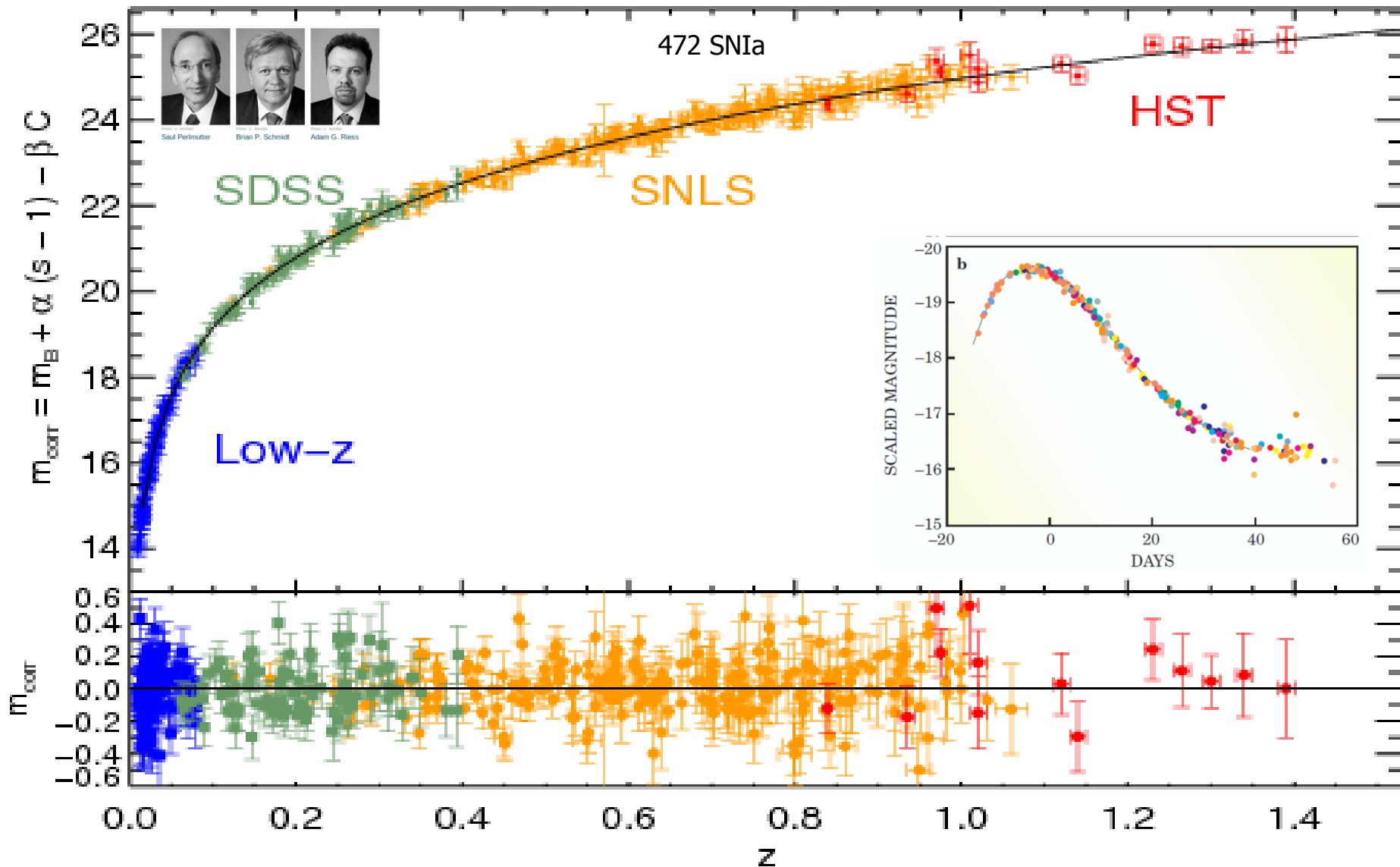




# Euclid à la recherche de l'énergie sombre

Y. Mellier  
Institut d'Astrophysique de Paris

# L'expansion de l'univers s'accélère: confirmé avec un degré de confiance de 99.999%



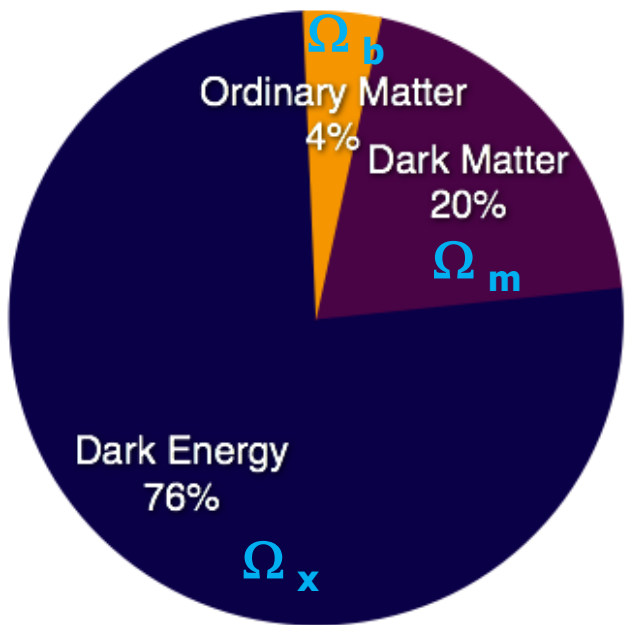
# Pourquoi l'expansion s'accélère?

Comment l'observation de l'Univers  
peut nous aider à trouver une réponse?

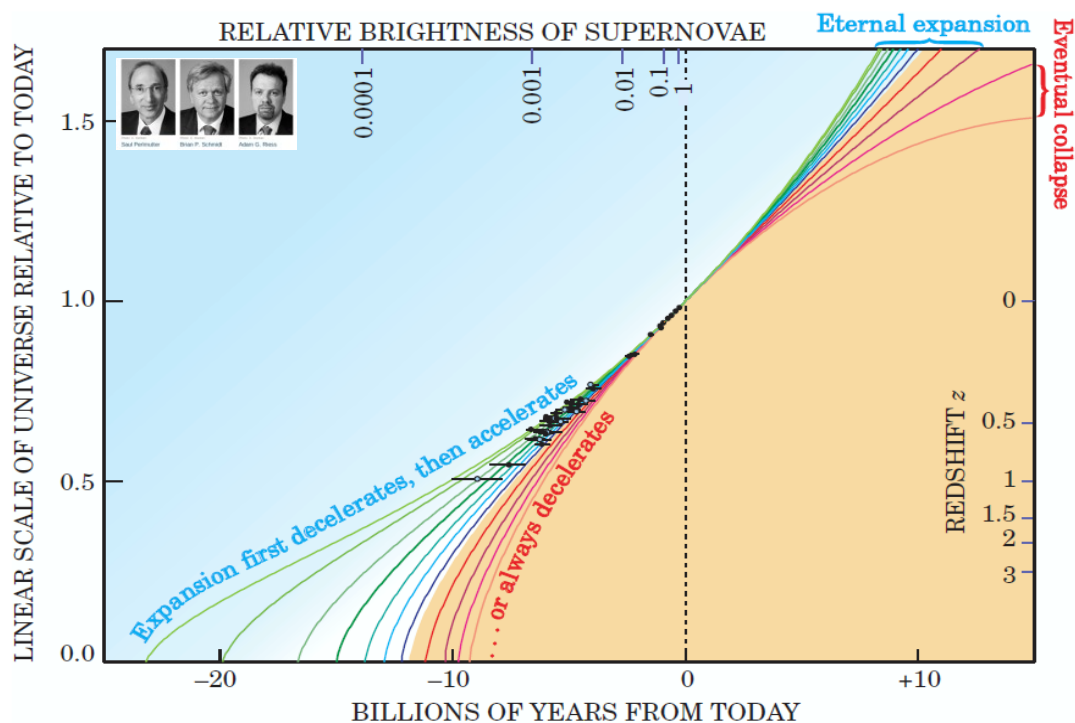
# Pourquoi l'expansion s'accélère?

Accélération → *quelque chose* d'inconnu en est la cause... :

Ce *quelque chose* = 70% du contenu en matière-énergie de l'Univers!



Cette composante est dominante vis-à-vis des autres de l'Univers. Mais cette domination est très récente!



# Pourquoi l'expansion s'accélère?

Une des plus grandes énigmes de la physique actuelle

## Hypothèses:

1. Une nouvelle substance/interaction de nature inconnue, « l'énergie sombre », s'oppose à la gravitation aux très grandes échelles de l'Univers?... Elle agit comme une pression négative.
2. Les lois de la gravitation, telles qu'elles sont formulées dans la théorie d'Einstein, ne sont plus valides aux très grandes échelles de l'Univers?
3. Le principe cosmologique est remis en cause?

# Energie sombre, gravitation, autre?

## Comment déterminer la bonne hypothèse?

Les effets de l'énergie sombre et de la gravitation peuvent être séparés en mesurant leurs effets:

- sur l'histoire de l'expansion de l'Univers;
- sur l'histoire de la formation des structures de matière (noire) dans l'Univers;

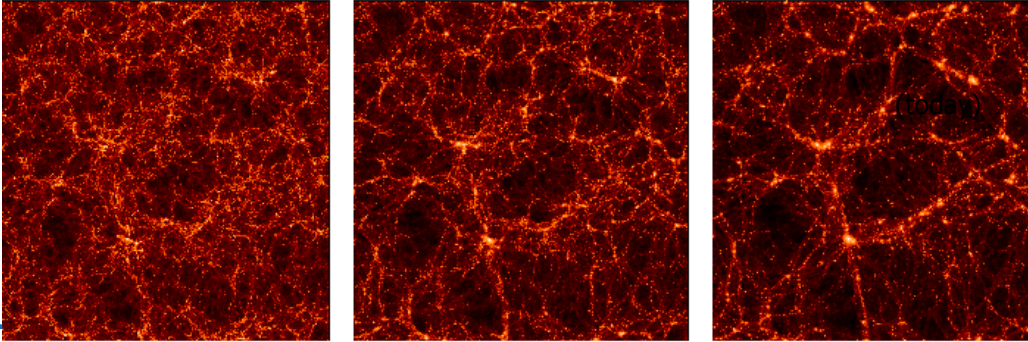
# Les effets de l'énergie sombre simulés

Il y a 10  
milliards  
d'années



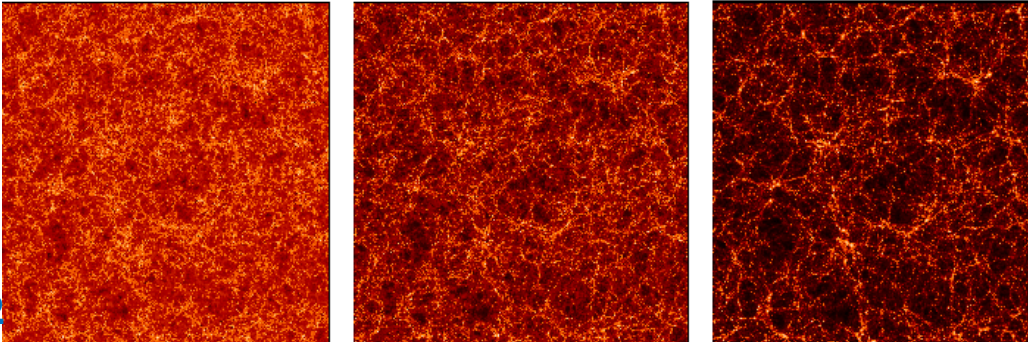
Aujourd'hui

Univers 1



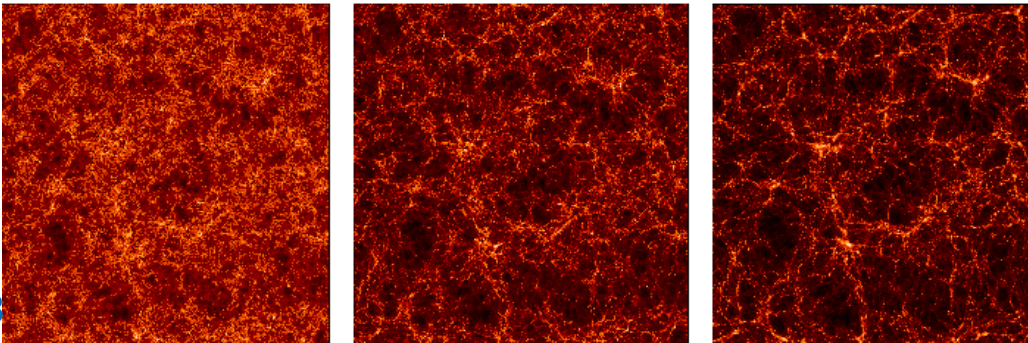
Univers avec  
énergie sombre

Univers 2



3 cosmologies  
différentes,

Univers 3



3 histoires  
cosmiques  
différentes

# Energie sombre ou gravitation, comment savoir quelle est la bonne hypothèse?

Les effets de l'énergie sombre et de la gravitation peuvent être séparés en mesurant leurs effets:

- sur l'histoire de l'expansion de l'Univers;
- sur l'histoire de la formation des structures de matière (noire) dans l'Univers;
- On peut prédire ces effets,
- on sait comment les observer et comment mesurer les différences...
- Mais les effets sont infimes... expériences complexes, ultra-précises, qui observent tout le ciel



# Caractériser les propriétés de l'énergie sombre

On suppose que l'énergie sombre se comporte comme les autres composantes de l'Univers (matière, photons, neutrinos)

→ relation entre sa pression,  $P$ , et sa densité,  $\rho$ , l'« équation d'état » d'un fluide parfait = relation entre sa pression et sa densité:  $w = P/\rho$  :

- pour les photons:  $w = 1/3$
- Pour la matière noire ou ordinaire:  $w = 0$
- pour une constante cosmologique  $w = -1$

→ A chaque modèle théorique avec  $w < -1/3$  correspond une énergie sombre différente capable d'accélérer l'expansion de l'Univers.

