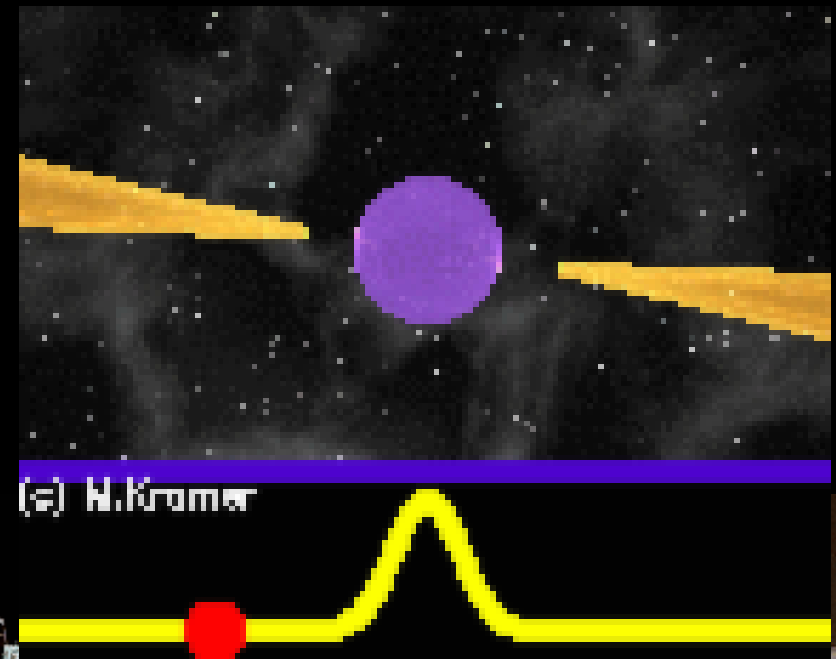
$M \sim 1.2 - 1.4 M_{\text{sol}}$

$R \sim 10 \text{ km}$

$B \sim 10^8 \text{ T}$ (sur Terre $B \sim 5 \times 10^{-5} \text{ T}$!)

$2 \text{ ms} < \text{Period} < 10 \text{ s}$

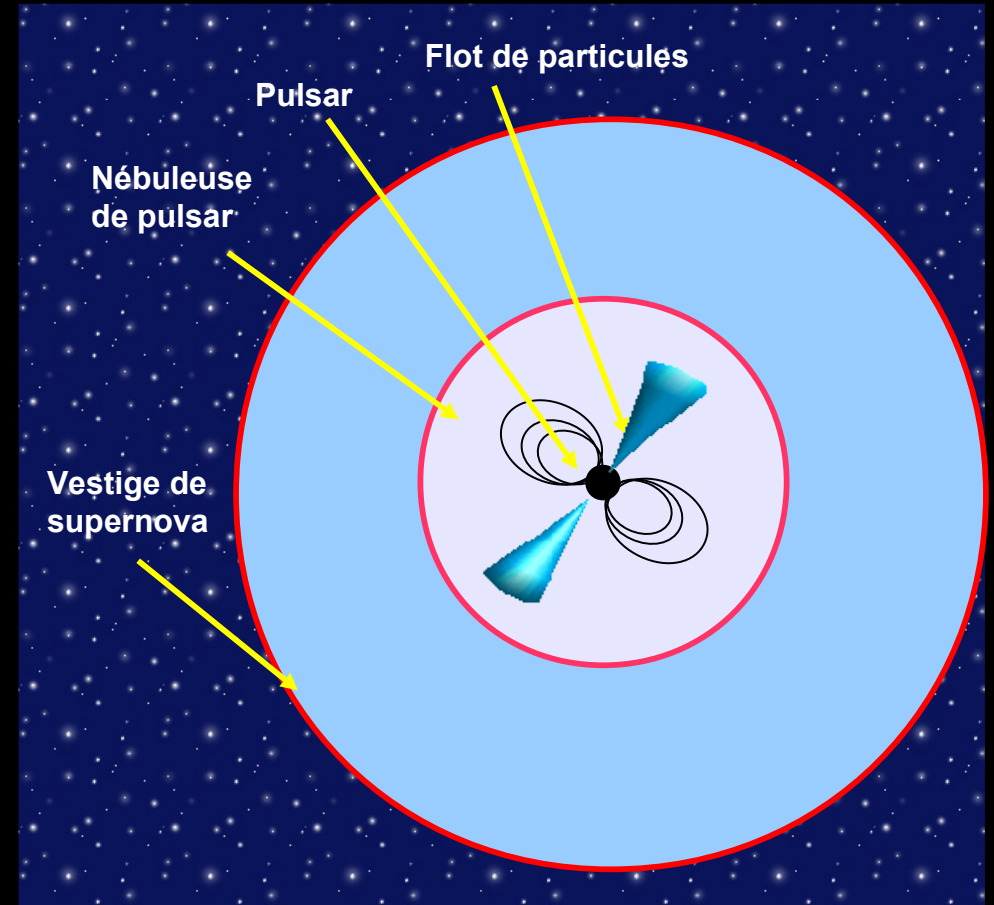
=> densité $\sim 10^{17} \text{ kg/m}^3$



La nébuleuse de pulsar : une deuxième onde de choc !

Après l'explosion en supernova, le pulsar émet un vent de particules chargées (e^\pm) à des vitesses très importantes.

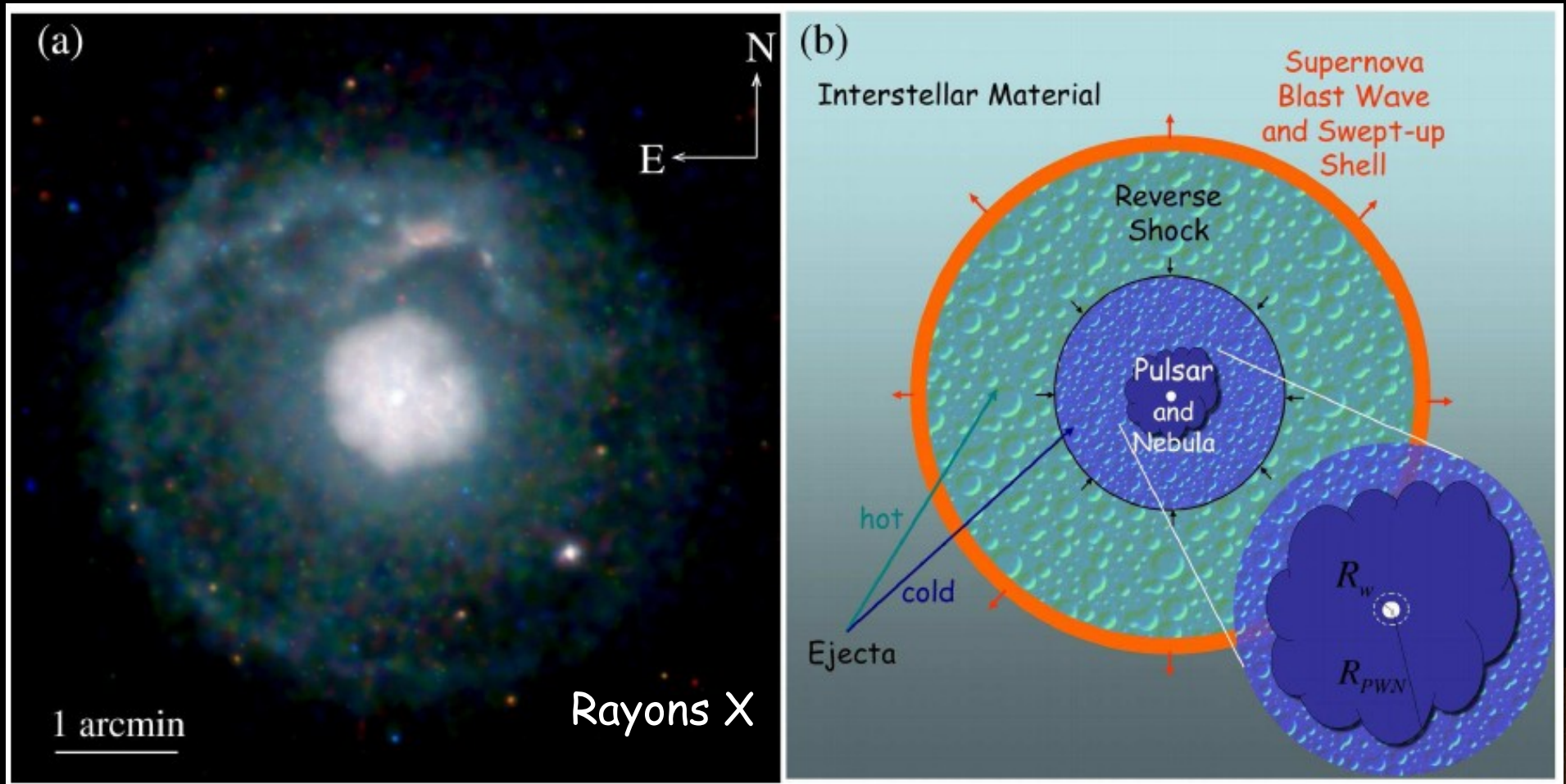
Une onde de choc se forme à proximité du pulsar, zone d'accélération des particules.



Les nébuleuses de pulsars (II)

G21.5-0.9: une nébuleuse composite

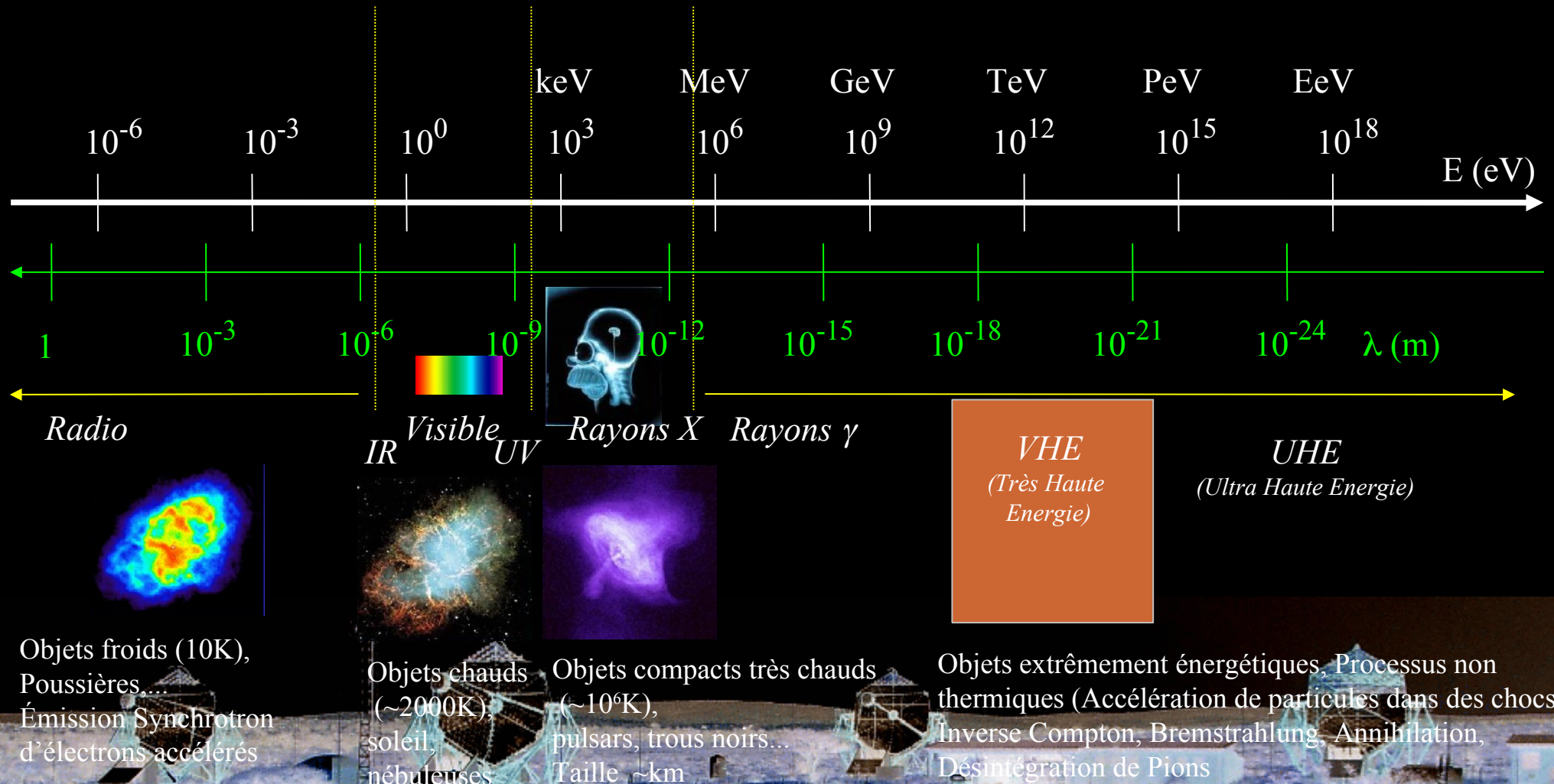
Au centre, émission étendue d'une nébuleuse alimentée sans cesse par le pulsar J1833-1034



La lumière invisible !



