



INSU

Thématiques et interdisciplinarité

Frédérique Motte, Benoit Famaey & Nadège Meunier

pour le Groupe de Travail II.1 de la Prospective INSU AA 2024

→ 23 septembre 2024



© Vincent Astier-Péret / Regards d'en haut



INSU

Membres du Groupe de Travail II.1

Section 17 : Frédérique Motte & Benoit Famaey et Nabila Aghanim, Donia Baklouti, Frédéric Bournaud, Laurent Cambresy, Sandrine Codis, Karine Issautier, Laurent Lamy, Jeremy Leconte, Laurent Mirioni, Mamadou N'Diaye, Micaela Oertel, Ana Palacios, Alejandra Recio-Blanco, Fabrice Roy, Renaud Savalle, Gilles Theureau, Luigi Tibaldo, Laurence Tresse, Frédéric Vincent

Directions des PNs : Nadège Meunier et Guillaume Aulanier, Kévin Belkacem, Ludovic Biennier, Isabelle Boisse, Samuel Boissier, Patrick Charlot, Elodie Choquet, Thierry Fouchet, Maud Langlois, Benoit Lavraud, François Lévrier, Benjamin Magnelli, Frantz Martinache, David Maurin, Pierre-Olivier Petrucci, Matthieu Tristram, Philip Tuckey, Valentine Wakelam

Présidents des GTs du CERES/CNES: John Carter, Matthieu Kretzschmar, Joao Marques, Antoine Petiteau, François Petrelis, Cyril Szopa

Déléguée Scientifique INSU chargée du suivi du groupe : Susanna Vergani

→ 23 septembre 2024



INSU

Méthodologie de travail du GT. II.1

Un contexte particulier

- Modification du périmètre de la Section 17
 - Transformation de la plupart des Programmes Nationaux du domaine A&A en Actions Thématiques
-
- Peu de réunions plénières
 - Beaucoup de partage de travail en ligne
 - **Texte rédigé à partir du résumé exécutif de la Prospective de chacun des 8 programmes nationaux et axes transverses**

→ 23 septembre 2024





INSU

Objectif de cette présentation

- 1/ Présenter la structure du document de Prospective du GT II.1
- 2/ Illustrer la richesse et la complexité des études et projets portés par la communauté Astrophysique
- 3/ Introduire des questions que vous serez amenés à discuter au sein des ateliers

Basée sur l'intelligence collective !

→ 23 septembre 2024



© Vincent Astier, Perret, Regards d'en haut

Sommaire

- 01 Structure de notre document de Prospective
- 02 L'Astrophysique, une science holistique : les couplages d'échelles et de processus physiques au cœur de notre recherche
- 03 Nos grands défis
- 04 Recommandations et questions des ateliers

01

Structure de notre document de Prospective

Structure de notre document de Prospective

**Quatre défis thématiques et
méthodologiques et trois axes**

Quatre défis pour bien illustrer nos spécificités, nos forces et nos ambitions

Deux défis thématiques

1- Interactions et complexité dans l'univers :

processus physiques, couplages d'échelles spatiales et phénomènes dynamiques et impulsifs

2- De la naissance aux stades ultimes des systèmes astrophysiques :

formation, évolution, destruction et recyclage

Deux défis méthodologiques

3- Instrumentation de pointe et programmes d'observations pour sonder les extrêmes :

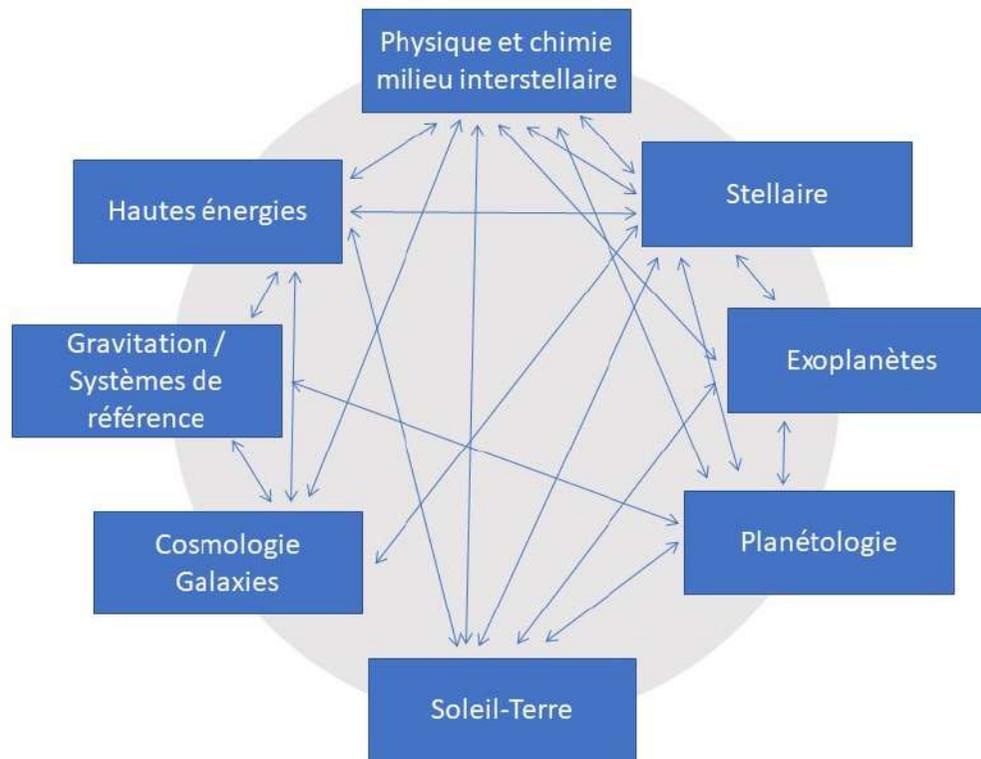
exploiter et ré-ouvrir des fenêtres observationnelles, renforcer les expériences de laboratoire

4- Méthodes numériques innovantes pour étudier l'univers :

de la haute performance à l'intelligence artificielle

Forte synergie entre nos communautés thématiques

Par essence, nombre de nos projets se développent à l'interface



Trois axes/ fils rouges thématiques

Axe 1 : Origine et évolution des structures de l'univers

Le modèle cosmologique, l'énergie noire, la matière noire ; La gravitation et ses tests ; L'origine et la dynamique de notre Voie Lactée par l'archéologie Galactique ; L'évolution des grandes structures, des populations de galaxies et de leur interaction ; L'ère de réionisation et les populations primordiales d'étoiles et de galaxies ; L'astrophysique multi-messagers ; Les processus énergétiques dans les plasmas astrophysiques ; Le milieu interstellaire dans le contexte galactique et cosmologique.

Axe 2 : Du milieu interstellaire aux systèmes stellaires et planétaires

La physico-chimie de la poussière : du milieu interstellaire au système solaire ; La formation et l'évolution de la matière organique : ouverture vers l'exobiologie ; La formation des étoiles, des disques circumstellaires et protoplanétaires ; La caractérisation et évolution des disques protoplanétaires ; La formation de notre système solaire et l'étude des petits corps.