→ Mais  $w$  peut dépendre du temps:  $w = w_p + w_a(t)$

# Que savons nous aujourd'hui, en 2012?

Si  $w_X = P/\rho = \text{cte}$

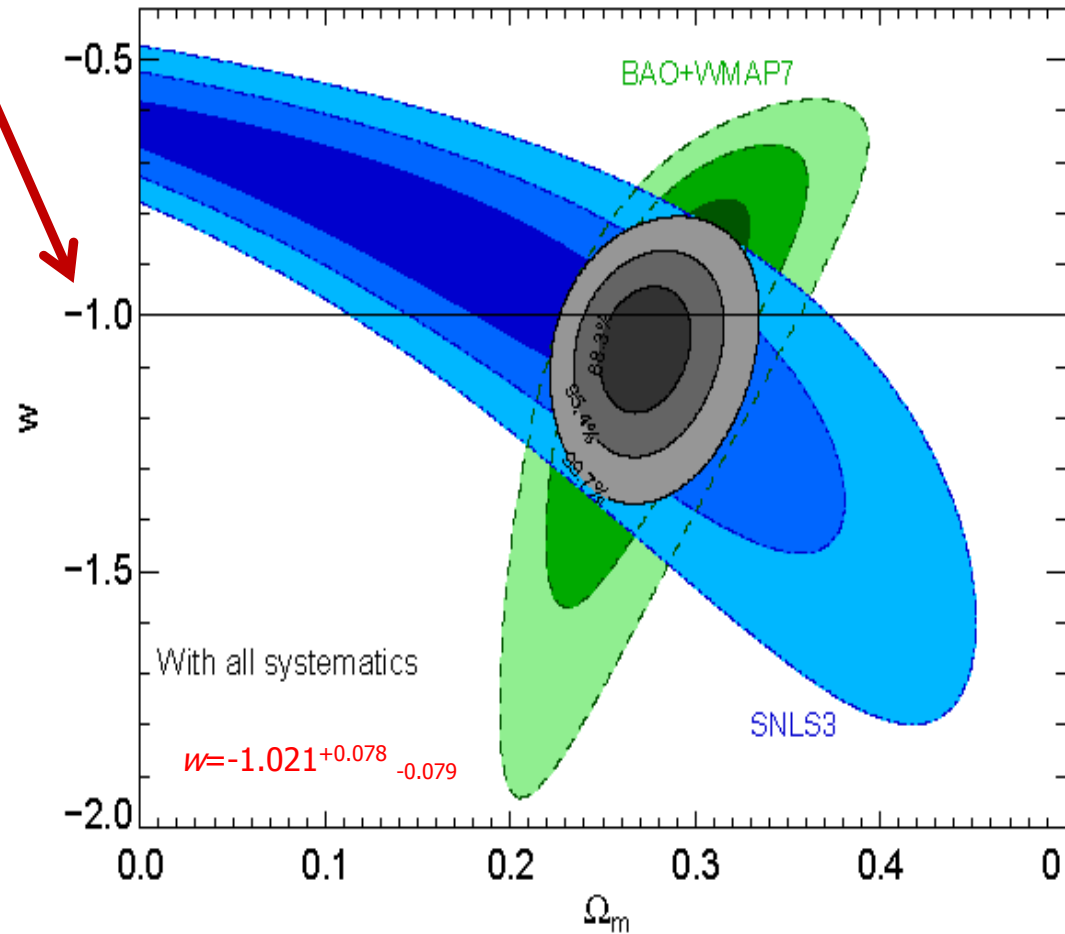
→  $w_X$  compatible avec -1

- ou bien  $w$  est constant et très très proche de -1

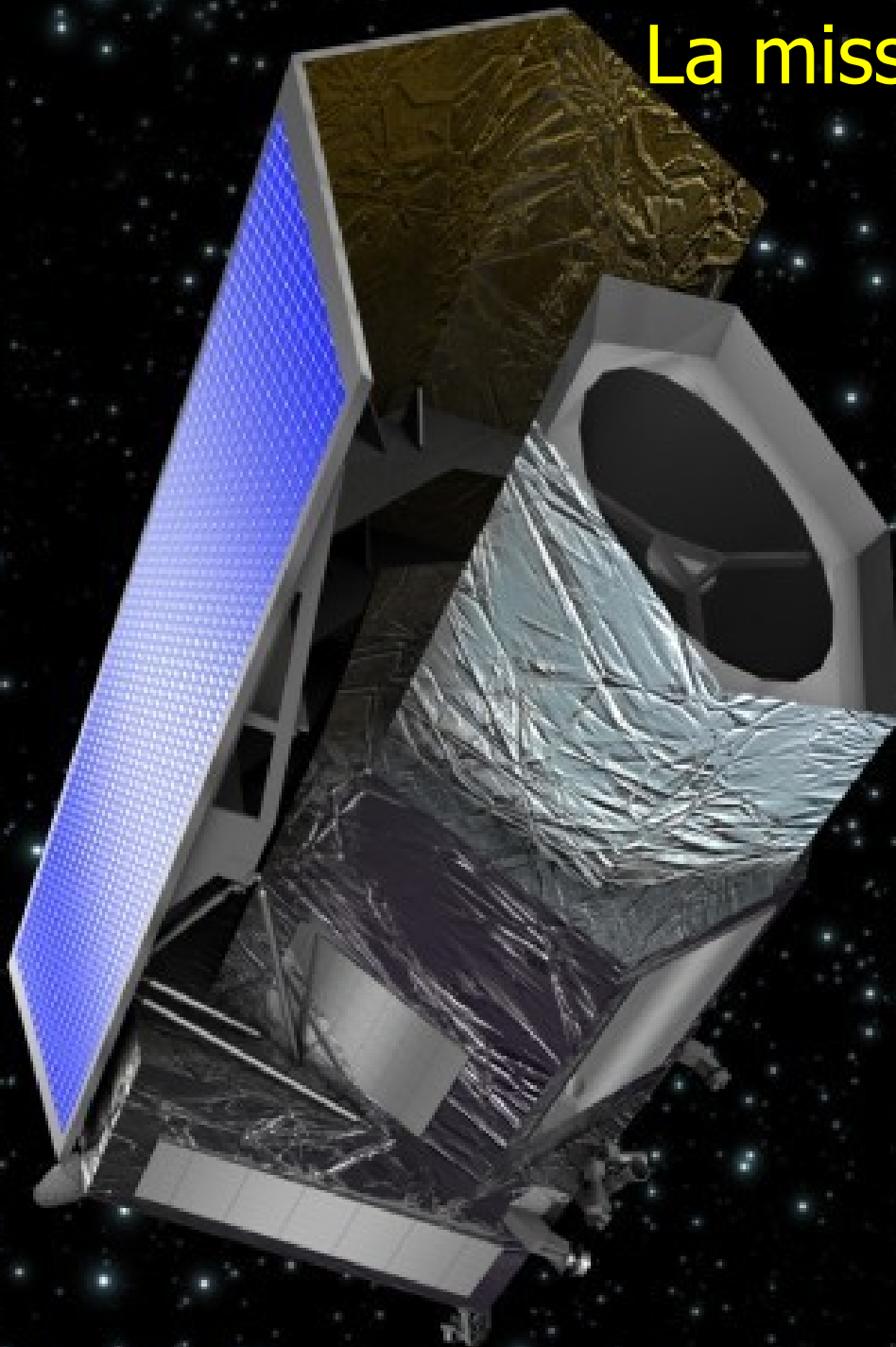
→ la source de l'accélération de l'Univers est la Constante Cosmologique qui fut initialement introduite par Einstein. Mais qu'elle est son origine?

- ou alors  $w$  dépend du temps?...

→ seule une expérience ultra-précise comme Euclid pourra le voir... et son origine est tout aussi énigmatique pour les physiciens.



# La mission spatiale Euclid



# Comment caractériser les propriétés de l'énergie sombre et interpréter les données d'Euclid?

« Mais  $w$  peut dépendre du temps:  $w = w_p + w_a(t)$  »

→ **But d'Euclid**: mesurer  $w_p$  et  $w_a$ , avec une précision:

- $w_p \sim 10$  fois meilleure qu'aujourd'hui  
→ atteindre mieux que 1%,
- $w_a \sim 40$  fois meilleure qu'aujourd'hui  
→ atteindre mieux que 5%

# La mission spatiale Euclid

Objectifs: Mesurer les effets infimes pour différencier ceux de l'énergie sombre et ceux de la gravitation sur

- l'histoire de l'expansion,
- l'histoire de la formation des structures,

En observant **l'évolution de la structuration** de

- la matière noire
- des galaxies

depuis aujourd'hui, jusqu'à la **période de transition** où la matière noire dominait l'énergie sombre

# La mission spatiale Euclid

Objectifs: Mesurer les effets infimes

... et construire une expérience qui permette d'apporter une réponse **décisive**

→ Il faut une expérience dédiée, conçue spécifiquement pour atteindre cet objectif.

# La mission spatiale Euclid

Observer des centaines de millions de galaxies

Construire des instruments de haute précision

Objectifs: Mesurer les effets infimes

de l'énergie sombre et de la gravitation sur

l'histoire de l'expansion,

Couper l'Univers par tranche de temps (-> décalage spectral)

l'histoire de la formation des structures,

en observant l'évolution de la distribution et la structuration tridimensionnelle à grande échelle de

la matière noire

Observer l'Univers entre  $z=0$  et  $z=3$  ( $t=13.5$ =aujourd'hui et  $t=2$  milliards d'années)

Observer d'immenses parties du ciel

des galaxies

depuis aujourd'hui, jusqu'à la période de transition ou la matière noire dominait l'énergie sombre

Voir la matière noire: effets de lentille gravitationnelle

Spectroscopie = distance des galaxies

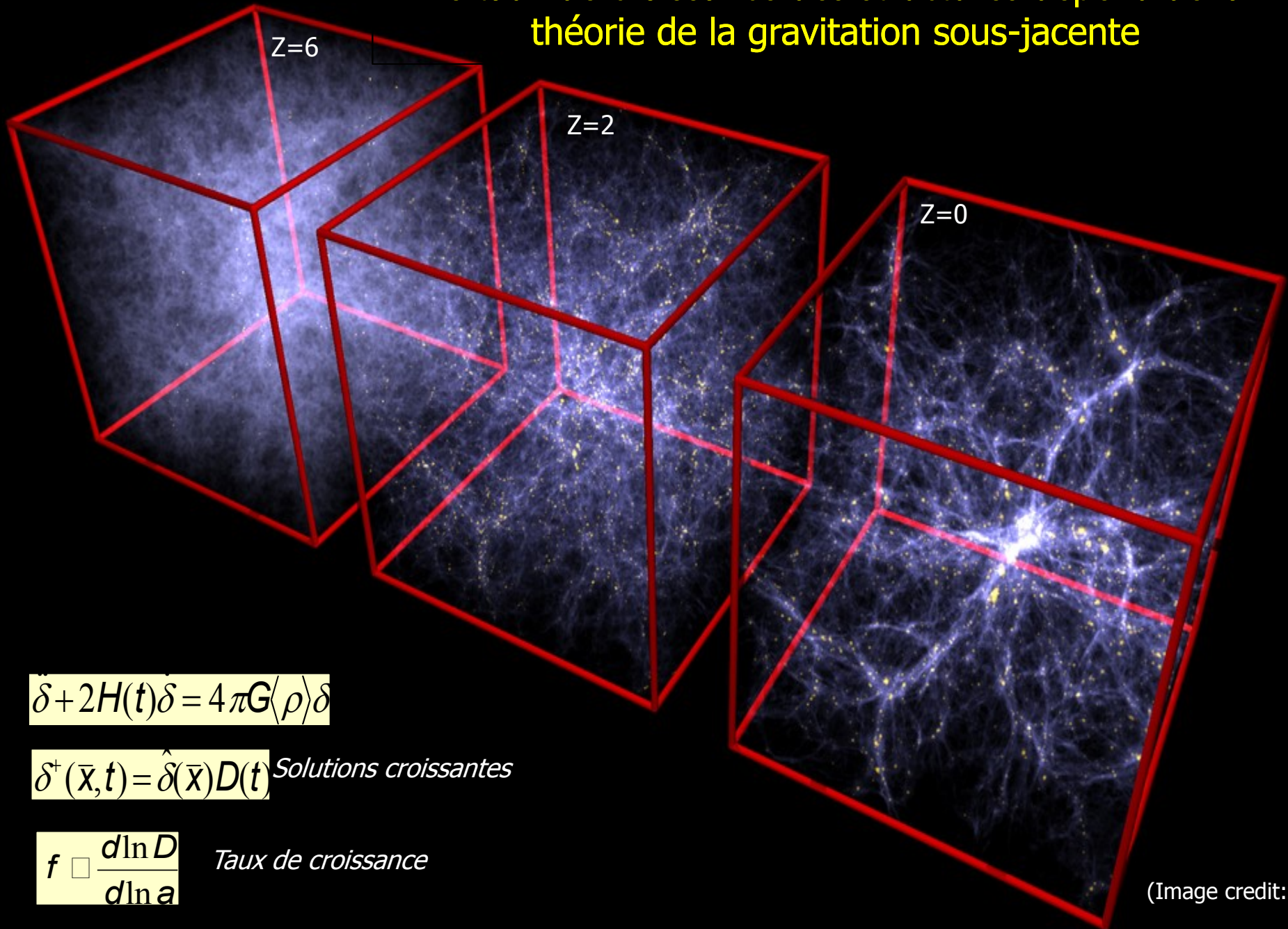
# La mission spatiale Euclid

- Envoyer dans l'espace un télescope,
- Faire de l'imagerie visible et infrarouge et de la spectroscopie infrarouge,
- Observer tout le ciel extragalactique (hors du plan de la Galaxie et de l'ecliptique),
- Mesurer les formes et les distances de 2 milliards de galaxies  
→ voir directement la distribution de la matière noire: effets de distorsion gravitationnelle des grandes structures de l'Univers, et ceci en fonction du temps (tomographie),
- Mesurer précisément la distribution tri-dimensionnelle des galaxies en fonction du temps grâce à la spectroscopie et la mesure de 50 millions de redshifts.



# Disgression sur les distorsions en redshifts

# Le taux de croissance des structures dépend de la théorie de la gravitation sous-jacente



$$\ddot{\delta} + 2H(t)\dot{\delta} = 4\pi G\langle\rho\rangle\delta$$

$$\delta^+(\bar{x}, t) = \hat{\delta}(\bar{x})D(t) \text{ Solutions croissantes}$$

$$f \equiv \frac{d \ln D}{d \ln a} \text{ Taux de croissance}$$

(Image credit:

V. Springel)

La croissance des structures engendre des mouvements  
→ vitesses particulières des galaxies

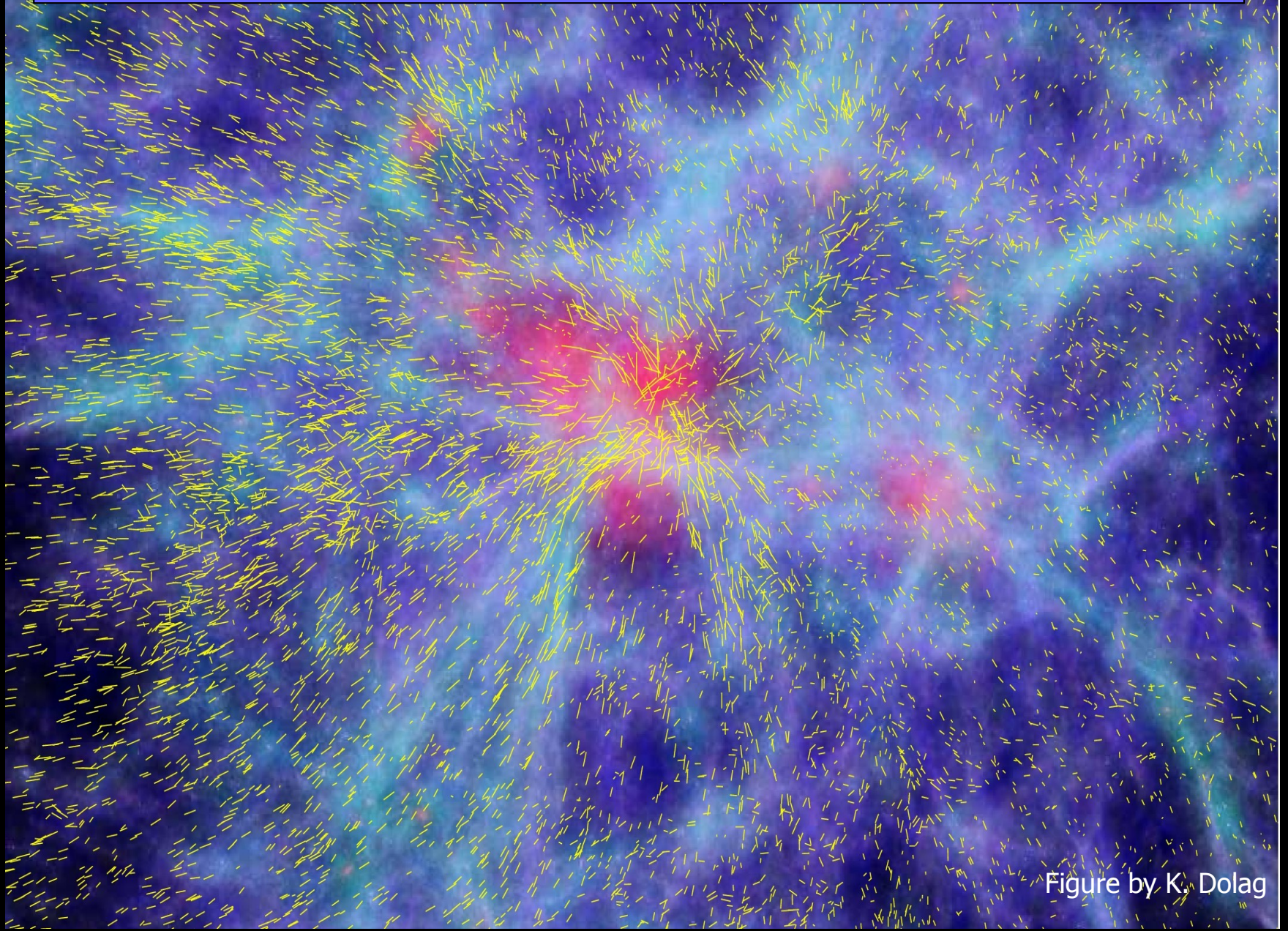
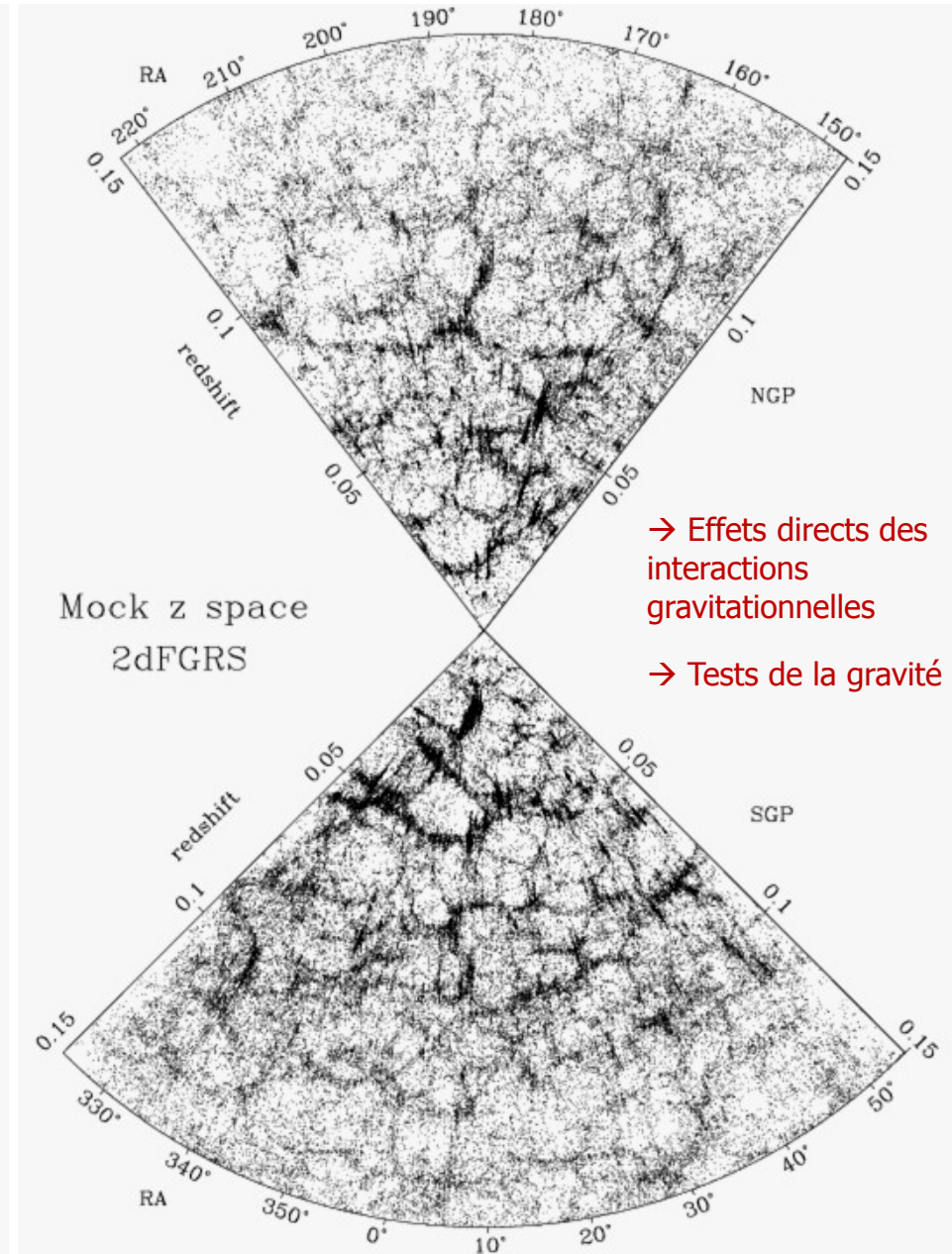
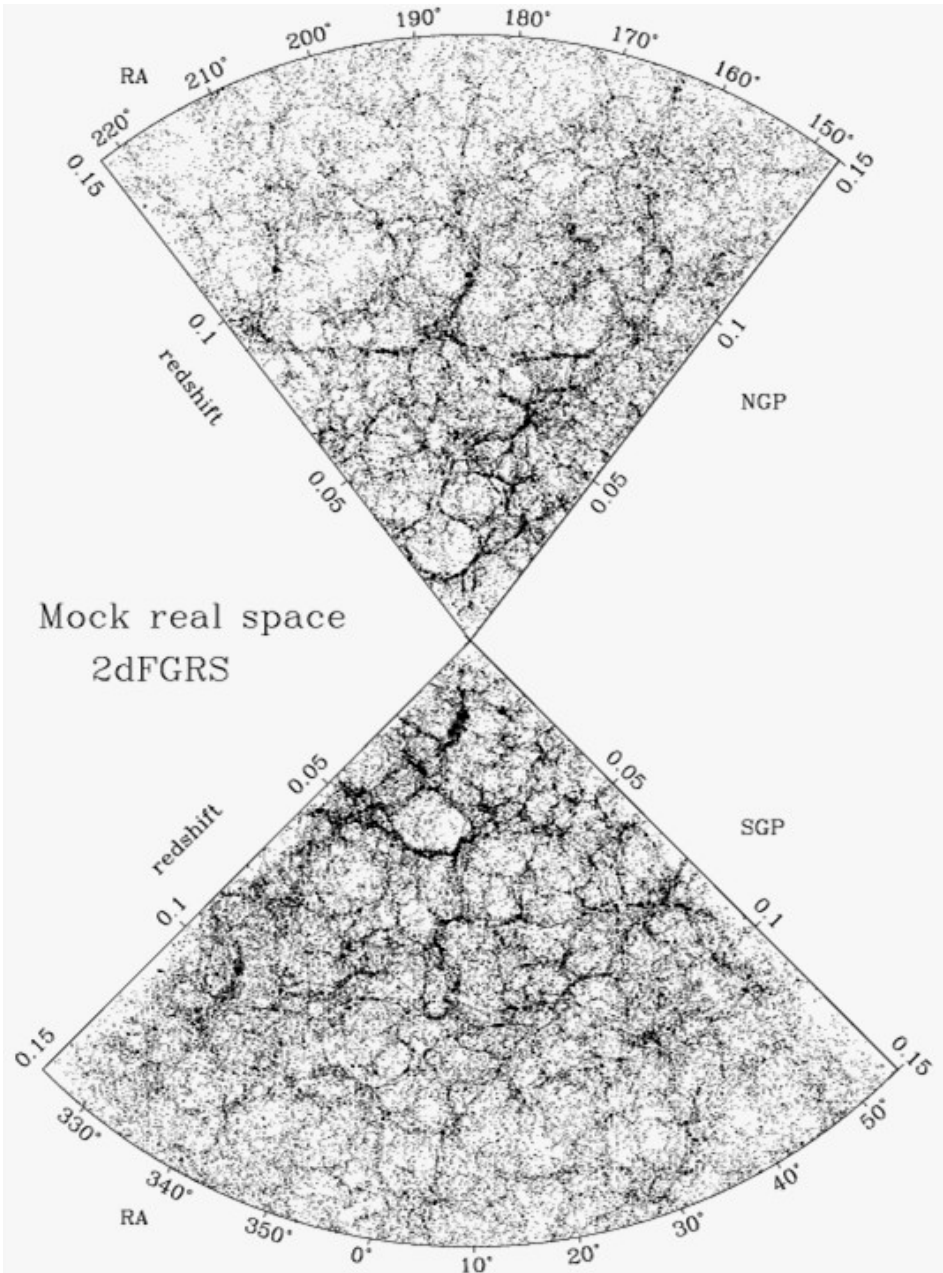