La lumière visible représente une octave sur près de 70 !
Le rayonnement gamma couvre 20 octaves à lui seul



Objets froids (10K),
Poussières...
Émission Synchrotron
d'électrons accélérés

Objets chauds
(~2000K),
soleil,
nébuleuses

Objets compacts très chauds
(~ 10^6 K),
pulsars, trous noirs...
Taille ~km

Objets extrêmement énergétiques, Processus non
thermiques (Accélération de particules dans des chocs)
Inverse Compton, Bremstrahlung, Annihilation,
Désintégration de Pions

Preuves observationnelles: les électrons

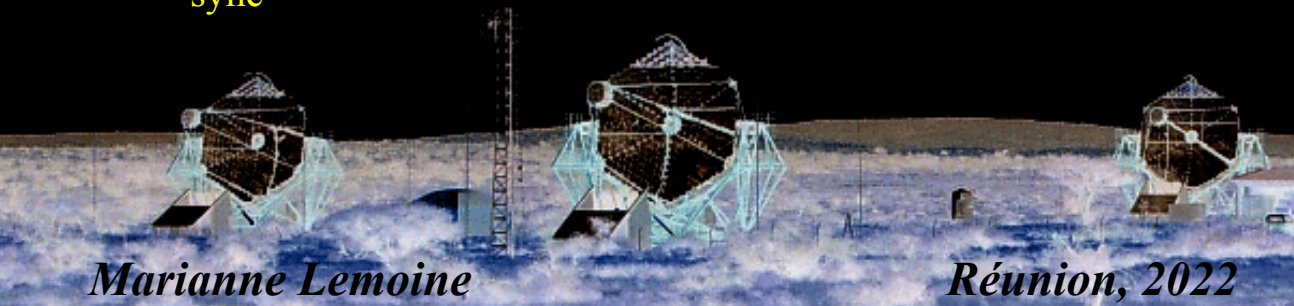
1. En radio :

Dès 1950, la découverte d'émission radio dans certains restes (Cas A, Tycho) prouve l'existence d'une population d'électrons accélérés au GeV.

2. En rayons X :

En 1995, ASCA met en évidence que l'émission de périphérie de SN1006 est dominée par le rayonnement des électrons accélérés à des énergies de l'ordre de 100 TeV. (*Koyama et al., Nature, 1995*)

$$\nu_{\text{sync}} \text{ (Hz)} = 1.65 \times 10^7 B_{\mu\text{G}} E^2_{\text{GeV}}$$



Marianne Lemoine

Réunion, 2022

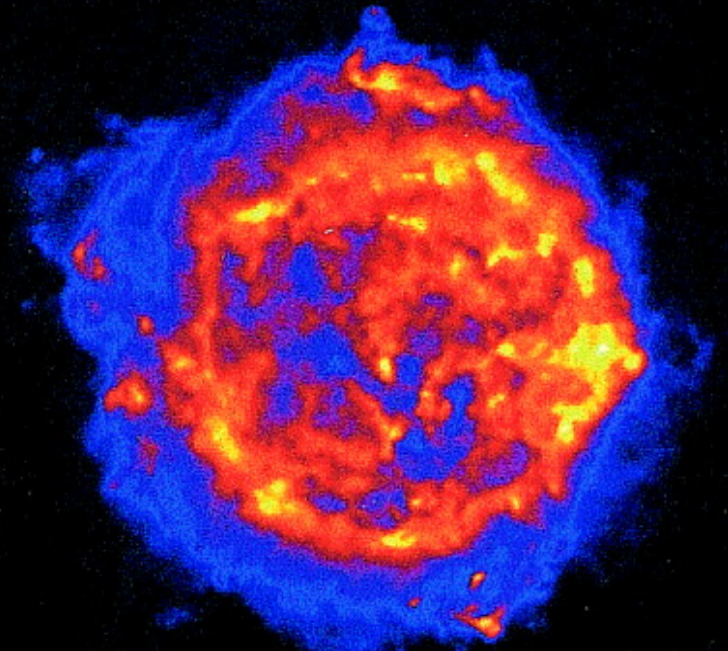


Image radio de Cas A

Et les protons ?

Production de γ par interaction proton-proton
=> Nécessité d'observer dans le domaine γ

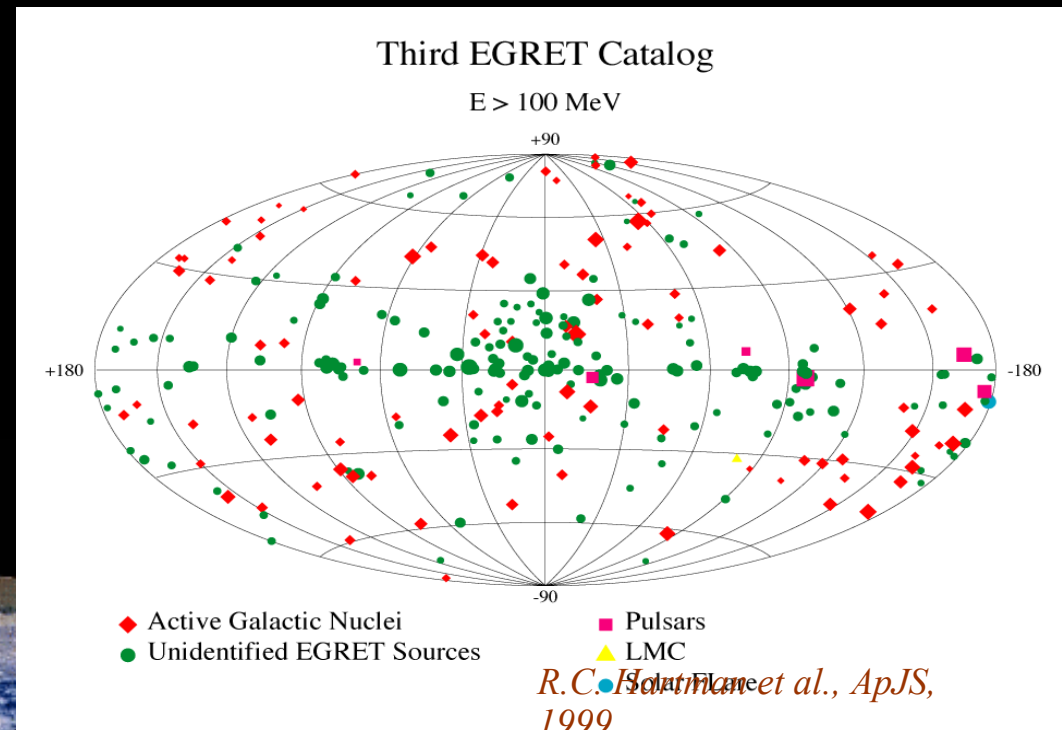
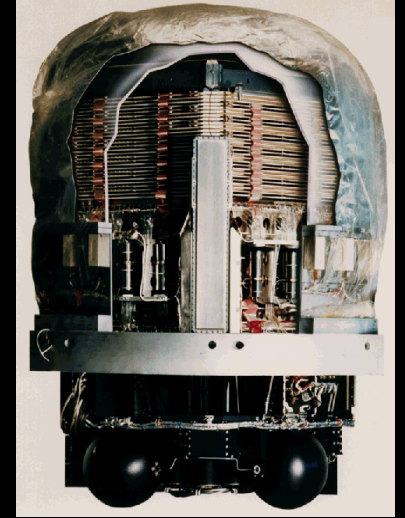
1er satellite gamma:

SAS-2 (NASA) en 1972: détection de 3 sources !

Essor du domaine γ avec CGRO/EGRET :

- Avril 1991 - Juin 2000
- 30 MeV - 30 GeV

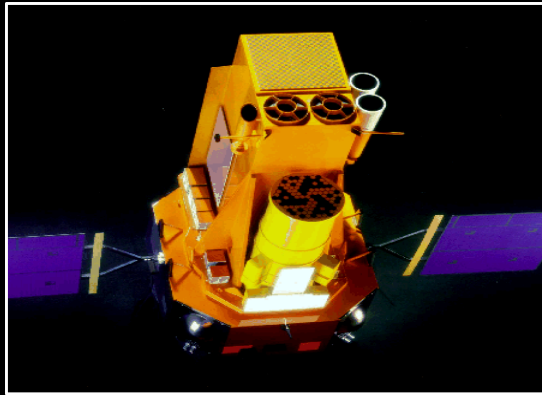
271 sources détectées...mais
aucun vestige de supernova
clairement identifié



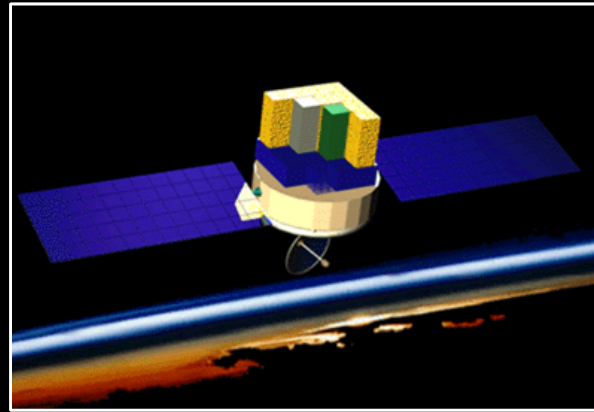
Les instruments en Astronomie gamma

γ mous: $E < 10 \text{ MeV}$

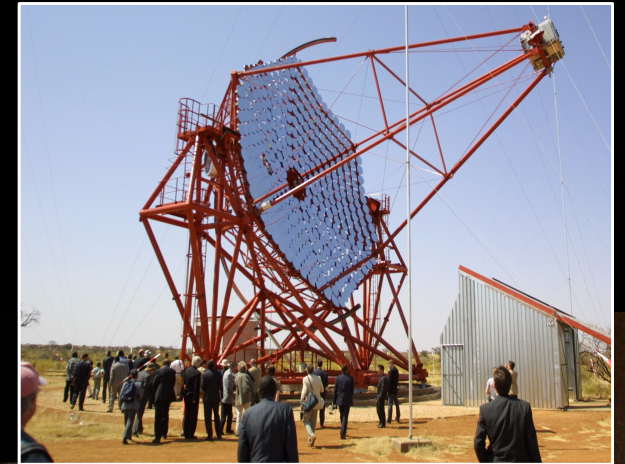
INTEGRAL



γ de haute énergie:
 $10 \text{ MeV} < E < 100 \text{ GeV}$
EGRET, AGILE, Fermi



γ de très haute énergie
 $E > 100 \text{ GeV}$
HESS, VERITAS...



Le Large Area Telescope (LAT) à bord du Fermi Gamma-Ray Space Telescope

Large Area Telescope (LAT):

Grand domaine d'énergie: 20 MeV - >300 GeV
(incluant la région inexplorée 10-100 GeV)

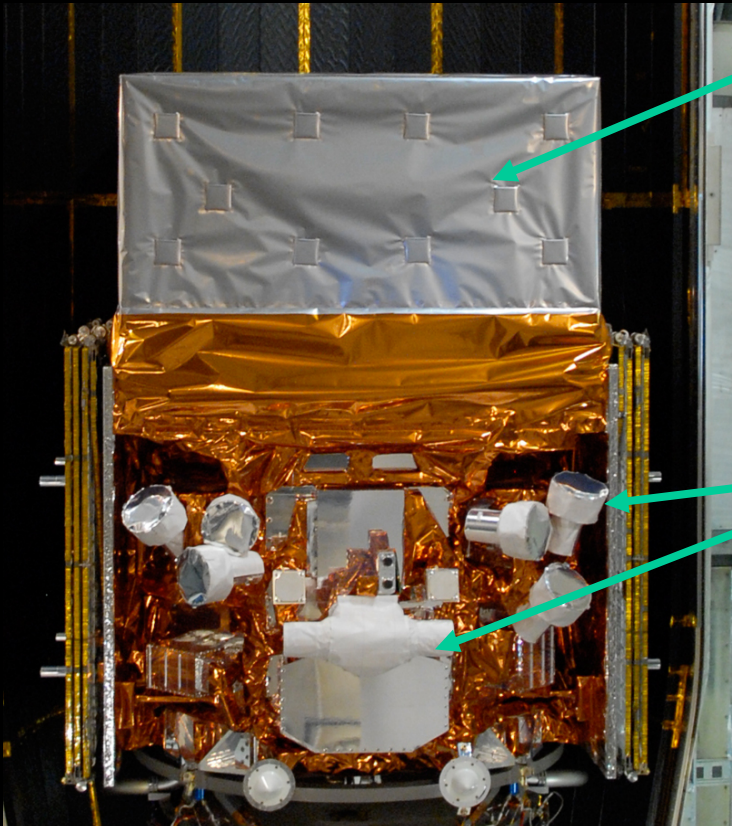
Grand champ de vue 2.4 sr (voit l'ensemble du ciel en ~ 3 hrs)

Bonne surface efficace (9500 cm² à 1 GeV, incidence normale)

