

# Cosmologie et Formation des Galaxies

**Sandrine Codis & Frederic Bournaud**

— AIM / CEA-Paris Saclay —

horizon-AGN

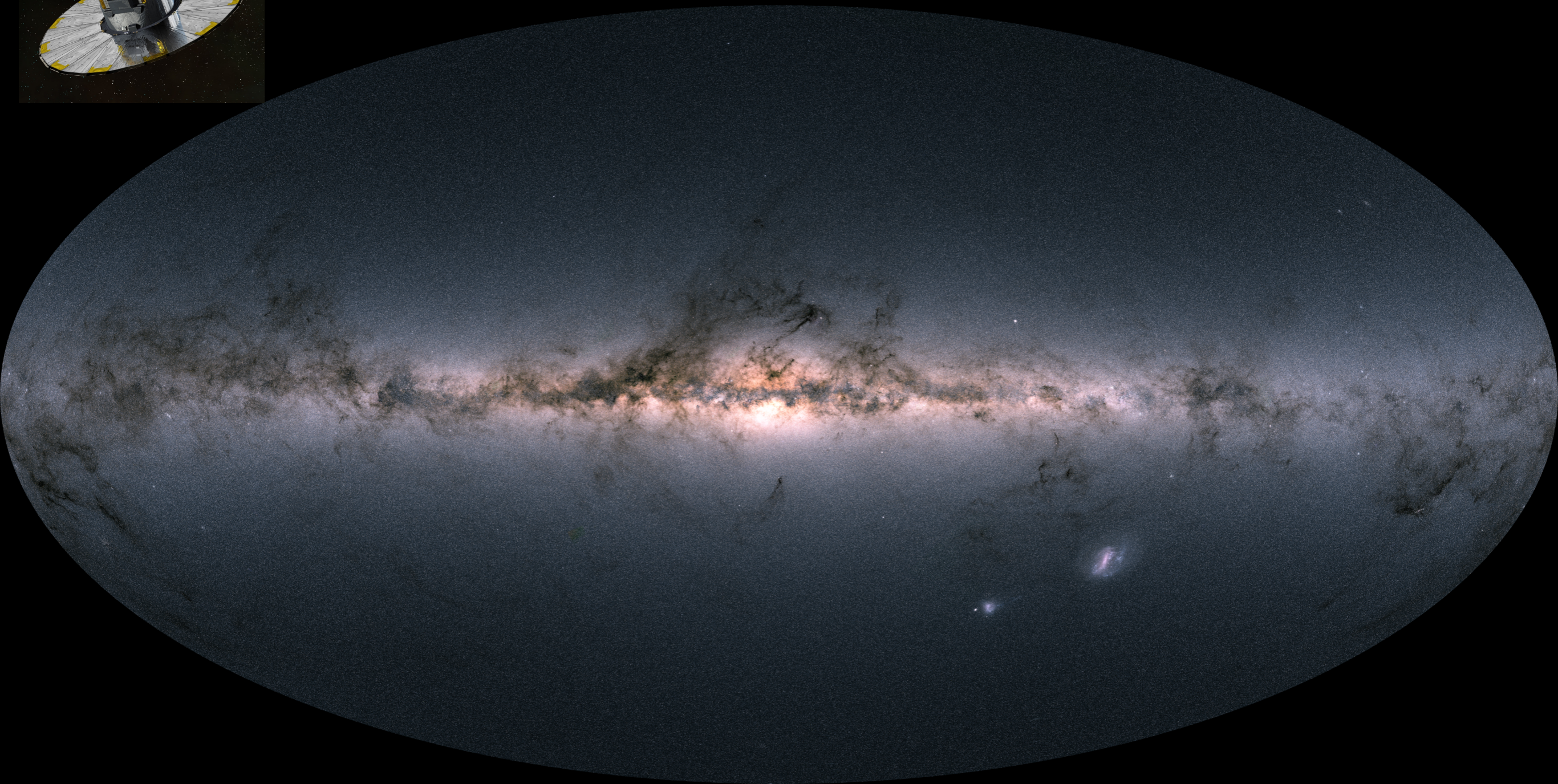
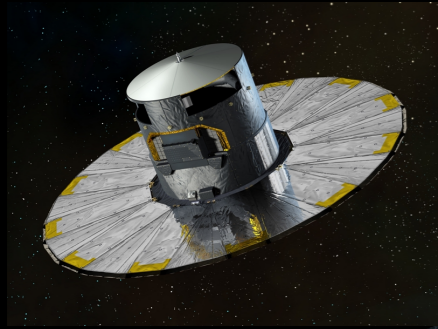
8 nov 2022

Lycee Roland Garros



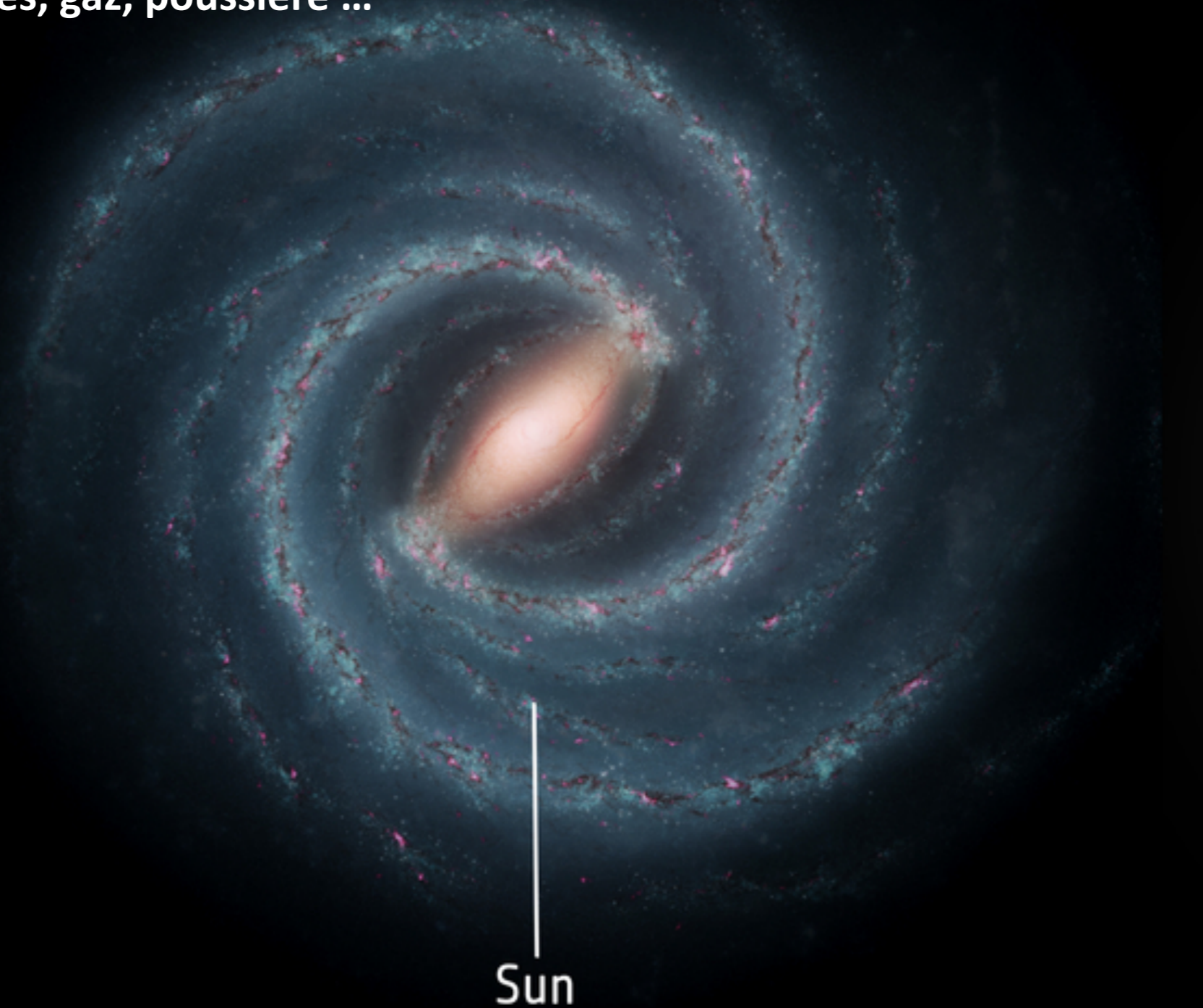
© *Luc Perrot Photographies*

# La Voie Lactée vue par Gaia



# Notre galaxie, la Voie Lactée

100 000 années lumière de diamètre  
~ 300 milliards d'étoiles, gaz, poussière ...



# Notre galaxie, la Voie Lactée

100 000 années lumière de diamètre  
~ 300 milliards d'étoiles, gaz, poussière ...

1ere image de Sgr A\*  
(printemps 2022)

(c) EHT

Sgr A\*, trou noir de 4 millions de masses solaires

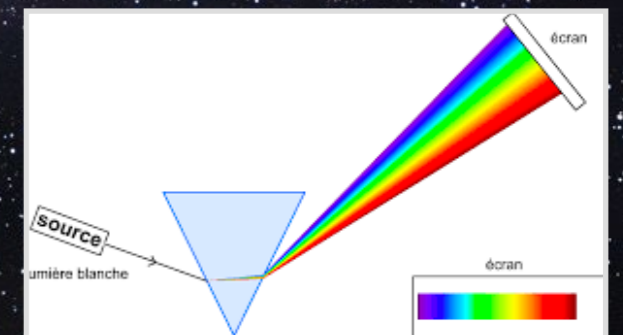
Sun



© *Luc Perrot Photographies*

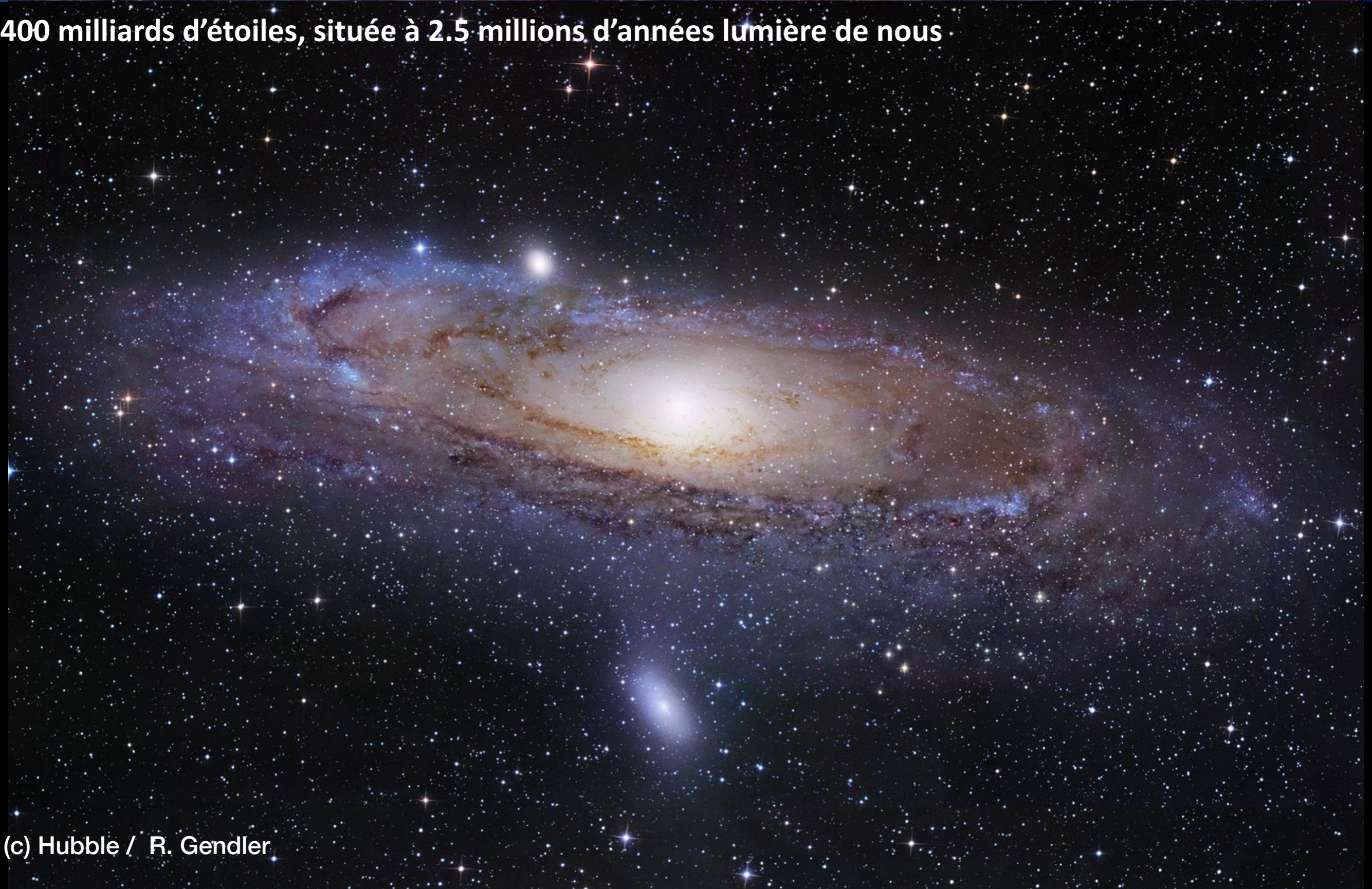
# Andromède notre plus proche voisine

Étoiles, gaz, poussière... et matière noire !