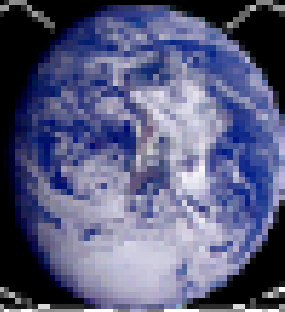
Figure by K. Dolag

# La distorsion en redshift induite par les vitesses individuelles



# Disgression sur les distorsions gravitationnelles

La courbure de  
l'espace-temps à  
proximité de la Terre

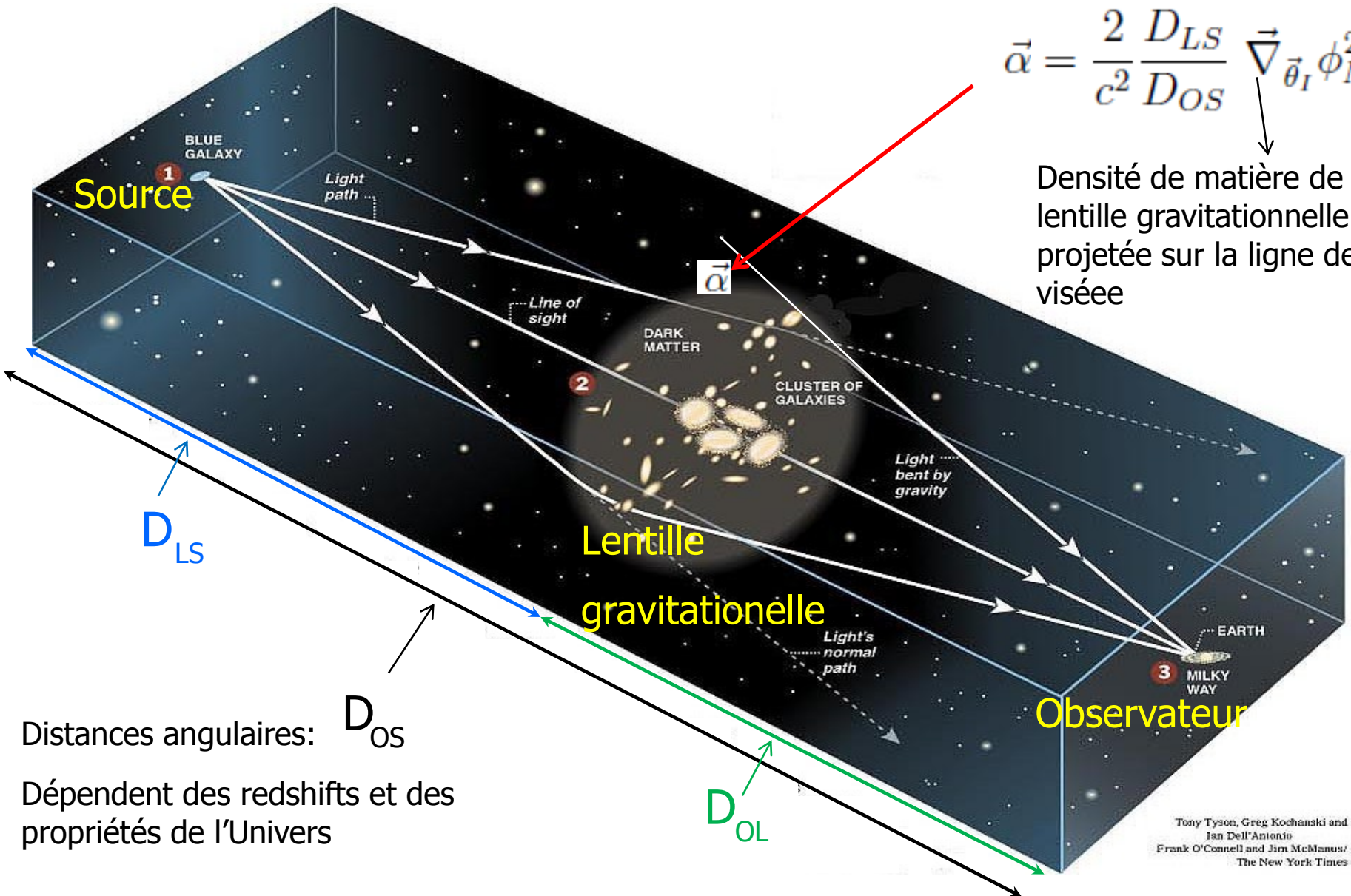


# La déflexion des rayons lumineux

Prédiction d'Einstein:

$$\vec{\alpha} = \frac{2}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_{OS}} \vec{\nabla}_{\vec{\theta}_I} \phi_N^{2D}$$

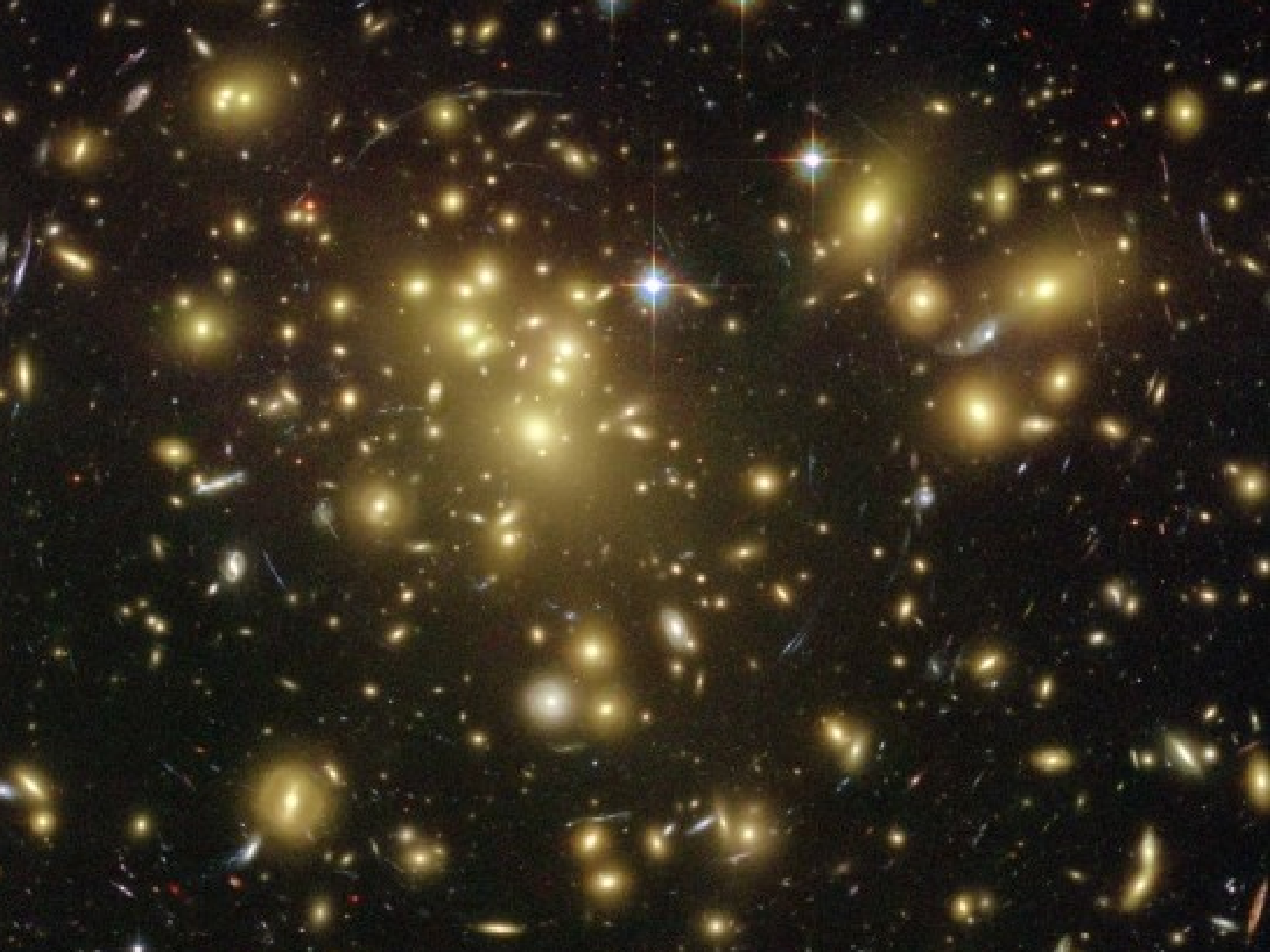
Densité de matière de la lentille gravitationnelle projetée sur la ligne de visée



Distances angulaires:  $D_{OS}$

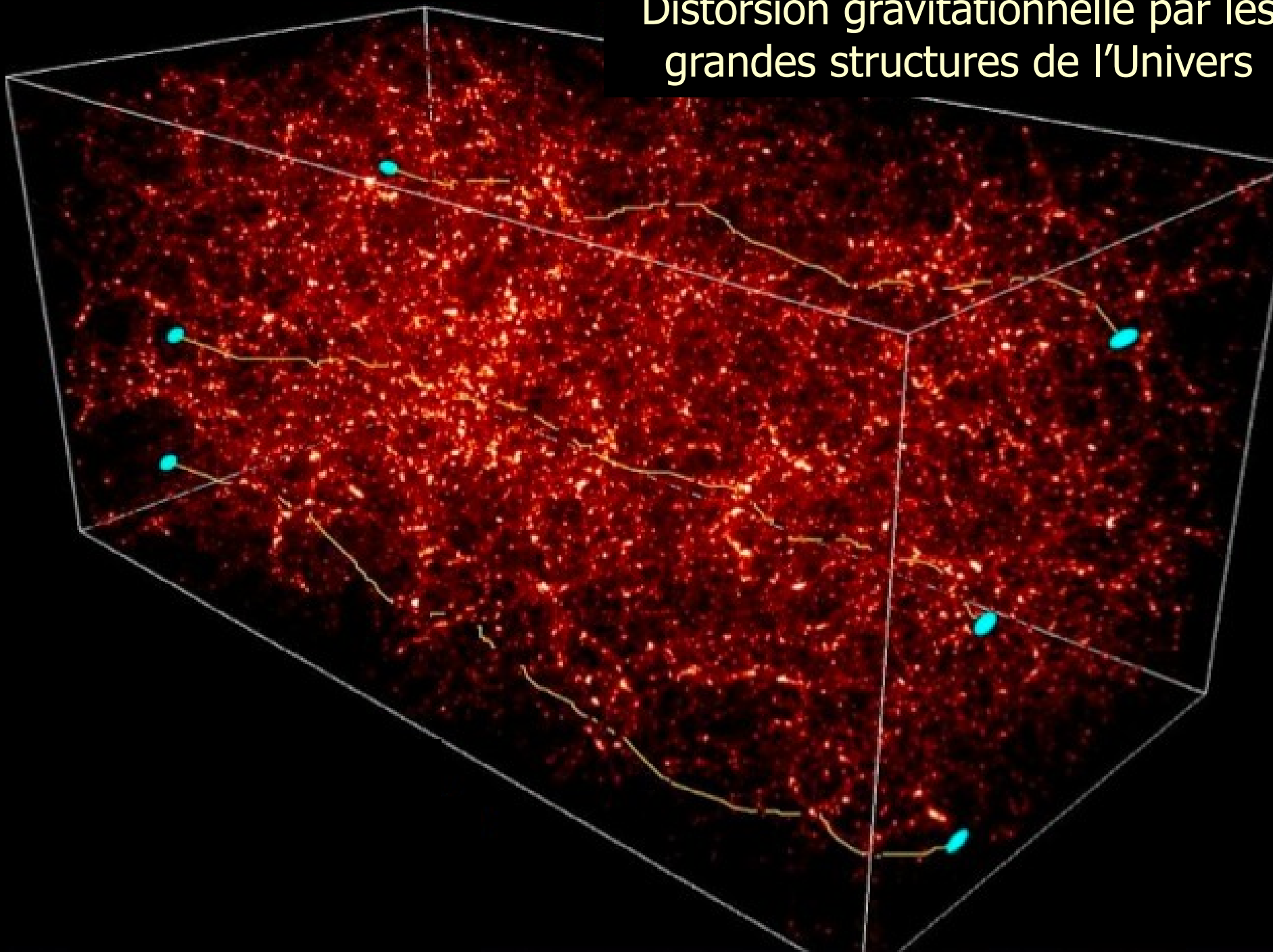
Dépendent des redshifts et des propriétés de l'Univers

Tony Tyson, Greg Kochanski and Jan Dell'Antonio  
Frank O'Connell and Jim McManus/  
The New York Times