Axe 3 : Caractérisation et évolution des systèmes stellaires

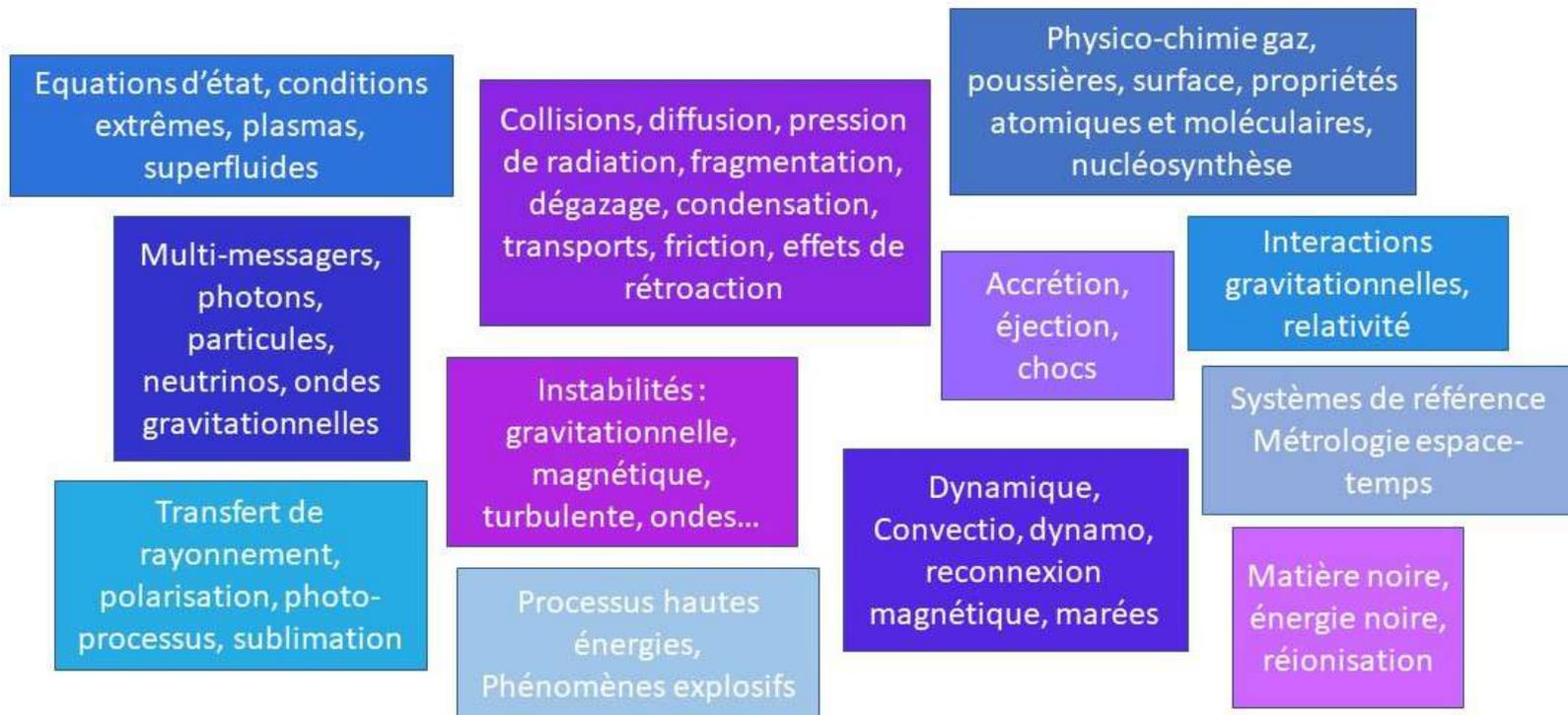
Le soleil : son activité éruptive, son expansion dans l'héliosphère ; Les étoiles : leur structure et leur évolution ; Les populations stellaires de la Voie Lactée ; L'origine du magnétisme solaire et stellaire ; Les exoplanètes : populations et caractérisation de leurs atmosphères ; Les exoplanètes et leur étoile hôte ; Les planètes du système solaire et les systèmes anneaux-satellites-magnétosphère ; Les couplages magnétosphère-ionosphère de la Terre et la météorologie de l'espace ; La fin de vie des étoiles : supernovæ et objets compacts.

02

L'Astrophysique, une science holistique

L'Astrophysique, une science holistique

Processus physiques, nombreux et variés, phénomènes dynamiques et impulsifs



L'Astrophysique, une science holistique

Physique stellaire et processus physiques

Physique des étoiles

- Nucléosynthèse
- Convection, rotation, champ B
- Interactions avec les (exo)planètes
- Stades ultimes variés

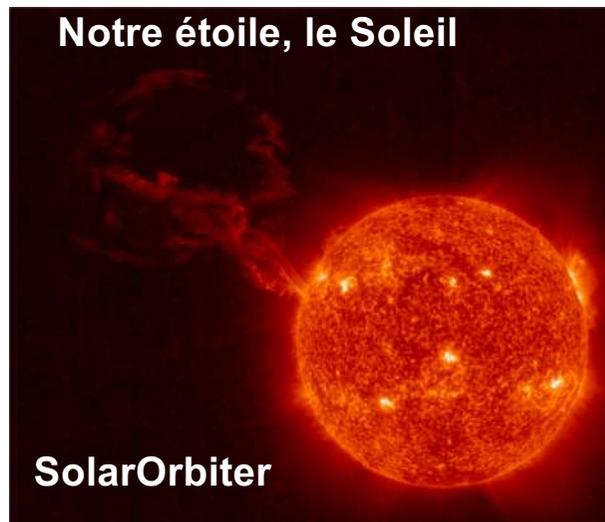
et du Soleil

Plasmas et particules :
héliosphère et
magnétosphères

Défis

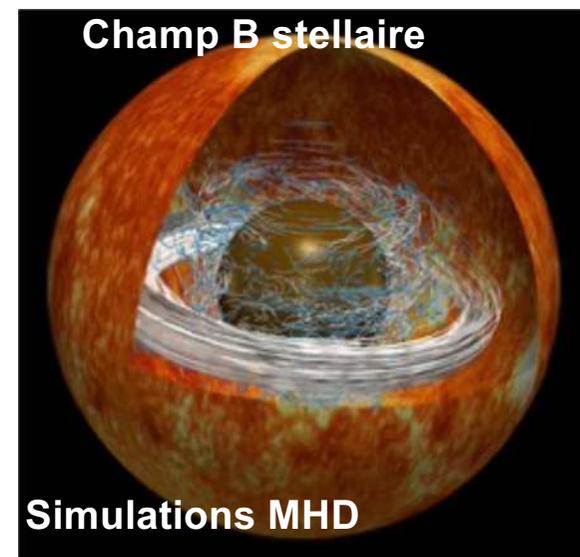
- Codes multi-physique
- Activité stellaire et détection d'exoplanètes
- Planétologie comparée

Notre étoile, le Soleil



SolarOrbiter

Champ B stellaire



Simulations MHD

Méthodologies

Observations photons et plasma (sol, espace, in situ)
Centre de données (p.exp. Polarbase, POLLUX, MEDOC, CDPP)
Modélisations et simulations HP
Développement instrumental : télédétection et plasma
Expériences de laboratoires avec l'INP

L'Astrophysique, une science holistique

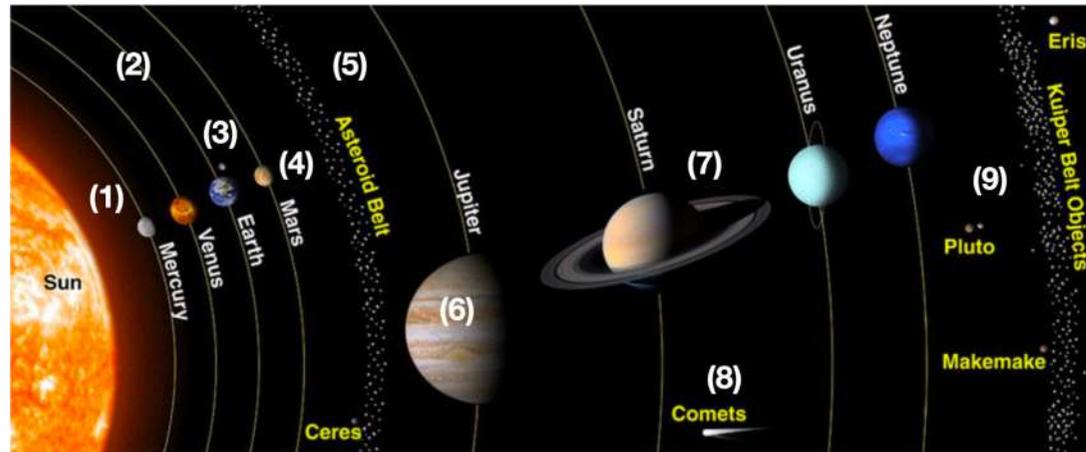
Planétologie du système solaire et processus physiques

Processus

- Collision et fragmentation
- Pression de radiation
- Physicochimie des surfaces
- Dégazage, condensation
- Plasmas

Questions

Age, formation et évolution
Transport et héritage



Observations :

Spatiales et mesures in situ
(BepiColombo, JUICE, etc.)