# Andromède notre plus proche voisine

400 milliards d'étoiles, située à 2.5 millions d'années lumière de nous

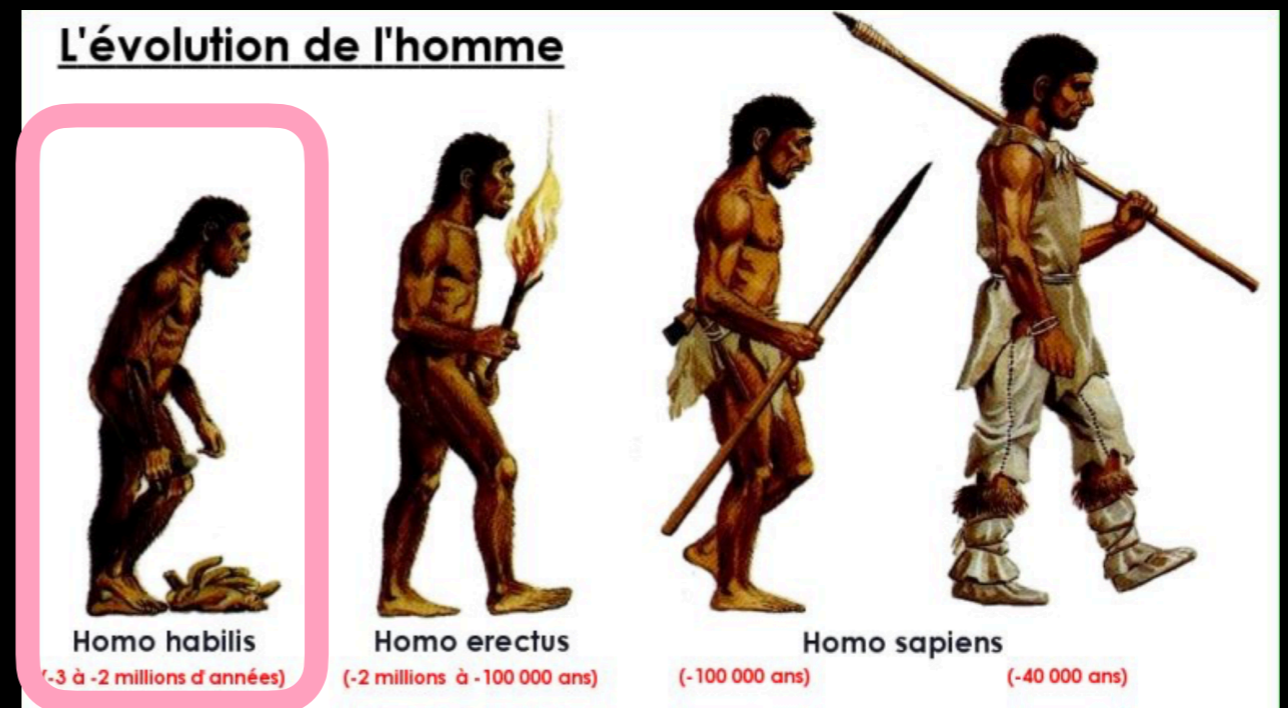




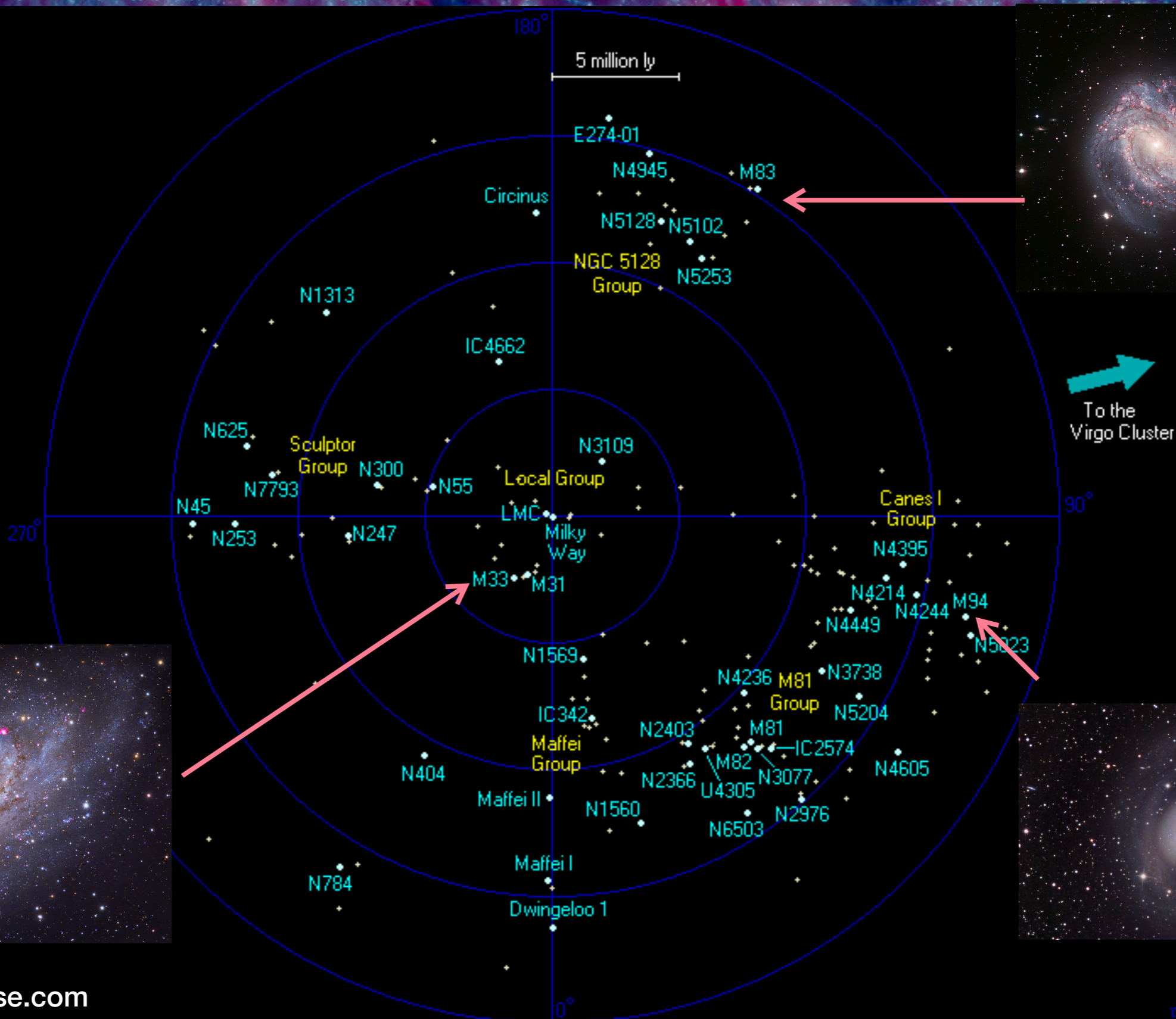
# Au même moment



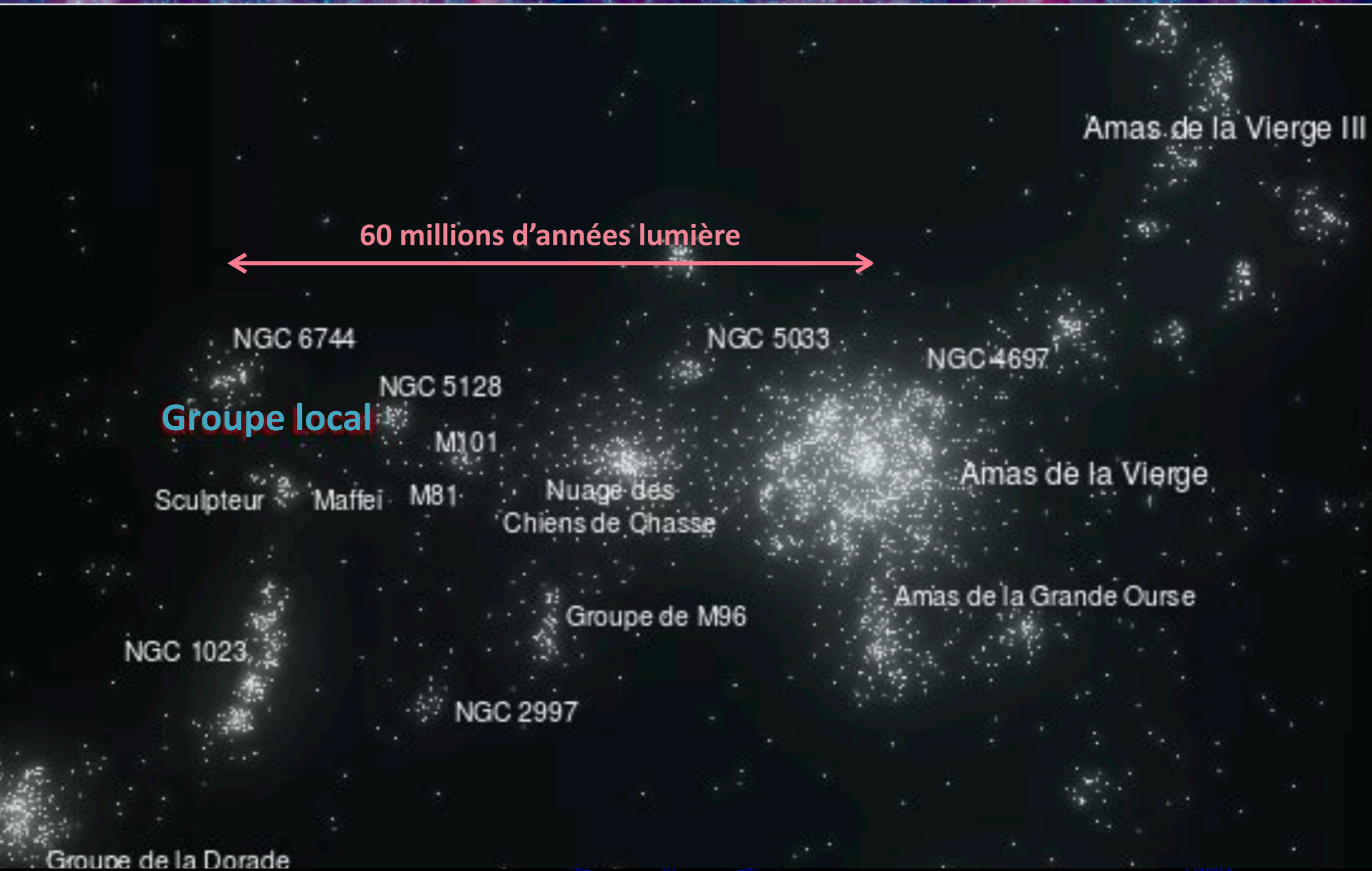
Les premiers hommes apparaissent sur Terre. Homo Habilis commencent à utiliser des outils...



# Le voisinage de la Voie Lactée



# Le voisinage de la Voie Lactée



# Groupes, amas, superamas de galaxies

Quintette de Stephan



# Groupes, amas, superamas de galaxies

Abell 2218



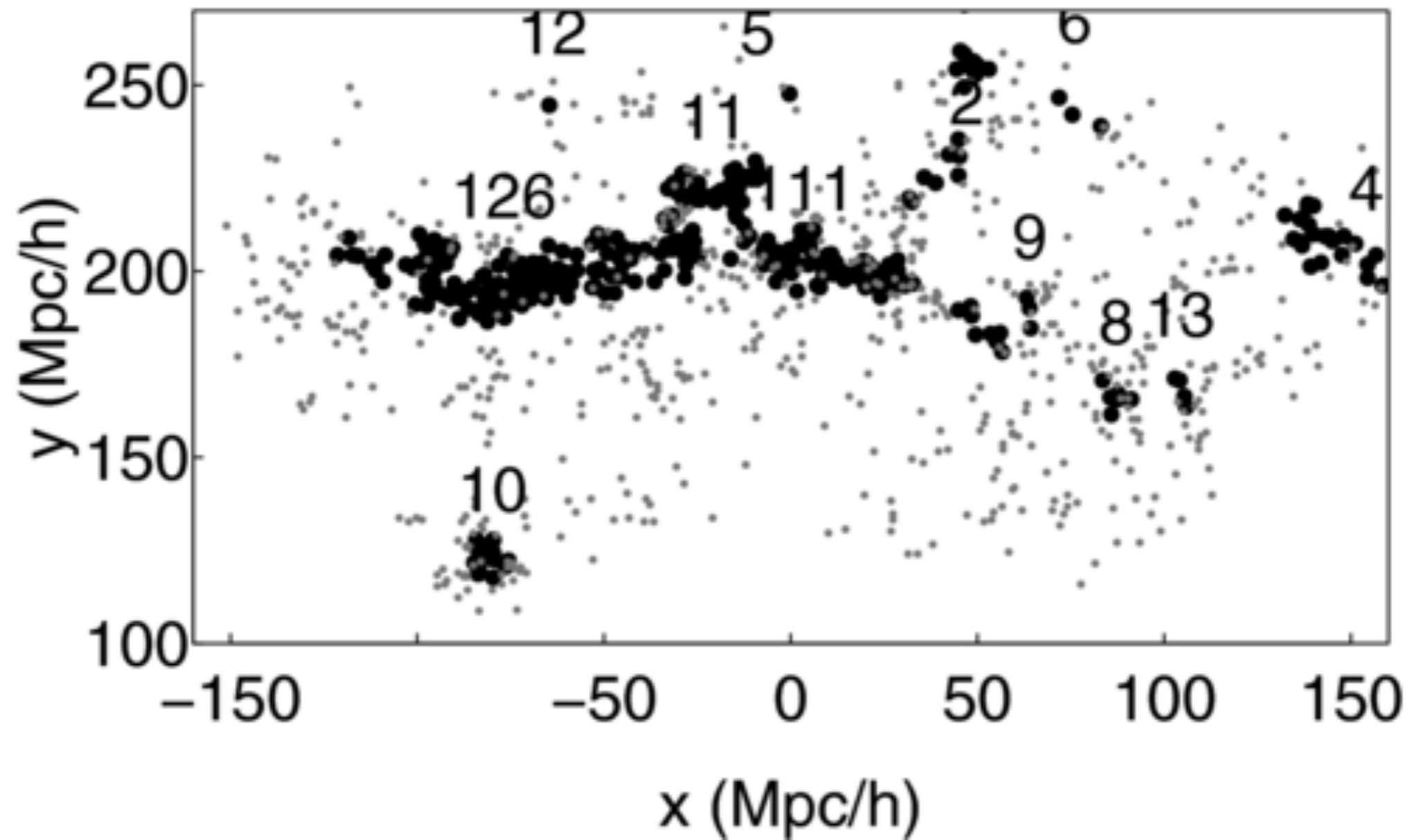
# Groupes, amas, superamas de galaxies

Abell 370



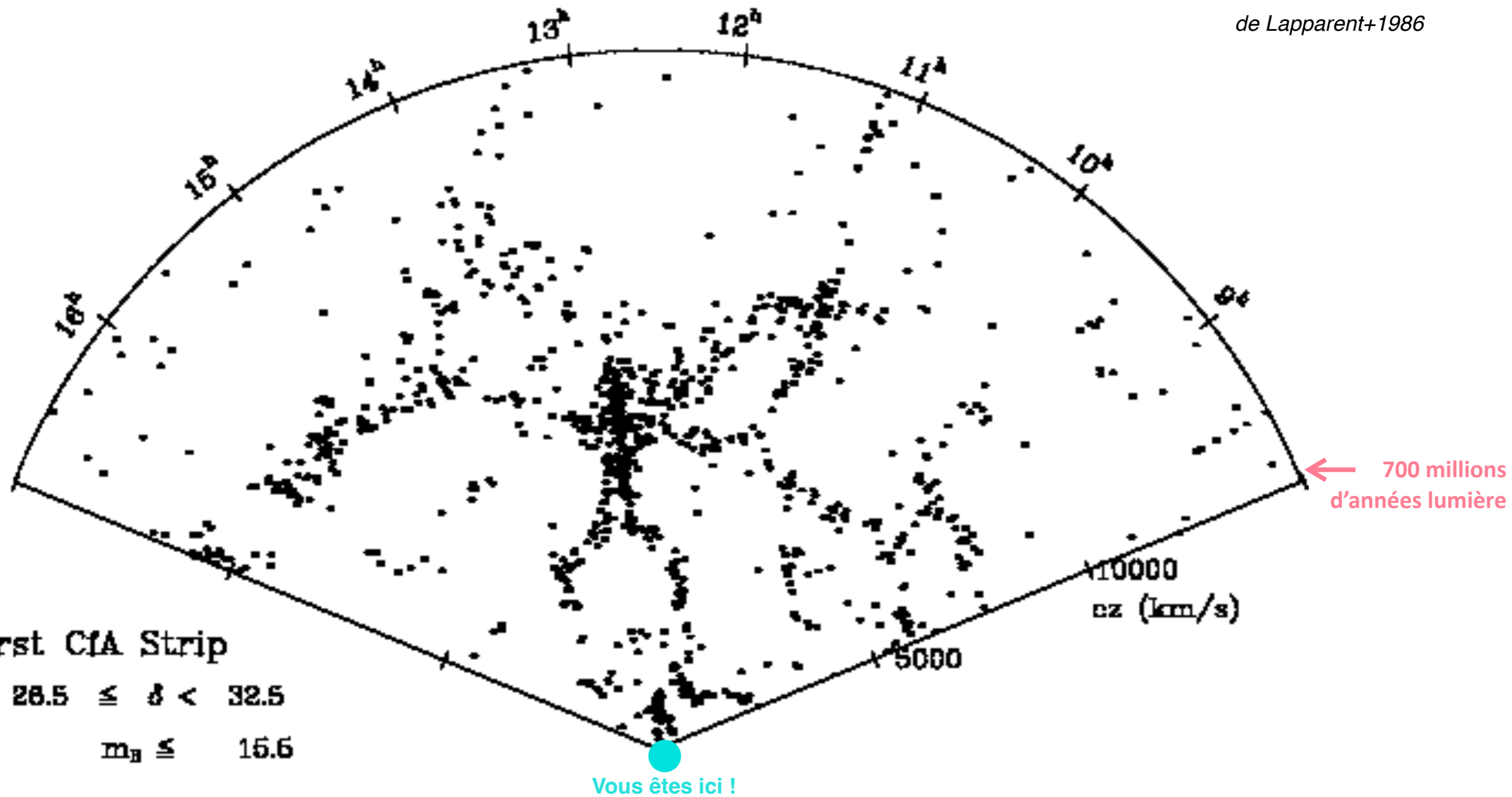
# Murs, vides dans la distribution des galaxies

Grand mur du Sloan: une structure de 1.3 milliards d'années lumière de long !