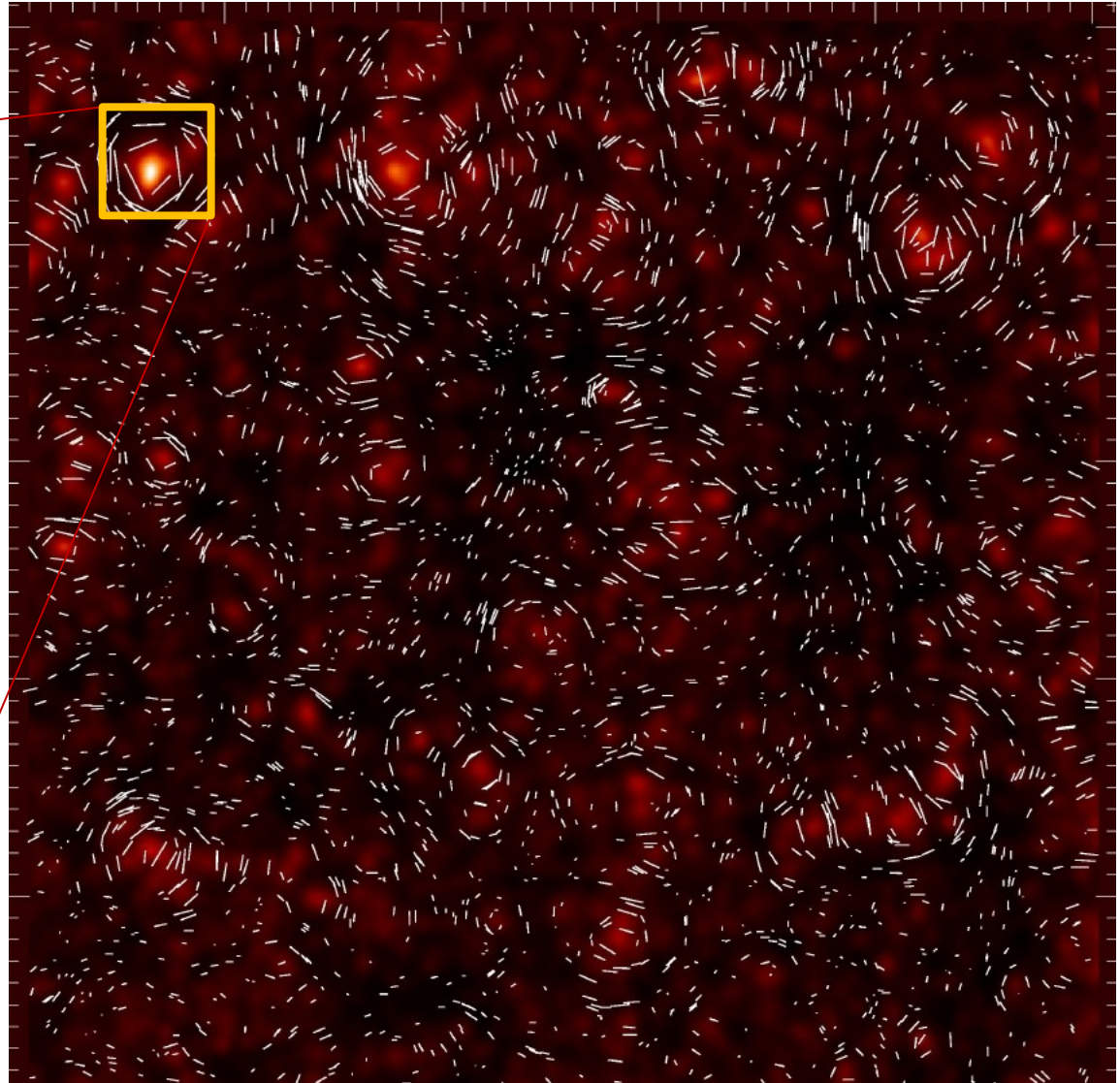


# Distorsion gravitationnelle par les grandes structures de l'Univers



# Distorsion gravitationnelle par les grandes structures de l'Univers projetée sur le ciel:

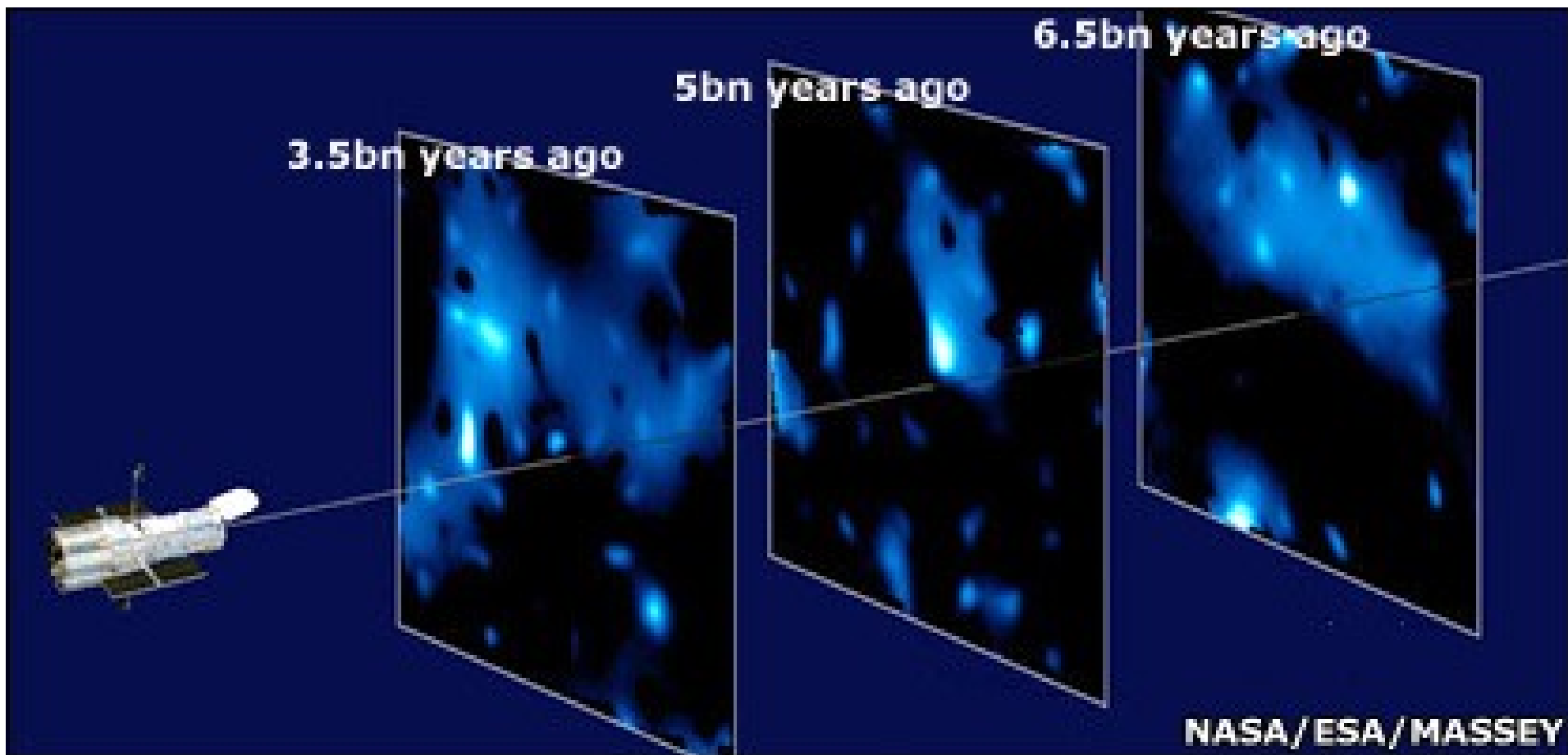
→ Un champ de galaxies orientées et allongées de façon cohérente



Les allongements des galaxies sont infimes, invisibles sur les galaxies individuelles

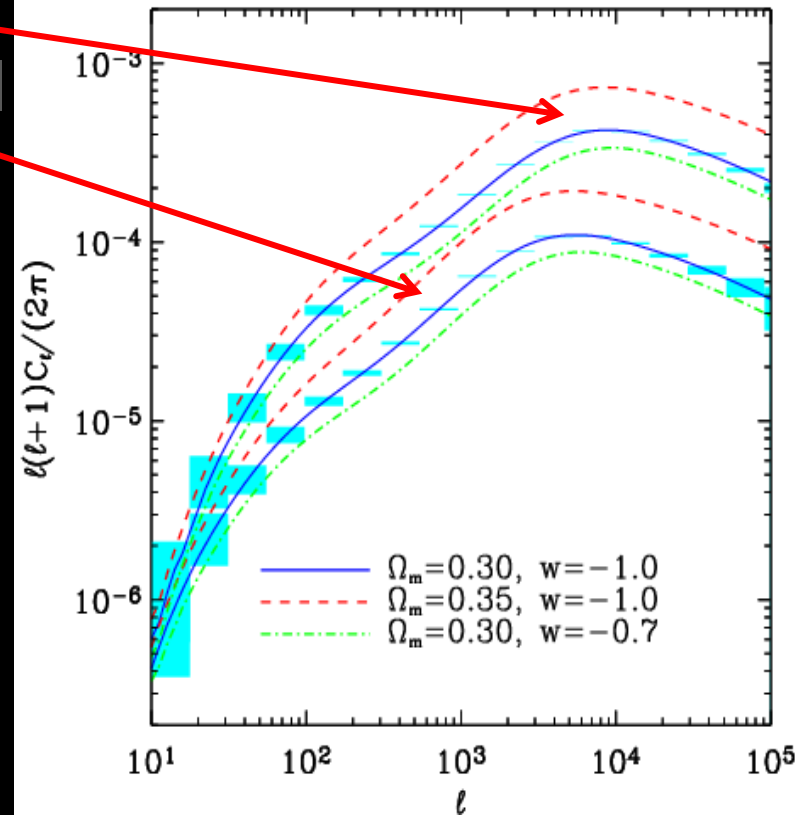
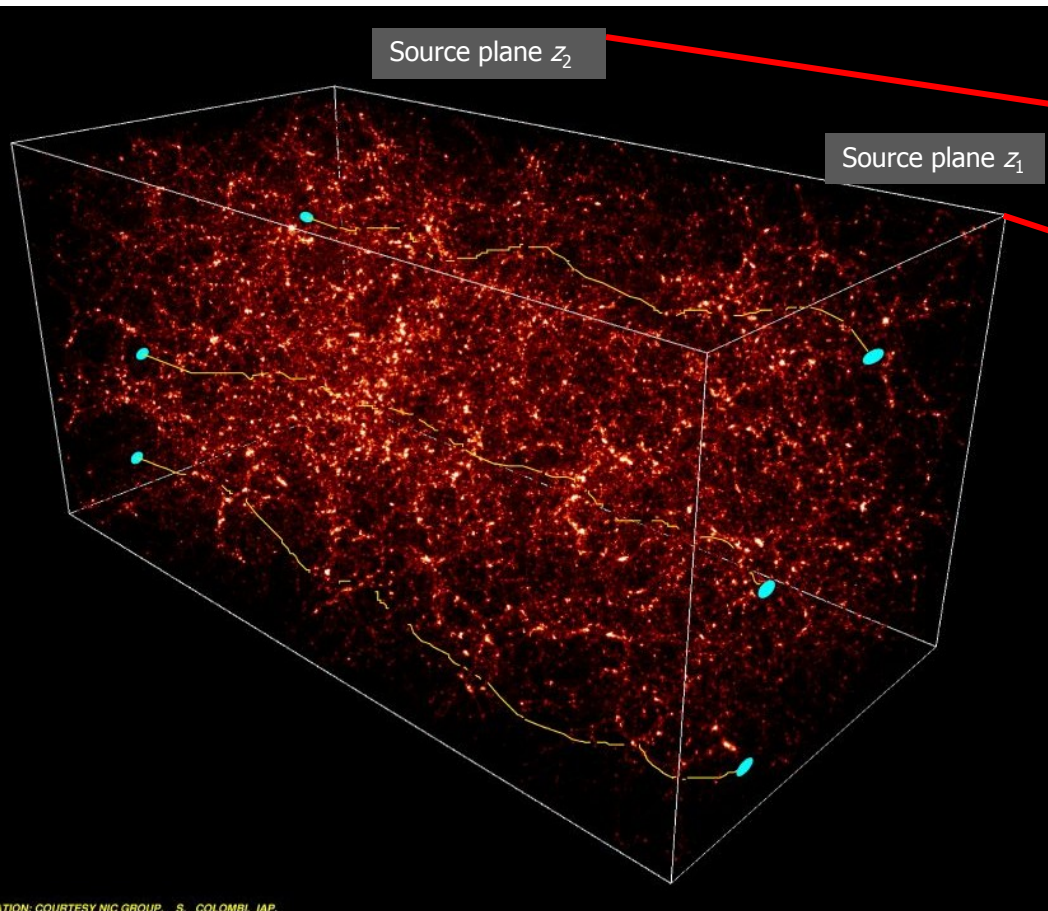
# Euclid va mesurer des effets de distorsion gravitationnelle projetés sur le ciel mais...

- à 10 époques différentes
- au cours des 10 derniers milliards d'années



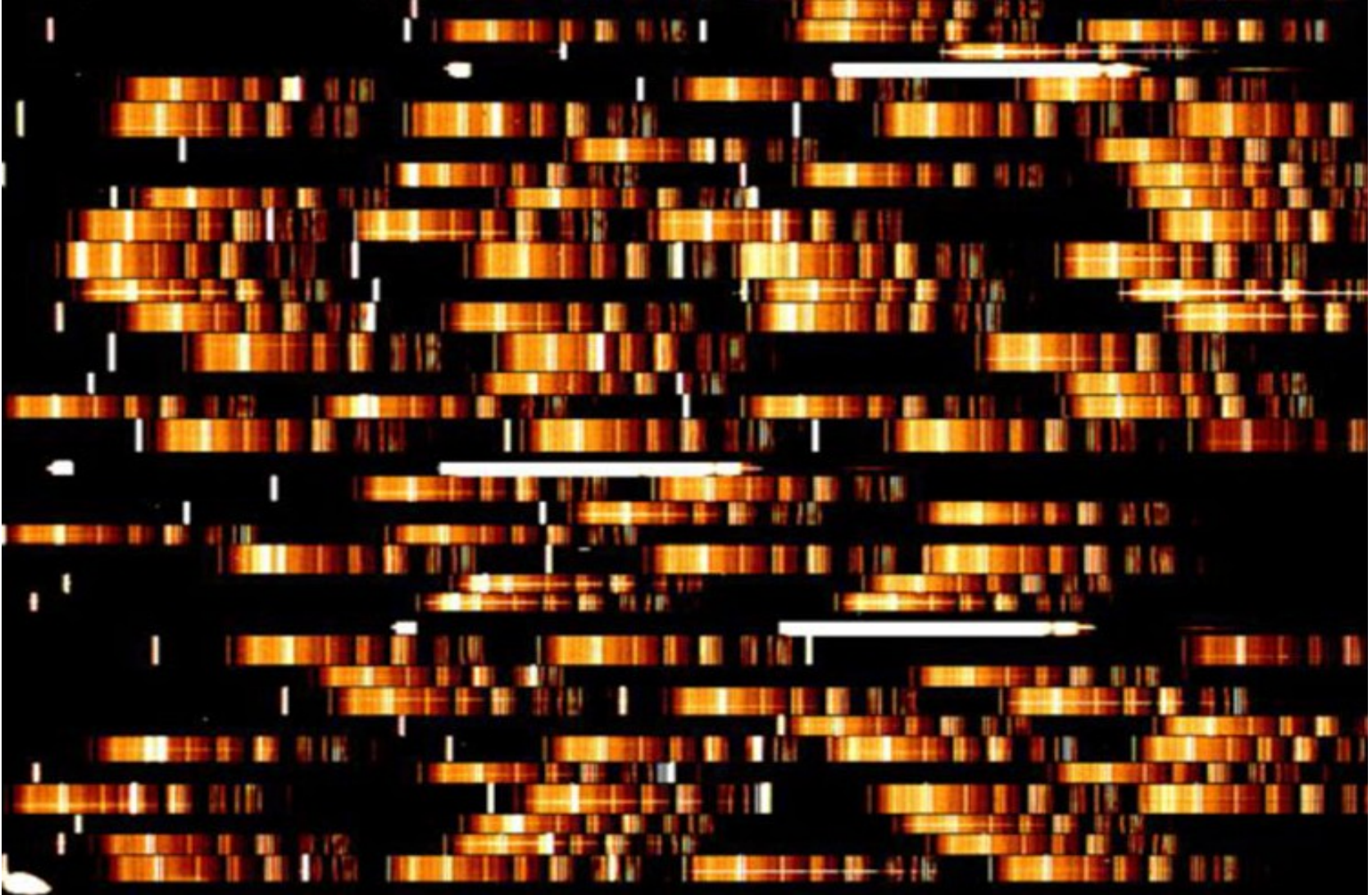
# Ce que va déterminer Euclid:

la distribution de la matière noire en fonction de l'échelle  
= le spectre de puissance de la matière noire et des galaxies en  
fonction du temps ... puis comparer aux prédictions théoriques...

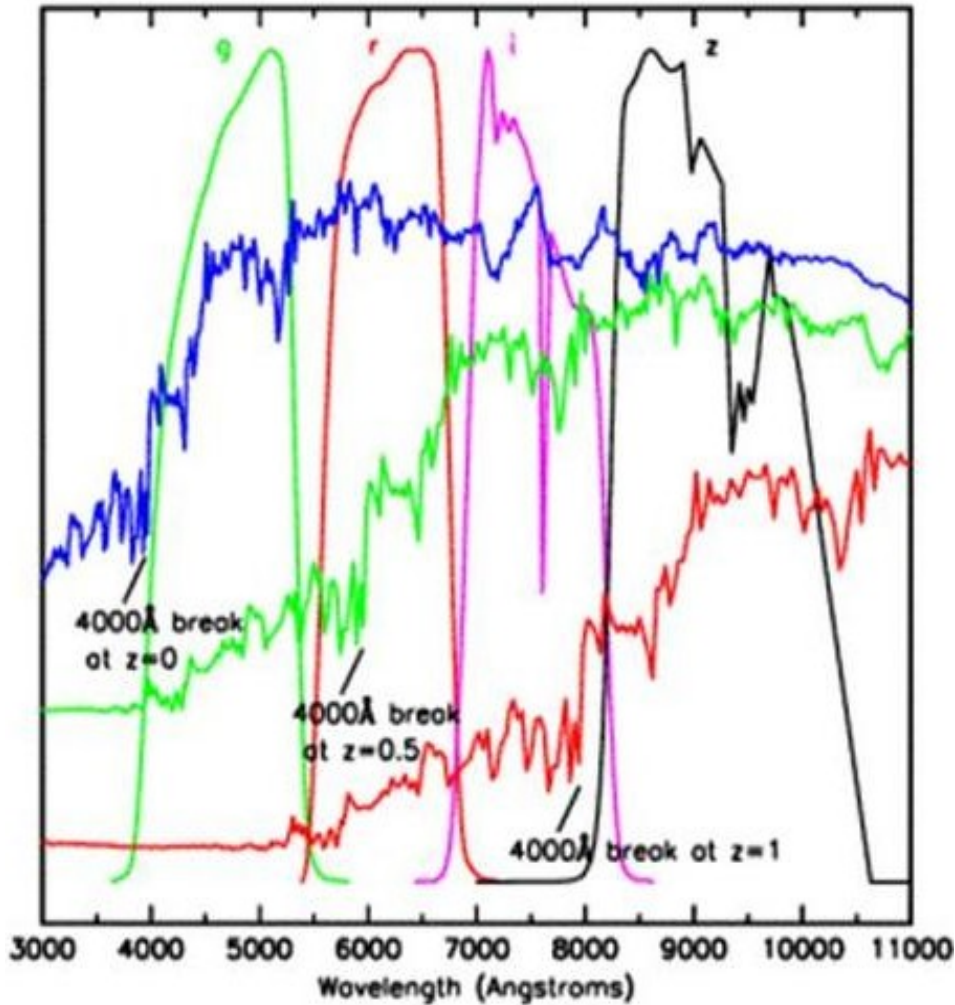


mais il faut des distances  $\rightarrow$  des redshifts

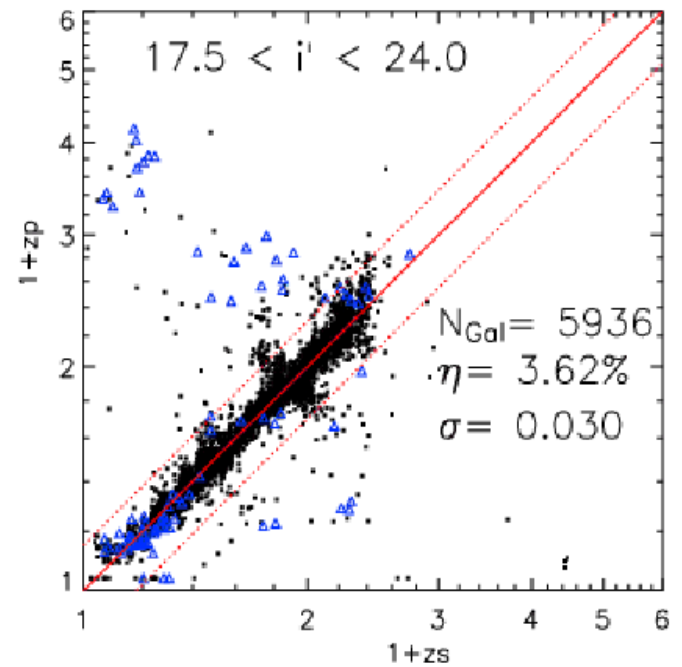
Les machines à redshifts : d'ici 2020 aucune de pourra fournir les redshifts de milliards de galaxies (maximum  $\sim 100$  millions)