Défis

- Planétologie comparée (planètes telluriques, gazeuses, etc.)
- Expériences de laboratoires en collaborant avec l'INP, IN2P3, INC, etc.
- Simulations HP des atmosphères

Liens étroits avec les communautés TS et OA de l'INSU

L'Astrophysique, une science holistique

Impact sociétal

Services régaliens

(nécessité d'exactitude et stabilité)

- Métrologie du temps et des fréquences, service « temps légal »
- Systèmes de référence spatio temporel et service « éphémérides »

Mécanique céleste

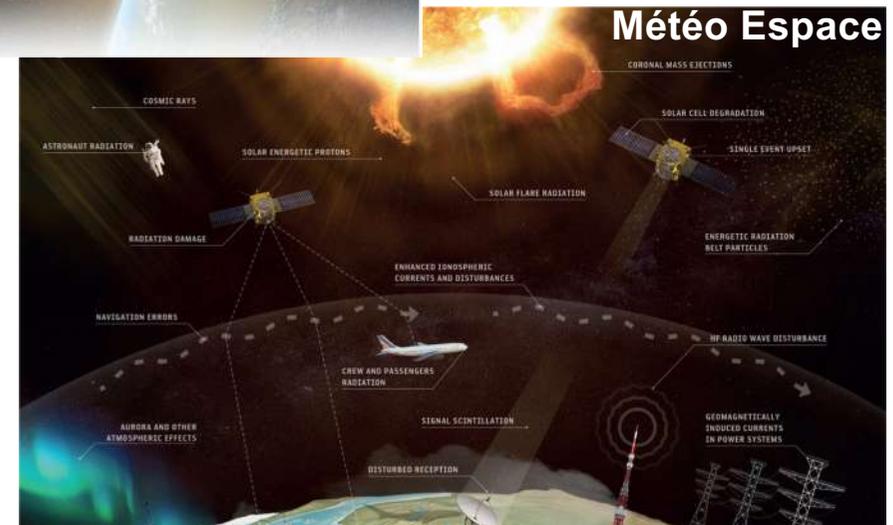
→ Suivi de géocroiseurs

Relations Soleil-Terre

Interaction héliosphère-magnétosphère

→ Météorologie de l'espace

+ enseignement, formation, diffusion des connaissances



L'Astrophysique, une science holistique

Différents états d'énergie et de matière

Matière noire et énergie noire avec la mission Euclid

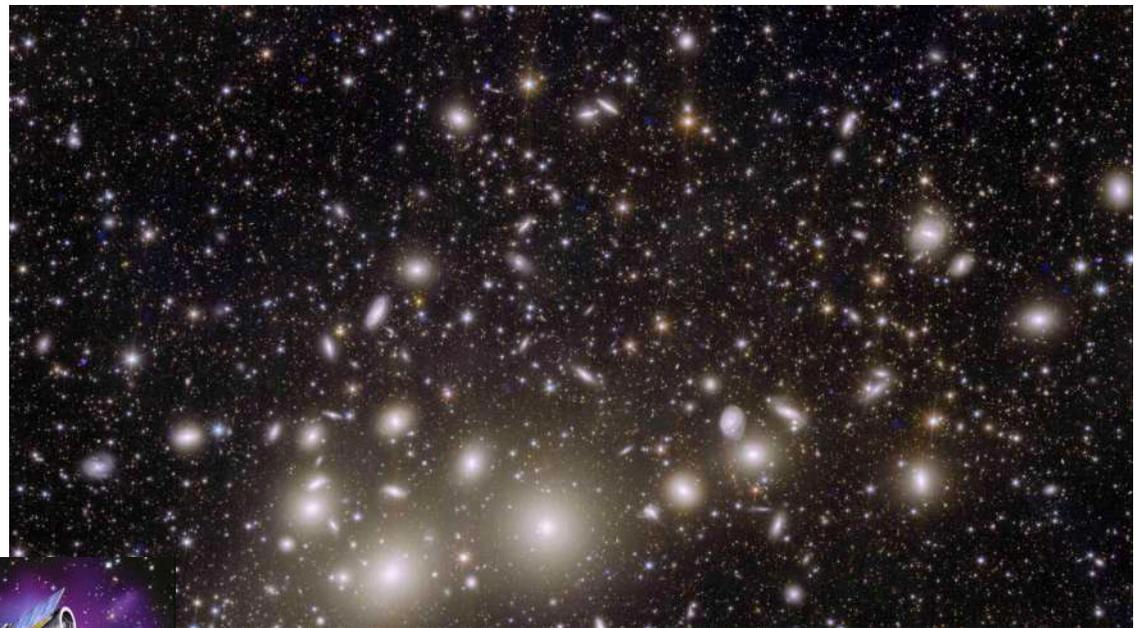
Grandes questions

Nature de l'énergie noire et de la matière noire ?
Evolution des grandes structures

→ Importance de comprendre les traceurs (par ex. galaxies) comme objets physiques en tant que tels

Synergie avec

- Gaia
- Relevés sols
- Simulations numériques



L'Astrophysique, une science holistique

Continuum de nos thématiques

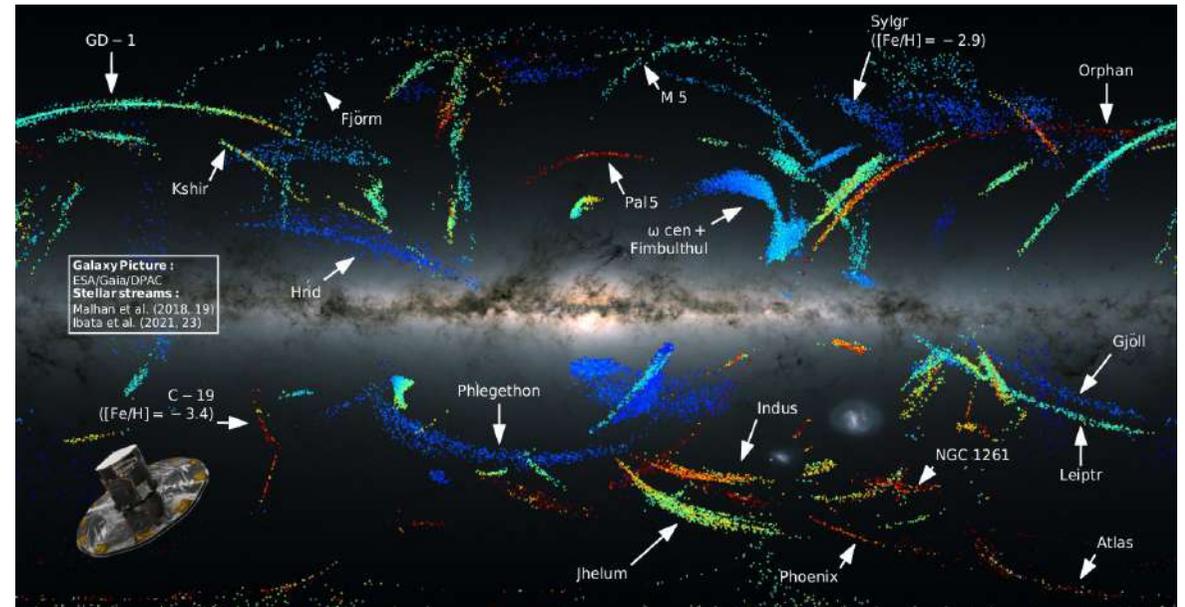
Etoiles de la Voie Lactée avec Gaia

Grande base de données (DR3) : 470 millions d'étoiles, RV pour 33 millions

- Courants d'étoiles informant sur l'origine de la Voie Lactée (archéologie Galactique)
- Extinction vers les étoiles traçant la distribution 3D du milieu interstellaire

Matière noire avec Gaia

Modéliser le halo de matière noire de la Voie Lactée à partir des courants d'étoiles