Gamma-ray Burst Monitor (GBM)

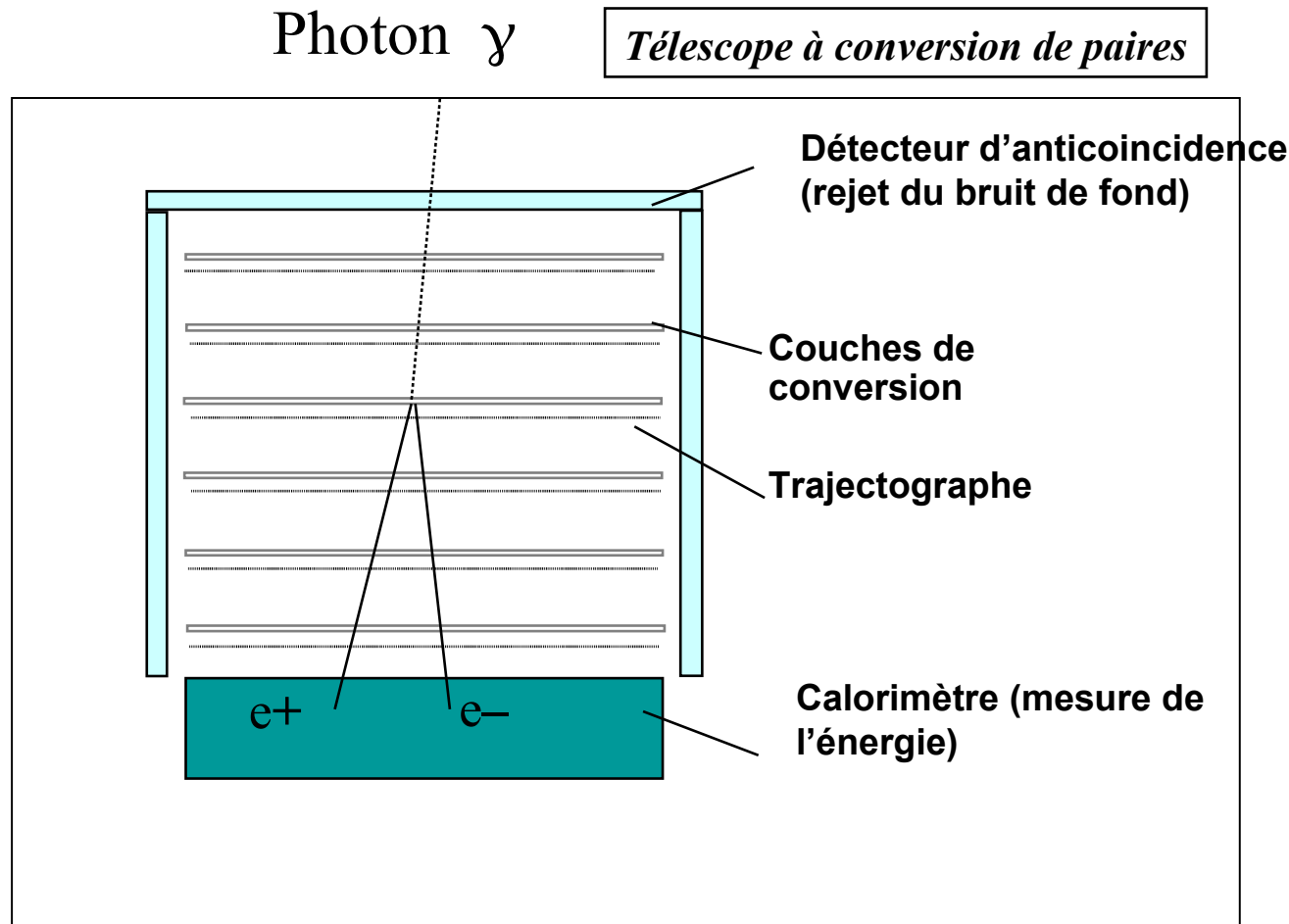
8 keV - 40 MeV

voit l'ensemble du ciel inocculté



Lancement 11 Juin 2008

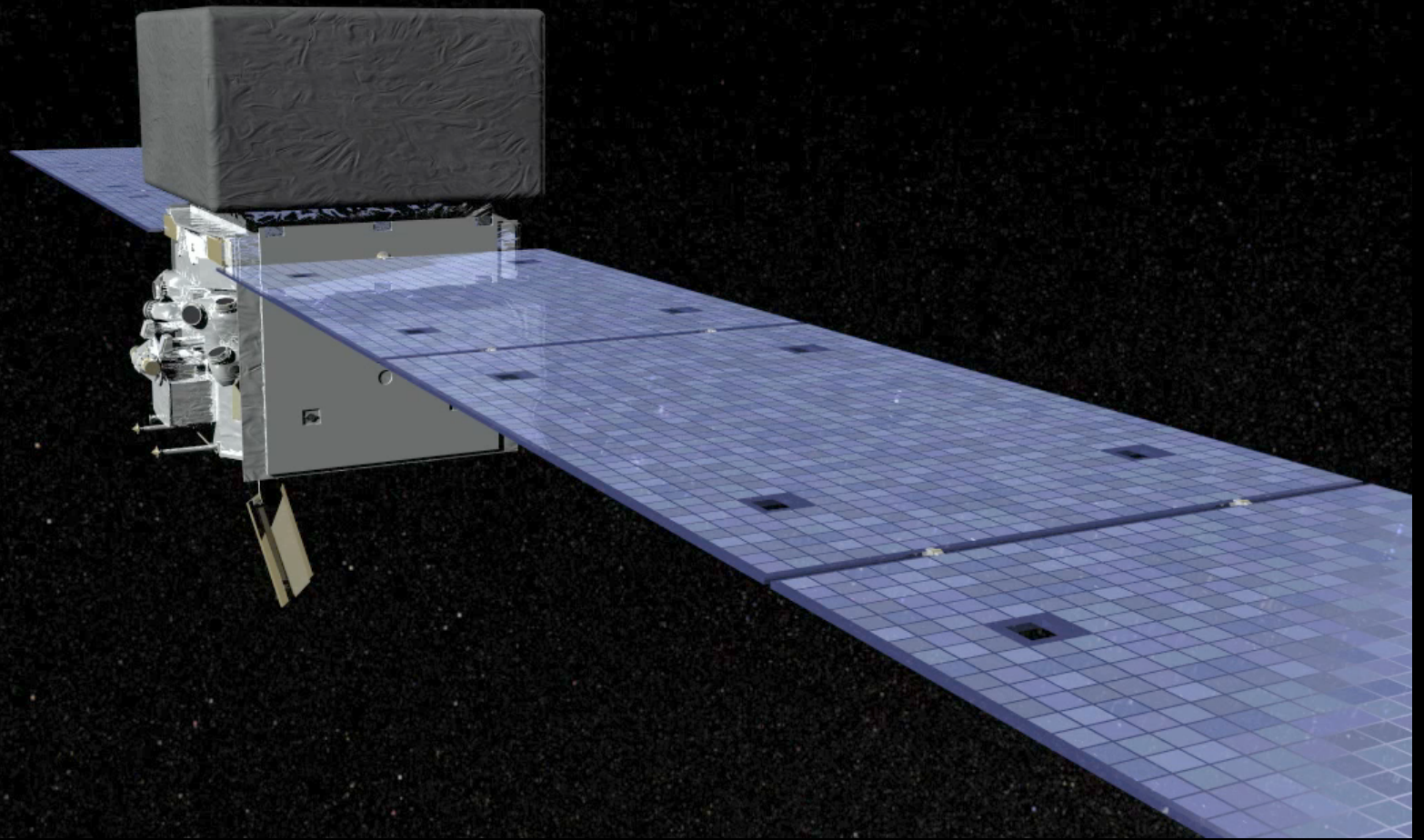
=> Potentiel de découverte extraordinaire !



Les photons gamma interagissent avec la matière par production de paires électron-positron. Le LAT est un détecteur de particules.

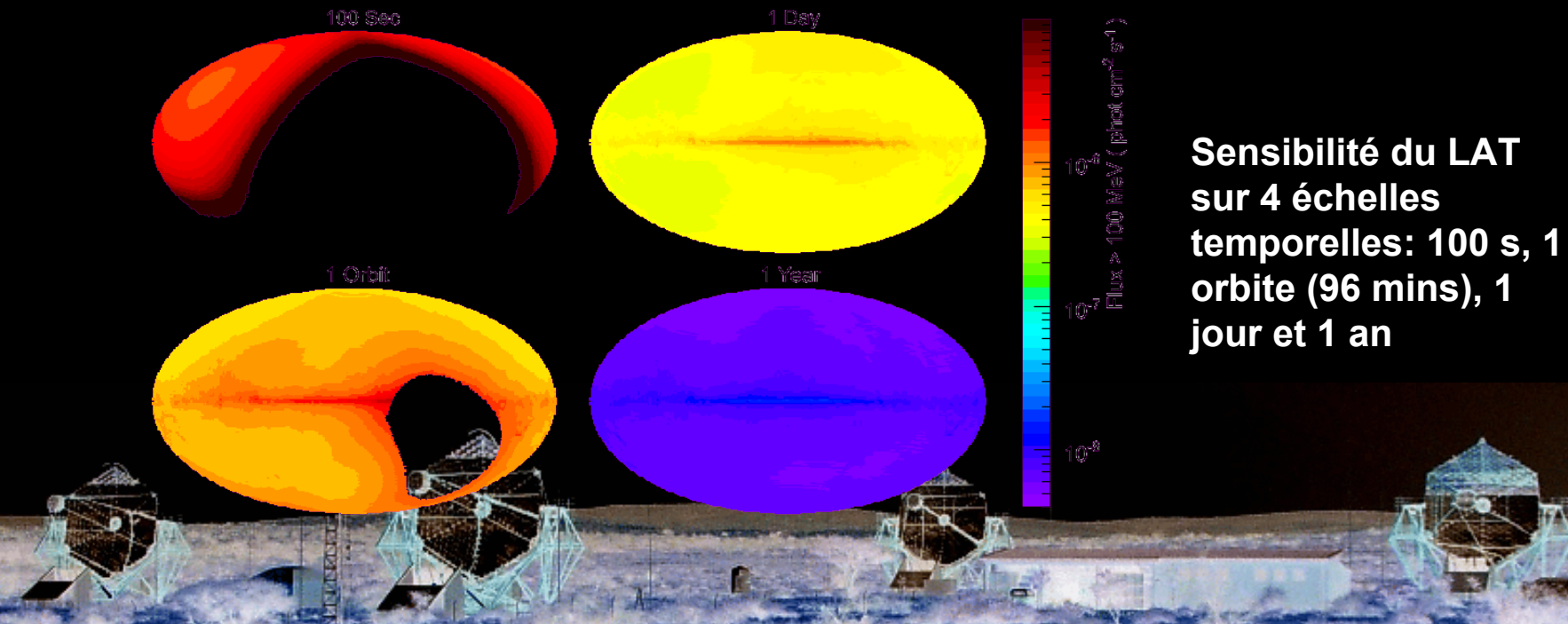
Energies : de 100 MeV (1.6×10^{-13} J) à 2 TeV (3.2×10^{-7} J) soit ~4 décades !