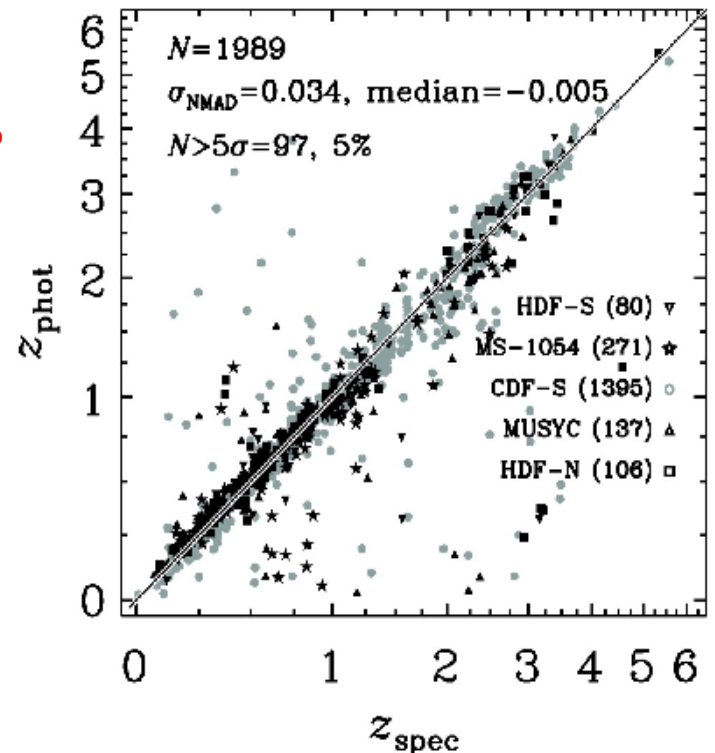
# Principe du redshift photométrique



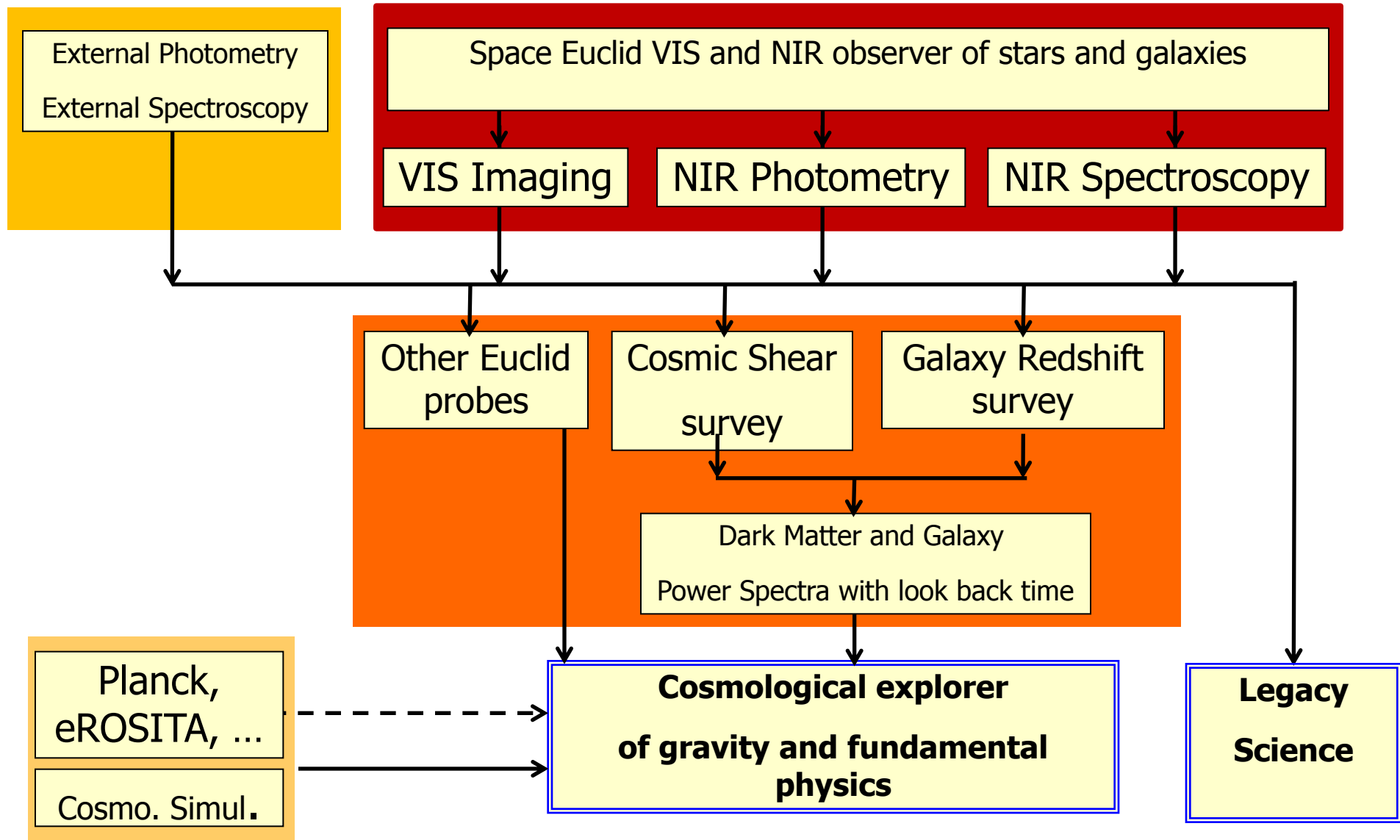
Avec données visibles sans infrarouges



Avec données visibles+ infrarouges



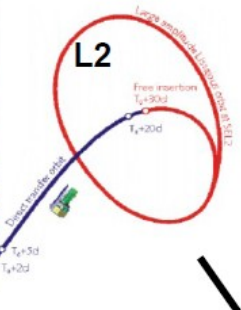
# The *Euclid* Machine



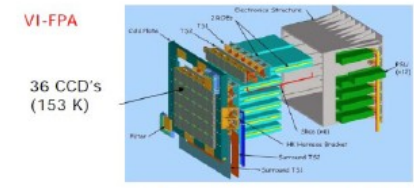
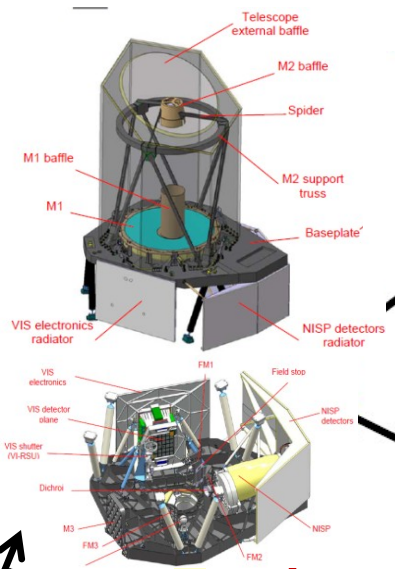
# Toute la mission Euclid en une image

## Soyuz@Kourou

Q2 2020



## PLM+SVM: 2010-2019



## VIS imaging: 2010-2020

(VIS team)

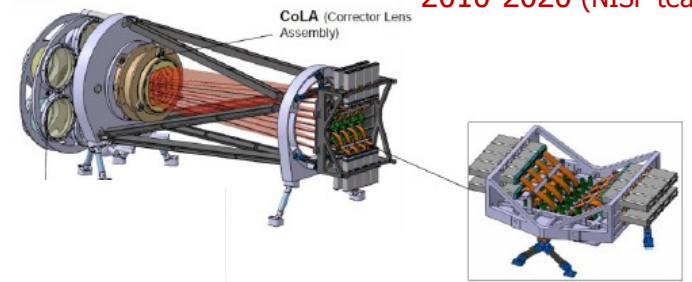
## VIS

## NIR spectro-imaging

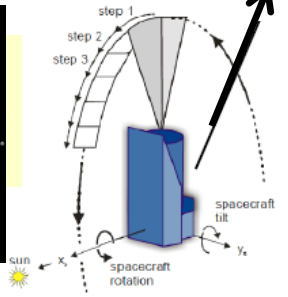
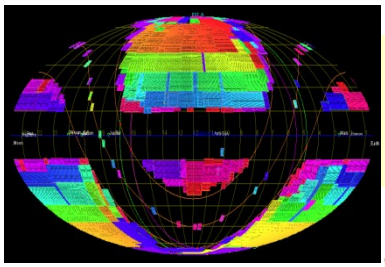
2010-2020 (NISP team)

## NISP

## NI-OMA



## Surveys: 2010-2028 (Survey WG)



6 yrs - 15,000 deg<sup>2</sup>

Commissioning - SV

Euclid opération:

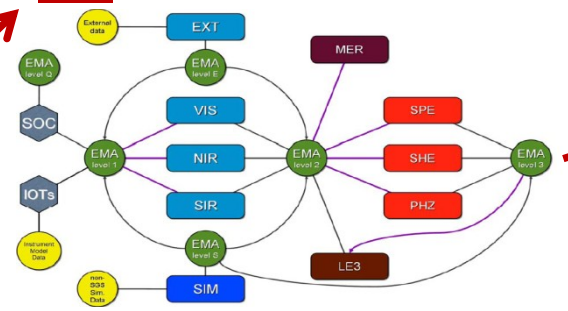
5.5 yrs: Euclid Wide+Deep

+: SNIa, mu-lens, MW?

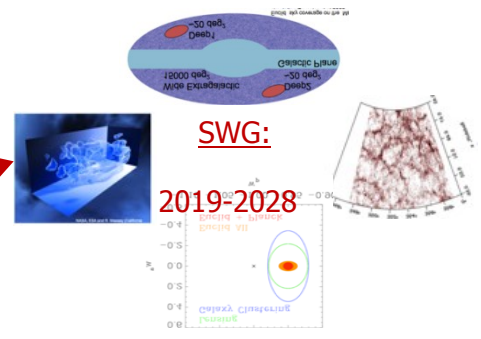
## Ground data



## SGS: 2010-2028



20-30 PB data processing (EC-SGS team)



## SWG:

2019-2028

Science analyses



# L'apport considérable de l'espace avec Euclid

- **Mesure des déformations des galaxies avec un télescope dans l'espace:**
  - Pas de dégradation des images par la turbulence atmosphérique
  - Télescope ultra-stable pendant les 7 années dans l'espace
- **Mesure des redshifts photométriques:**
  - Emission thermique du ciel ou du télescope 1000 fois plus faible qu'au sol:
  - Si on voulait couvrir les 15000 deg<sup>2</sup> à la profondeur nécessaire avec ESO/VISTA (4 mètres de diamètre, champ 2 fois plus grand qu'Euclid).... **Il faudrait 640 ans!**

# Euclid:

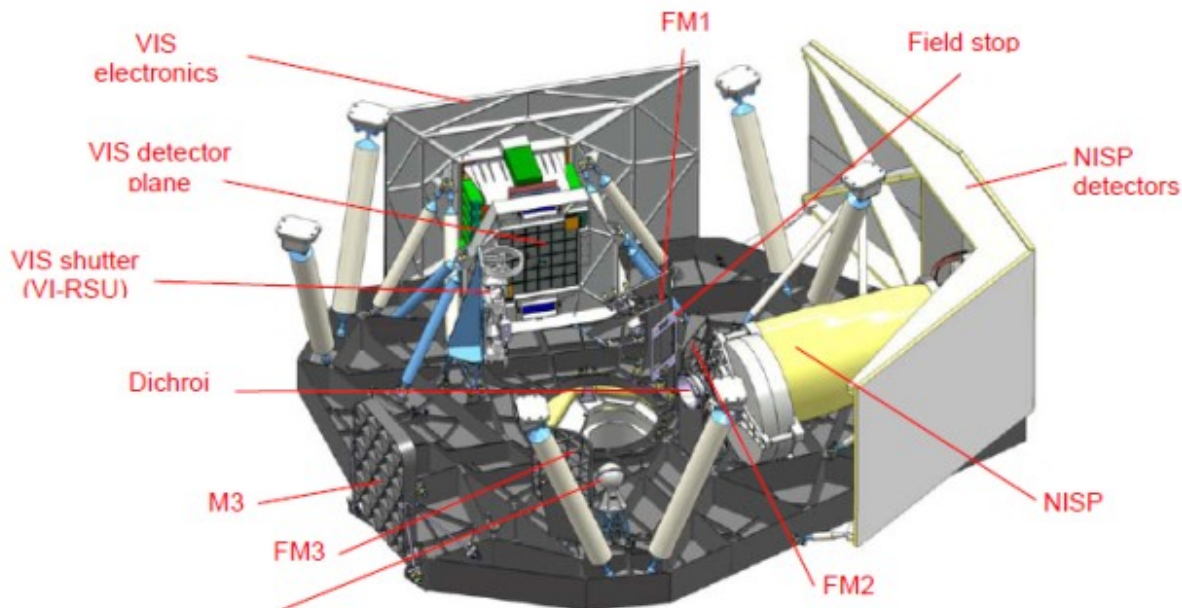
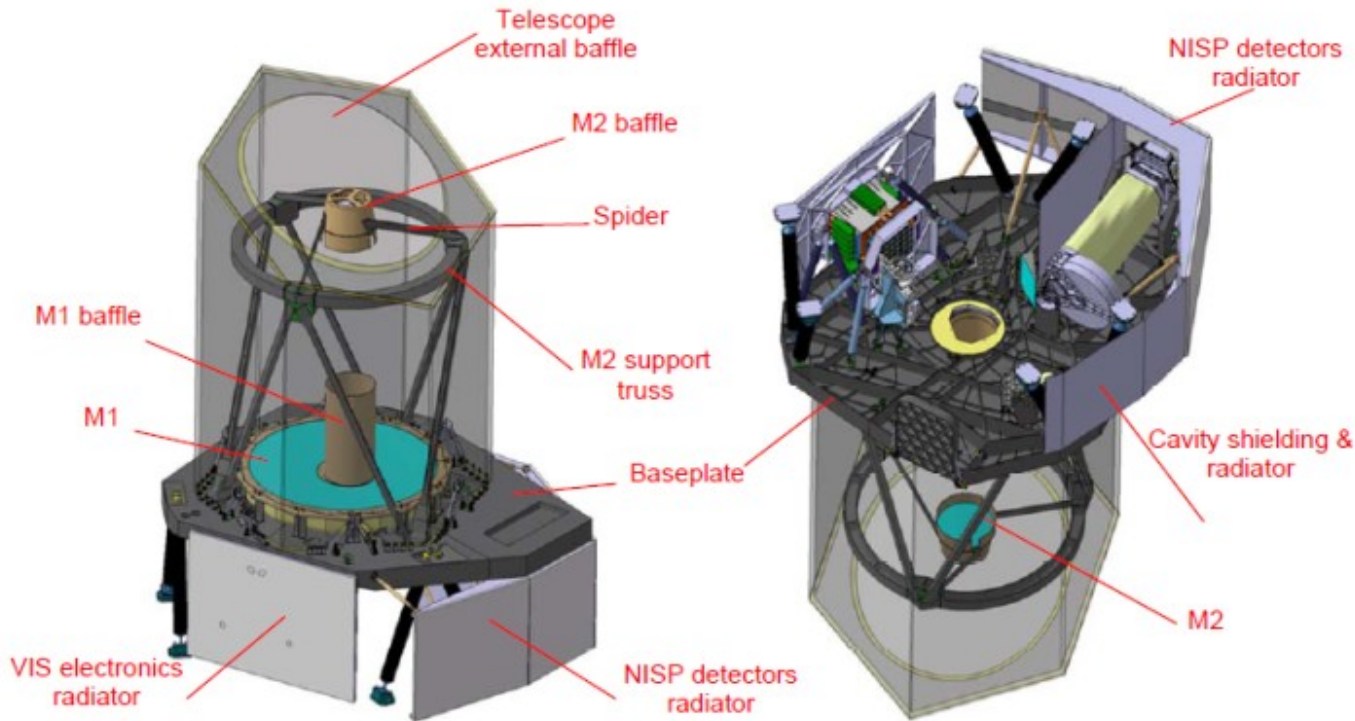
## télescope et instruments

- Stabilisation:

erreur de pointé selon les axes x,y = 25mas sur une durée de 600 s.