Thématiques liées à la variabilité

800 000 étoiles multiples
Détection d'exoplanètes

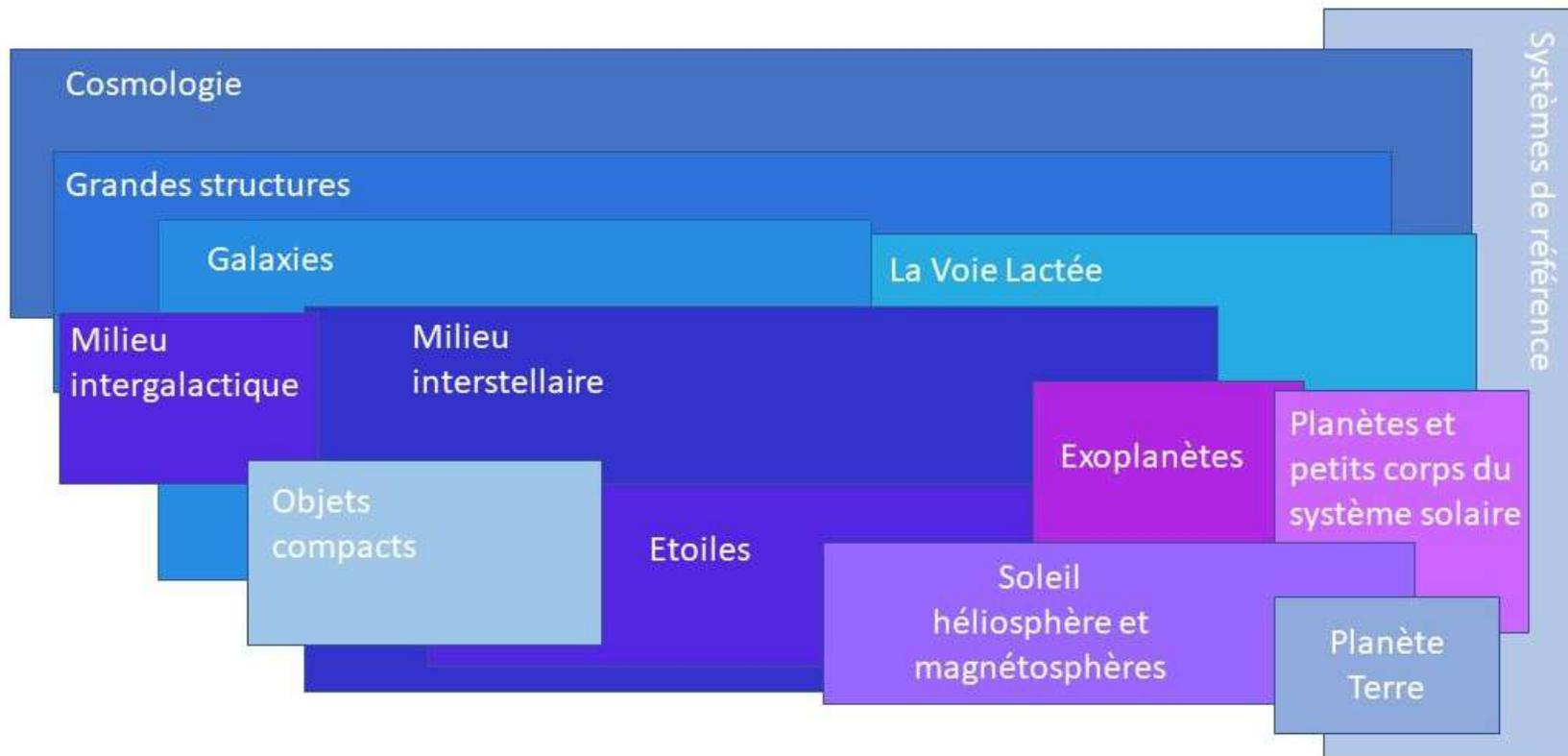
03 Nos grands défis

Nos grands défis

Défi 1 : Interactions et complexité dans l'univers

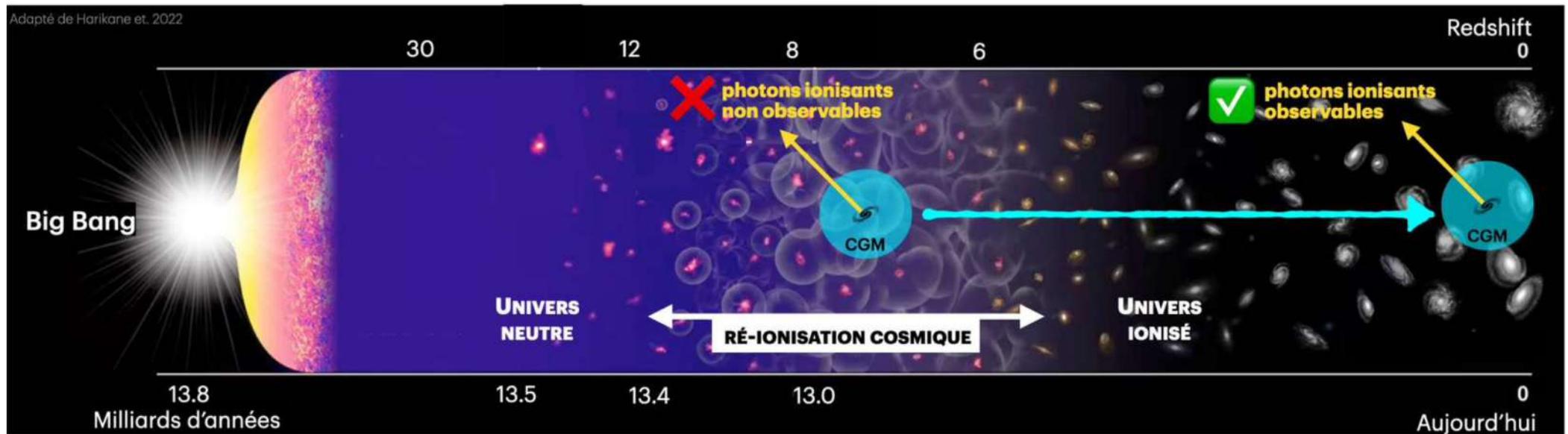
Défi 1 : Interactions et complexité dans l'univers

Nos objets astrophysiques et leur fort couplage en échelles spatiales et temporelles



Défi 1 : Interactions et complexité dans l'univers

De l'univers primordial aux galaxies d'aujourd'hui...



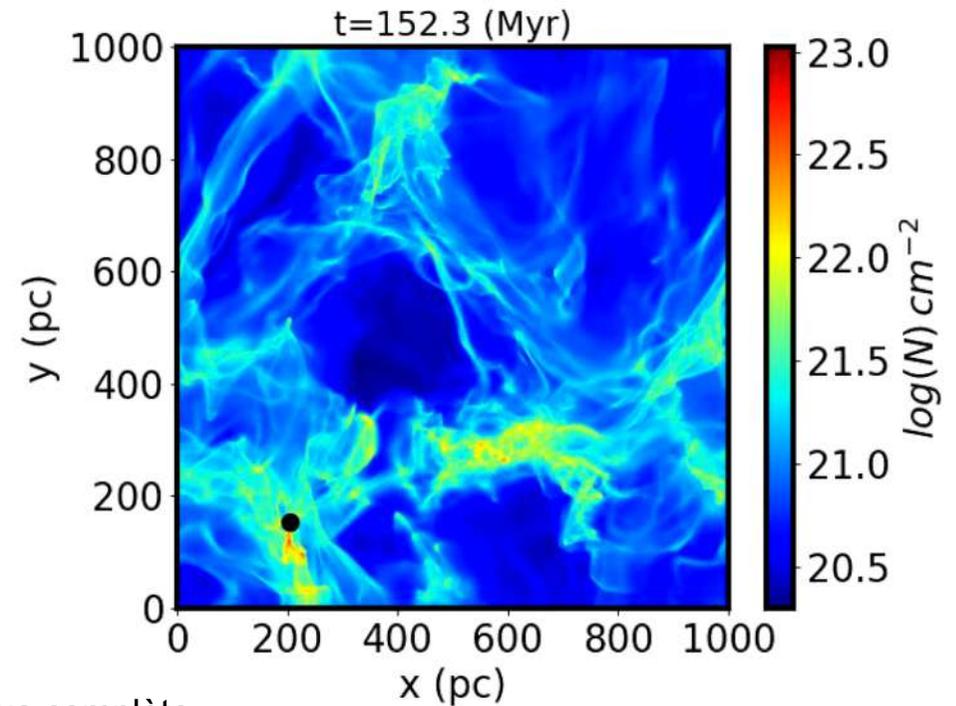
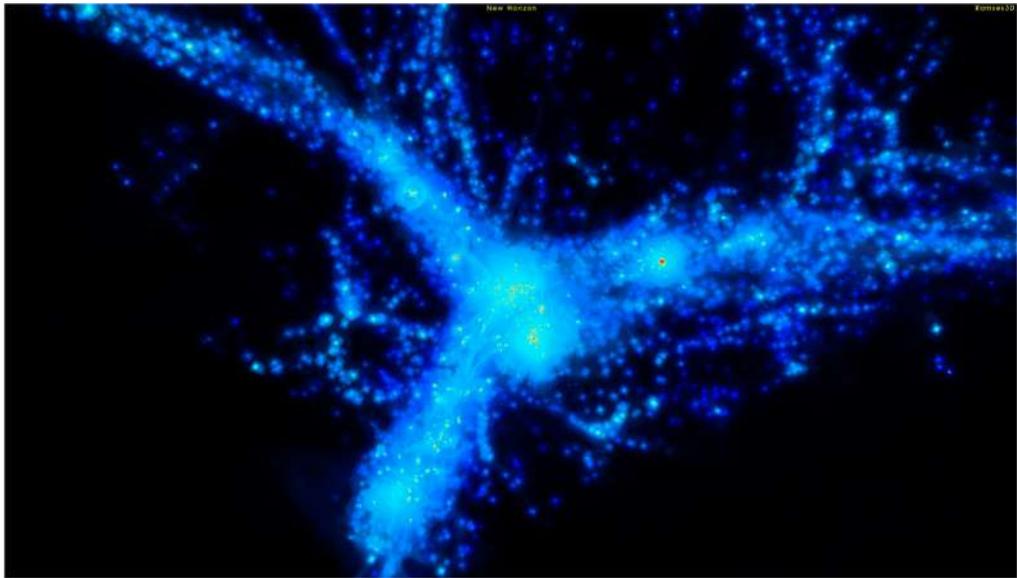
Contraindre les paramètres cosmologiques avec une bonne connaissance de notre Voie Lactée (avants plans) et de la physique des galaxies elles-mêmes en tant que traceurs

Prendre en compte l'environnement des galaxies sur leur évolution

Etablir des recettes pour la rétroaction sur le milieu interstellaire à partir d'études extragalactiques