# Distribution des galaxies

de Lapparent+1986





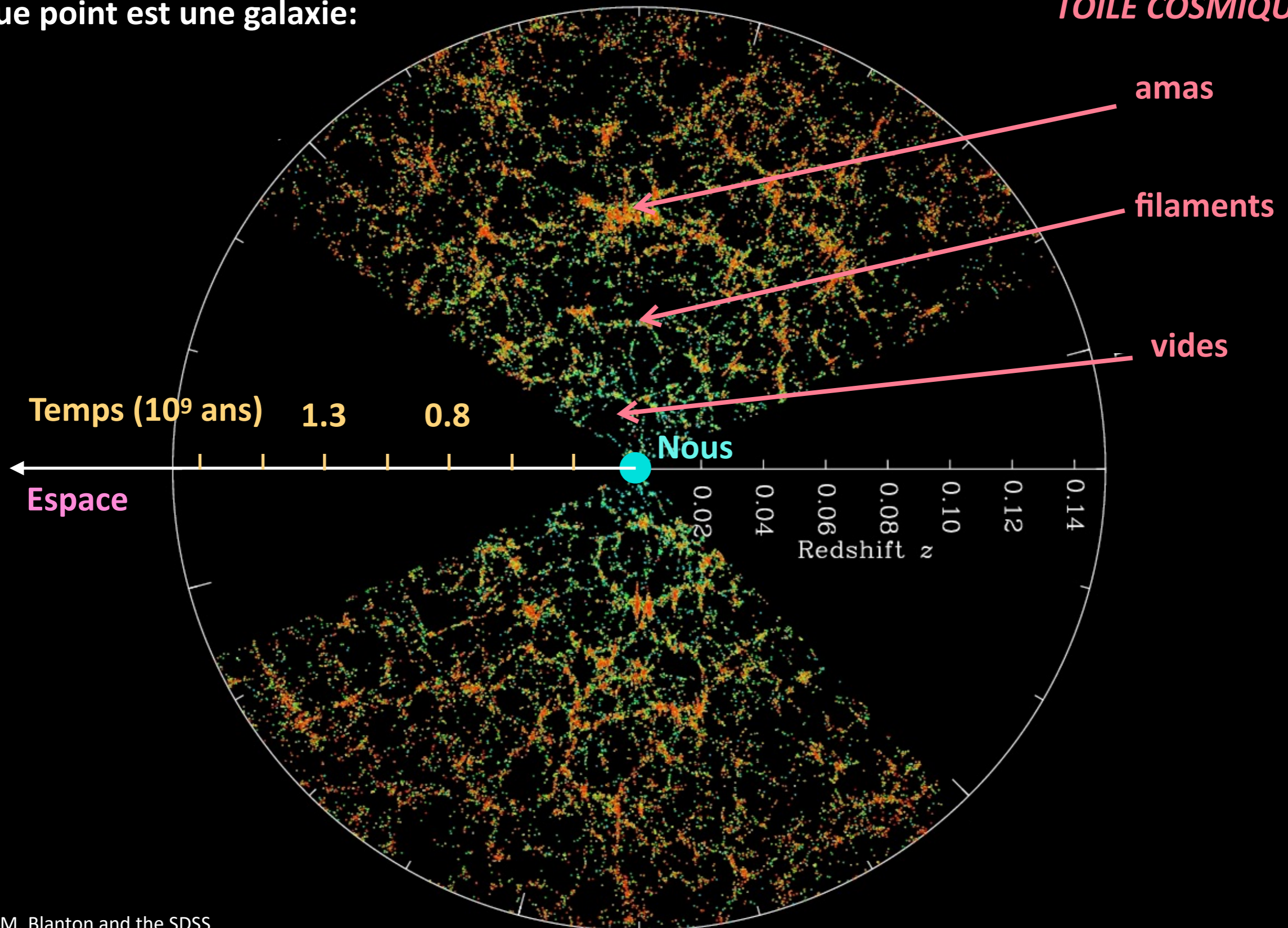


(c) SDSS collaboration

# Distribution des galaxies

Chaque point est une galaxie:

*TOILE COSMIQUE :*



~1 milliard d'années lumière



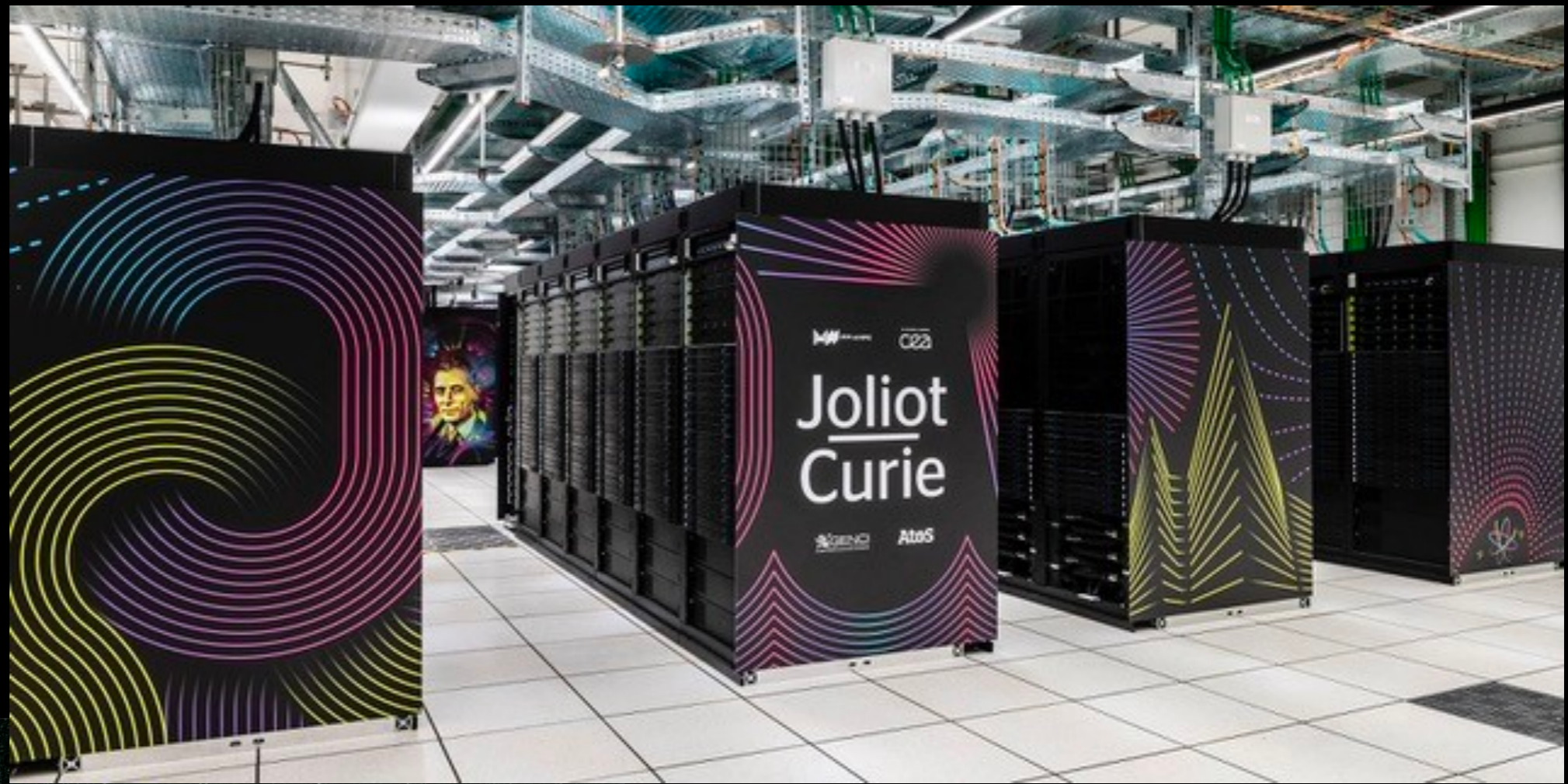
La toile cosmique est naturellement prédite par le **modèle concordant de la cosmologie** au moyen par exemple de simulations numériques.

Au sein de la toile cosmique, la matière s'échappe des vides vers les murs, les filaments et finit dans les noeuds.

# Collisions de galaxies

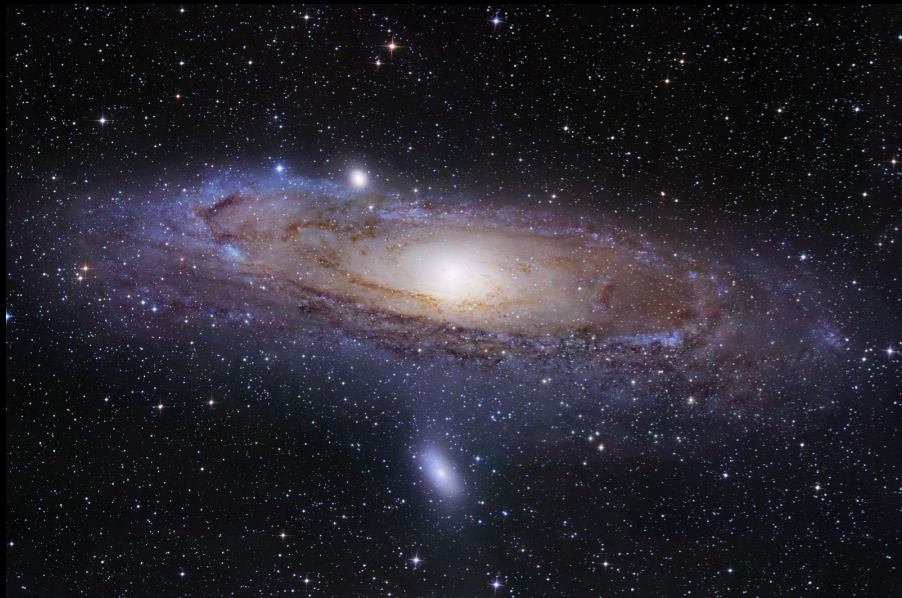
Quintette de Stephan



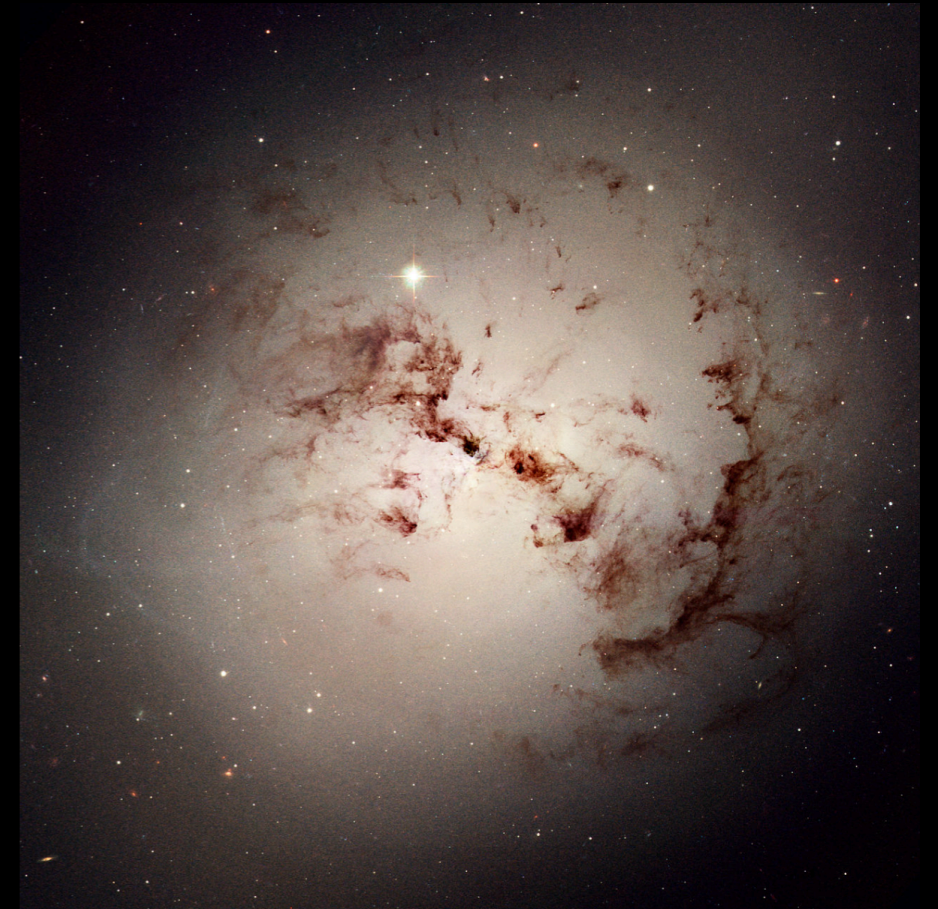




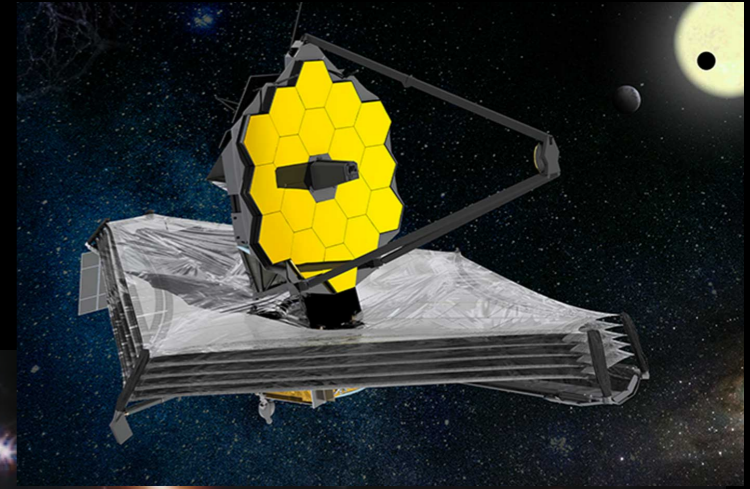
# Morphologie des galaxies



Des spirales... aux elliptiques



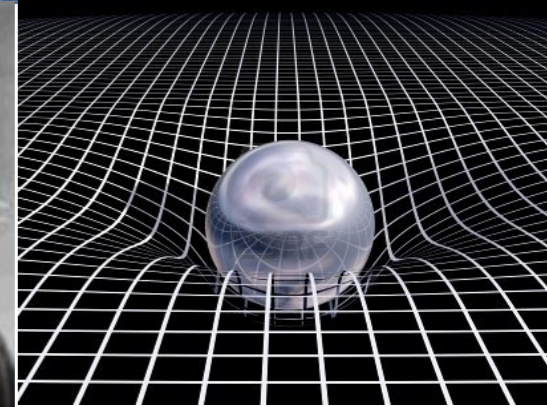
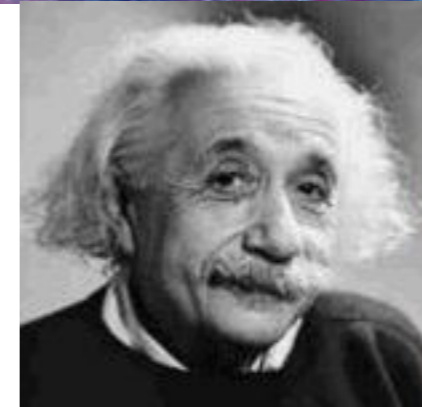
# L'émergence des premières galaxies vue par le James Webb Space Telescope