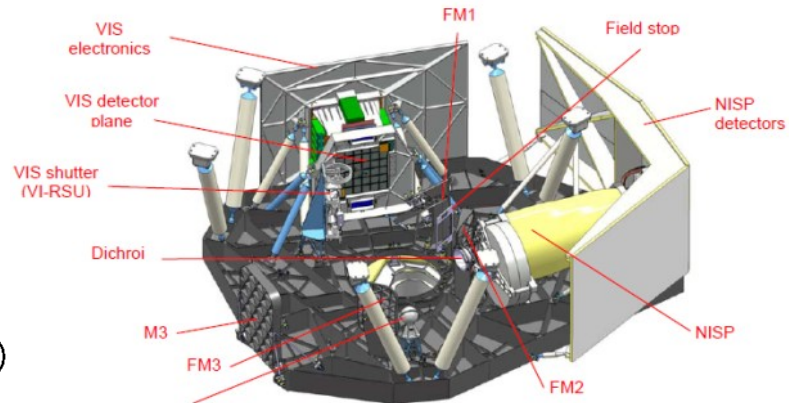
- FoV:

champ d'observation des instrument visible et infra-rouge commun = 0.54 deg<sup>2</sup>



# L'instrument VIS

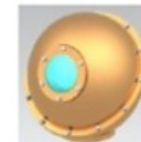
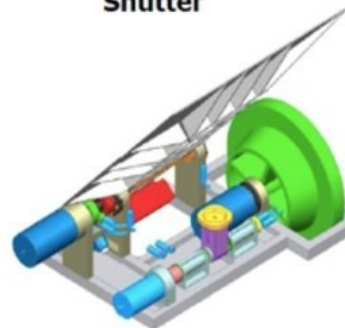
- large area imager - a 'shape measurement machine'
- 36 4kx4k CCDs with 12 micron pixels
- 0.1 arcsec pixels on sky
- bandpass 550-900 nm - narrow band channel
- limiting magnitude for wide survey of magAB = 24.5 for 10 $\sigma$  (extended)
- data volume - 520Gbit/day



## COLD

### Shutter

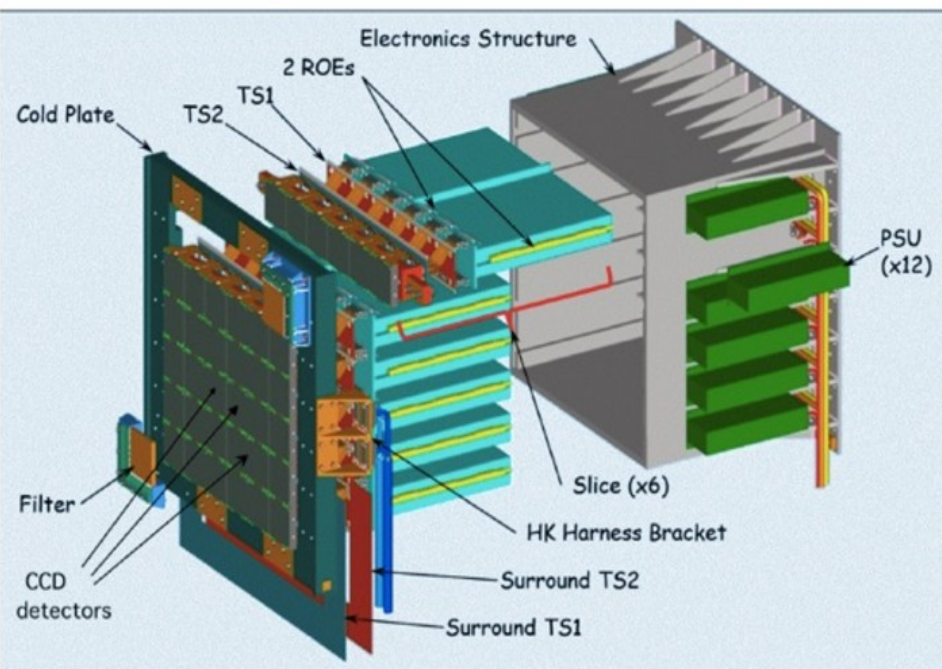
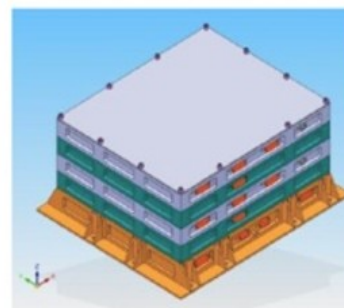
### Cal Unit



## WARM

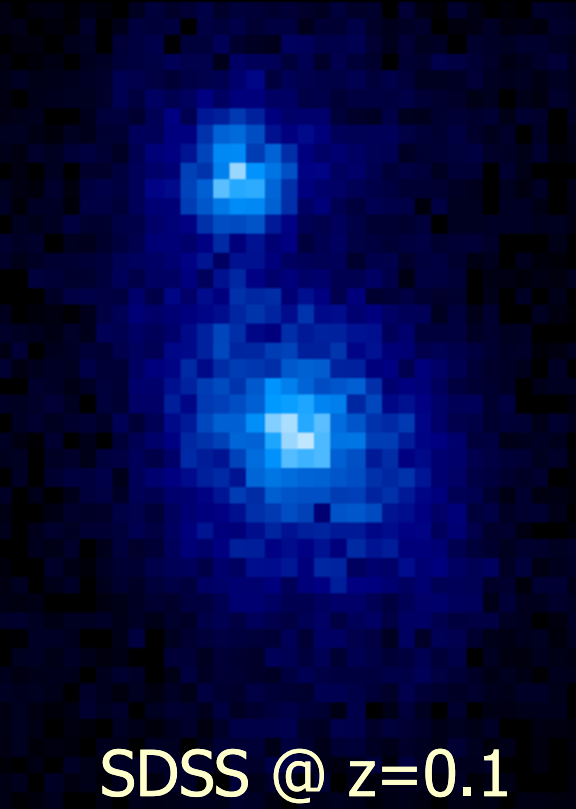
### Power and Mechanisms Control Unit

### Command and Data Processing Unit

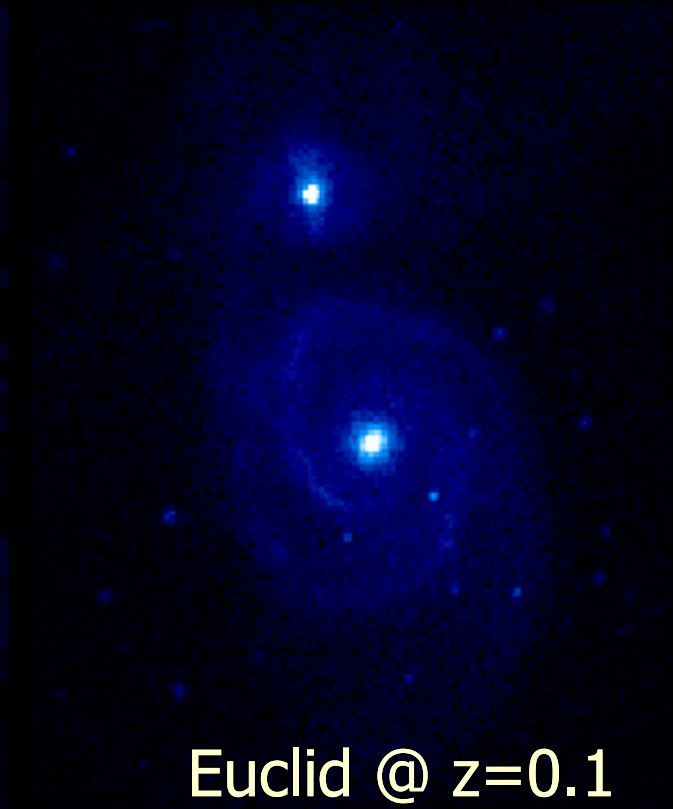


### Focal Plane Assembly

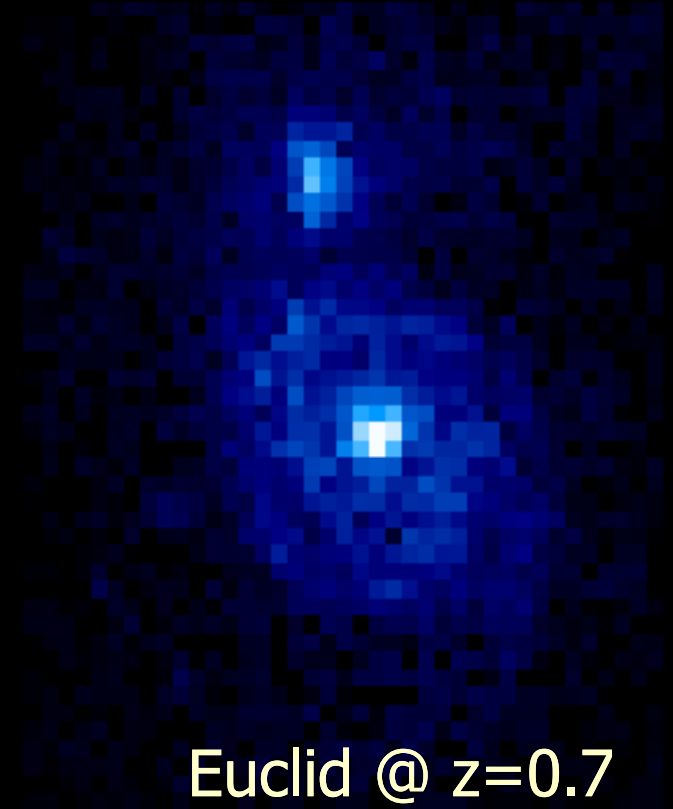
# Simulation de M51 avec VIS



SDSS @  $z=0.1$



Euclid @  $z=0.1$

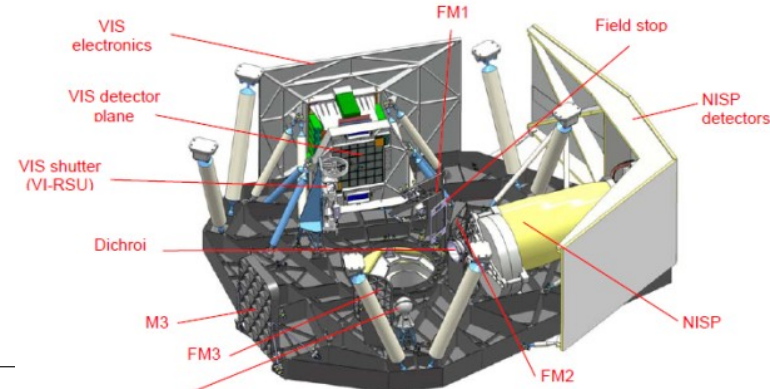


Euclid @  $z=0.7$

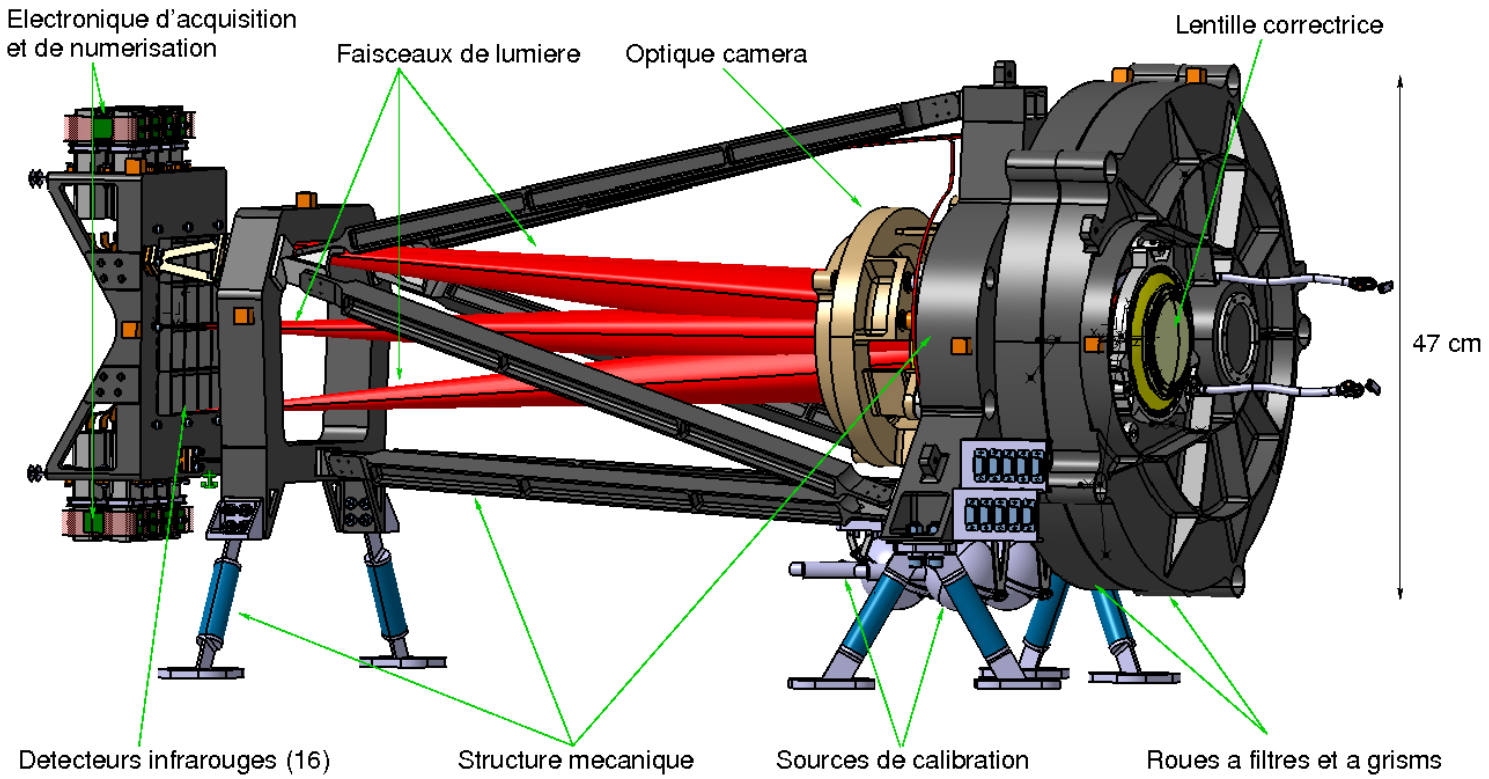
Images simulées d'Euclid de la galaxies M51 à  $z\sim 0.1, 0.71$ :

Euclid aura la même résolution à  $z\sim 1$  que le grand relevé Sloan SDSS à  $z\sim 0.05$ , mais sera 3 magnitudes plus profond.  $\rightarrow$  Euclid = Super-Sloan Survey

# L'instrument NISP



L'instrument NISP: Near Infrared Spectrometer and Photometer



16 détecteurs NIR 2kx2k H2RG - 0.3 arcsec/pixel

4 Grisms (2 B, 2 R, tournés de 90 deg.) ; 3 filtres NIR: Y, J H - Télémétrie= 180 Gbit/j

Euclid VIS+NISP

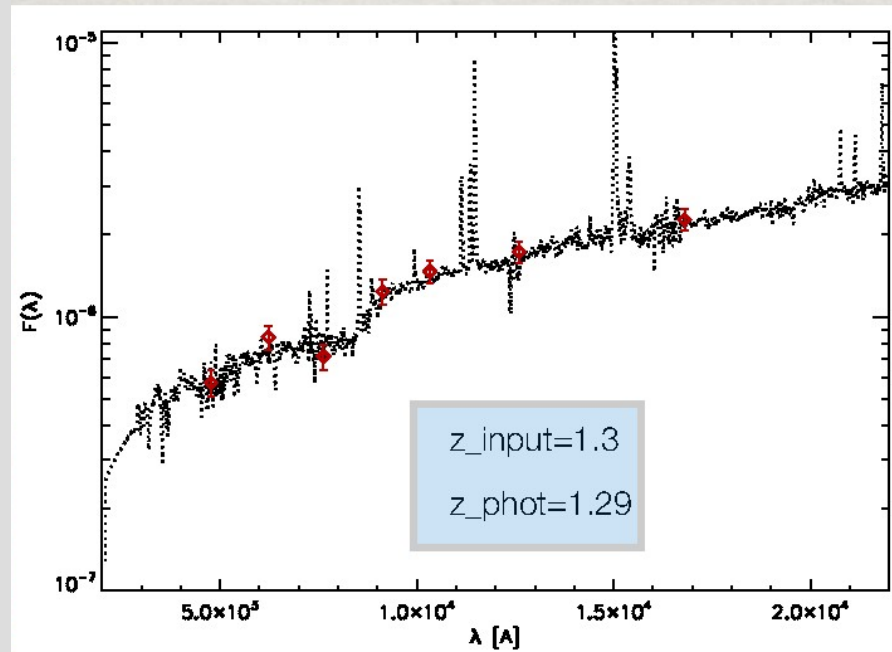


Simulation d'une  
image combinée  
Euclid visible+  
infrarouge Y+J+H  
d'un amas de  
galaxie-lentille

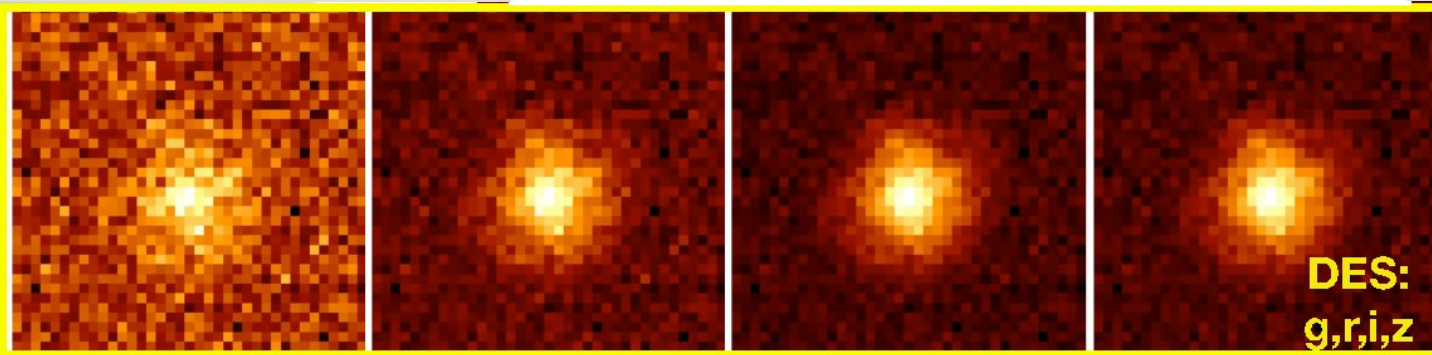
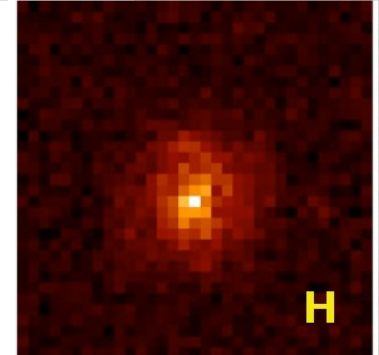
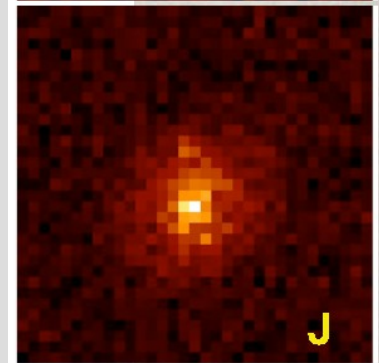
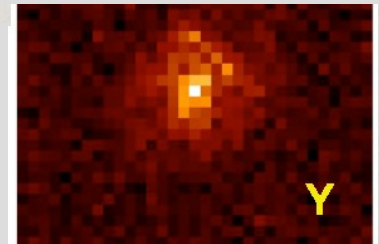
# Analyse des données Euclid sol+espace