Défi 1 : Interactions et complexité dans l'univers

Simulations (magnéto-)hydrodynamique à maillage adaptatif

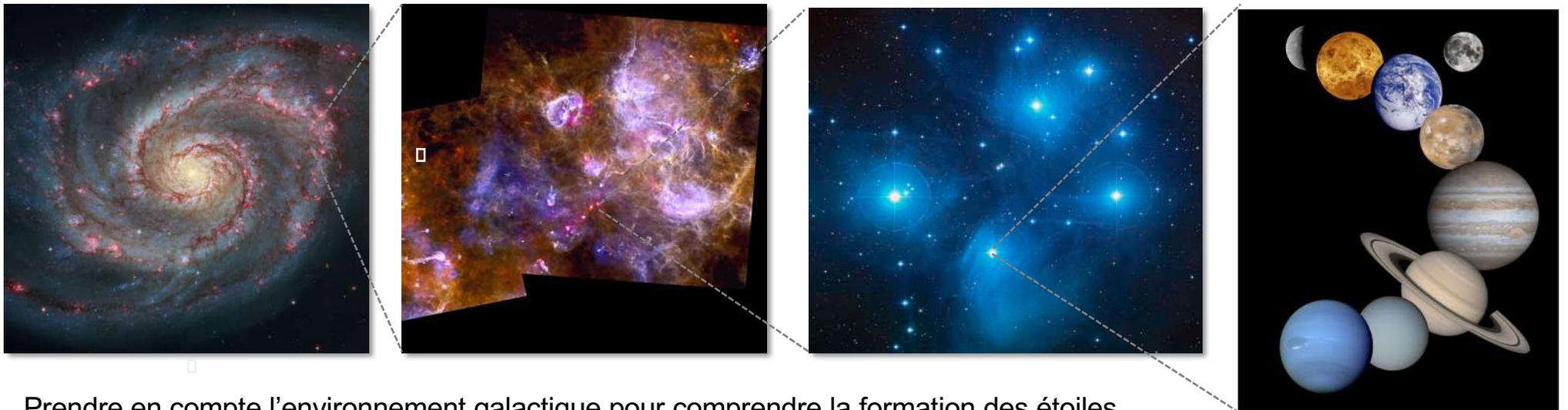


Défis:

Plusieurs ordres de grandeurs d'échelle versus une physique plus complète

Défi 1 : Interactions et complexité dans l'univers

De la Voie Lactée aux étoiles et planètes



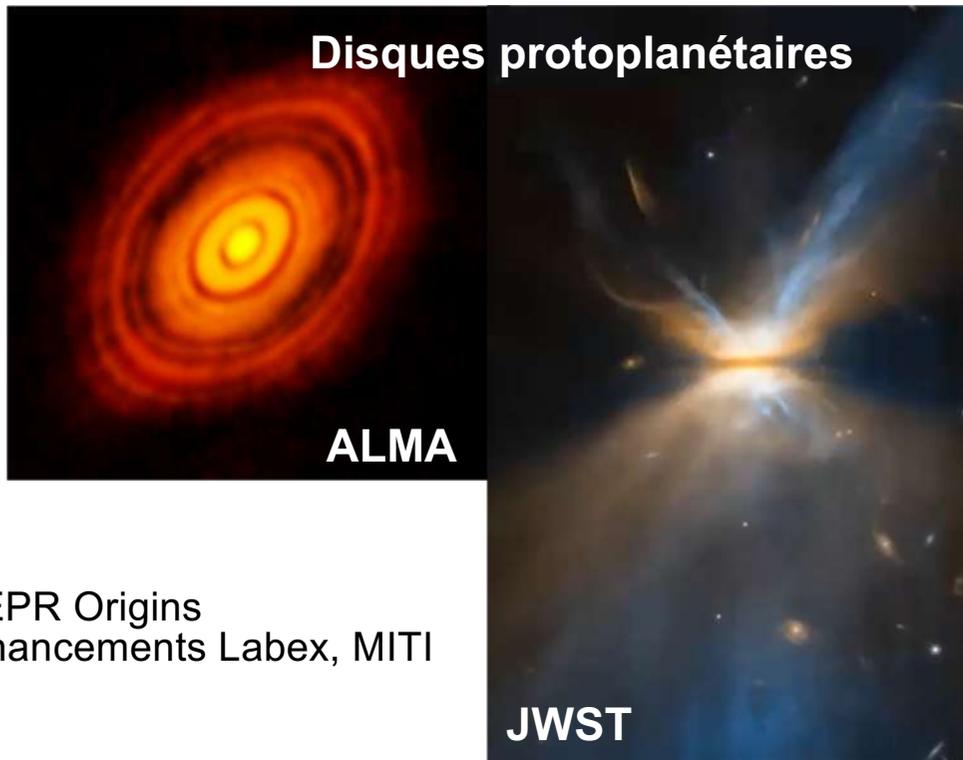
- Prendre en compte l'environnement galactique pour comprendre la formation des étoiles
- Prendre en compte la multiplicité des étoiles dans la formation des planètes
- Comprendre les couplages plasma entre étoiles et planètes
- Etudier les effets en retour des étoiles et objets compacts sur le milieu interstellaire des galaxies
- Comprendre la formation d'étoiles dans la Voie Lactée pour l'extrapoler à tous les âges de l'Univers

Nos grands défis

Défi 2 : De la naissance aux stades ultimes des systèmes astrophysiques

Défi 2 : La naissance de systèmes astrophysiques

Formation des planètes ($\sim 10^3$ km) à partir de poussières de $0.1 \mu\text{m}$



Disques protoplanétaires

ALMA

PEPR Origins
Financements Labex, MITI

JWST

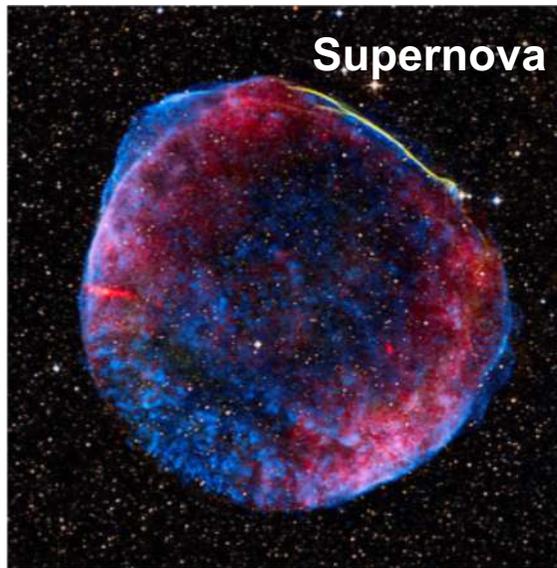


Poussière interstellaire

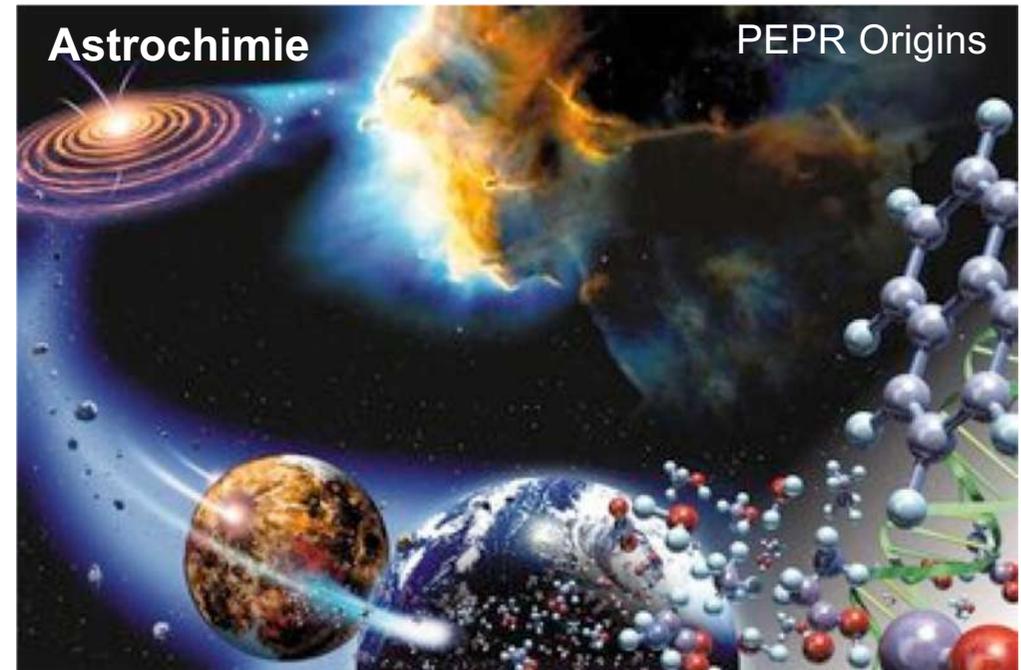
Expériences de laboratoire : transfert radiatif sur des analogues de grains