Modes d'observation de Fermi

- Le LAT voit 20% ciel à tout moment:
Couvre l'ensemble du ciel en 3hrs !
- Chaque point du ciel reçoit ~30 minutes d'exposition toutes les 3h.
- Basculement:
Basculement de ± 35 degrés à chaque orbite.
- Exposition uniforme:
Obtenue en un seul jour !
Observations pointées possibles pour des sources de choix



Sensibilité du LAT
sur 4 échelles
temporelles: 100 s, 1
orbite (96 mins), 1
jour et 1 an

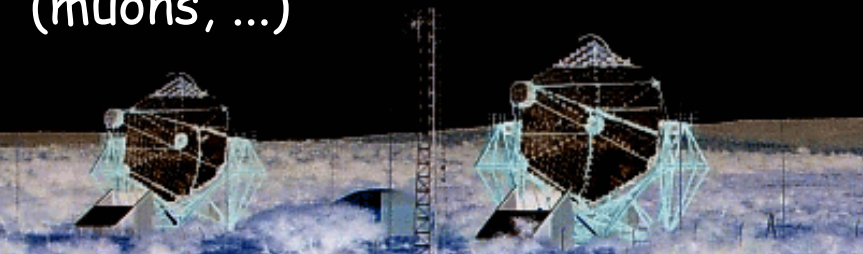
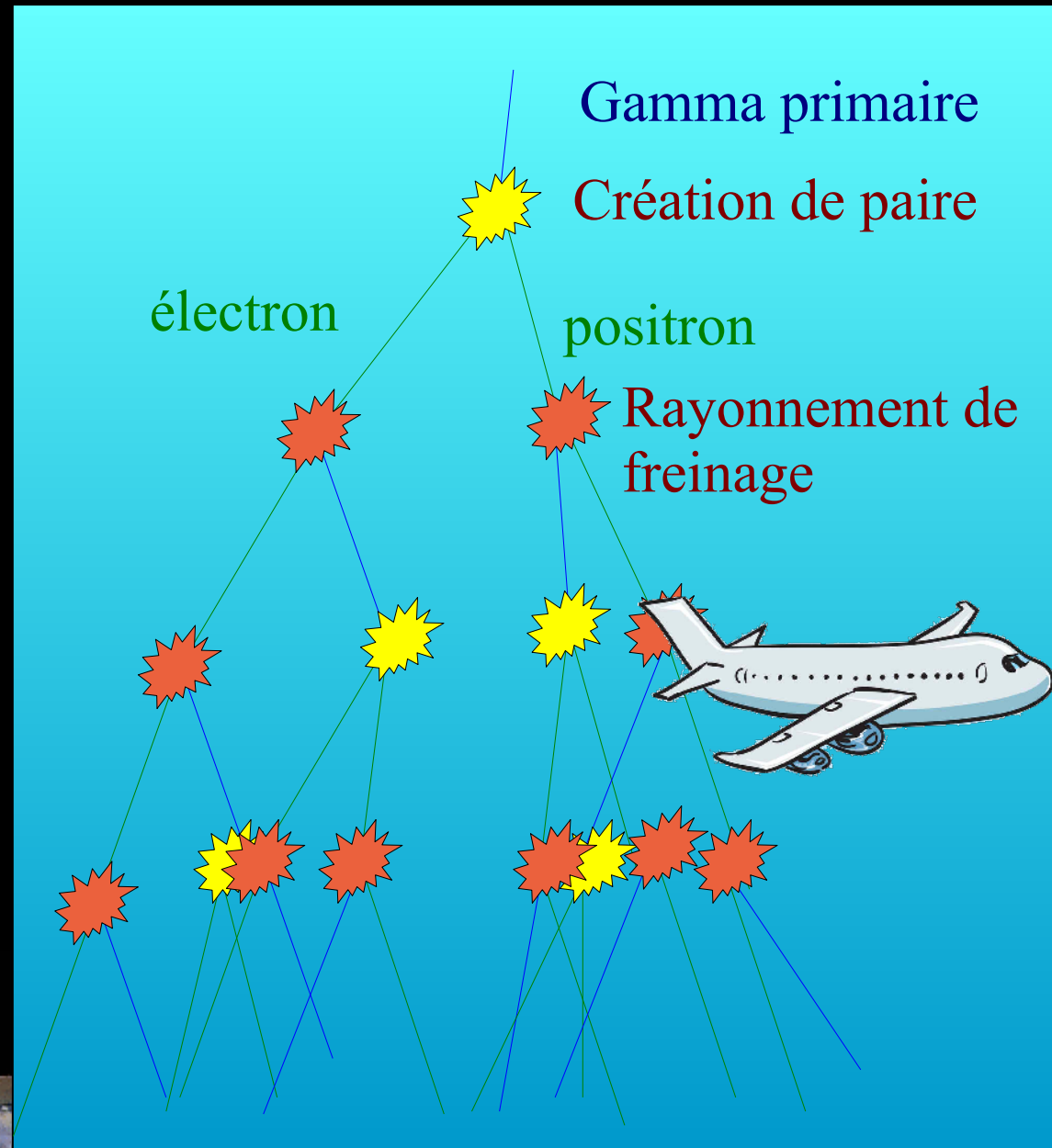
Cascades atmosphériques

Interaction du photon primaire avec un noyau de l'atmosphère

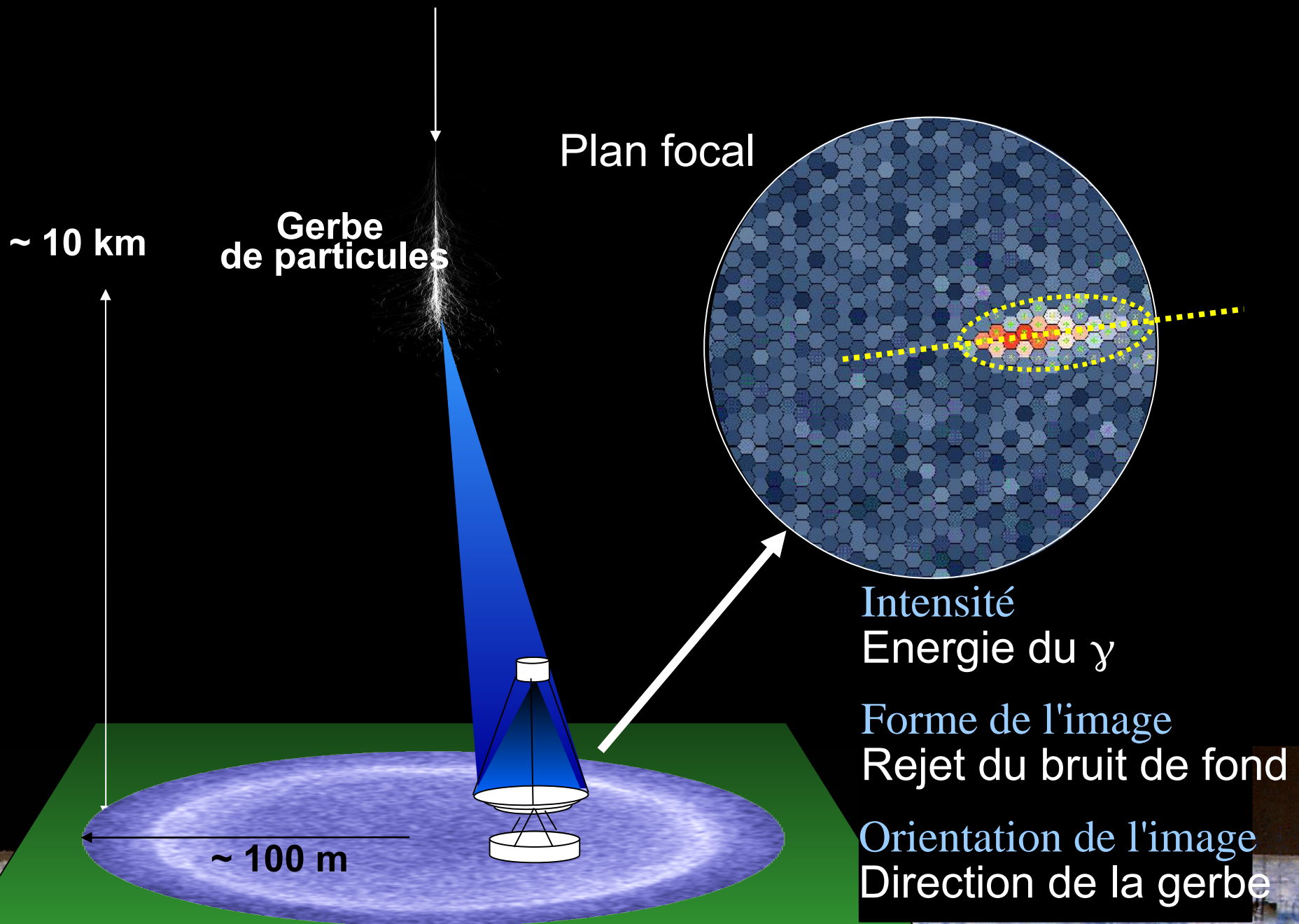
Succession de créations de paire et de rayonnement de freinage

L'énergie est ainsi peu à peu redistribuée en un grand nombre de particules et absorbée dans l'atmosphère

Les cascades issues de protons (et de noyaux) comportent en sus des fragments nucléaires et des particules pénétrantes (muons, ...)

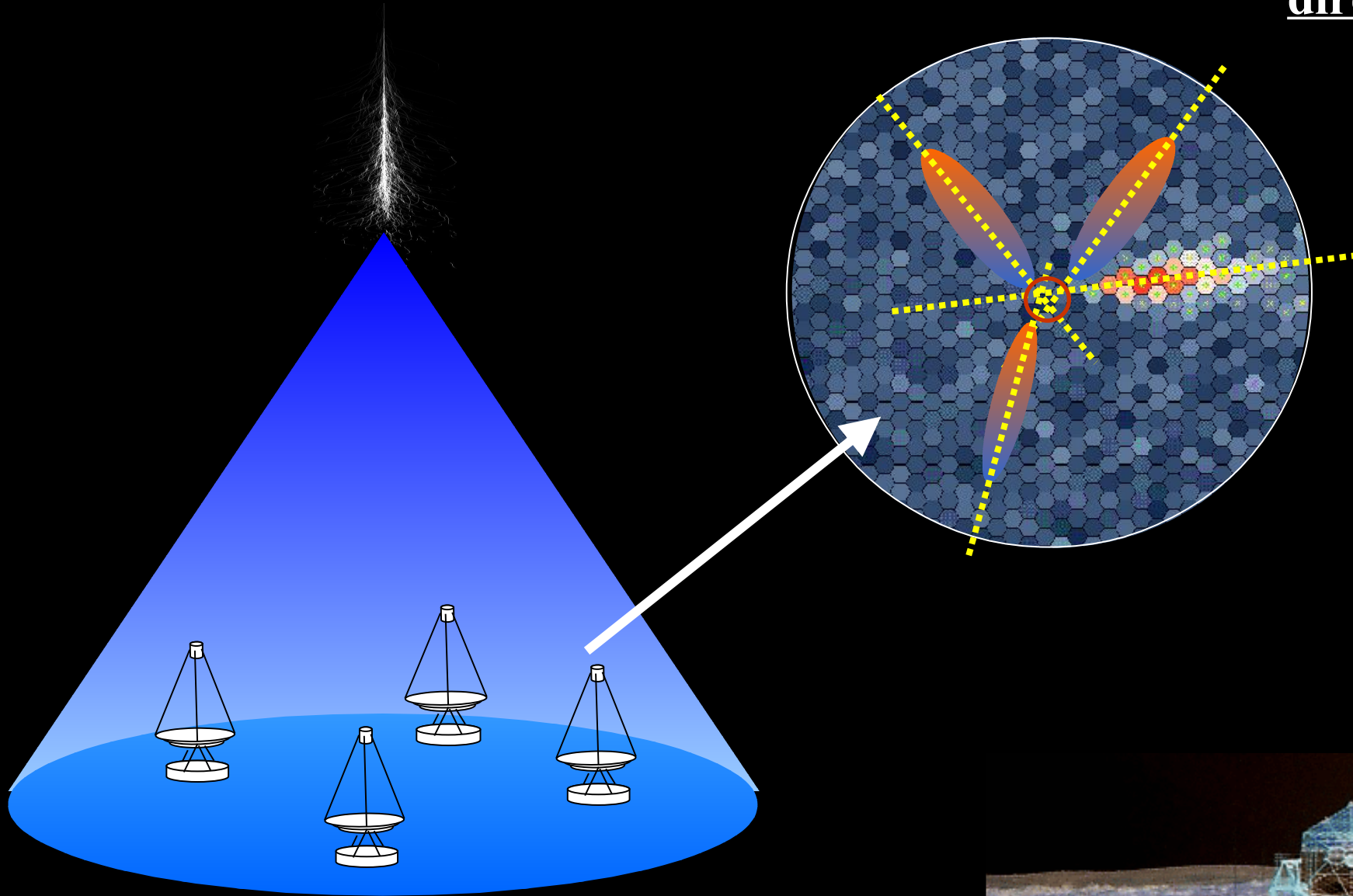


Principe de l'imagerie Tcherenkov

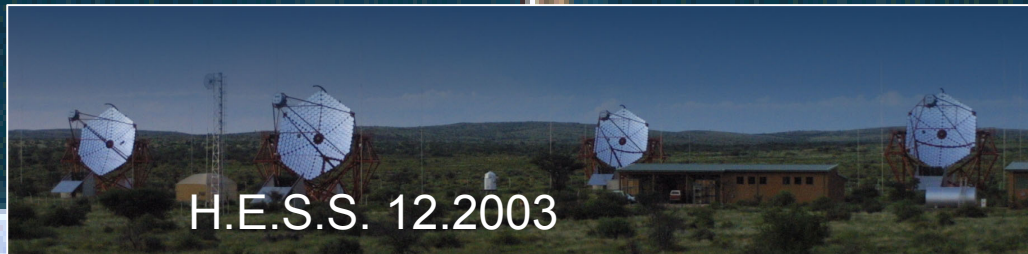


Principe de la stereoscopie

direction



Les détecteurs Tcherenkov



High Energy Stereoscopic System

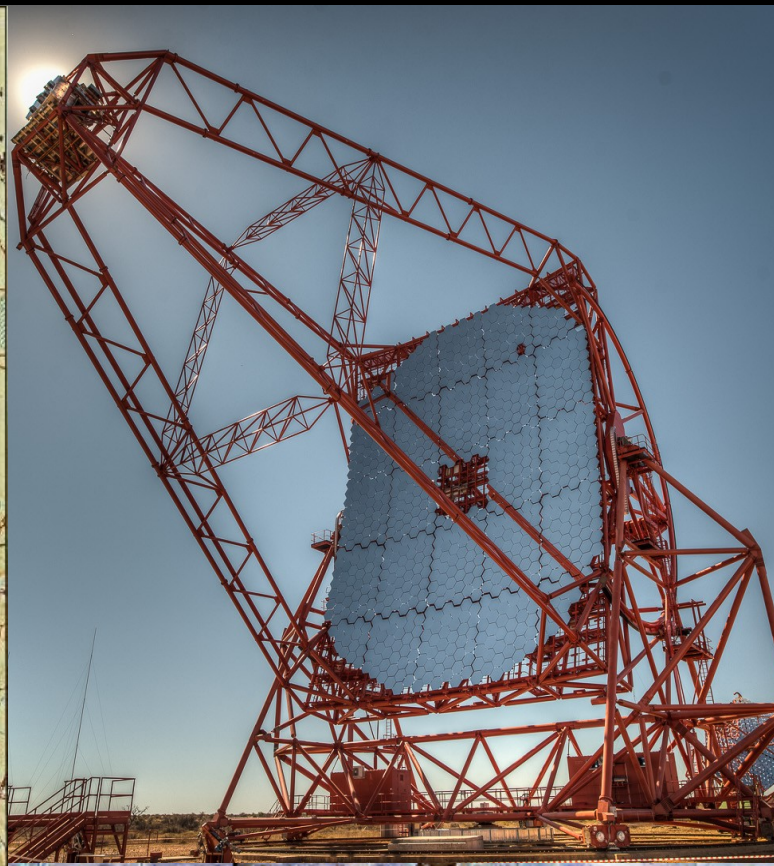
Consortium international, mené par Allemagne + France