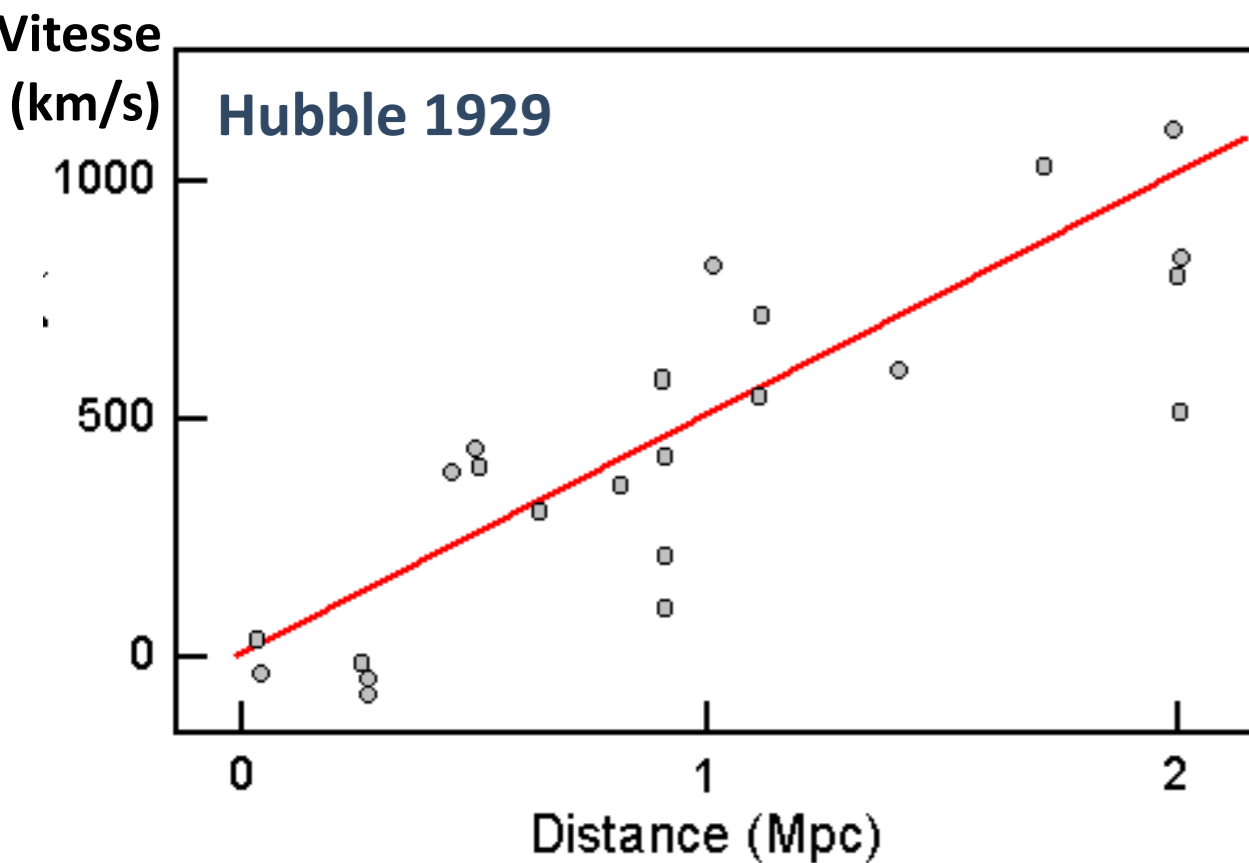
# Le modèle cosmologique concordant

## 1. La Relativité Générale décrit la Gravitation



# Le modèle cosmologique concordant

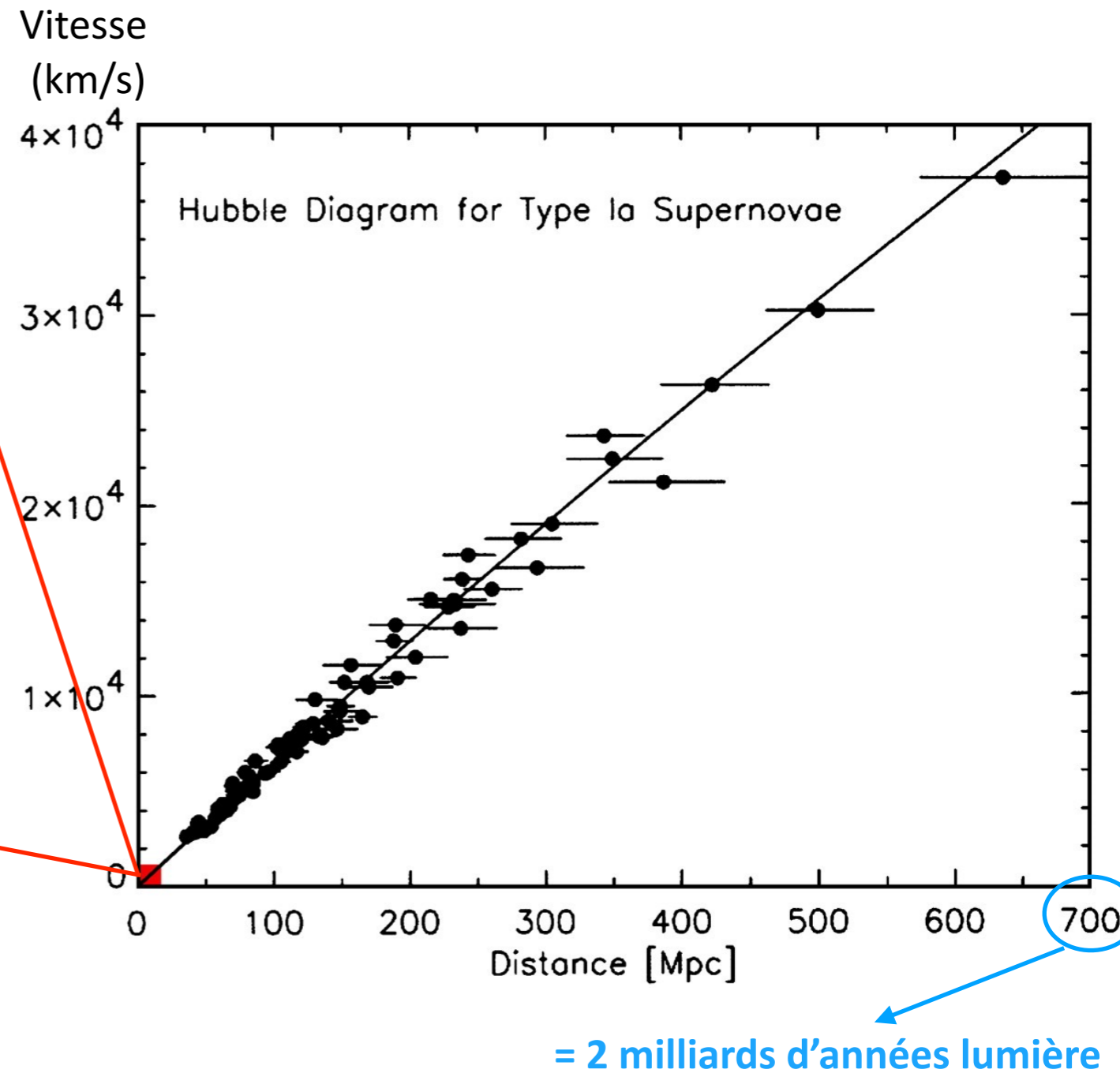
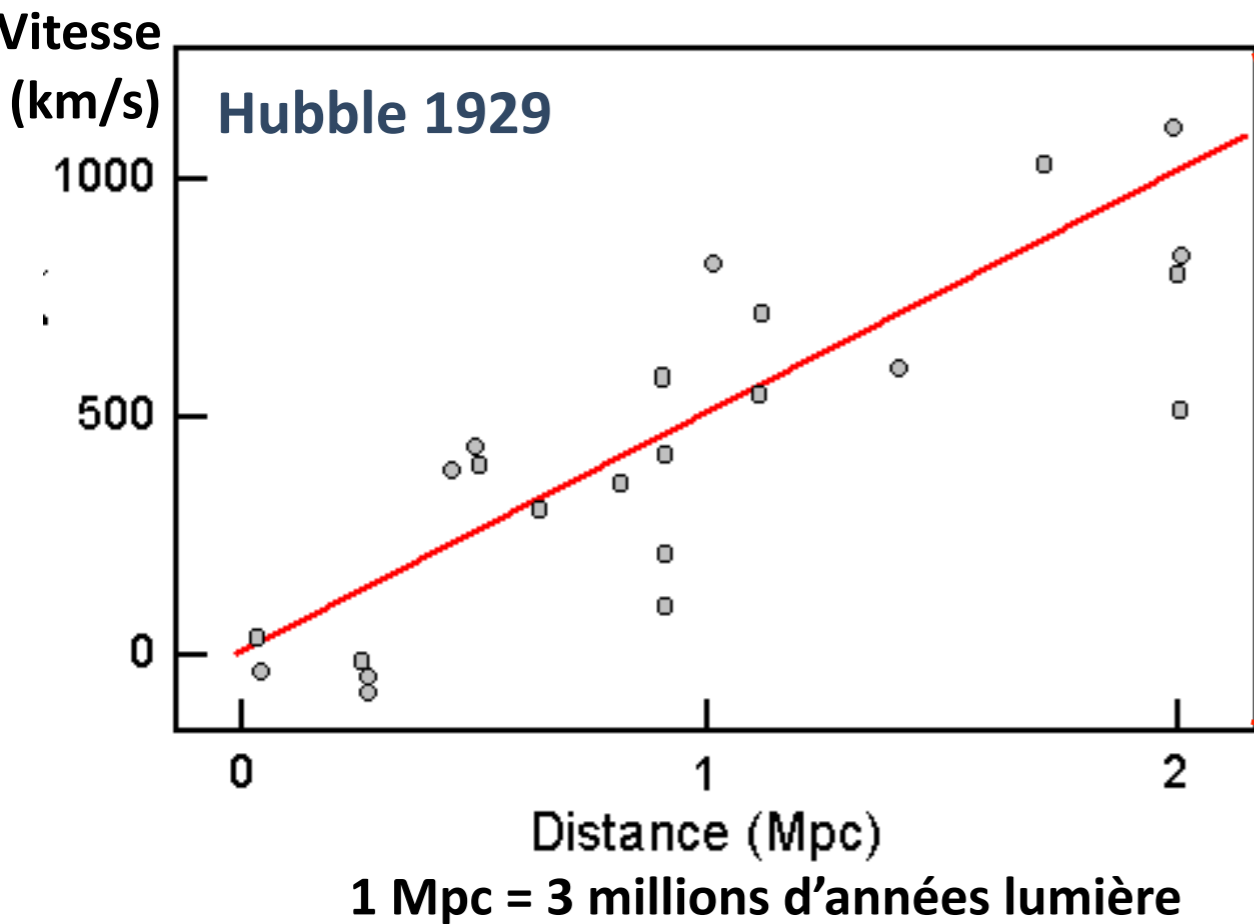
1. La Relativité Générale décrit la Gravitation
2. L'Univers est en expansion!



1 Mpc = 3 millions d'années lumière

# Le modèle cosmologique concordant

1. La Relativité Générale décrit la Gravitation
2. L'Univers est en expansion!



# Le modèle cosmologique concordant

1. La Relativité Générale décrit la Gravitation
2. L'Univers est en expansion!
3. L'expansion cosmique s'accélère → énergie sombre?

# Le modèle cosmologique concordant

1. La Relativité Générale décrit la Gravitation
2. L'Univers est en expansion!
3. L'expansion cosmique s'accélère → énergie sombre?
4. 80% de la matière dans l'Univers est inconnue → matière noire

# Le modèle cosmologique concordant

1. La Relativité Générale décrit la Gravitation
2. L'Univers est en expansion!
3. L'expansion cosmique s'accélère → énergie sombre?
4. 80% de la matière dans l'Univers est inconnue → matière noire

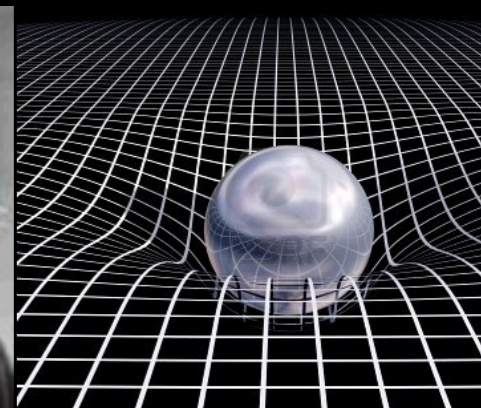
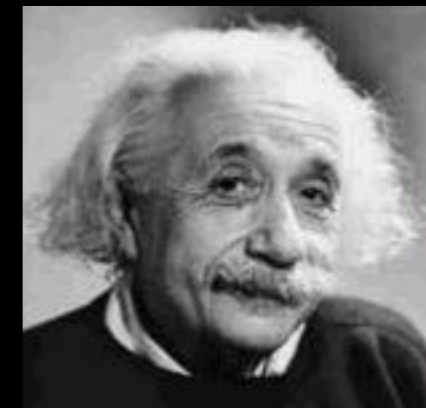
## Contenu de l'Univers