Défi 2 : Recyclage de la matière et origines de la vie

Observations de molécules complexes et expériences de laboratoire



Complexité moléculaire dans les éjecta des étoiles en fin de vie, le milieu interstellaire, les petits corps du système solaire
--> observations NOEMA/ALMA



Défi 2 : Expériences de laboratoire

Analyse d'échantillons extraterrestres



Echantillon astéroïde Ruygu (Hayabusa2) sous la ligne de lumière de SOLEIL
--> Composition chimique

Simu. de processus physico-chimiques des milieux astrophysiques

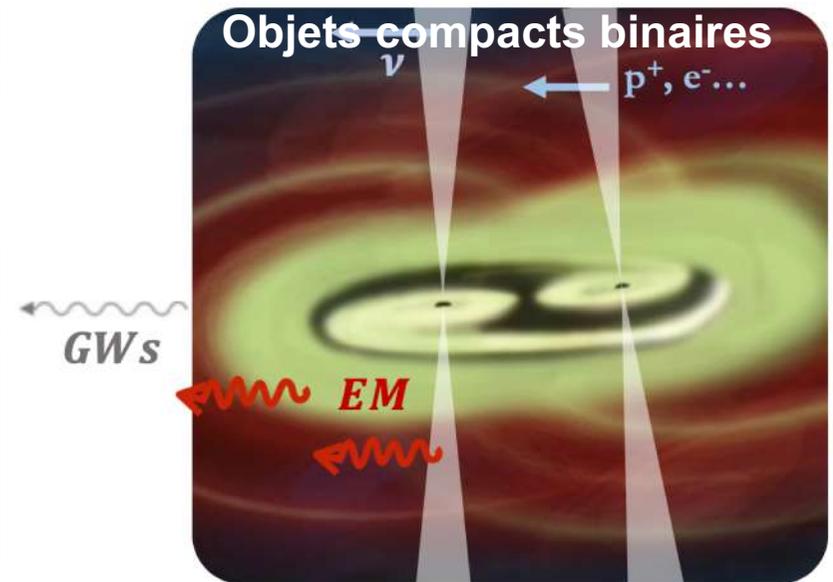
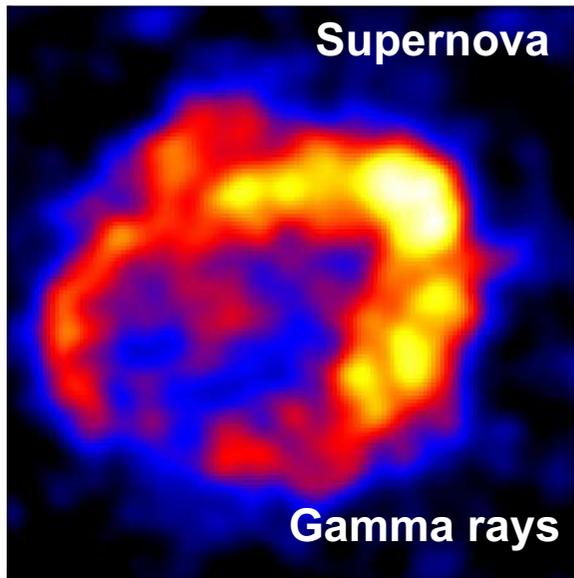


Expériences d'irradiation à basse température
---> Prédiction de composition chimique & structure

Accès aux IR* nationales et collaborations avec des équipes de l'IN2P3 et l'INC incontournables !

Défi 2 : Stades ultimes des systèmes astrophysiques

Phénomènes de haute énergie X et γ



Observatoires futurs : CTA, SVOM, NewAthena, etc.
En synergie avec des observations au sol : Nançais, ALMA, etc.

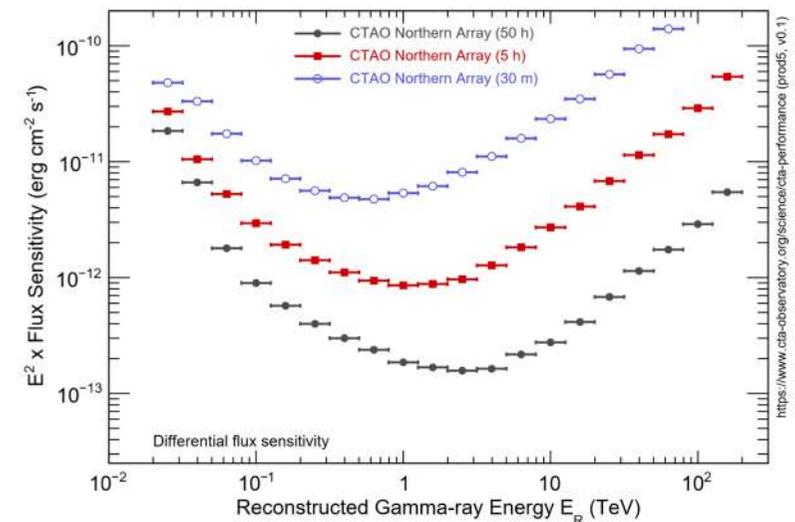
Défi 2 : Stades ultimes des systèmes astrophysiques

Des observatoires pour sonder les phénomènes extrêmes et transitoires



Thématiques

Accélération des particules cosmiques
Caractérisation des étoiles à neutrons, des trous noirs
des jets relativistes, des phénomènes explosifs
Nature de la matière noire



Multi-longueur d'ondes : Gamma, X, Optique, Submm, Radio
& **multimessager** (Rayons cosmiques, Neutrino, OG)

Défis: Suivis de phénomènes transitoires (ToO)
Impact environnemental

Défi 2 : Stades ultimes des systèmes astrophysiques

Les Ondes Gravitationnelles (Binaires BH/BH, BH/NS, NS/NS, CCSN, CW)

Etudes

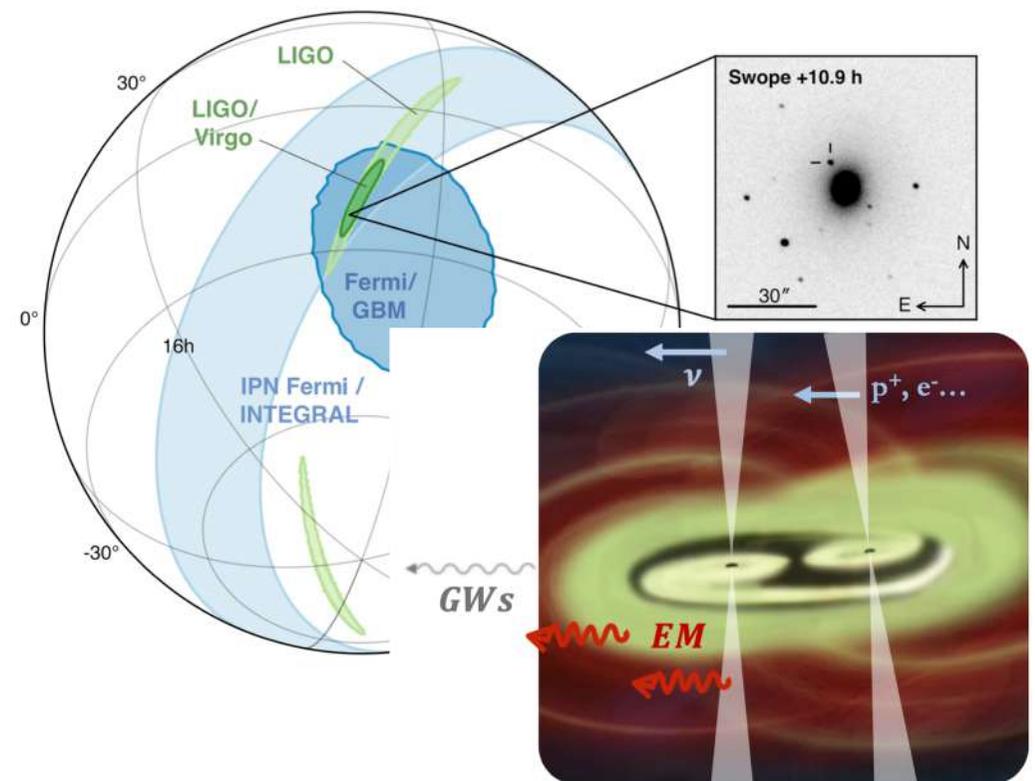
- Modélisation des sources d'Ondes Gravitationnelles (populations, formation, structure et impact)
- Recherche de sources individuelles et de fonds stochastiques d'origine cosmologique (Virgo/LIGO, GRAND, PTA et plus tard LISA)

Objectifs astrophysiques :

- Sonde cosmologique (paramètre H_0)
- Test de la gravitation
- Sources multi-messagers (OG + EM + neutrinos...)