Site: 23°16' S, 16°30' E, 1800 m asl, 100 km de Windhoek (Namibie)

très bonne qualité optique du ciel

hémisphère peu observé, grande partie du plan galactique observable

MPI Kernphysik, Heidelberg
Humboldt Univ. Berlin
Ruhr-Univ. Bochum
Univ. Hamburg
Landessternwarte Heidelberg
Ecole Polytechnique, Palaiseau
APC Paris
LPNHE Univ. Paris VI-VII
CEA Saclay
CESR Toulouse
LPTA Montpellier
LAOG Grenoble
LAPP Anecy
CENBG Bordeaux
Observatoire de Paris
Durham Univ.
Dublin Inst. for Adv. Studies
Charles Univ., Prag
Yerewan Physics Inst.
North-West Univ., Potchefstroom
Univ. of Namibia, Windhoek
DESY, Zeuthen
Linne University, Sweden
Leicester University, UK
Nicolaus Copernicus Astronomical Center, Warsaw
University of Warsaw (UW)
Jagiellonian University, in Cracow
Institute of Nuclear Physics, Cracow
Nicolaus Copernicus University, Torun



Réunion, 2022

H.E.S.S.-II



H.E.S.S. Phase 1:

Installation en 2002-2003

4 télescopes: \varnothing 12 m, 107 m²

Reconstruction stéréoscopique

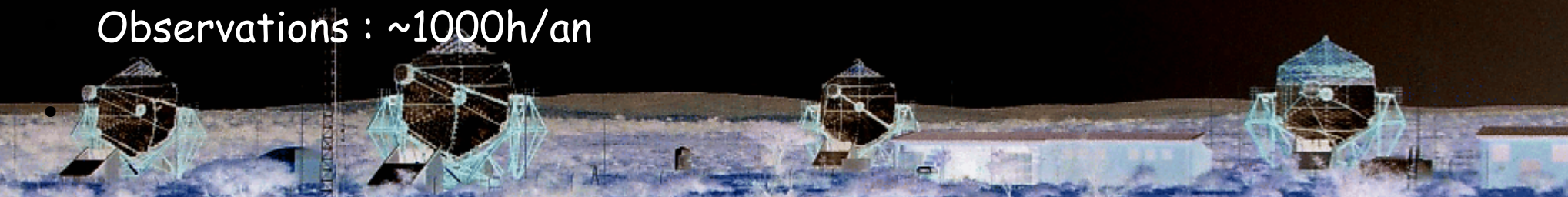
Observations : ~1000h/an

H.E.S.S. Phase 2:

Installation en 2012

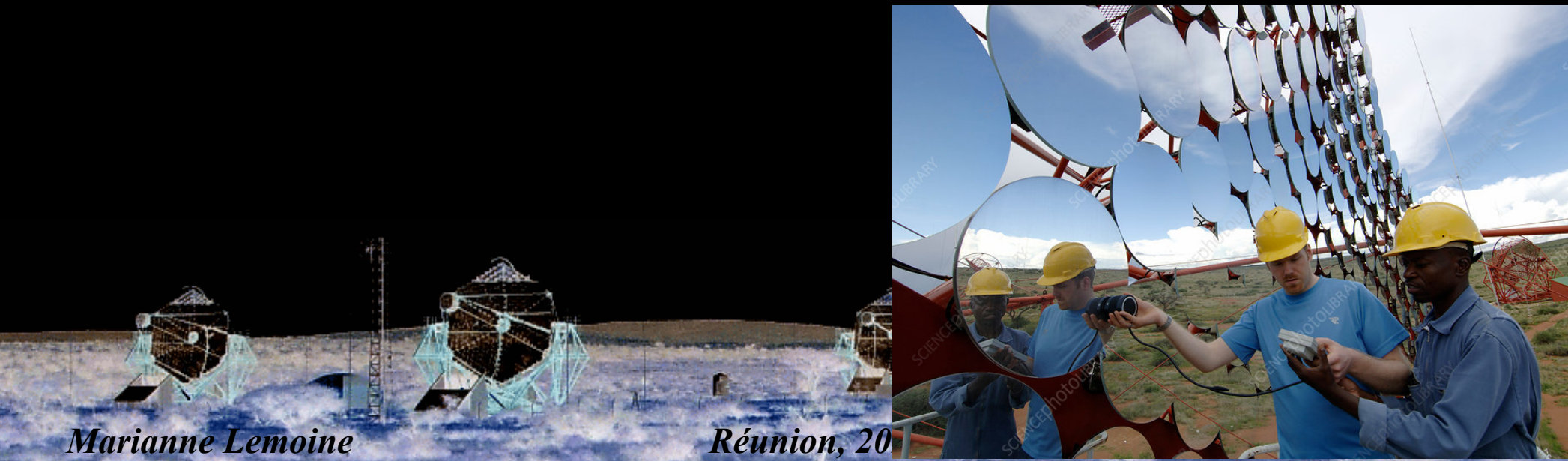
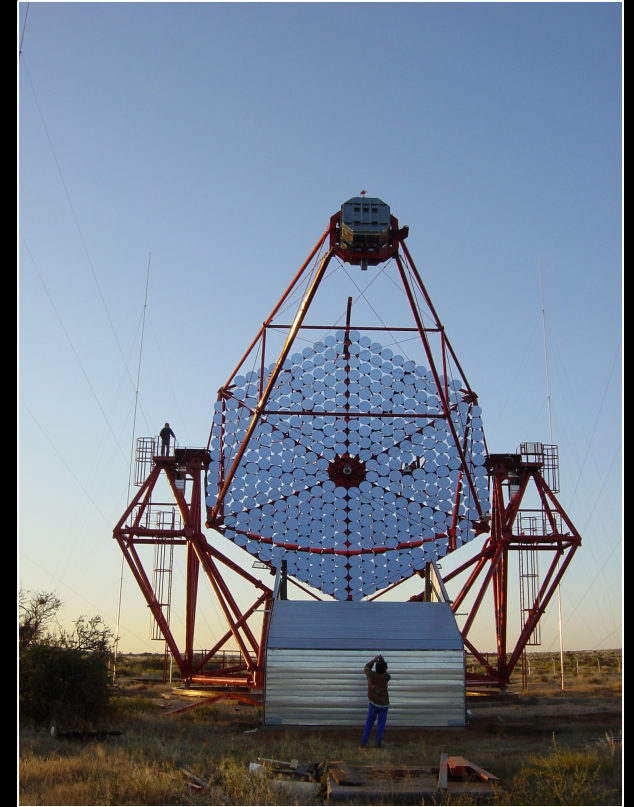
5^{ème} télescope, \varnothing 28 m, 600 m²

Pointé en < 1 min sur 50 % du ciel



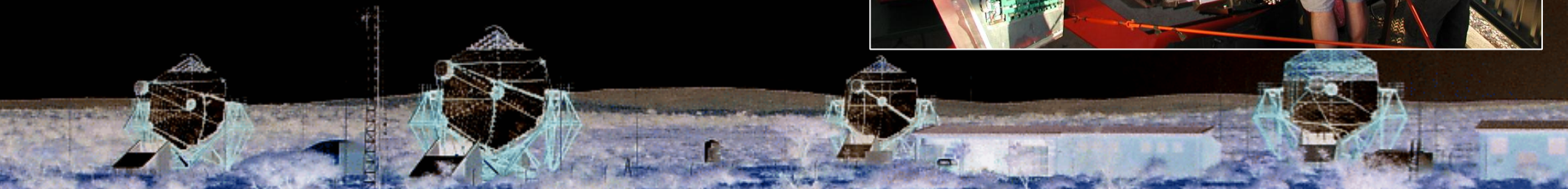
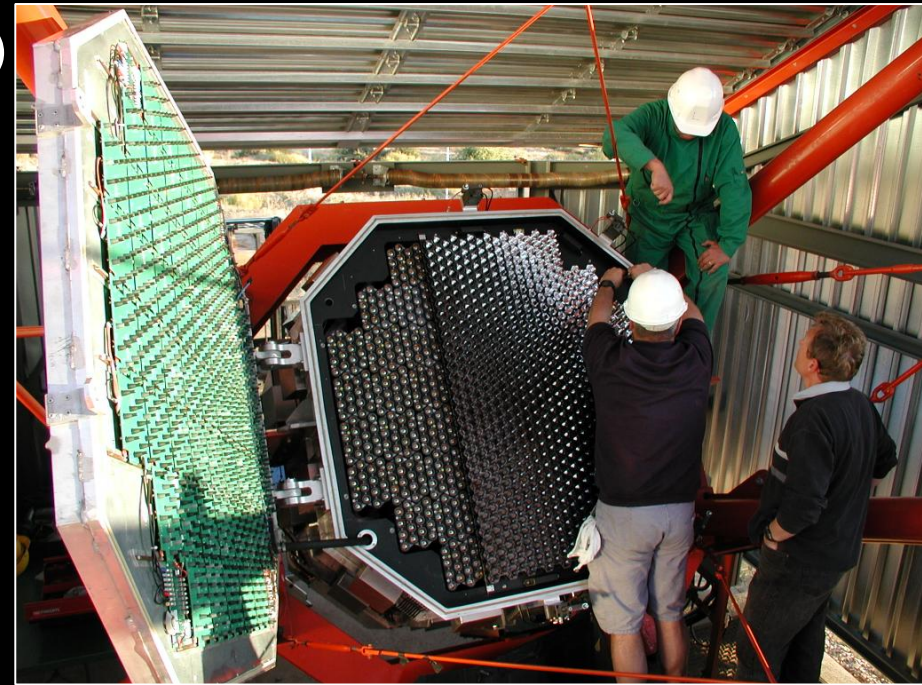
Les petits télescopes H.E.S.S.

- ◆ Réseau de 4 petits télescopes
Séparation des télescopes: 120 m
- ◆ Structure des télescopes
Surface totale des miroirs: $4 \times 10^7 \text{ m}^2$
Diamètre: 12 m, Longueur focale: 15 m
- ◆ Miroirs
380 × 60cm petits miroirs circulaires