visible matter 5%

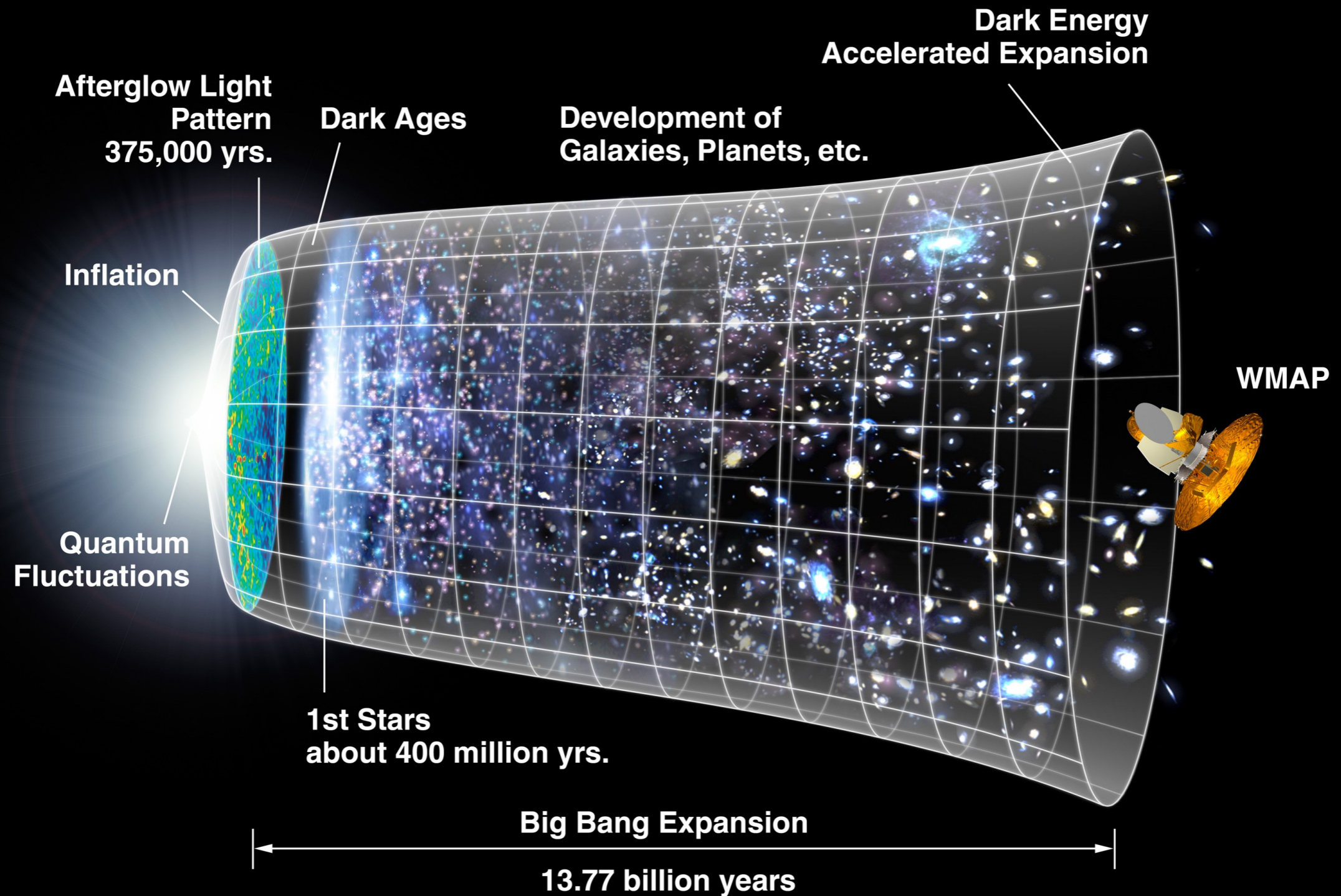
dark matter 27%

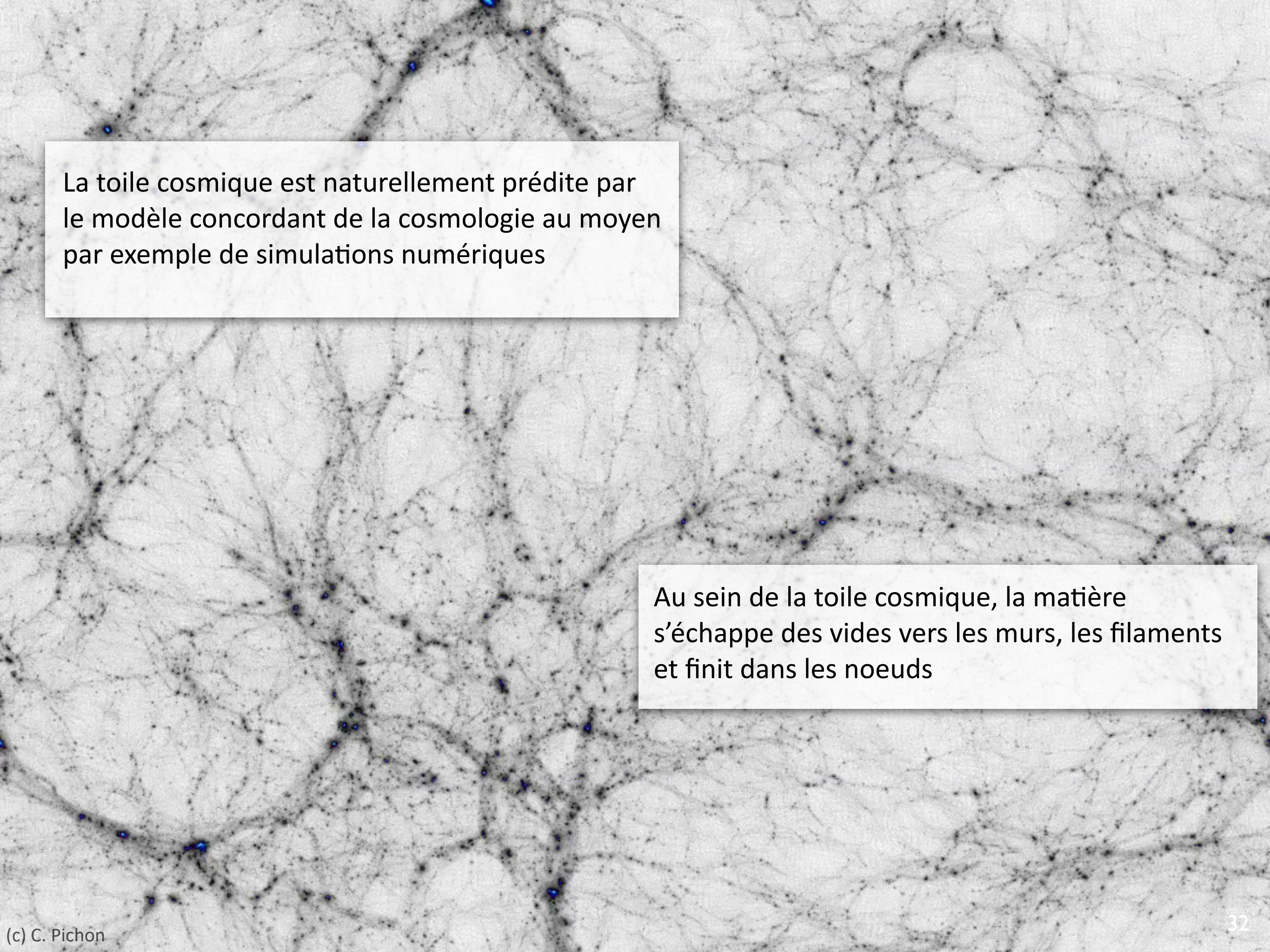
dark energy 68%

+ Relativité  
Générale



# Le modèle cosmologique concordant



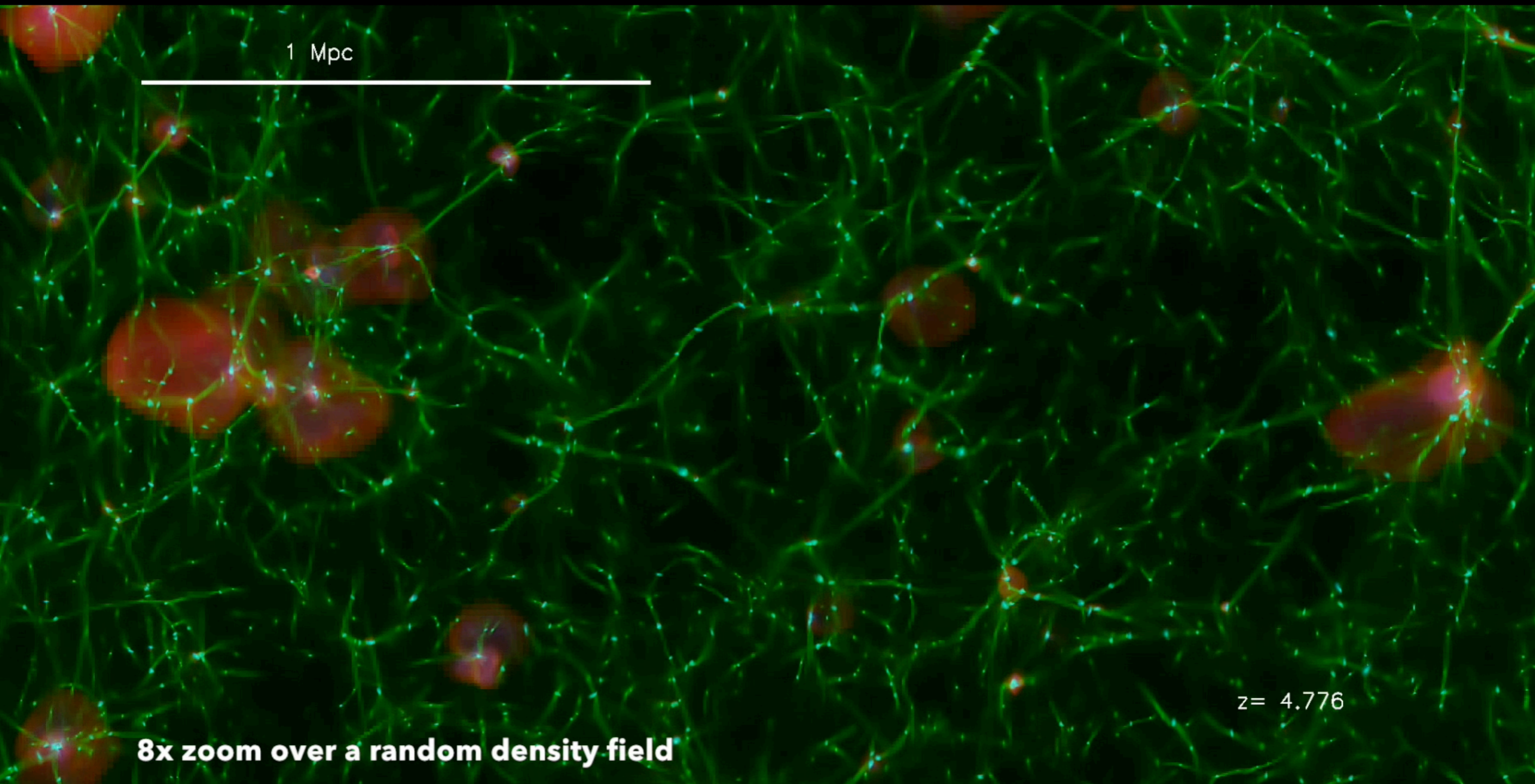
A grayscale simulation of the cosmic web, showing a complex network of dark filaments and nodes against a lighter background. Several nodes are highlighted with small blue dots. The filaments form a web-like structure with large voids between them.

La toile cosmique est naturellement prédite par le modèle concordant de la cosmologie au moyen par exemple de simulations numériques

Au sein de la toile cosmique, la matière s'échappe des vides vers les murs, les filaments et finit dans les noeuds

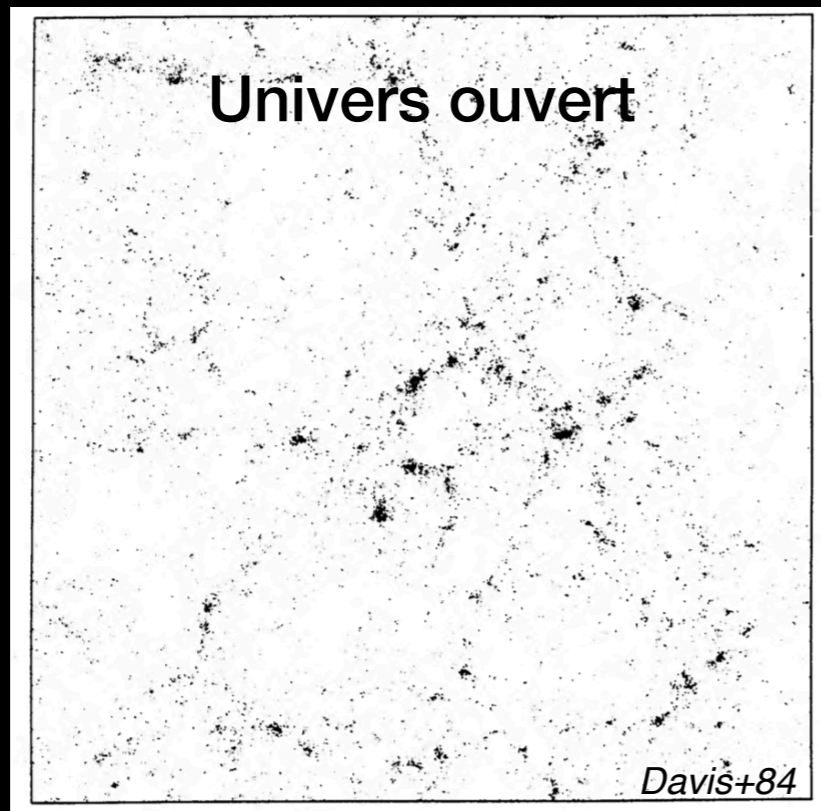
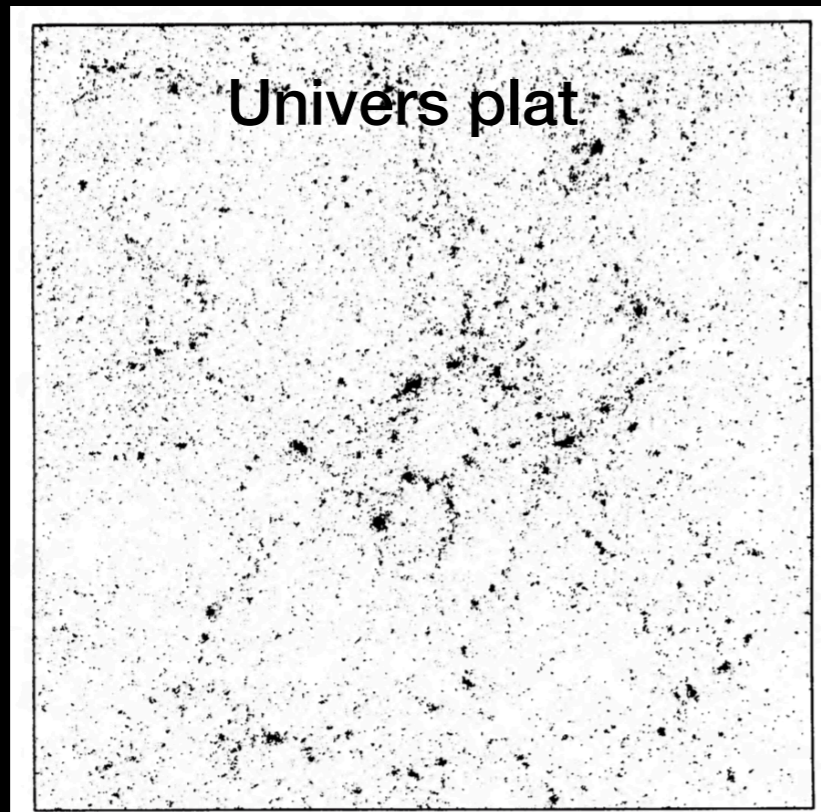


# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique



Simulation Horizon-AGN (Yohan Dubois IAP)... 10 millions d'heures de calcul!

# La toile cosmique comme sonde cosmologique

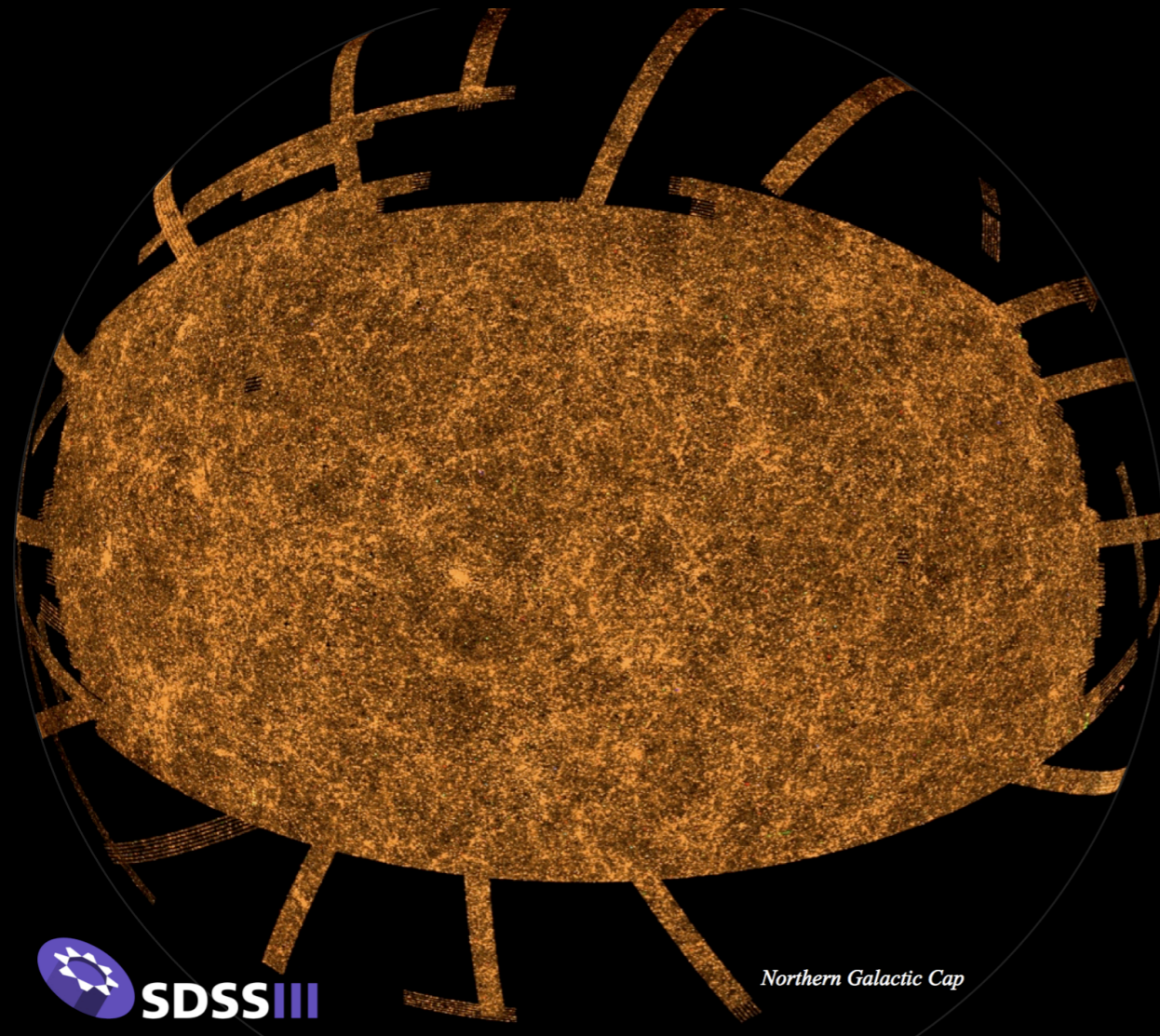


La croissance de la toile cosmique est sensible :

- à des modifications de la gravitation
- aux propriétés de l'énergie sombre
- à la nature de la matière noire

...

