



COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

*Chaire Galaxies et Cosmologie*

# Perspectives avec Euclid, WFIRST, LSST, SKA



**Françoise Combes**



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique



# Des télescopes puissants dans l'espace et au sol



→ Euclid, satellite ESA: lancement 2020: Principal but Energie noire

→ WFIRST de la NASA: Energie noire et exoplanètes (~2025-30?)

→ LSST: Large Synoptic Survey Telescope: 8m grand champ au Chili  
Aspect temporel: Observer tout le ciel en 3 jours



→ SKA: Square Kilometer Array: Réseau d'antennes, Australie et Afrique du Sud, Plusieurs fréquences,  $\lambda = 2\text{cm}$  à  $6\text{m}$



# Les principaux paramètres

**1-Nature de l'énergie sombre:  $w$        $P = w \rho$**

Equation d'état de l'énergie noire, 5 outils: Lentilles faibles, SNIa, BAO, "Redshift Space Distorsions" (RSD), Amas de galaxies

**2-Gravité au-delà d'Einstein:  $\gamma$**

Test de la gravité modifiée, mesure de l'exposant  $\gamma$  de la croissance

**3- Origine des structures cosmiques**

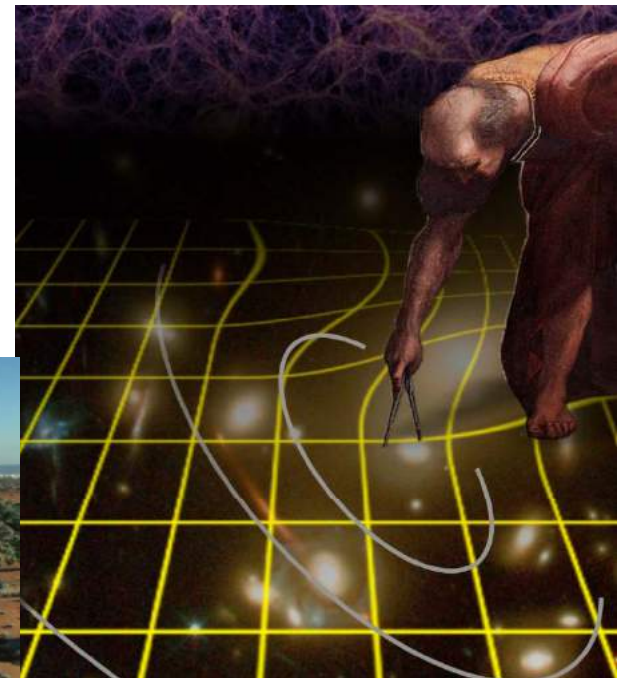
Améliorer d'un facteur 20,  $n =$  index spectral,

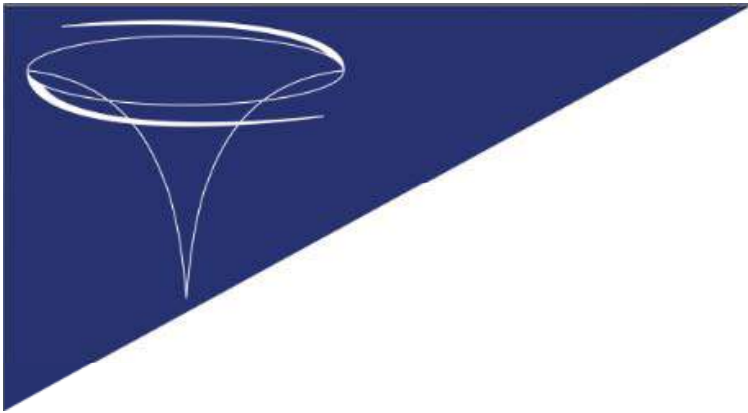
$\sigma_8 =$  amplitude du spectre de puissance,