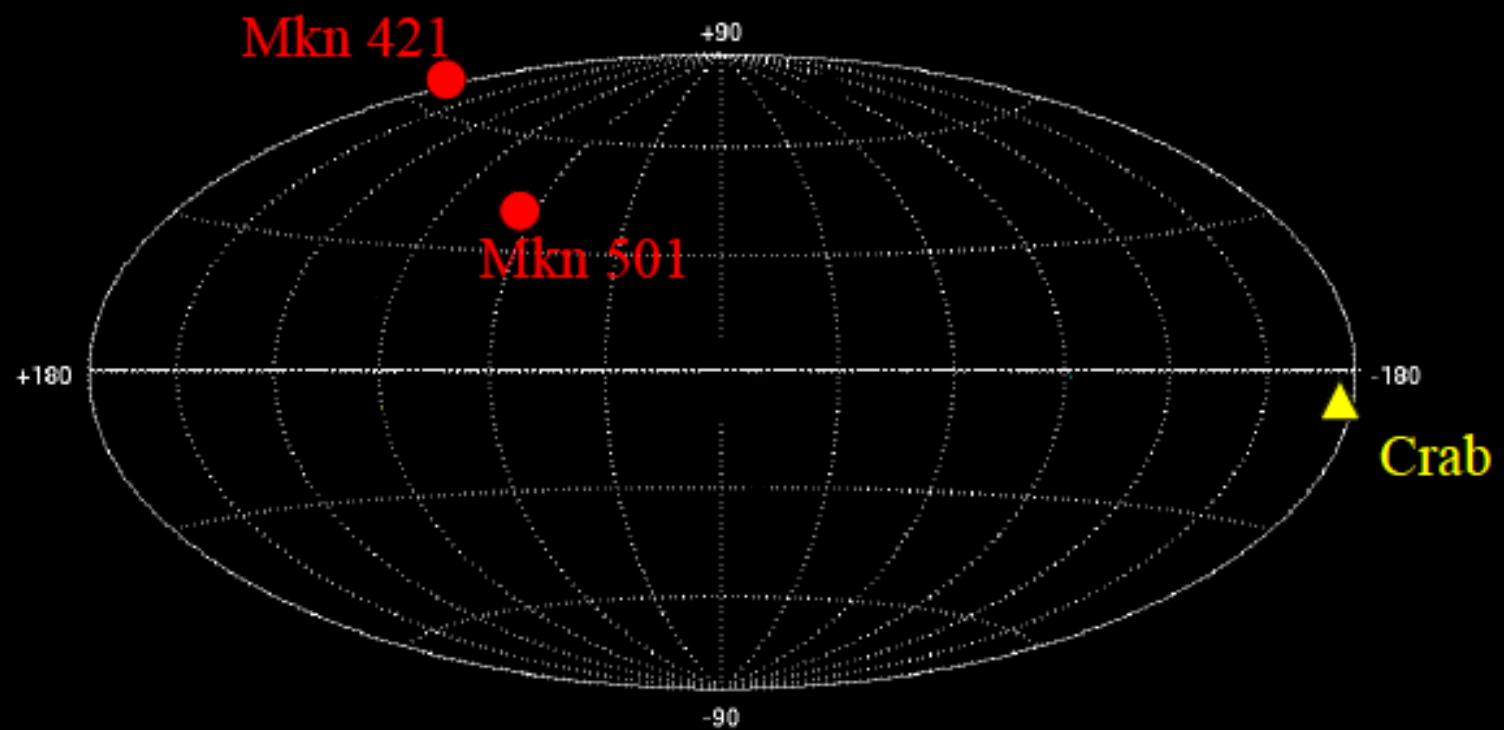
Les « petites » caméras

- ◆ 960 photomultiplicateurs
- ◆ Très grand champ de vue de 5°
- ◆ Fenêtre d'intégration de 16ns,
- ◆ Electronique *intégrée* dans la caméra
- ◆ 3 cables (1 puissance, 2 fibres optiques)
- ◆ Loge dans un cube de 2 m
- ◆ Poids \sim 900 kg



VHE γ -ray Sky 1995

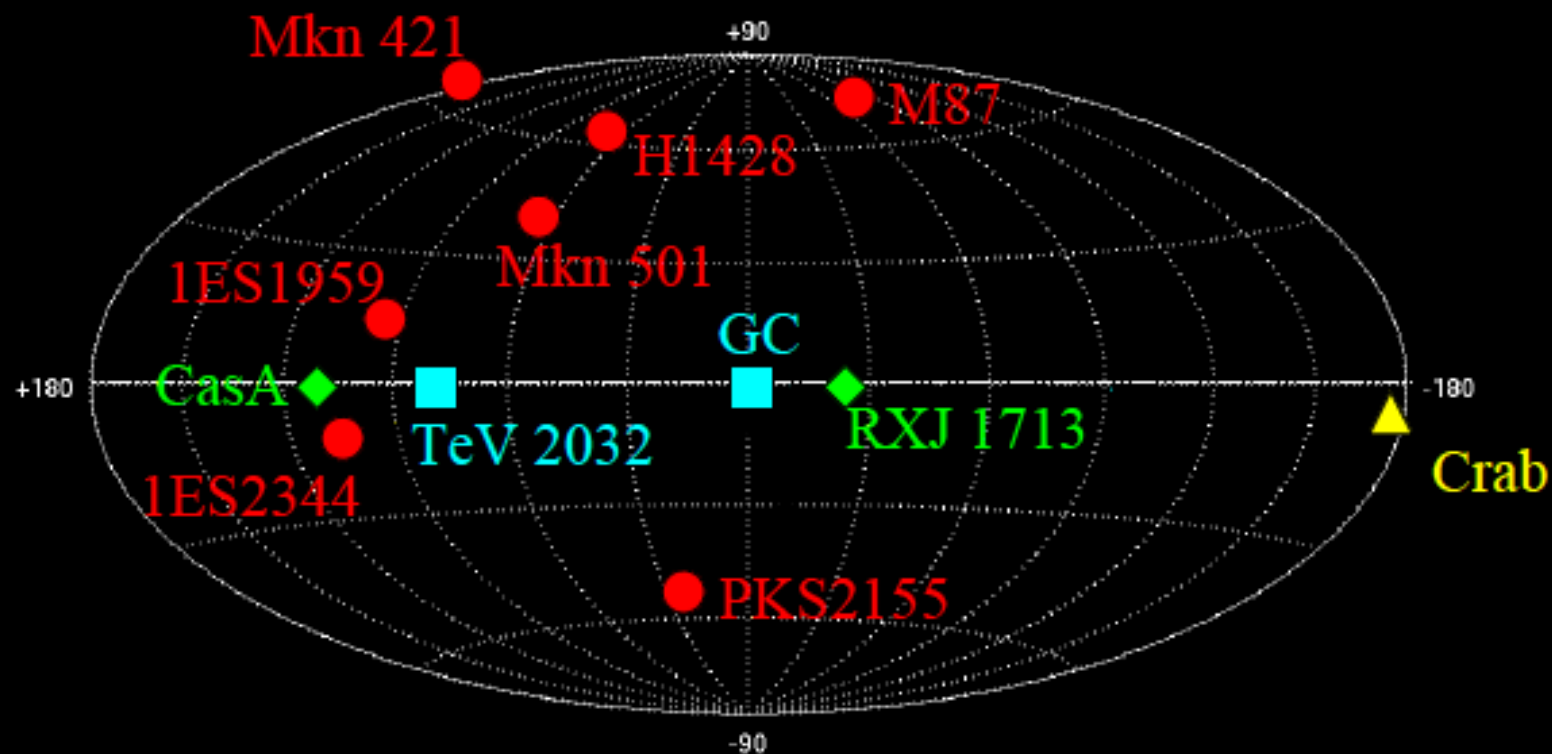
3 sources



- ▲ Pulsar wind nebulae
- ◆ SNRs
- AGNs
- UIDs

VHE γ -ray Sky 2003

12 sources, 6 firm detections



▲ Pulsar wind nebulae

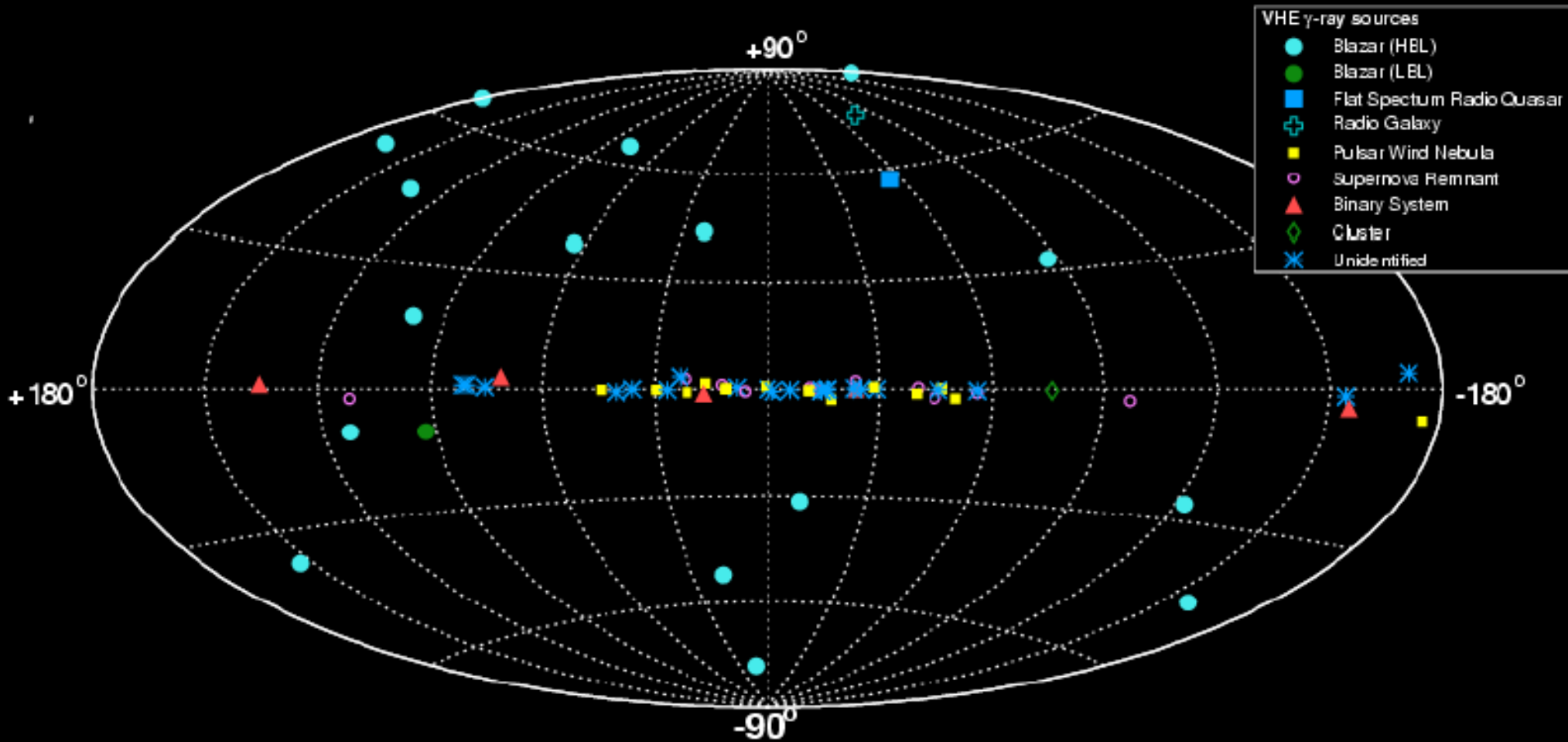
● AGNs

◆ SNRs

■ UIDs

VHE γ -ray Sky 2008

> 70 Sources



2007-09-15 - Up-to-date plot available at <http://www.mppmu.mpg.de/~rwagner/sources/>

Le grand télescope

- ◆ Camera: 3800 images/secondes

Loge dans un carré de 2,5m

Consommation de 8kW !

Poids total de 2.8 Tonnes ! (longueur focale: 36m)

- ◆ Structure du télescope

Dimension de la surface réfléchissante: 24m × 33m

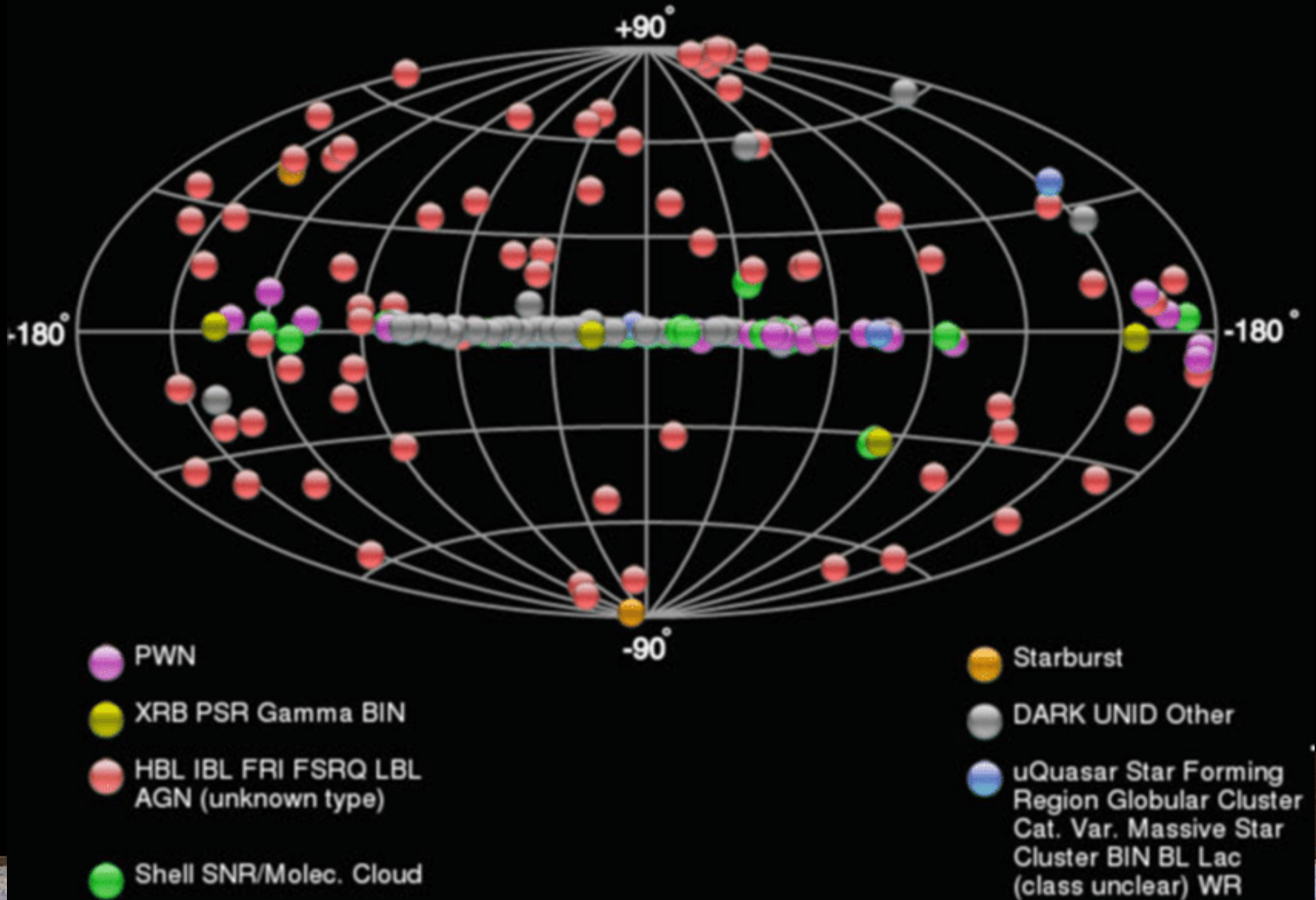
- ◆ Miroirs

875 × 90cm petits miroirs hexagonaux

Poids total du télescope: 580 Tonnes !