# La toile cosmique comme sonde cosmologique

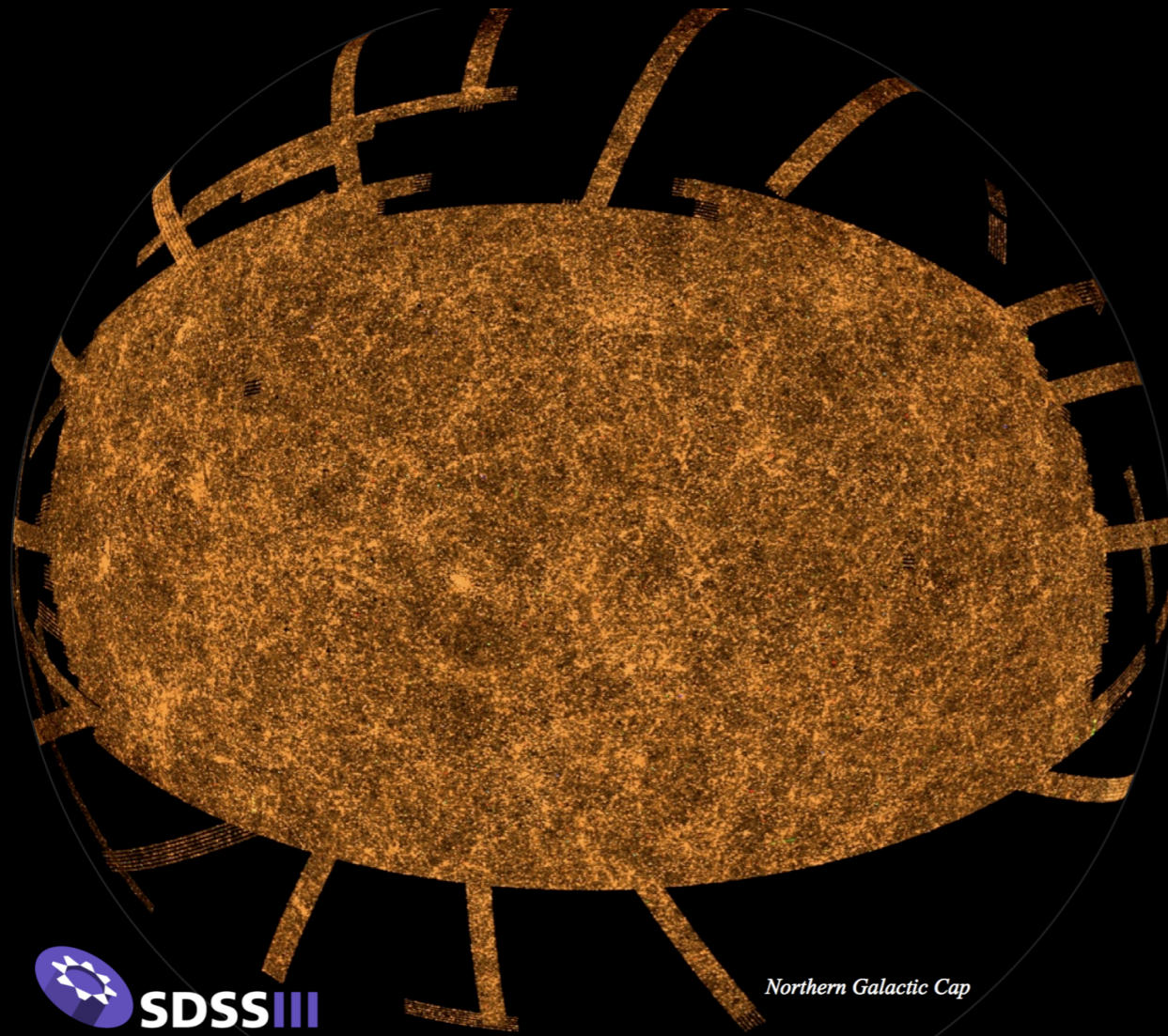


La croissance de la toile cosmique est sensible :

- à des modifications de la gravitation
- aux propriétés de l'énergie sombre
- à la nature de la matière noire

...

# La toile cosmique comme sonde cosmologique

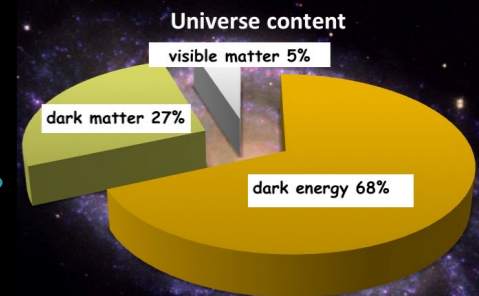
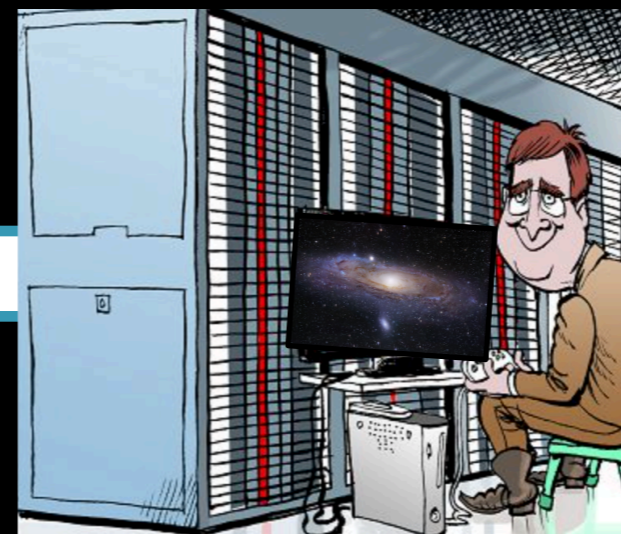
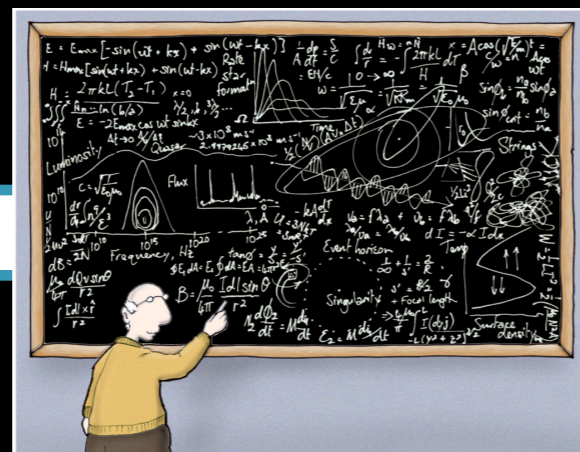
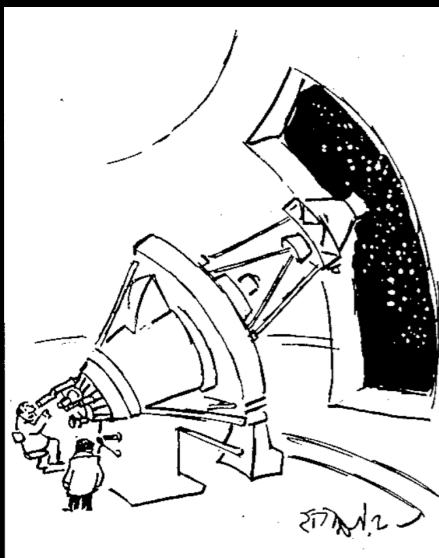


La croissance de la toile cosmique est sensible :

- à des modifications de la gravitation
- aux propriétés de l'énergie sombre
- à la nature de la matière noire

...

On construit donc des instruments toujours plus puissants pour la cartographier finement et en apprendre ainsi davantage sur l'Univers.

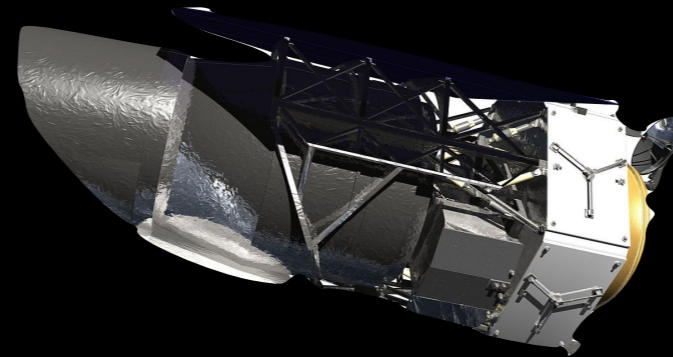


# La toile cosmique comme sonde cosmologique

**Euclid (ESA)**  
lancement 2023



**WFIRST (NASA)**  
lancement ~2025



La croissance de la toile cosmique est sensible :

- à des modifications de la gravitation
- aux propriétés de l'énergie sombre
- à la nature de la matière noire

...

On construit donc des instruments toujours plus puissants pour la cartographier finement et en apprendre ainsi davantage sur l'Univers.

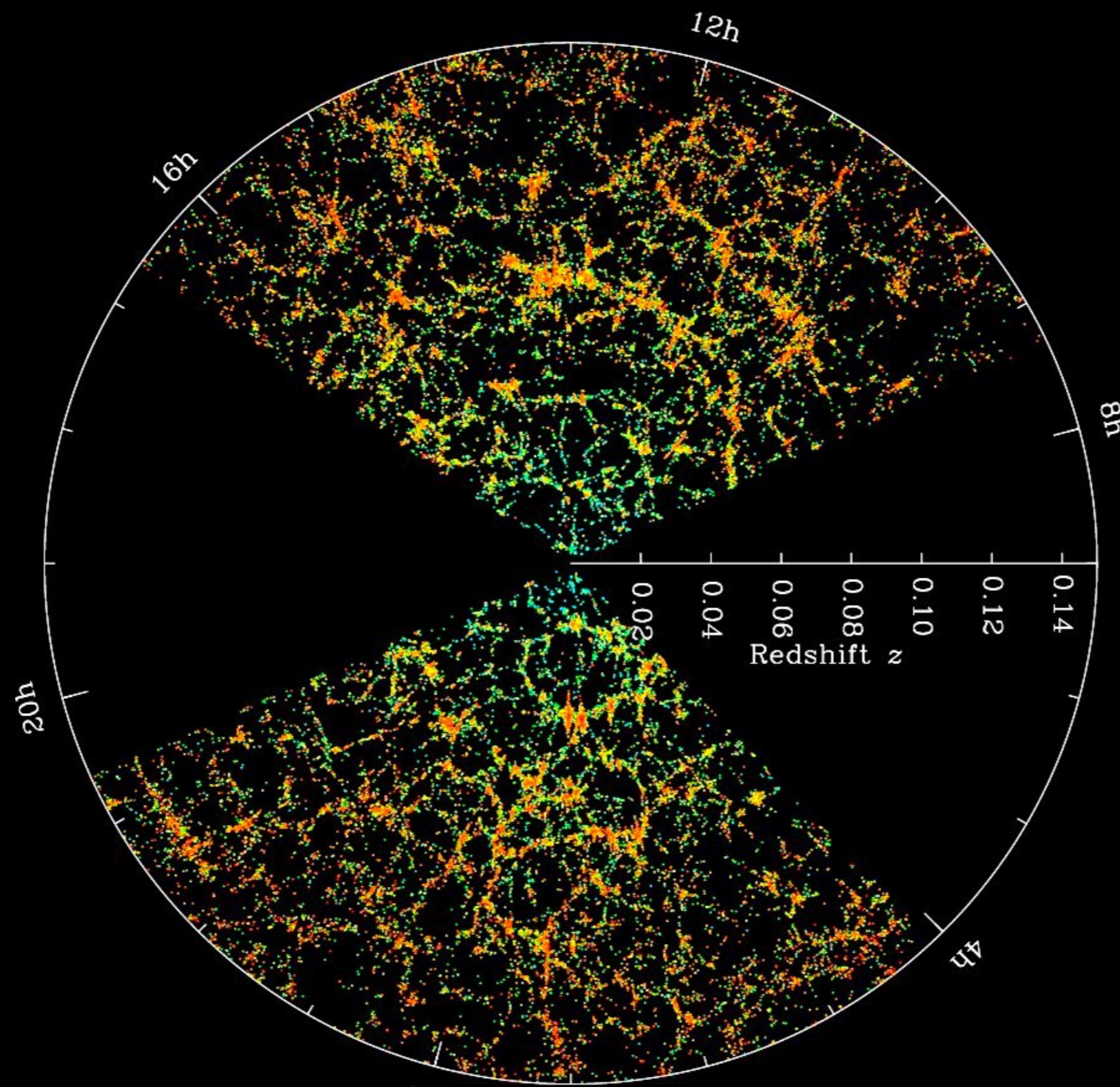
**Observatoire LSST/Vera Rubin (US)**  
1ère lumière 2021



# La toile cosmique comme sonde cosmologique

Deux sondes principales seront utilisées:

- 1) une cartographie tridimensionnelle de la toile cosmique en mesurant la *position des galaxies* (2 coordonnées sur le ciel + le décalage vers le rouge obtenu par spectroscopie)