## Redshifts photométriques avec Euclid

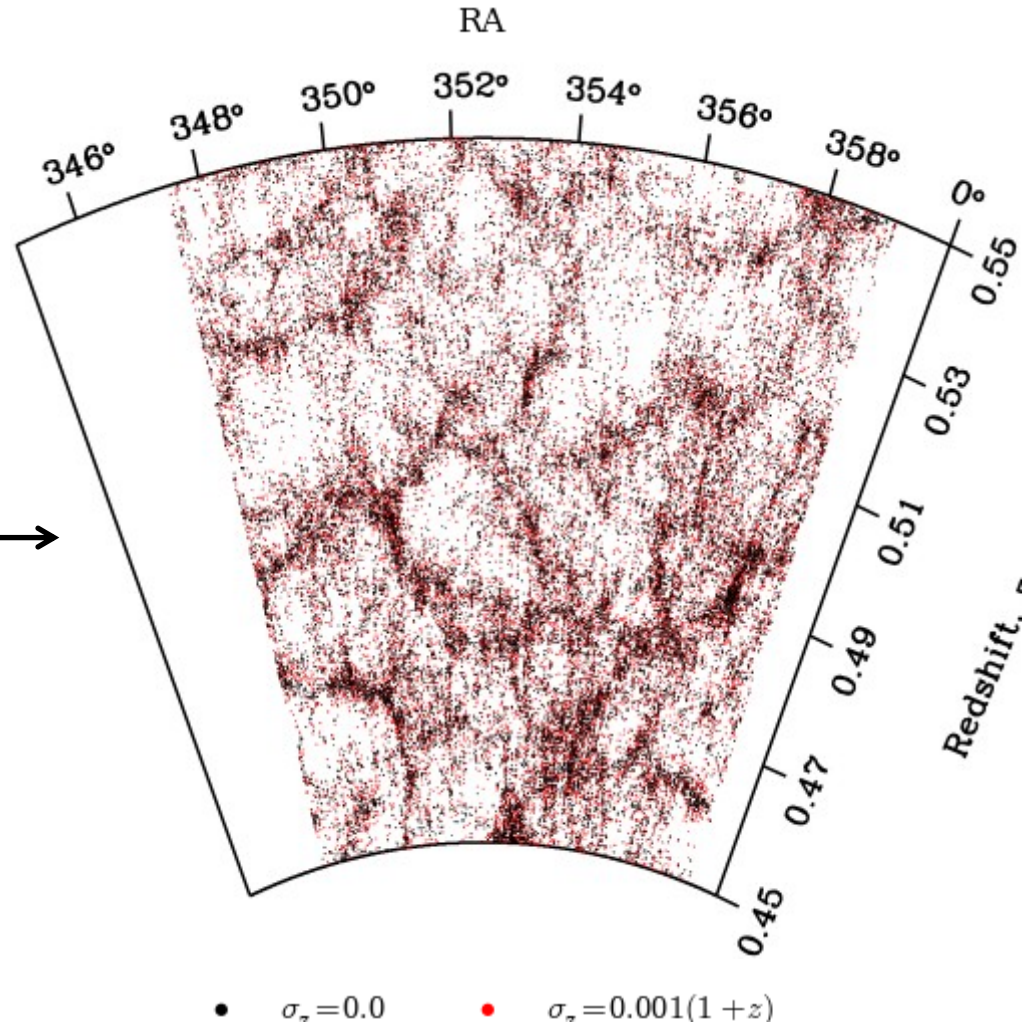
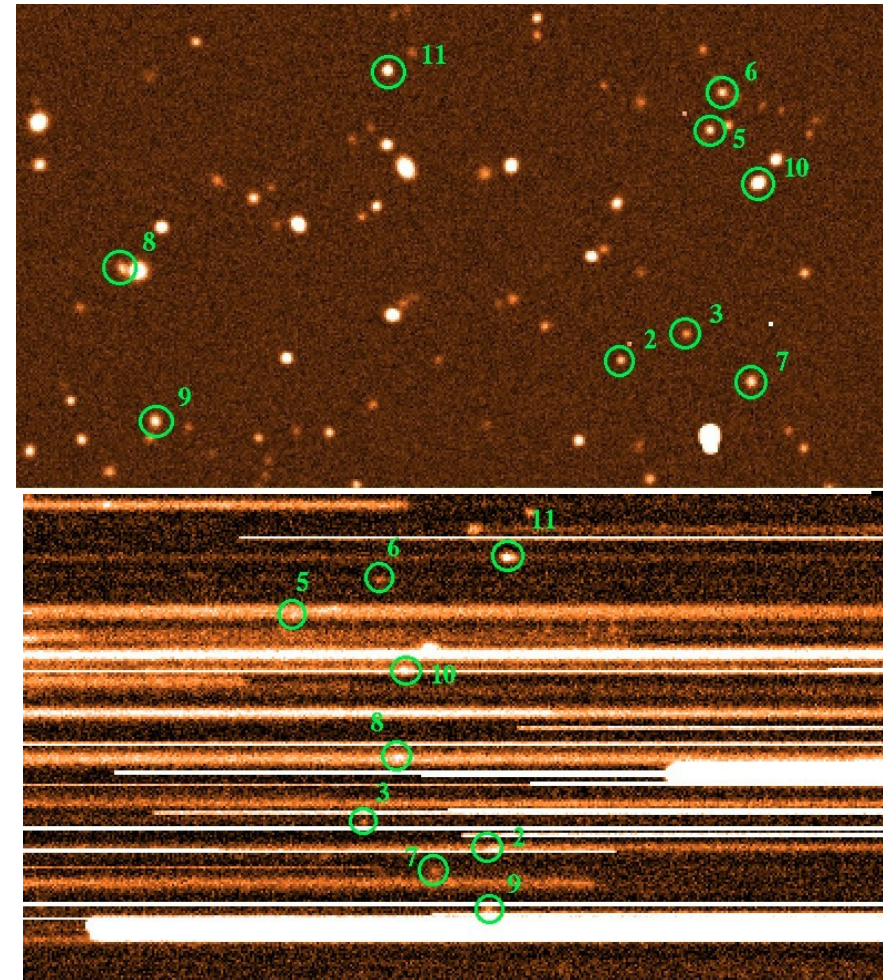
Filtres visibles provenant  
des télescopes optiques  
au sol



Filtres infra-rouges  
provenant des  
l'imagerie infra-rouge  
d'Euclid



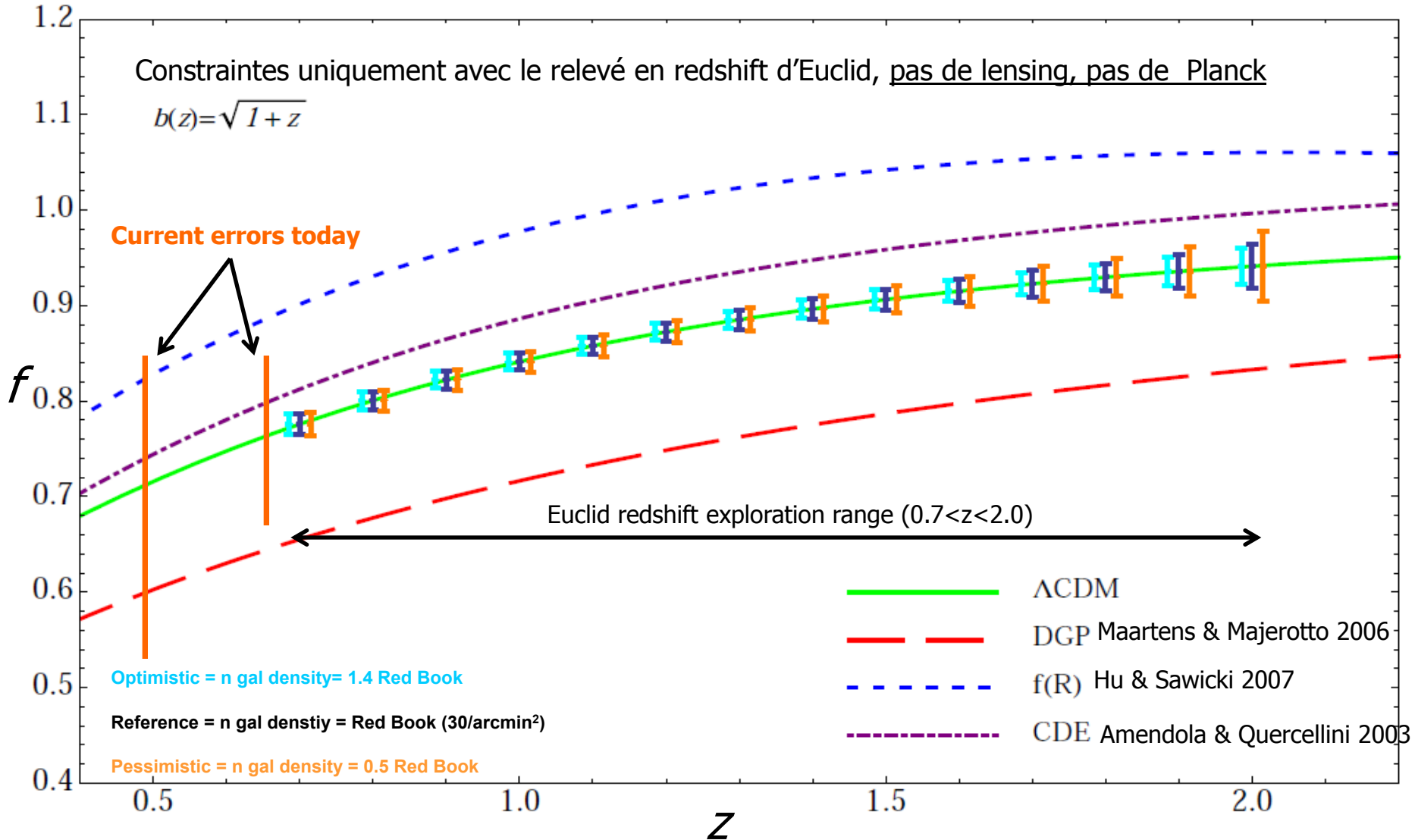
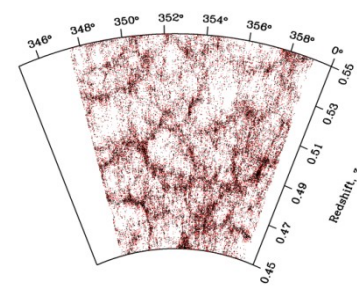
# Simulation des spectres/redshifts obtenus avec NISP



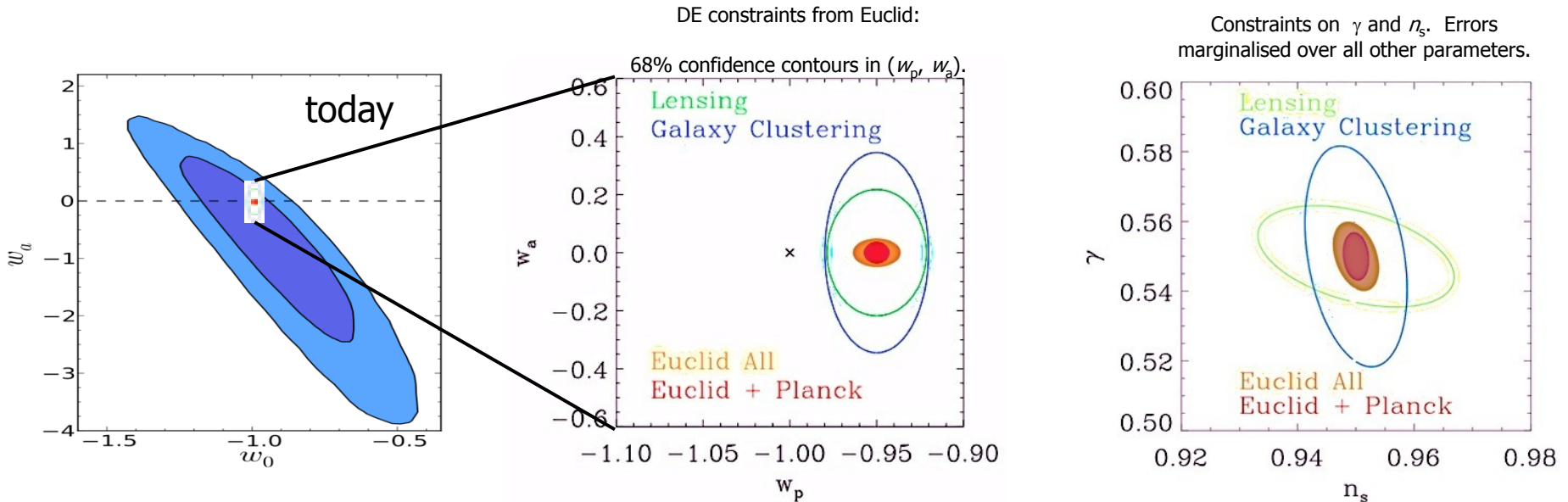
Redshift vrai versus  
redshift mesuré



# Euclid: prédictions sur les contraintes pour les modèles d'énergie sombre



# Euclid: prédictions pour le programme cosmologique central de la mission



	Modified Gravity	Dark Matter	Initial Conditions	Dark Energy		
Parameter	$\gamma$	$m_\nu / eV$	$f_{NL}$	$w_p$	$w_a$	FoM
Euclid primary (WL+GC)	0.010	0.027	5.5	0.015	0.150	430
Euclid All	0.009	0.020	2.0	0.013	0.048	1540
Euclid+Planck	0.007	0.019	2.0	0.007	0.035	4020
Current (2009)	0.200	0.580	100	0.100	1.500	~10
<b>Improvement Factor</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>50</b>	<b>&gt;10</b>	<b>&gt;40</b>	<b>&gt;400</b>

Assume systematic errors are under control

# Les données d'Euclid: une mine pour toute l'astronomie

Objets	Euclid	Avant Euclid
Galaxies à $1 < z < 3$ avec une masse précise	$\sim 2 \times 10^8$	$\sim 5 \times 10^6$
Galaxies massives ( $1 < z < 3$ )	Quelques centaines	Quelques dizaines
Emetteurs H $\alpha$ avec abondance en métaux $z \sim 2-3$	$\sim 4 \times 10^7 / 10^4$	$\sim 10^4 / \sim 10^2?$
Galaxies dans les amas de galaxies à $z > 1$	$\sim 2 \times 10^4$	$\sim 10^3?$
Galaxies à noyaux actifs ( $0.7 < z < 2$ )	$\sim 10^4$	$< 10^3$
Galaxies naines	$\sim 10^5$	
$T_{\text{eff}} \sim 400\text{K}$ Y dwarfs	$\sim \text{few } 10^2$	$< 10$
Galaxies-lentilles	$\sim 300,000$	$\sim 10-100$
Quasars à $z > 8$	$\sim 30$	aucun