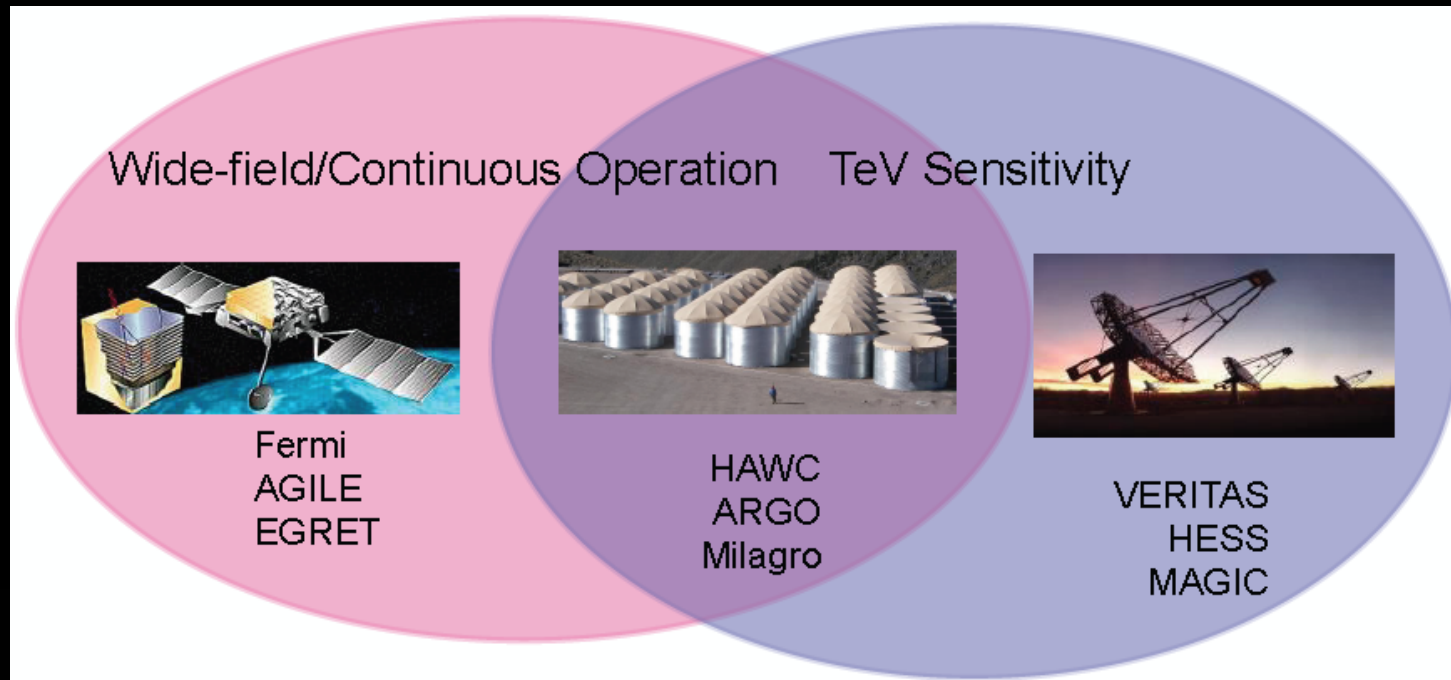


Ciel Gamma en 2020: >200 sources !



Complémentarité des instruments gamma

- Satellite - couverture continue et très large du ciel du MeV au GeV
- Détecteurs au sol ont des sensibilités au TeV
 - Excellentes résolution angulaire et en énergie, mais champ de vue de 0.003 sr et cycle utile de seulement 10%
 - Détecteurs de particules ont des champs de vue > 2 sr et un cycle utile de 90% mais une résolution angulaire de $\sim 0.6^\circ$ (@ 1 TeV)



Le Futur

- Plus d'événements

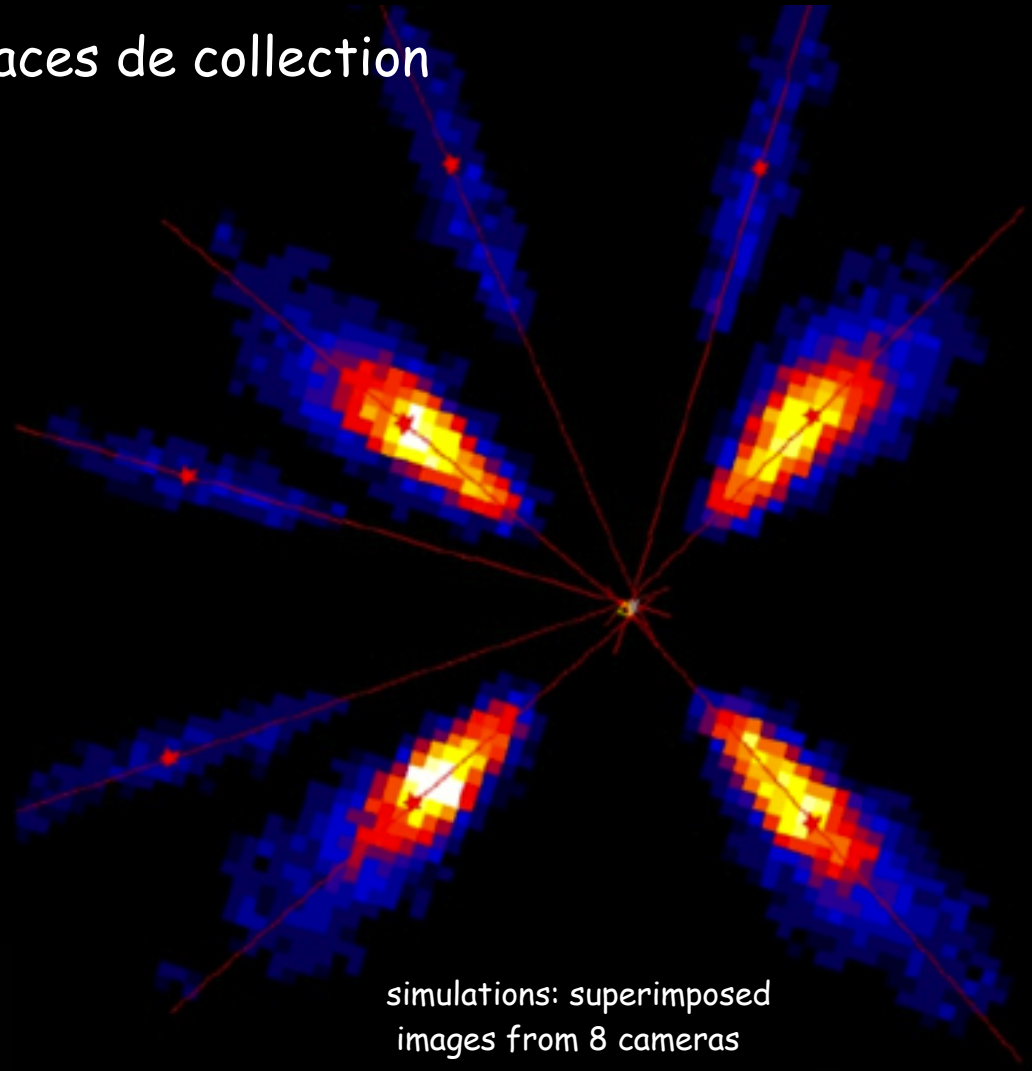
 - Plus de photons grâce à des surfaces de collection plus grandes

- Meilleurs événements

 - Meilleure reconstruction

- Nouveaux événements

 - Domaine d'énergie étendu



simulations: superimposed images from 8 cameras

CTA: Cherenkov Telescope Array

> 1400 membres

208 instituts provenant de 32 pays

2 sites sélectionnés:

Nord (La Palma, Canaries)

Sud (Paranal, Chili)

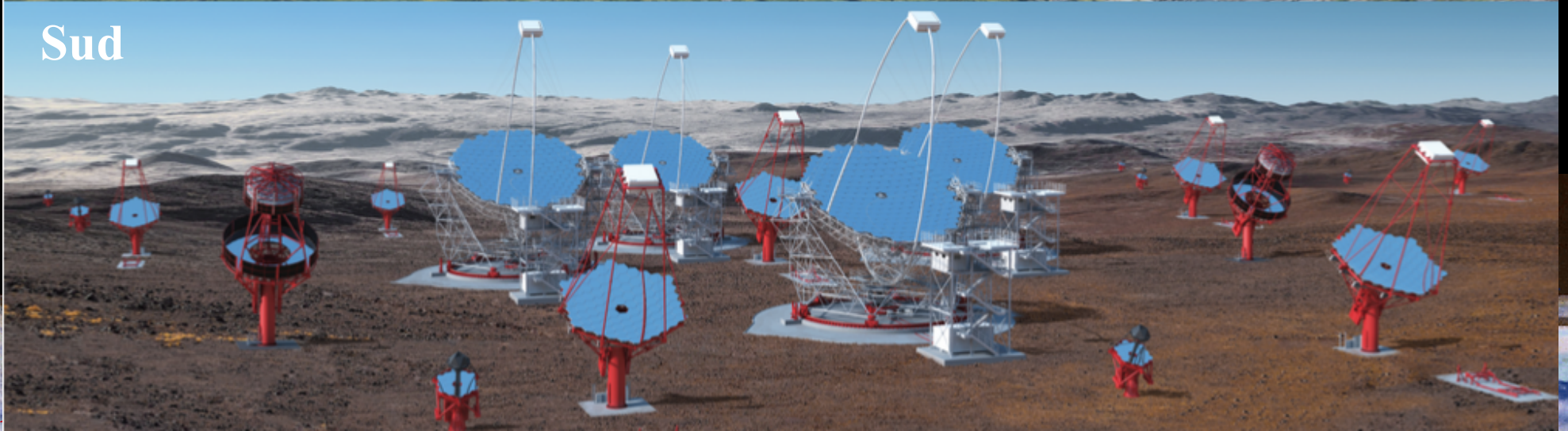
3 tailles de télescopes

~100 télescopes prévus en tout

Nord



Sud



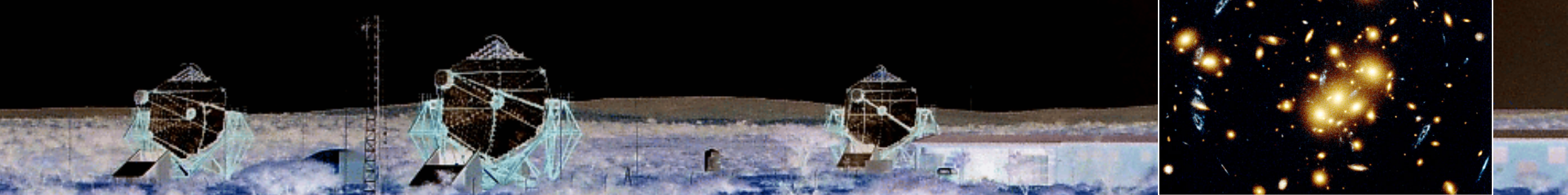
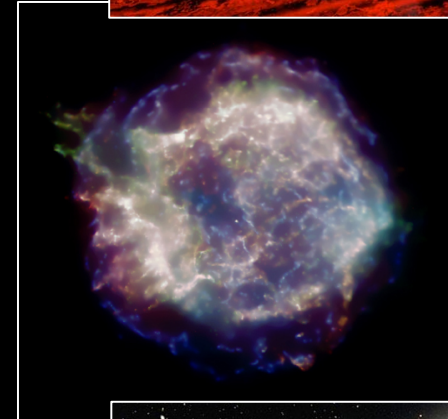
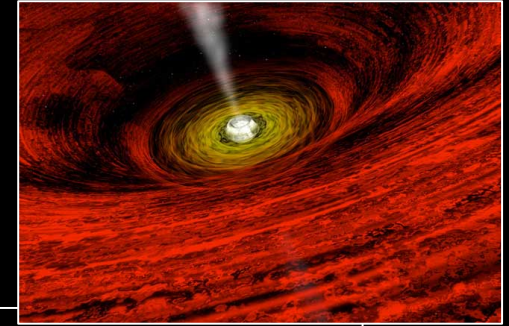
Astrophysique en rayons gamma