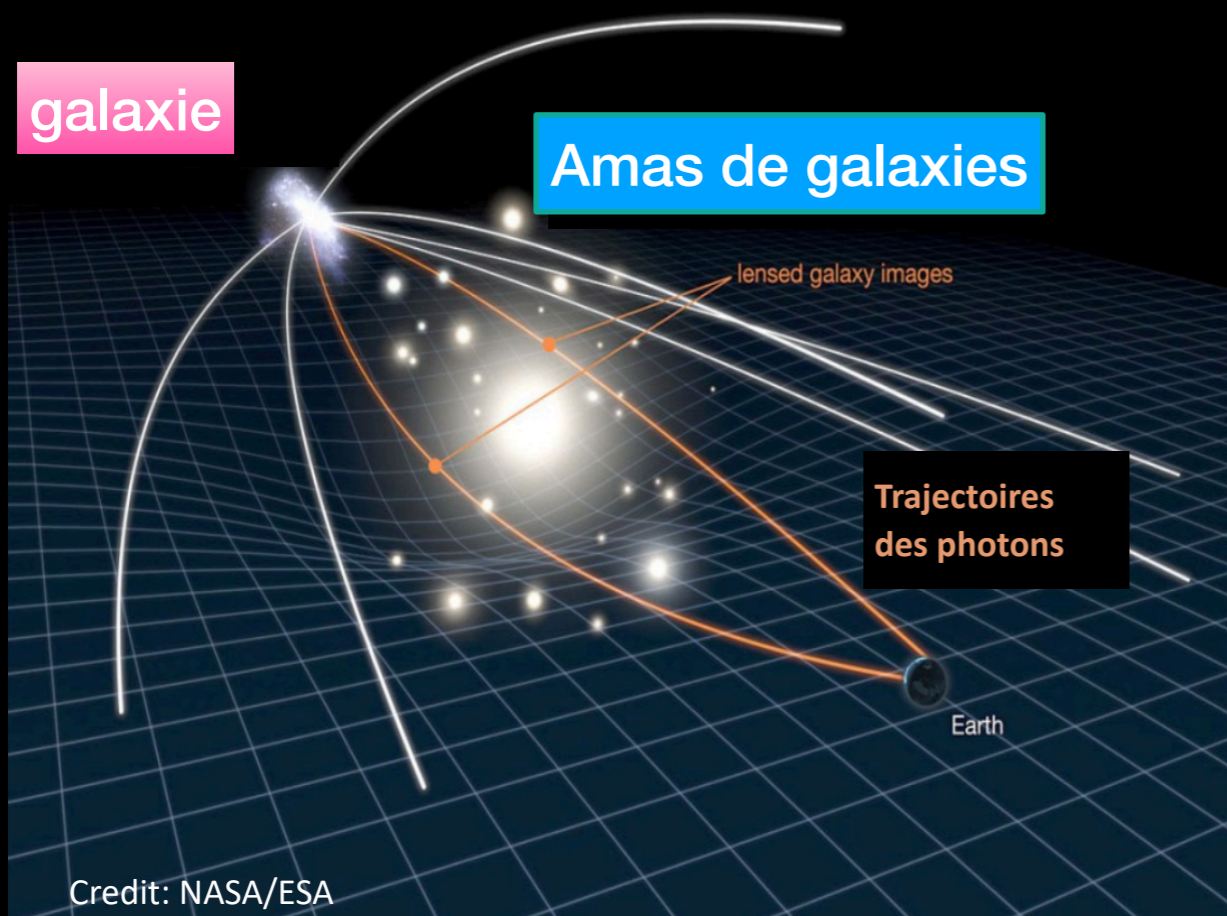


# La toile cosmique comme sonde cosmologique

Deux sondes principales seront utilisées:

- 1) une cartographie tridimensionnelle de la toile cosmique en mesurant la **position des galaxies** (2 coordonnées sur le ciel + le décalage vers le rouge obtenu par spectroscopie)
- 2) l'optique gravitationnelle (l'Univers est une loupe!), en mesurant les **formes des galaxies** (imagerie)

effet de lentille gravitationnelle



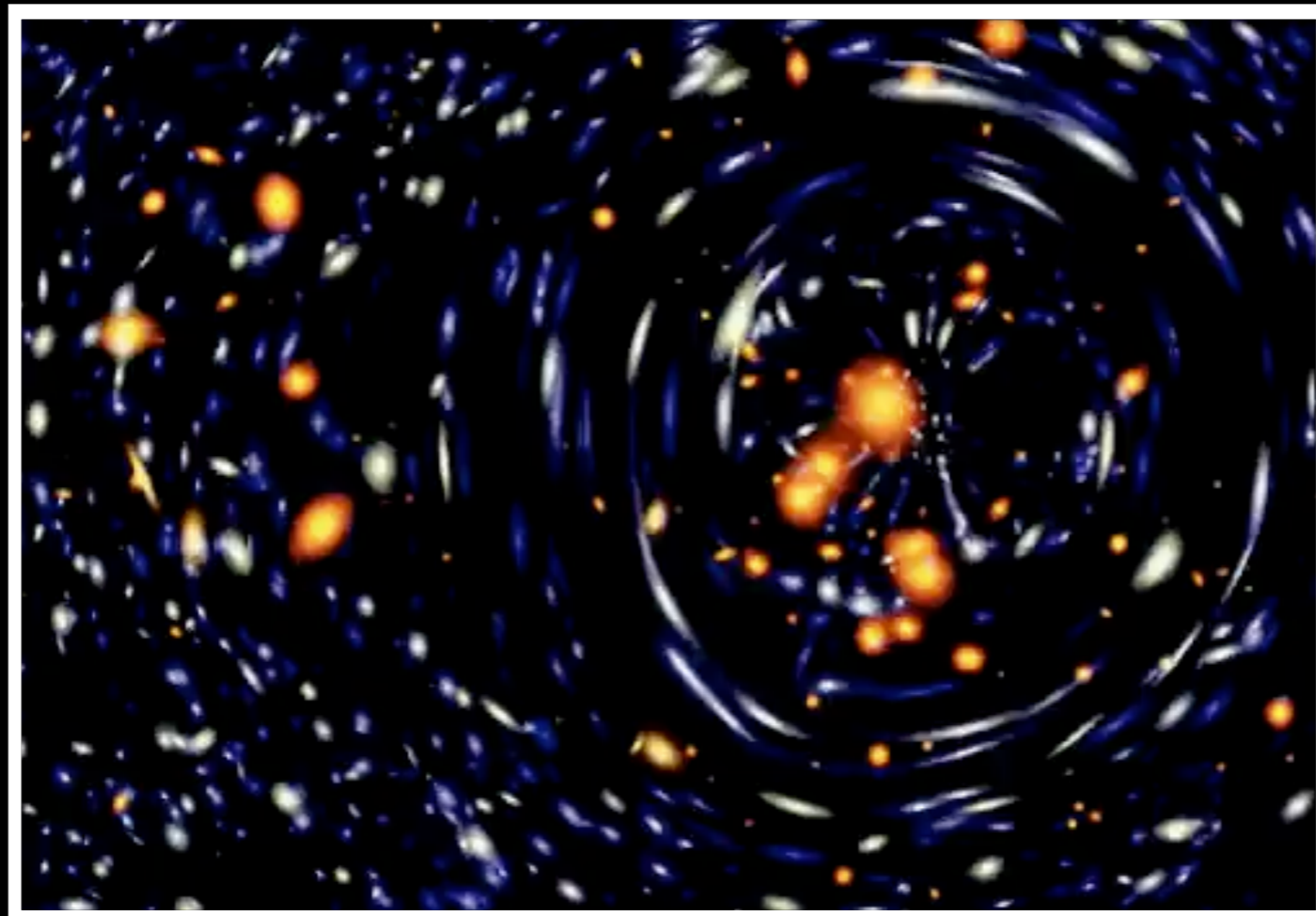
effet de lentille optique



# La toile cosmique comme sonde cosmologique

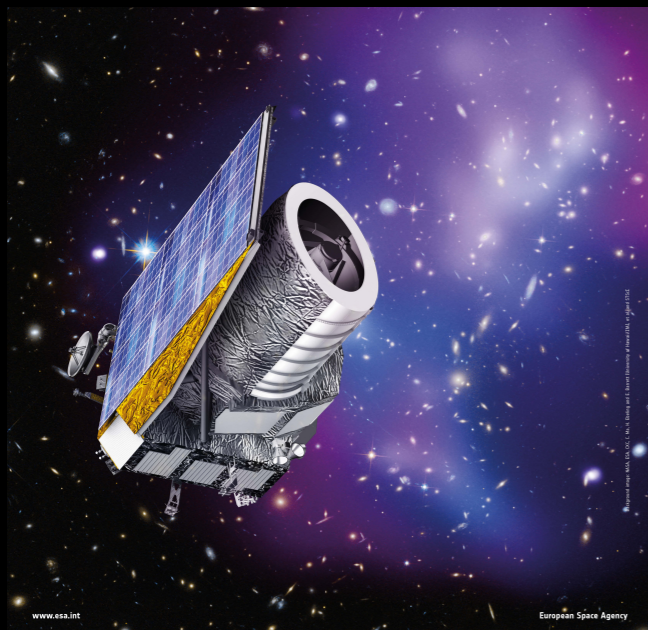
Deux sondes principales seront utilisées:

- 1) une cartographie tridimensionnelle de la toile cosmique en mesurant la **position des galaxies** (2 coordonnées sur le ciel + le décalage vers le rouge obtenu par spectroscopie)
- 2) l'optique gravitationnelle (l'Univers est une loupe!), en mesurant les **formes des galaxies** (imagerie)





# Euclid, une mission spatiale européenne en quête de la matière noire et l'énergie sombre



15 pays, 1500 personnes;  
Lancement prévu: 2023 depuis Kourou;  
6 ans de mission autour du point L2.

Une couverture du ciel de 15000 deg<sup>2</sup> (1/3);  
Qq milliards de galaxies sur les 10 derniers milliards d'années.

2 instruments:

- un photomètre visible le VIS (600 millions de pixels);
- un spectro-photomètre infrarouge, le NISP (avec 60 millions de pixels, la plus grande caméra infrarouge jamais lancée dans l'espace).

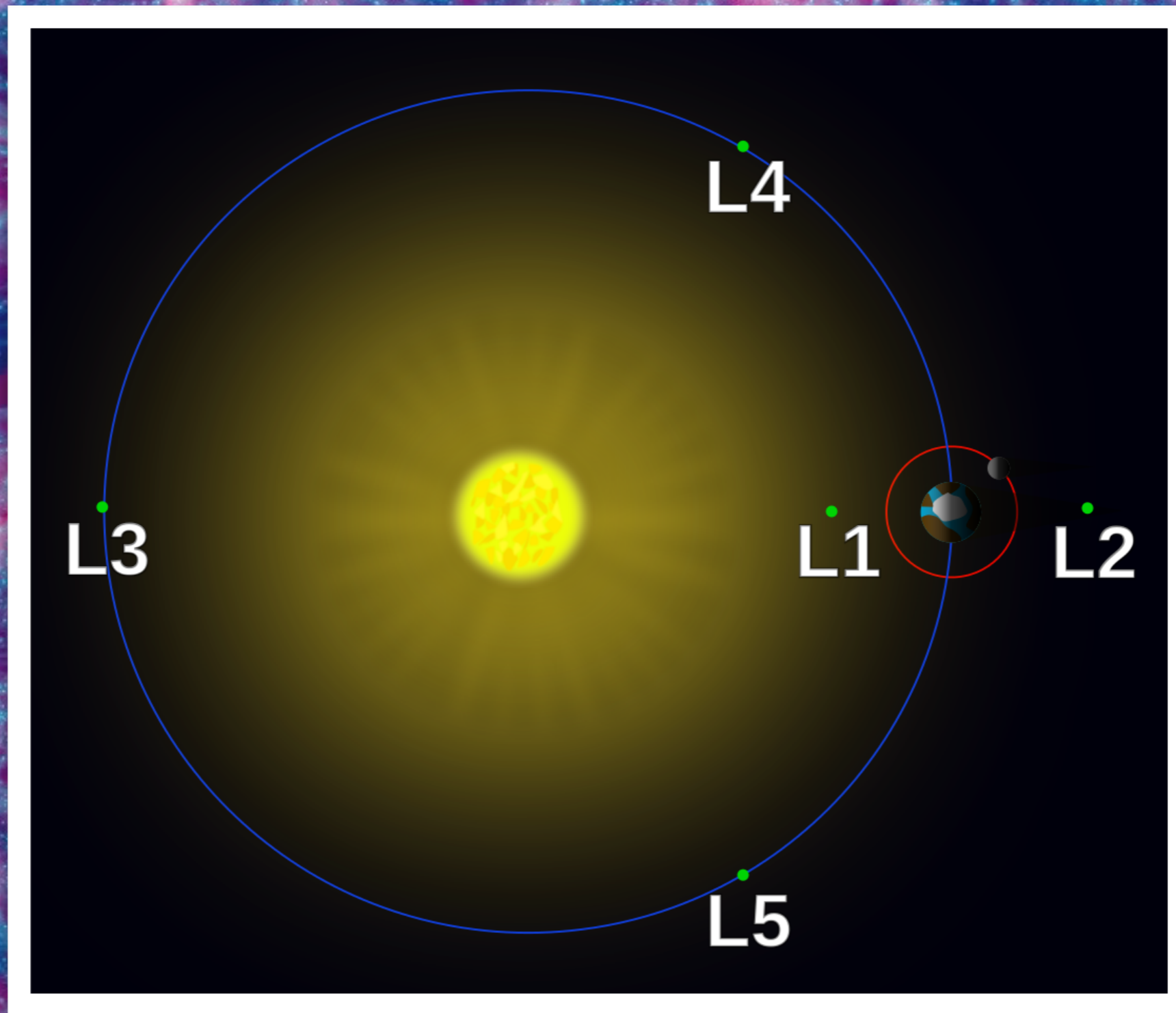
Des milliers de calculateurs pour traiter 170 Po de données.



Euclid-France

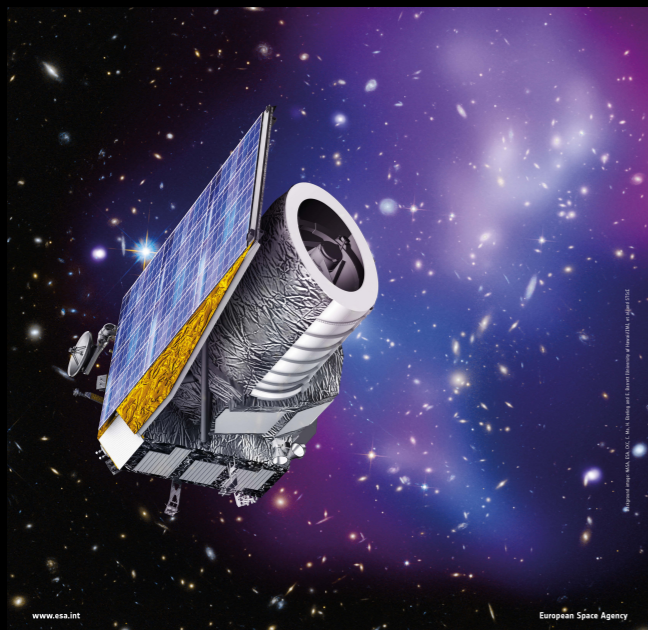


# L2



horizon-AGN

# Euclid, une mission spatiale européenne en quête de la matière noire et l'énergie sombre



15 pays, 1500 personnes;  
Lancement prévu: 2023 depuis Kourou;  
6 ans de mission autour du point L2.

Une couverture du ciel de 15000 deg<sup>2</sup> (1/3);  
Qq milliards de galaxies sur les 10 derniers milliards d'années.

2 instruments:

- un photomètre visible le VIS (600 millions de pixels);
- un spectro-photomètre infrarouge, le NISP (avec 60 millions de pixels, la plus grande caméra infrarouge jamais lancée dans l'espace).