Liens forts avec

- les communautés IN2P3 et INP
 - l'astrophysique des sources transitoires
- Réseau de suivis d'alertes (p.exp. Colibri)



Nos grands défis

Défi 3 : Instrumentation de pointe et programmes d'observations pour sonder les extrêmes

Défi 3 : Instrumentation de pointe

Développement de concepts instrumentaux et R&D (voir GT II.2)

R&D en haute résolution angulaire

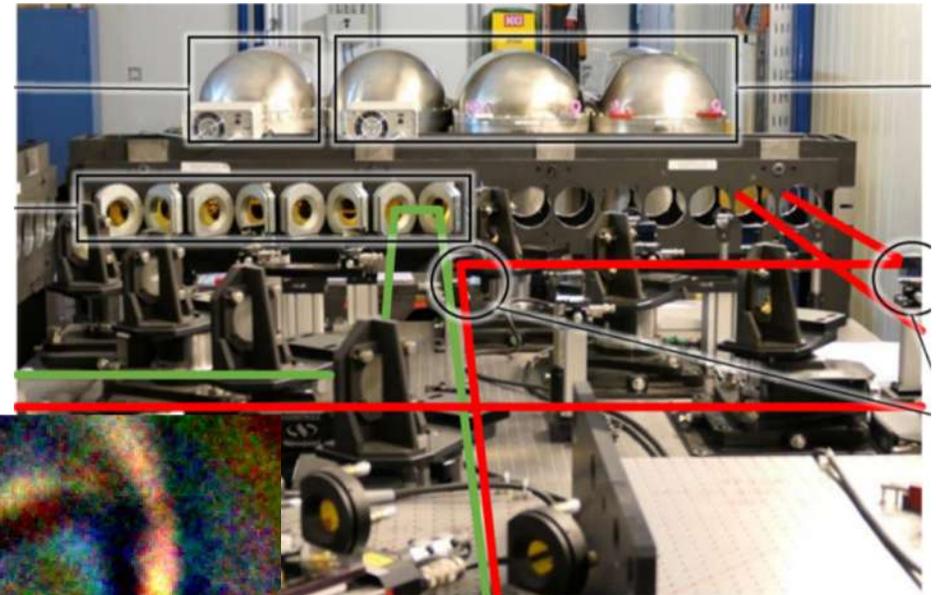
- Interférométrie optique
- Optique adaptative
- Imagerie haut contraste

Instrumentation ESO (VLT, VLTI, ELT) et JWST

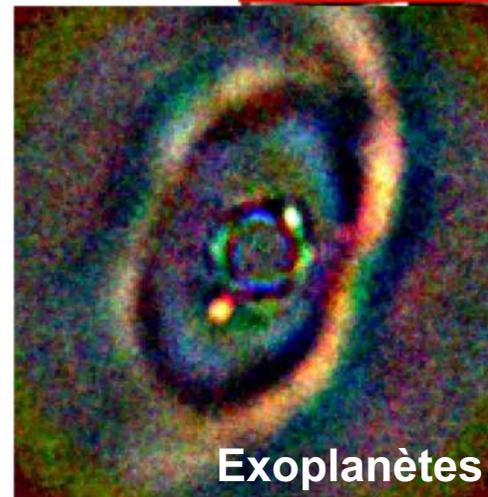
→ Etudes complémentaires de PLATO et ARIEL

Autres domaines d'expertise (collaborations avec le CNES, l'IN2P3, l'IRAM)

Mesures in situ de planètes et plasmas
Champ magnétique (CFHT/SPIRou)
Missions Gamma et Xrays
Submm et hétérodyne



Beam A Beam B
to GRAVITY beam combiner



Exoplanètes

Thématiques

Détection et caractérisation d'exoplanètes
Etoiles multiples
Centre Galactique

Défi 3 : Instrumentation de pointe en IR proche et moyen

Des observatoires spatiaux IR cruciaux pour plusieurs thématiques astrophysiques

Satellite JWST

Lancé en 2021

Thématiques

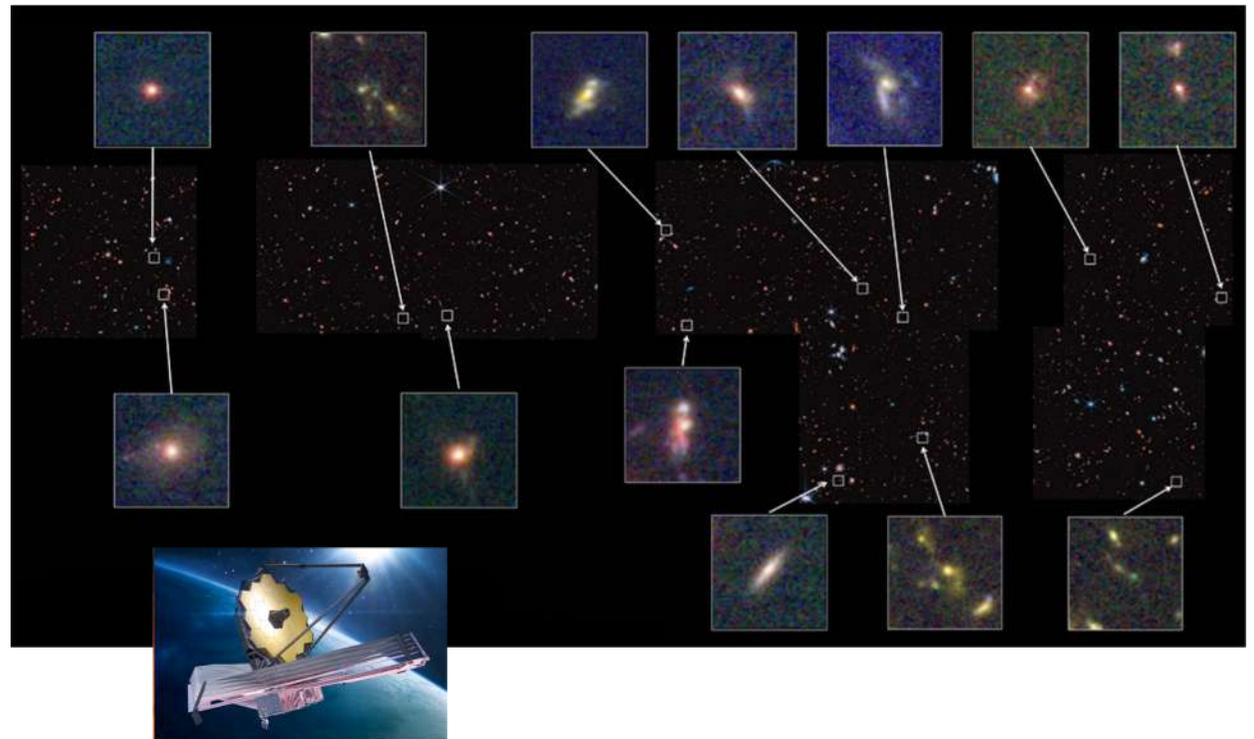
- Evolution des galaxies
- Formation des planètes
- Poussières dans milieu interstellaire
- Détection d'exoplanètes
- Atmosphère des planètes

Défi

Des données complexes

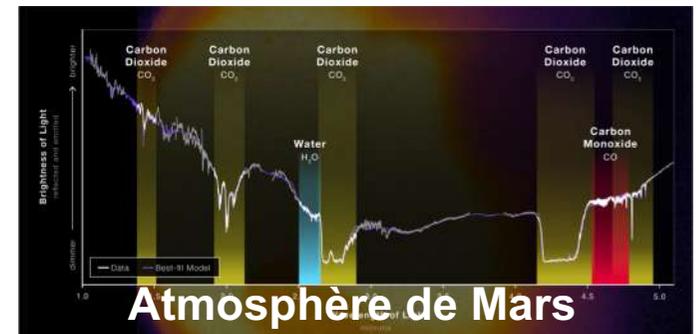
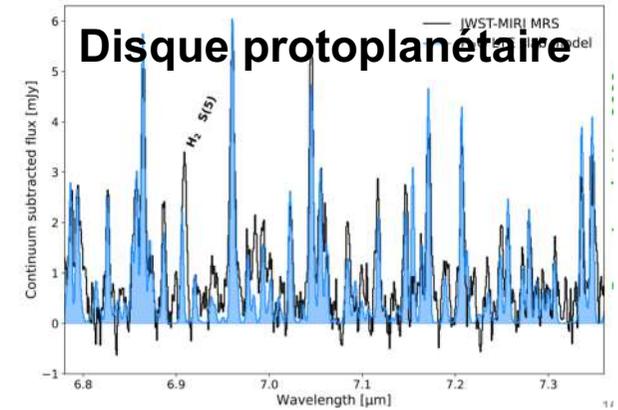
Complémentaire de ALMA et NOEMA