Sources extragalactiques

- Noyaux actifs de galaxie (NAGs)
- Galaxies à flambée d'étoiles
- Sursauts gamma

Sources galactiques

- Vestiges de supernovae (SNRs)
- Nébuleuses de pulsars
- Systèmes binaires
- Sources non identifiées
- Novae

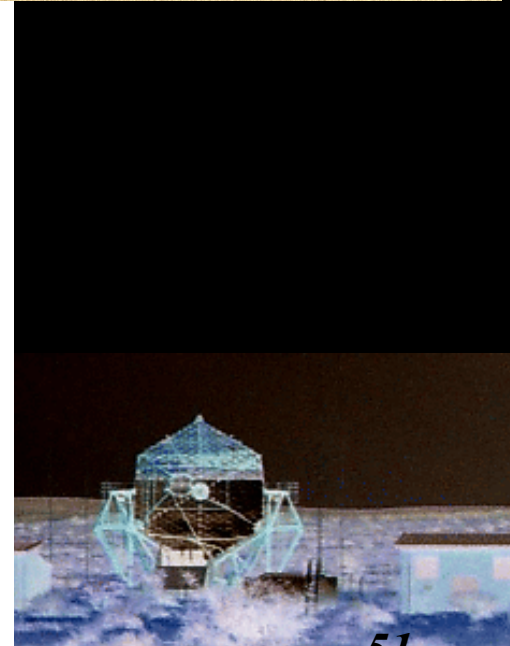


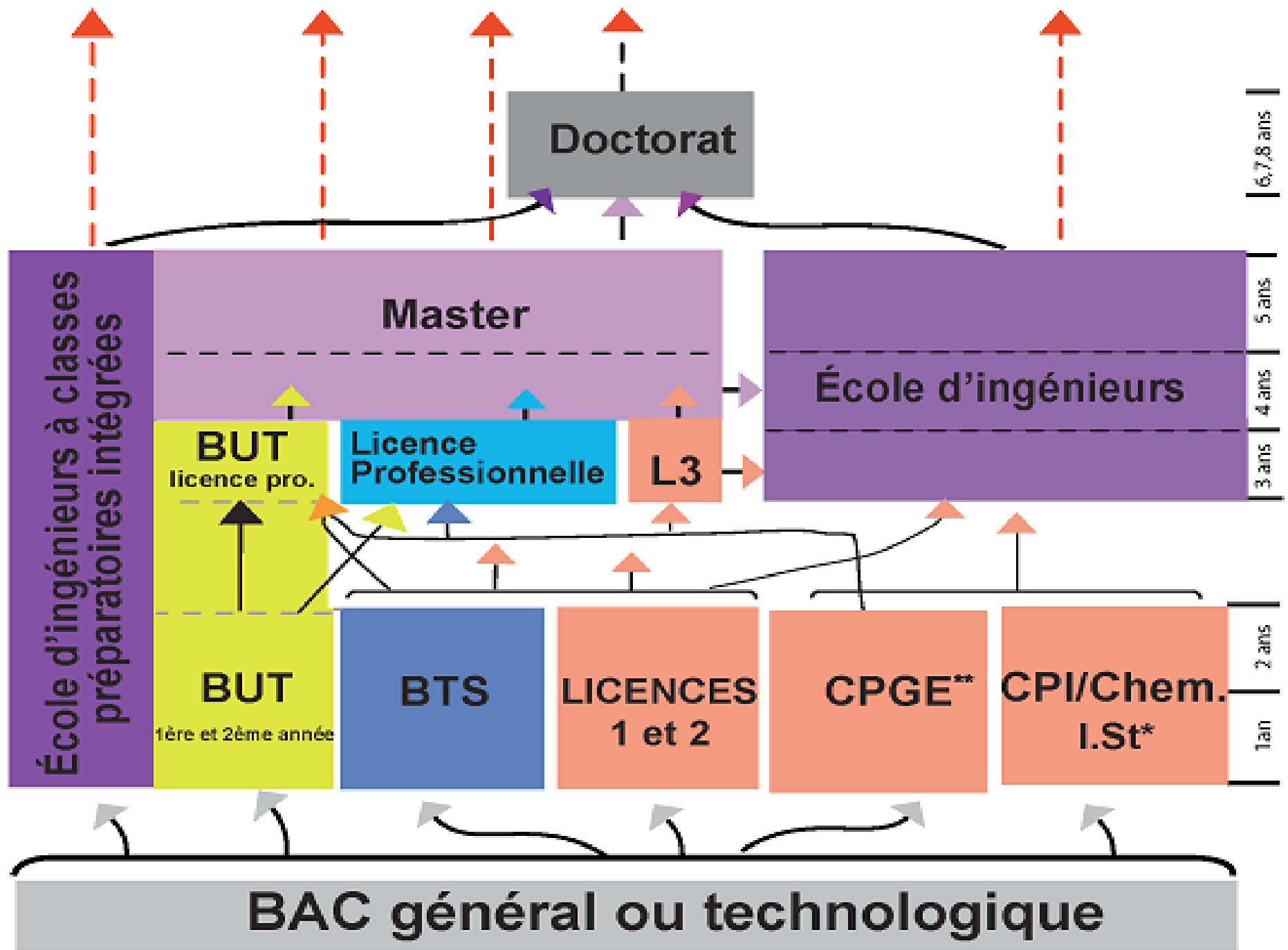
Qui sommes nous ?

M-H Grondin: maître de conférences à l'Université de Bordeaux

M Lemoine: Directrice de recherches au CNRS

Affectées au Laboratoire de Physique des 2 Infinis Bordeaux





* Cycle Préparatoire aux écoles d'ingénieurs chimistes et de génie chimique maintenant dénommé Chem.i.St (Chemistry International Studies)

**Classe préparatoire aux grandes écoles

Les chercheurs

Les chercheurs se répartissent dans **des disciplines très variées** : sciences et techniques, lettres et sciences humaines, droit, économie, gestion, médecine...

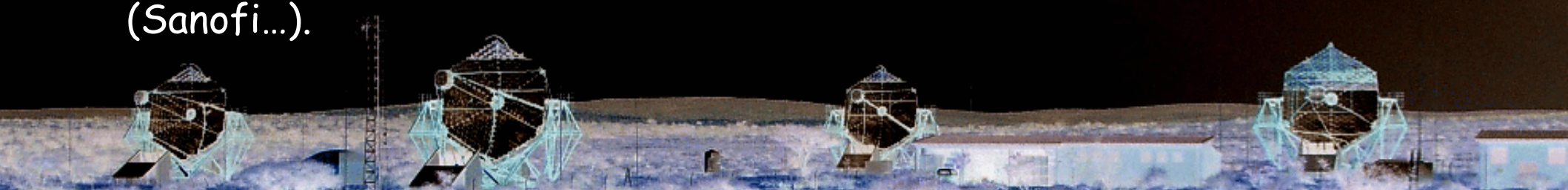
Ils travaillent dans **de nombreux organismes**:

des EPST (établissements publics à caractère scientifique et technologique) : CNRS, INRAE, INSERM, IRD, INRIA, INED...

des Epic (établissements publics à caractère industriel et commercial) : CEA, CNES, Ifremer, Institut Pasteur, ADEME, ONF...

des EPSCP (établissements publics à caractère scientifique, culturel et professionnel) : instituts nationaux polytechniques, ENS...

de grandes entreprises privées industrielles (Total...) ou pharmaceutiques (Sanofi...).





C'est quoi le CNRS ?

Plus grand organisme public de recherche en Europe

Plus de 1100 laboratoires en France et à l'étranger, en grande majorité rattachés à des universités

Plus de 33 000 agents dont 15 000 chercheurs et 16 000 ingénieurs

10 instituts: biologie, physique, chimie, ingénierie, sciences humaines et sociales, mathématiques, écologie, sciences de l'information et sciences de l'univers

Un budget annuel de 3,8 milliards d'euros



Les techniciens et ingénieurs au CNRS

- Technicien (Bac)
- Assistant Ingénieur (Bac+2)
- Ingénieur d'Etudes (Bac+3-Bac+5, écoles d'ingénieur, Master)
- Ingénieur de Recherche (grandes écoles ou thèse)



Sa mission est de concevoir, façonner et souffler avec une grande précision des pièces de verre pour des expériences de physique quantique. Il s'agit majoritairement de réceptacles (cellules sphériques, cylindriques, ampoules, etc.) qu'elle remplit de gaz rare ou de métal alcalin avant de les sceller sous vide.

Qu'est-ce que la recherche

- Se poser des questions
- Résoudre le problème posé
 - Faire des essais dans un cas simple
 - En tirer une méthode pour un cas plus général
 - Savoir rebrousser chemin si on est dans une impasse !
- Trouver des relations avec d'autres problèmes
 - Ce qui revient à se poser d'autres questions!
- Rédiger, publier et communiquer ses résultats.



Les enseignants-chercheurs

2 axes :

50% de recherche (cf. CNRS)

50% d'enseignement (Université, IUT, grandes écoles, ...)
niveau post-bac

Disciplines : aussi variées qu'au CNRS

Volume d'enseignement :

192 heures de Travaux Dirigés / an

Équivalent à 128h de Cours Magistraux ou 288h de Travaux
Pratiques

2 grades principaux :

Maître de conférences (ég. Chargé de recherche CNRS)

Professeur des Universités (ég. Directeur de recherche CNRS)

Les recrutements

CNRS (recherche, ingénierie):

Concours nationaux

2 phases : écrit puis oral

Université :

Concours par académie

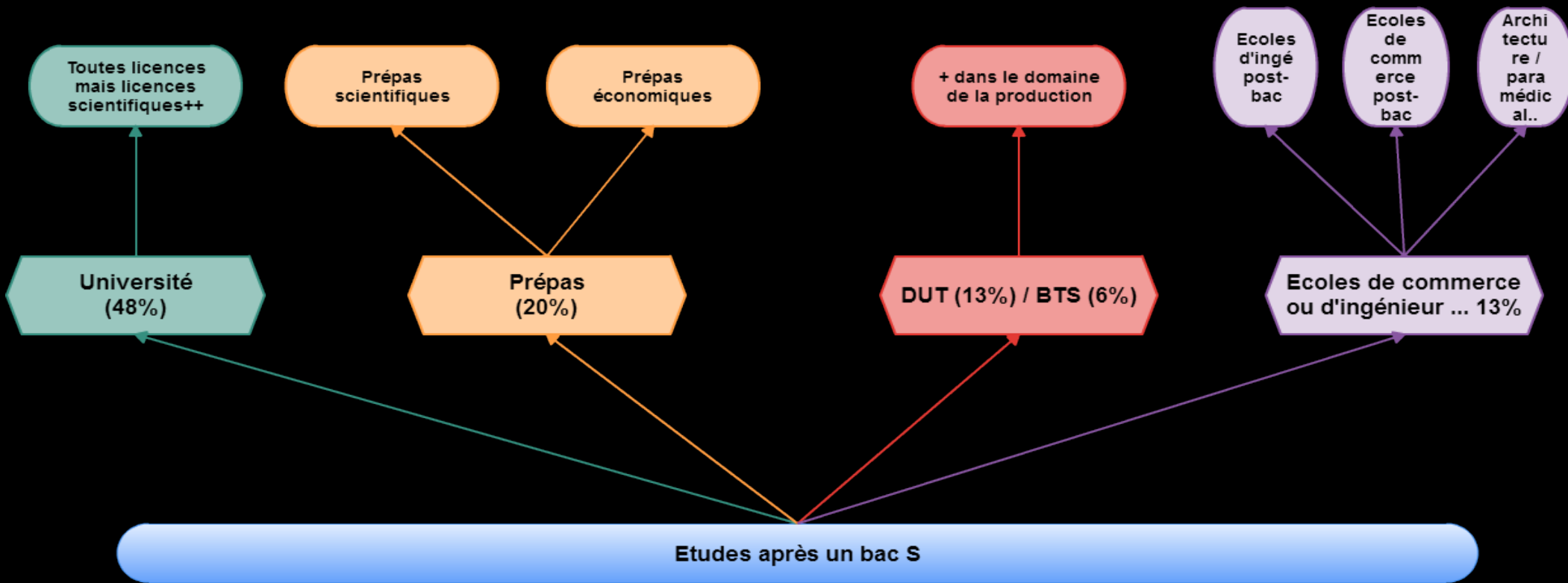
Nécessite d'avoir enseigné quelques heures (=> qualification)

2 phases : écrit puis oral

Possibilité d'évolution (ex : concours internes)

Chercheurs et enseignants-chercheurs : post-doctorat souvent requis

L'orientation après le bac



Voici où vont les bacheliers S dans le supérieur

Sélection principalement sur dossier !

Mieux vaut se renseigner sur les filières avant choix d'options