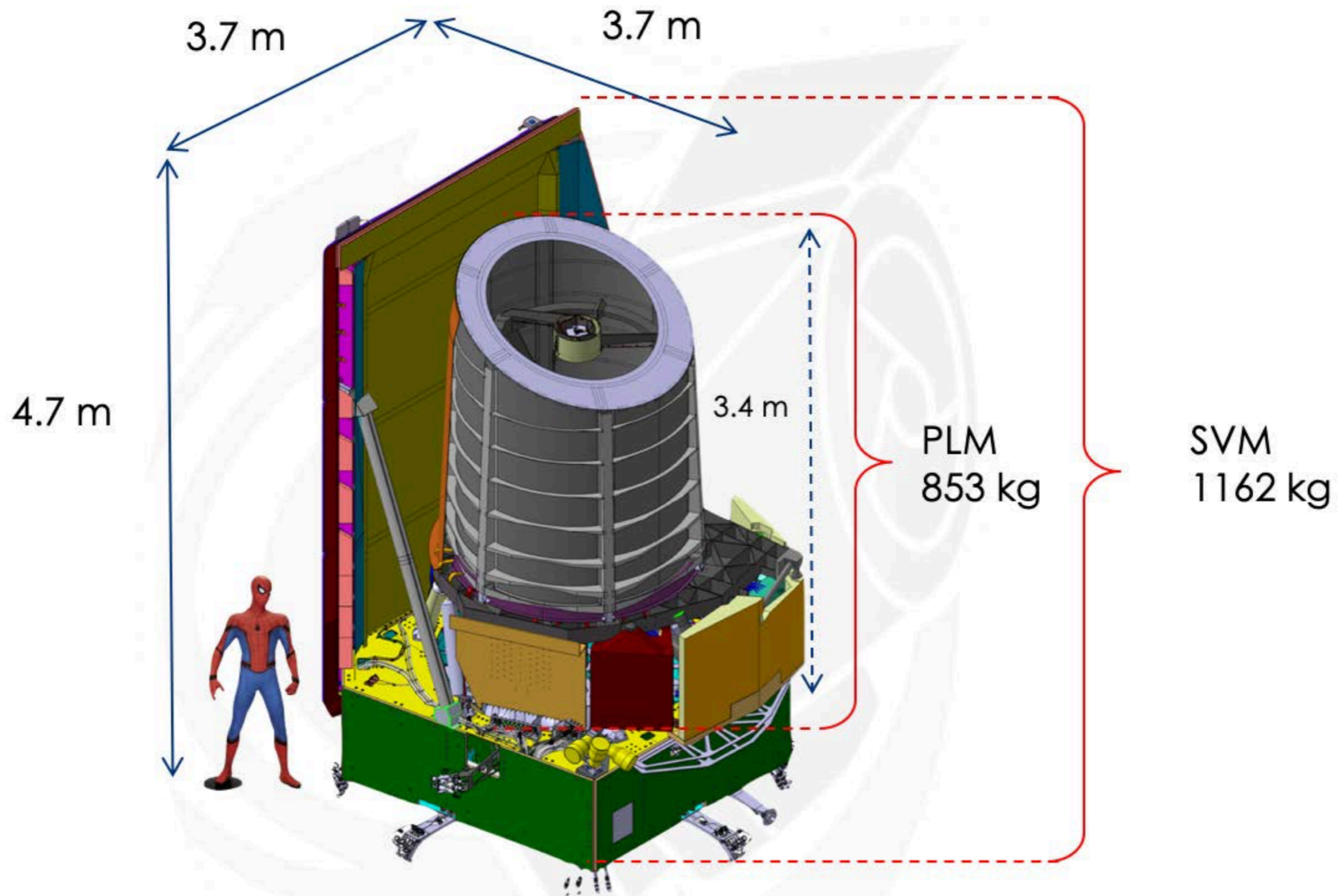
Des milliers de calculateurs pour traiter 170 Po de données.



**Euclid-France**

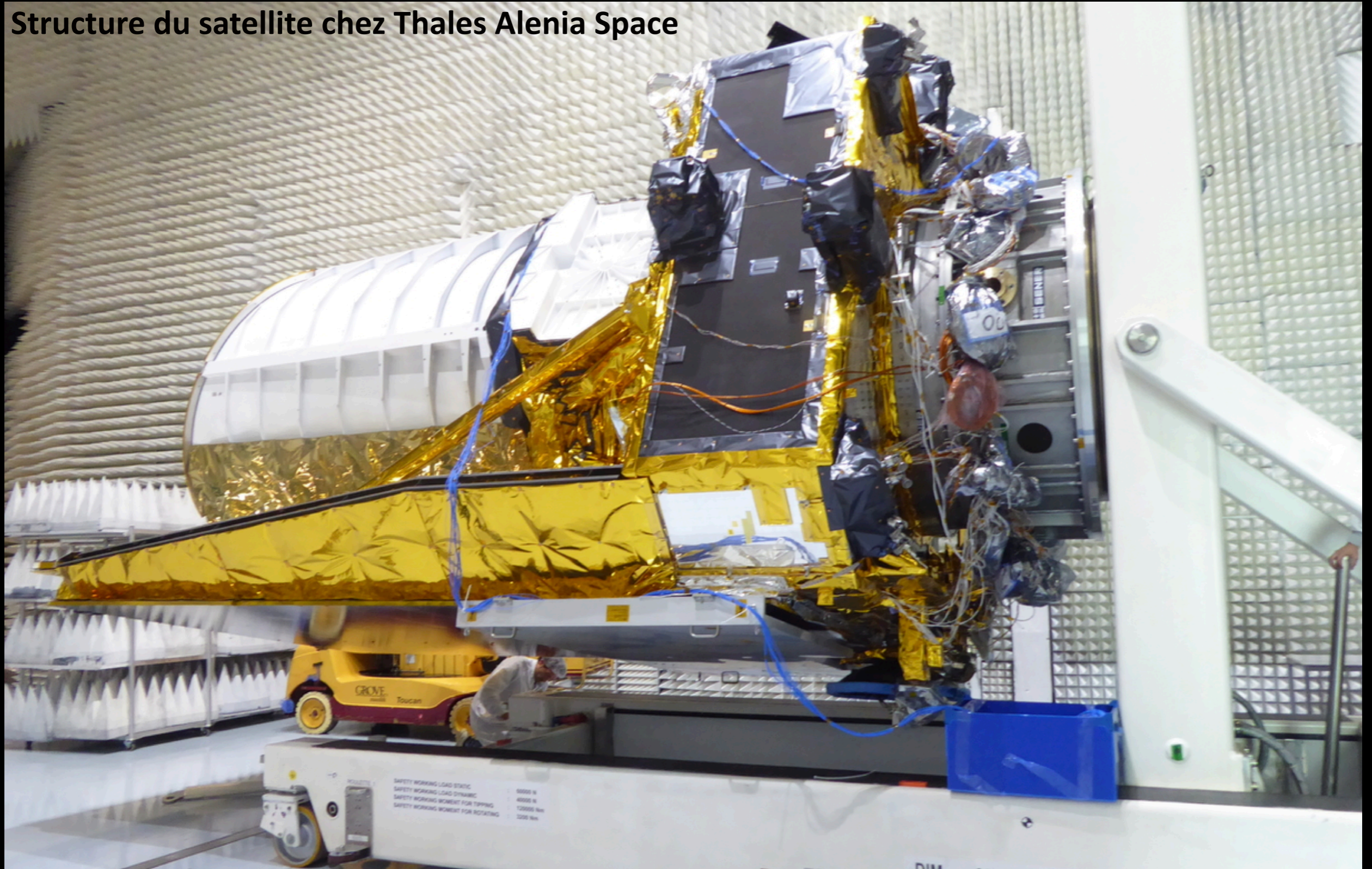


# Euclid, une mission spatiale européenne en quête de la matière noire et l'énergie sombre

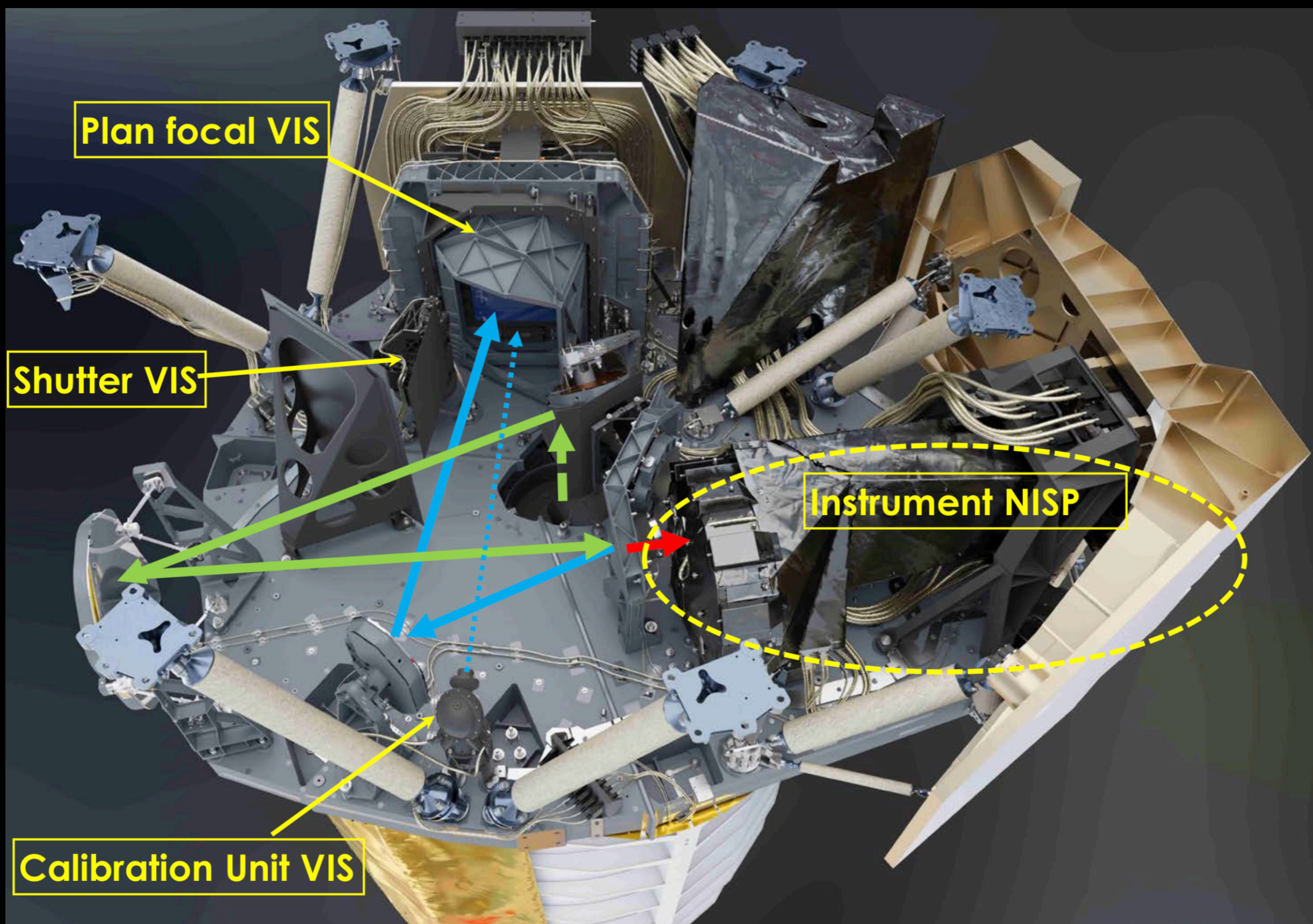


# Euclid, une mission spatiale européenne en quête de la matière noire et l'énergie sombre

Structure du satellite chez Thales Alenia Space



# Euclid, une mission spatiale européenne en quête de la matière noire et l'énergie sombre



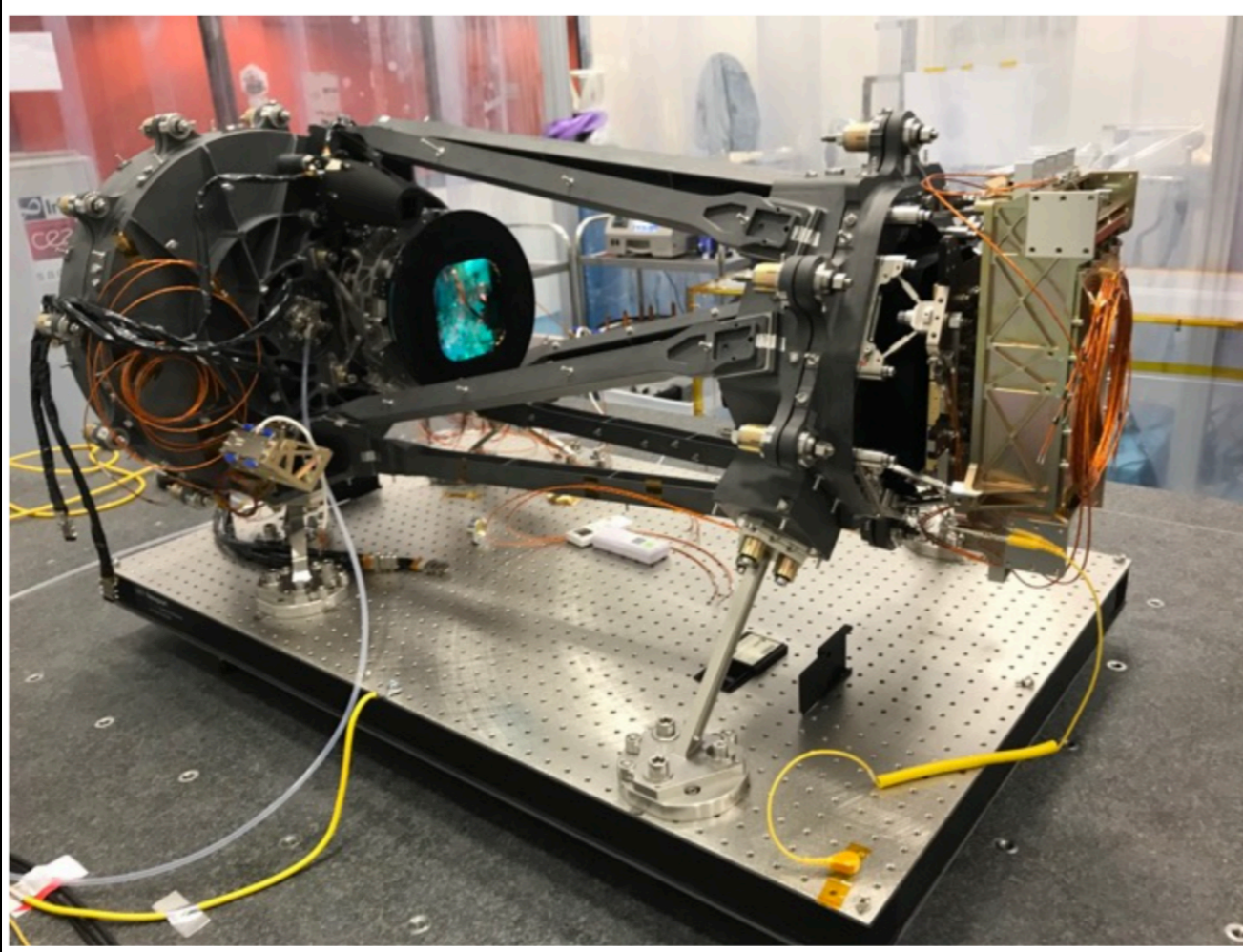
# Euclid, une mission spatiale européenne en quête de la matière noire et l'énergie sombre

VIS



# Euclid, une mission spatiale européenne en quête de la matière noire et l'énergie sombre

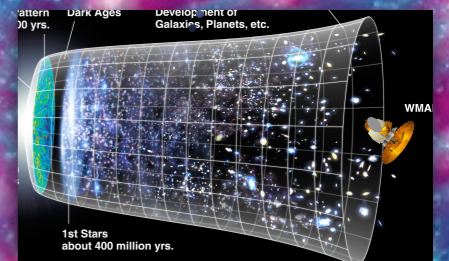
NISP





# Conclusion

- ▶ Les galaxies sont distribuées le long de la toile cosmique (prédite par le modèle concordant de la cosmologie).
- ▶ Les galaxies naissent et évoluent au sein de ce grand ballet cosmique, ce qui laisse une empreinte sur leur masse, leur morphologie et leur orientation.
- ▶ La toile cosmique est et sera une sonde cosmologique majeure avec l'arrivée de projets comme Euclid.



**Merci de votre attention !**