Manque un observatoire IR lointain



Défi 3 : Programmes d'observations

La finesse des images et la richesse des spectres



Défi 3 : Instrumentation de pointe en radio

Des observatoires radio cruciaux pour plusieurs thématiques astrophysiques

Interféromètres (10 000 antennes) à 50 MHz-15 GHz en
Afrique et Australie
Programmes scientifiques >2027
Précurseurs: NenuFAR, LOFAR

Thématiques

- Epoque de la réionisation
- Champ B du soleil au milieu interstellaire des galaxies
- Nature des premières étoiles
- Objets compacts et Ondes Gravitationnelles
- L'origine de la vie

Défis

Enormes volumes de données (700 pétaoctets par an)
Impact environnemental



Nos grands défis

Défi 4 : Méthodes numériques innovantes pour étudier l'univers

Défi 4 : Méthodes numériques innovantes pour étudier l'univers

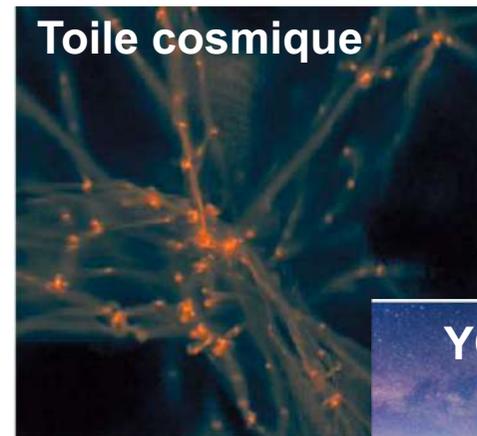
Analyse de données avec l'intelligence artificielle

Données astrophysiques de plus en plus volumineuses

- grande dynamique d'échelles spatiales, spectrales, multi-D, court pas d'intégration
- Traitement, curation, archivage dans le cadre de la Science Ouverte (CDS)
- observations, simulations numériques, R&D

Développement de techniques d'apprentissage statistique / Machine Learning

Beaucoup à faire ! Besoin d'experts.
Liens forts avec l'INSIS



Défi 4 : Méthodes numériques innovantes pour étudier l'univers

Simulations numériques de haute performance

A l'ère de l'exascale

10^{18} opérations/sec

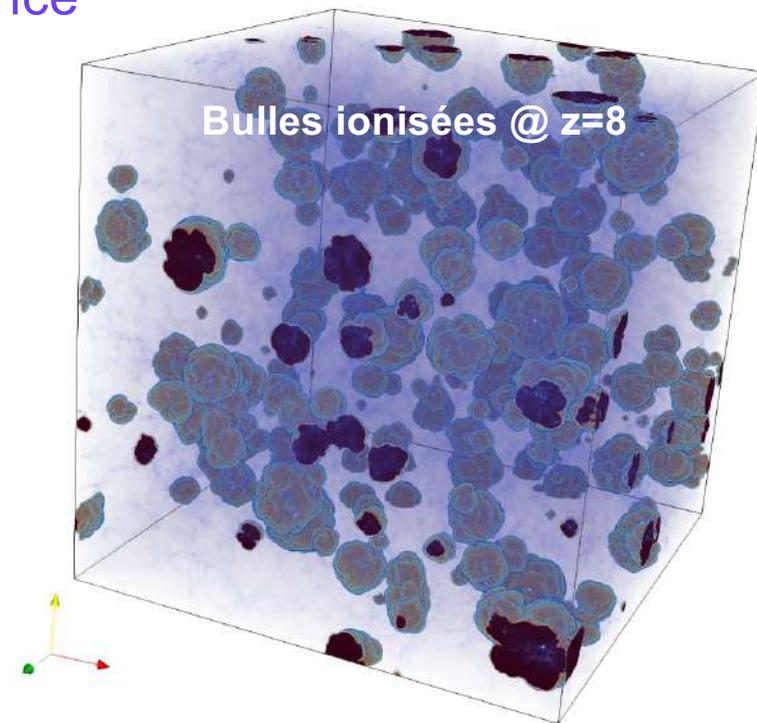
Incontournable pour ajouter les phénomènes physiques nécessaires à une description complète des systèmes astrophysiques

Défis

Architectures multiples
Coût environnemental

Efforts conséquents en cours !

Soutenus par PEPR Origins, PEPR Numpex
Futur calculateur Européen Alice Recoque



1^{ère} simulation Dyablo /TGCC CEA

04

Recommandations et questions à débattre en atelier

Recommandations

1. **Maintenir la belle synergie de notre communauté dans son ensemble**, avec une structuration en Actions Thématiques et Programmes Nationaux. (en lien avec GT III.4)
2. **Maintenir et renforcer nos activités scientifiques interdisciplinaires** pour assurer la cross-fertilisation, notamment avec l'INC et l'INP dans le cadre des expériences de laboratoire et avec l'INS2I pour la science des données.
3. **Renforcer l'interface institutionnelle entre l'INSU, l'IN2P3 et l'INP.** (voir GT II.3 Interinstituts)
4. **Soutenir l'exploitation scientifique des grands projets de la discipline** en dédiant des ressources humaines aux missions engagées et en accompagnant les porteurs et porteuses de demandes de financement national et international. (en lien avec GT III.3 Moyen)
5. **Définir ensemble les priorités stratégiques des 15 ans à venir** pour permettre un pavage thématique peut-être un peu plus réduit mais qui ne rate aucune opportunité. Cet exercice peut s'avérer nécessaire pour que nous maintenions un haut niveau de recherche dans un contexte budgétaire et climatique contraints. (en lien avec GT III.3 Moyen et I.1 TransitionEcologique)

Questions à débattre en atelier

Question 1 - Maintenons la belle synergie de notre communauté

Constat :

La réforme des Programmes Nationaux de l'INSU réaffirme le rôle des PN dans la structuration nationale. Notre communauté doit s'organiser dans le nouveau cadre comprenant la CSAA, le PN AA, ses AT & AS, et le PNP et l'IIT.

En particulier, la future AT Exosystèmes devra conserver des liens forts avec d'un côté la physique stellaire et le milieu interstellaire et de l'autre les sciences de la Terre et la planétologie.

Question :

Quels sont les besoins pour le domaine Astrophysique en terme

- de structuration au niveau national
- de coordination entre les AT, PN, & AS
- d'animation

Et en particulier, comment envisagez-vous la place d'une nouvelle AT Exosystèmes ? Son périmètre, son interface entre PN-AA et PNP, son lien avec le PEPR Origins ?

Questions à débattre en atelier

Question 2 - Soutenons nos activités interdisciplinaires

Constat :

La communauté Française a développé de nombreuses expertises grâce au développement d'activités scientifiques interdisciplinaires de très haut niveau, toujours renouvelées. Il est nécessaire de les maintenir et renforcer pour assurer la cross-fertilisation des communautés.

Questions :

- Quelle animation scientifique ?
- Et quels outils ?

devraient être renforcés/mis en place pour mieux structurer nos activités interdisciplinaires, notamment

- avec l'INC, l'IN2P3 et l'INP dans le cadre des expériences de laboratoire
- avec l'INSIS et l'INS2I pour la science des données
- avec l'IN2P3 et l'INP pour l'analyse de données pour sonder l'univers primordial, élucider le secteur sombre, comprendre l'univers violent/extrême.

Questions à débattre en atelier

Question 3 - Soutien à l'exploitation scientifique de nos grands projets

Constat :

Nous rencontrons tous de grandes difficultés à trouver les ressources humaines (scientifiques et techniques) et financières pour assurer l'exploitation scientifique de nos grands projets.

Questions :

- Quelles stratégies pouvons-nous mettre en place pour assurer cette exploitation scientifique ?
 - à l'échelle nationale et internationale ?
 - à court, moyen et long terme ?
- Quel accompagnement serait à mettre en place pour aider les porteurs et porteuses de demandes de financement national et international ?

Questions à débattre en atelier

Question 4 - Définir des priorités stratégiques ?

Constat :

Le contexte environnemental et budgétaire (RH compris) tend à plaider en faveur de priorités thématiques stratégiques plus ciblées.

Questions :

- Quelles seraient vos propositions de critères permettant de trouver le bon équilibre entre un tel ciblage de priorités thématiques et un pavage thématique qui ne rate aucune opportunité ?
- Quels sont les grands enjeux en Astrophysique et quelles sont les questions prioritaires car stratégiques pour les années à venir ?



**Pénurie de poste dans les universités
Diminution au CNAP**

**Chute importante du nombre d'IT dans
nos laboratoires**