# Simulations et prédictions d'arcs et anneaux d'Einstein avec Euclid

CFHTLS-w

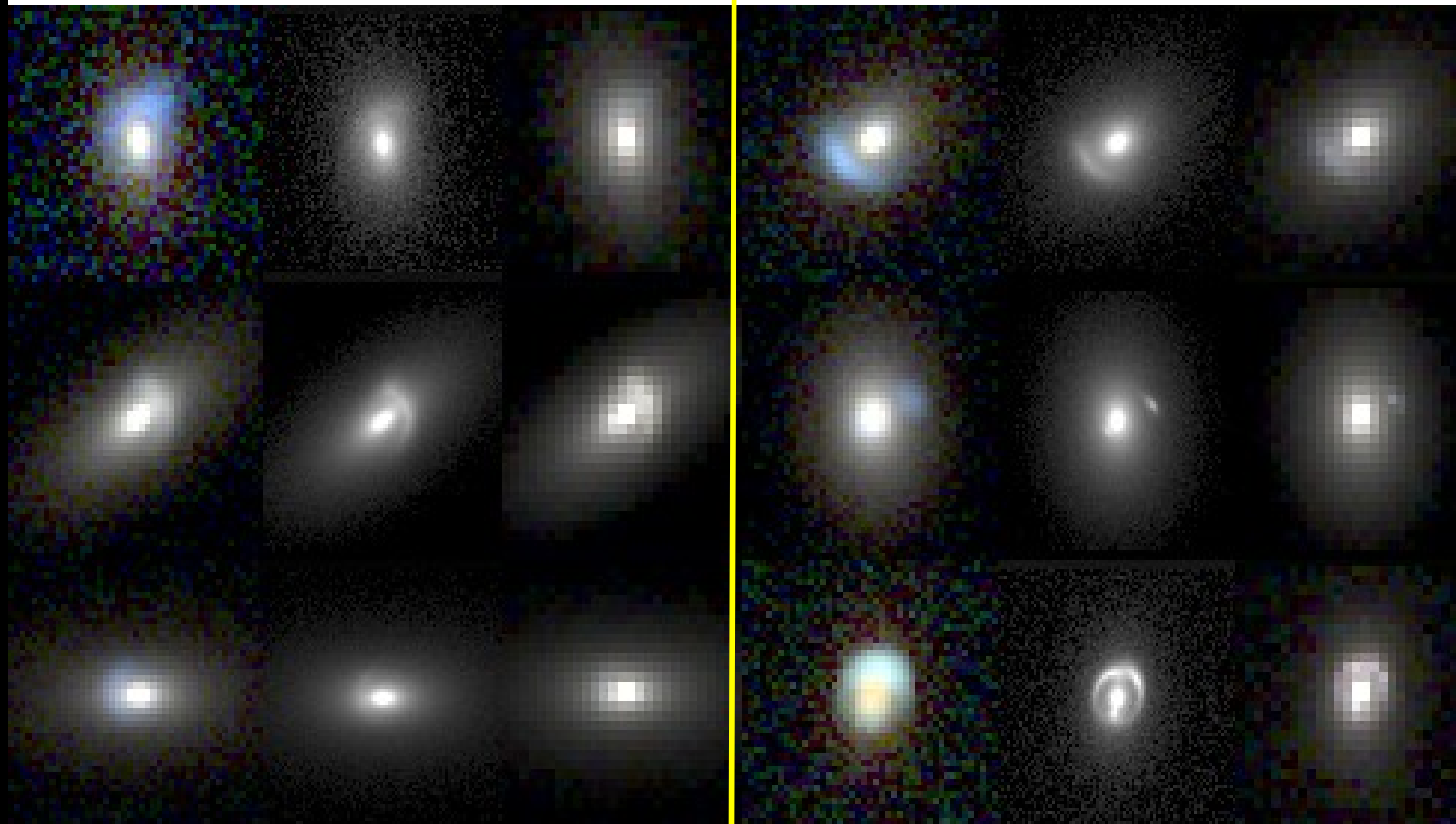
R+I+Z

YJH

CFHTLS-w

R+I+Z

YJH



# SLAC



SLACS: The Sloan Lens ACS Survey

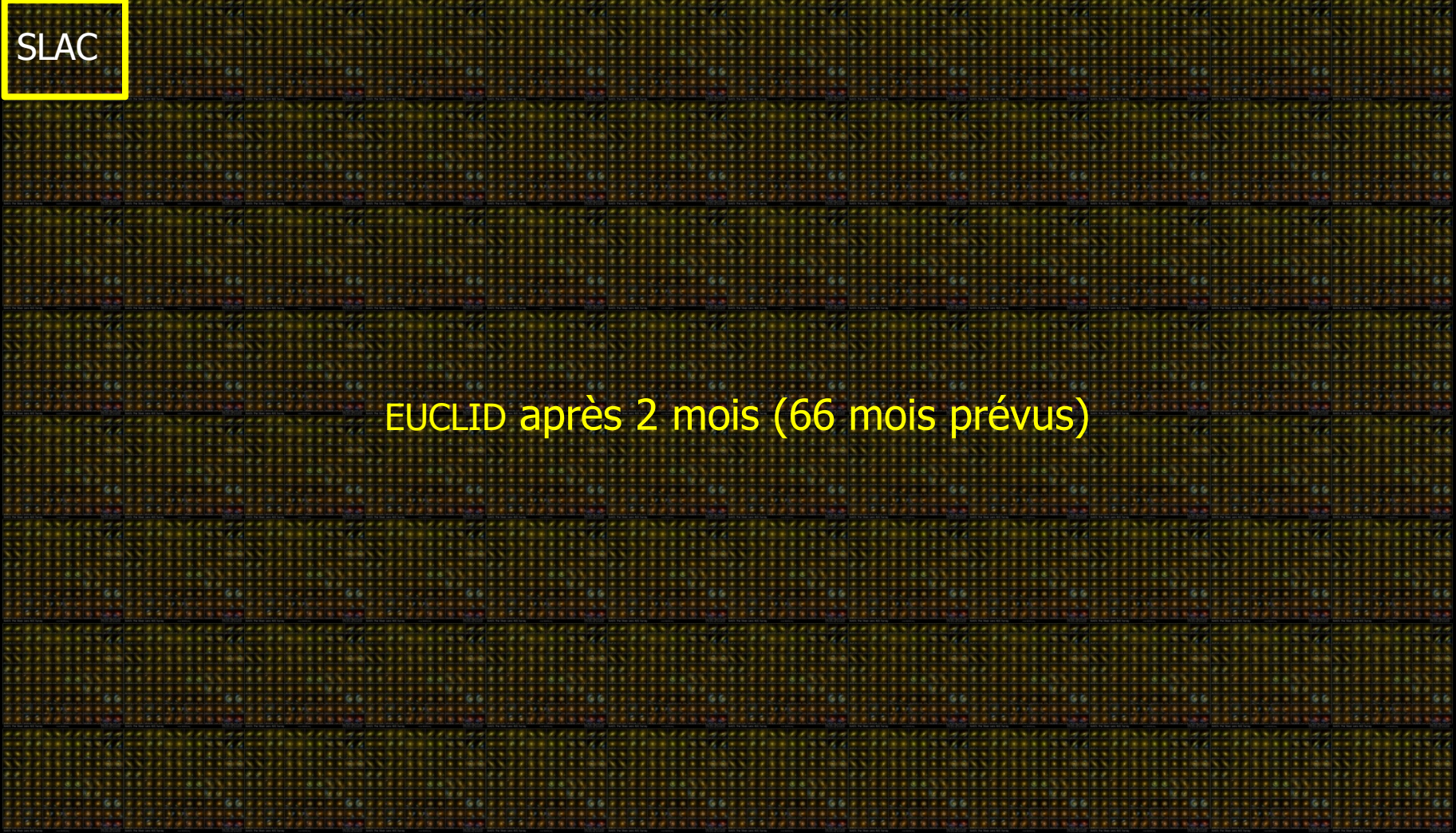
[www.SLACS.org](http://www.SLACS.org)

A. Bolton (U. Hawai'i IfA), L. Koopmans (Kapteyn), T. Treu (UCSB), R. Gavazzi (IAP Paris), L. Moustakas (JPL/Caltech), S. Burles (MIT)

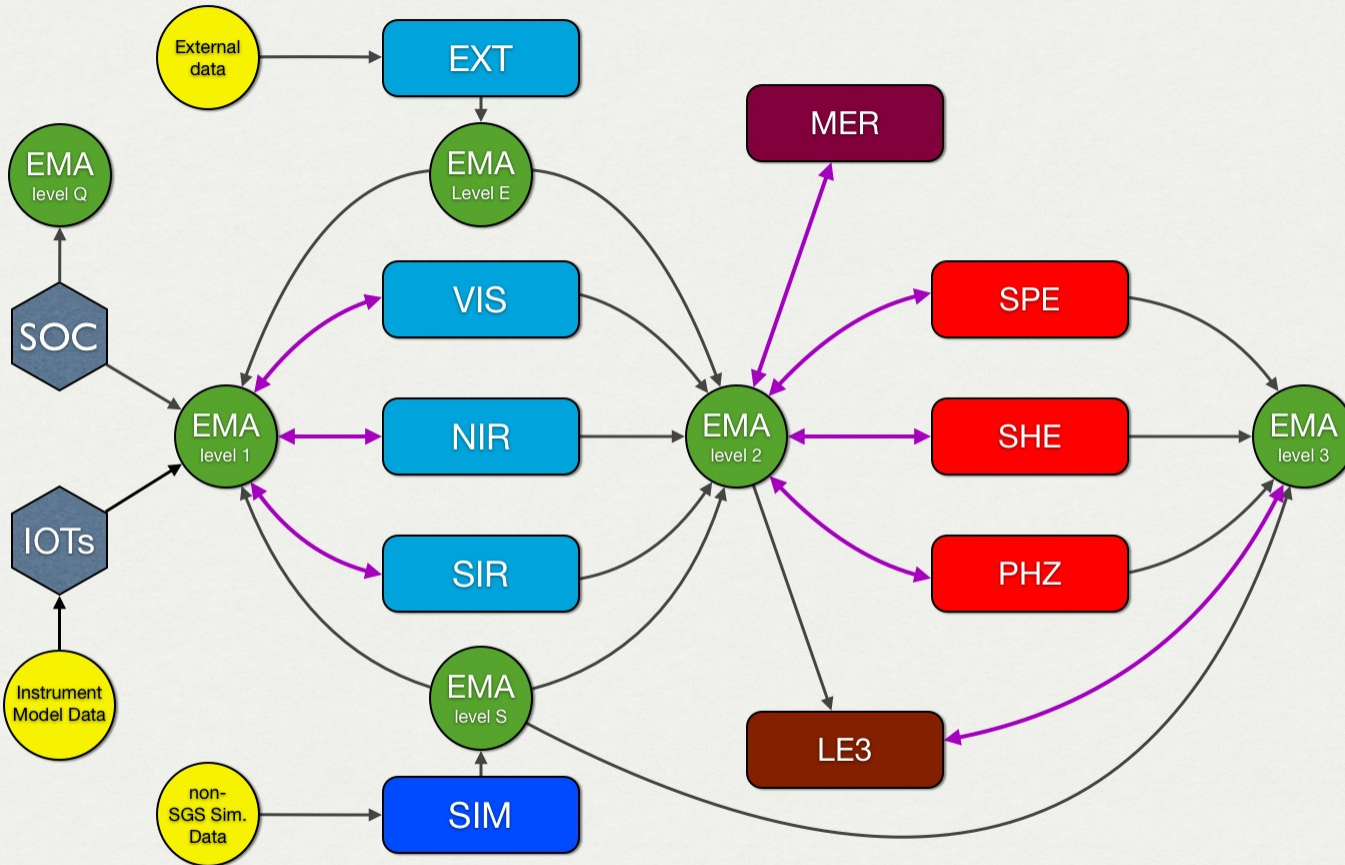
Image credit: A. Bolton, for the SLACS team and NASA/ESA

SLAC

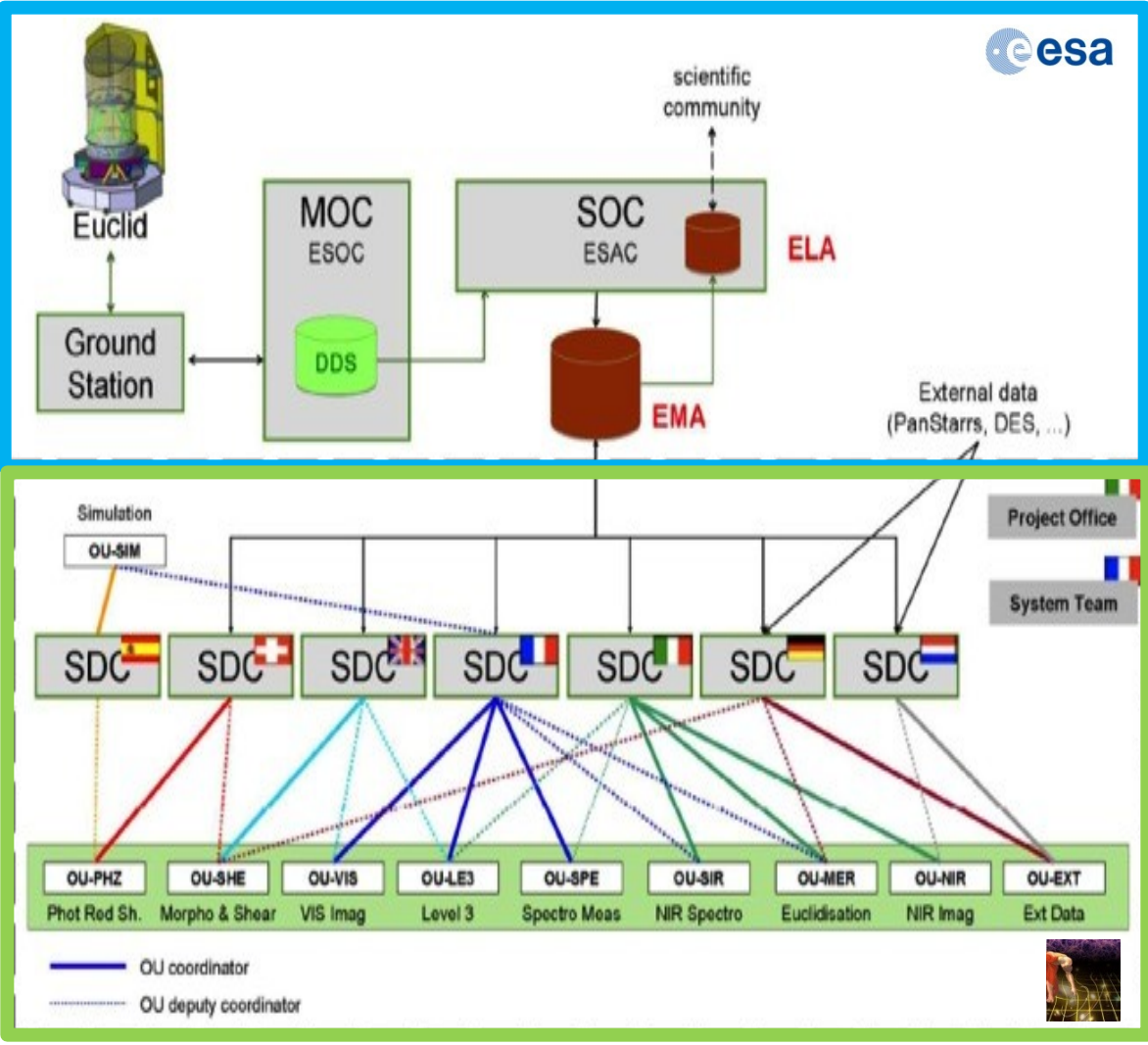
EUCLID après 2 mois (66 mois prévus)



# Euclid: segment sol, définition et validation des algorithmes: les “Organisation Units”



# Euclid: segment sol (SGS), production et analyse des données



Organisation complexe:

- 10 Organisation Units
- 7 Science Data Centers

Data: énorme, hétérogène

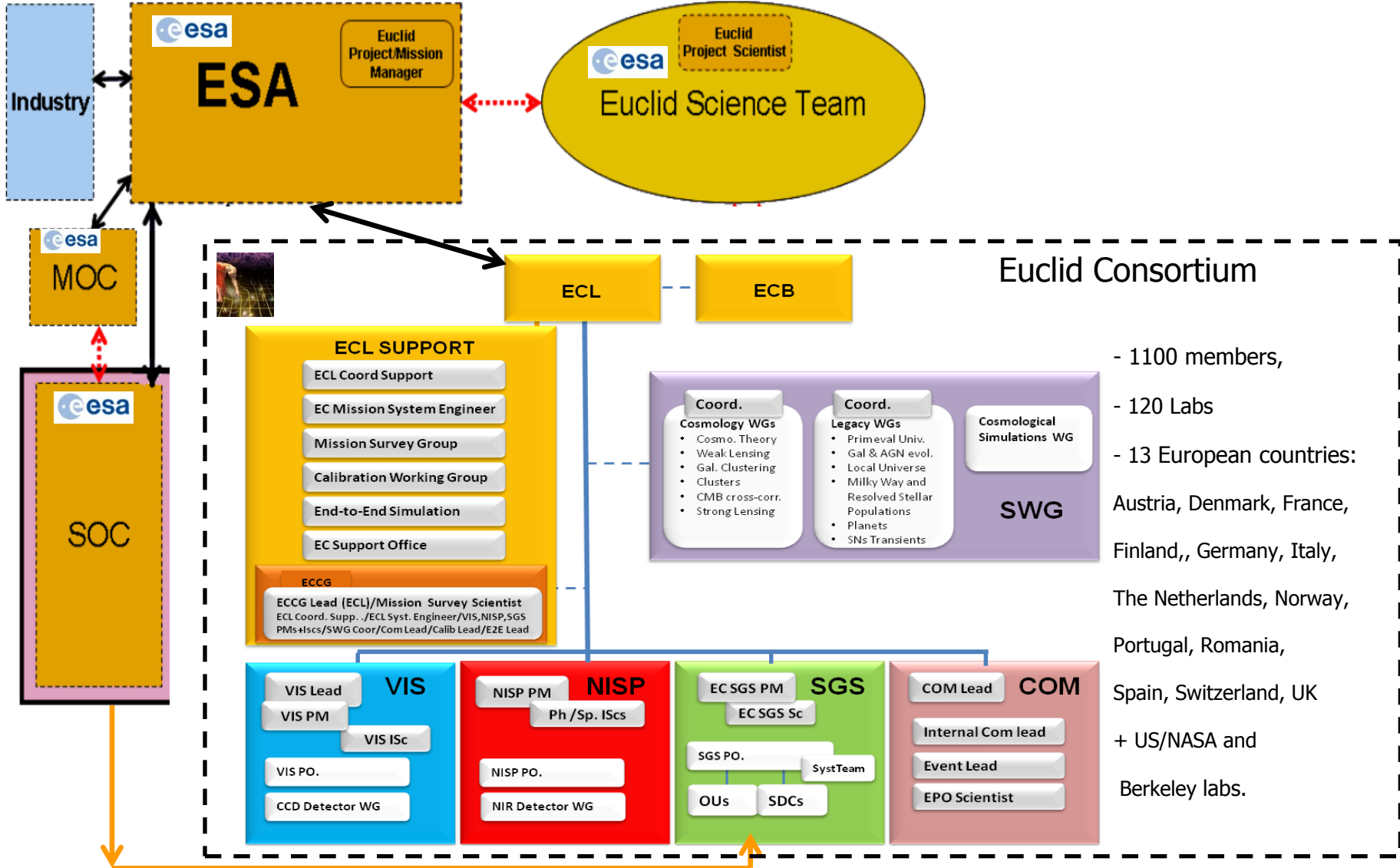
- imagerie et morphometrie, photometry spectroscopie
- provenant de télescopes sol et espace
- 20-30 Pbytes
- > 10<sup>10</sup> sources (>3-sigmas)

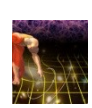
**1ère release Level-3:** 26 mois après le début du relevé.

SGS = 50% de la contribution des agences nationales.



# Euclid: organisation





# En résumé

- L'ESA a sélectionné l'unique mission spatiale au monde conçue pour comprendre l'origine de l'accélération de l'expansion de l'Univers;
- Euclid utilisera 5 sondes cosmologiques indépendantes
- Place l'Europe à la pointe d'une des énigmes les plus fascinantes de la physique et de la cosmologie moderne;
- Euclid = 12 milliards de sources, 50 millions de redshifts;
  - une mine d'or, d'images et de spectres pour l'ensemble de la communauté scientifique pendant plusieurs décennies;
  - un réservoir de cibles uniques pour les autres grands observatoires, JWST, GAIA, E-ELT, TMT, ALMA, le VLT et SKA...
- Une formidable chance pour les jeunes physiciens et astrophysiciens des décennies 2020-2040

**Restez à l'écoute... lancement en 2020!**