$f_{NL} =$  non-gaussianités

**4-Tester l'inflation?**

CMB, fond d'ondes gravitationnelles





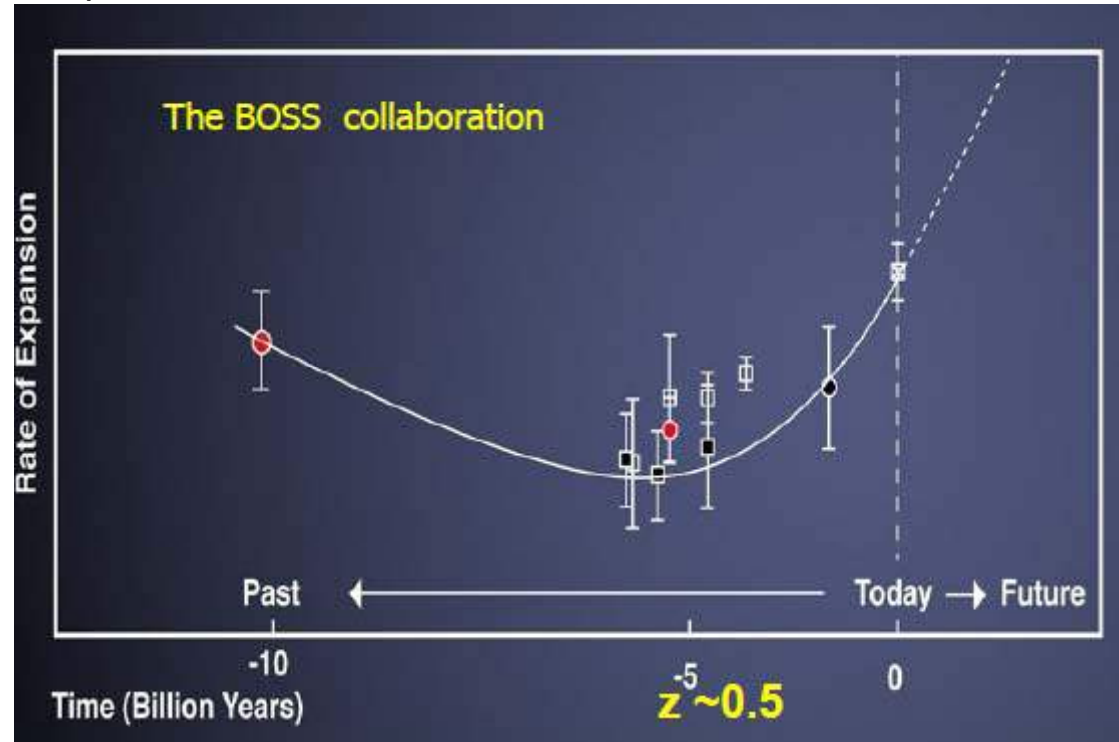
# Transition entre CDM et DE

L'énergie sombre ne devient significative que récemment  $z \sim 0.5$

La transition est très proche et on peut la voir en optique et proche infrarouge

→ Domaine de Euclid

$da/dt$

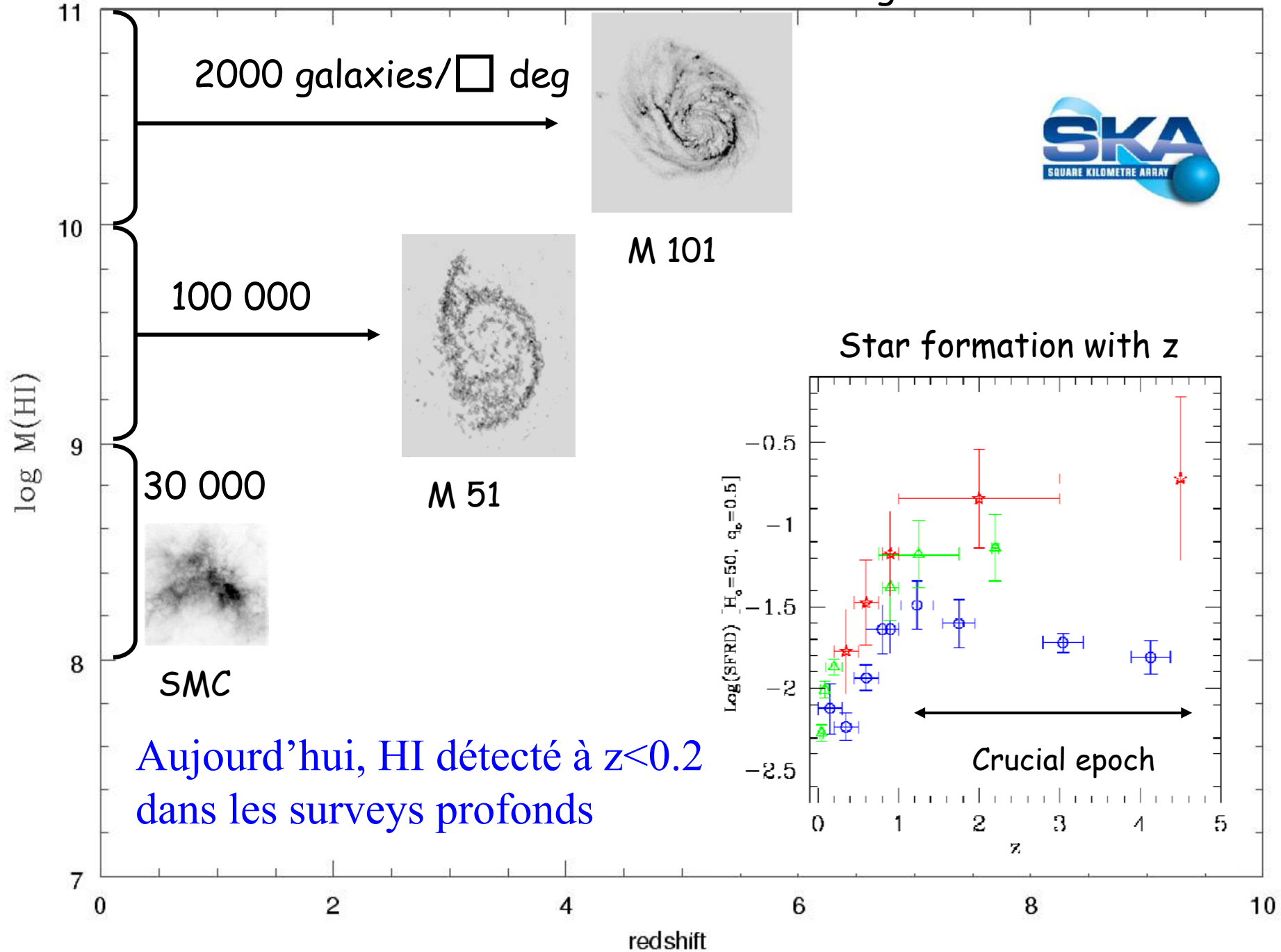


$z \sim 2$

détermination SDSS

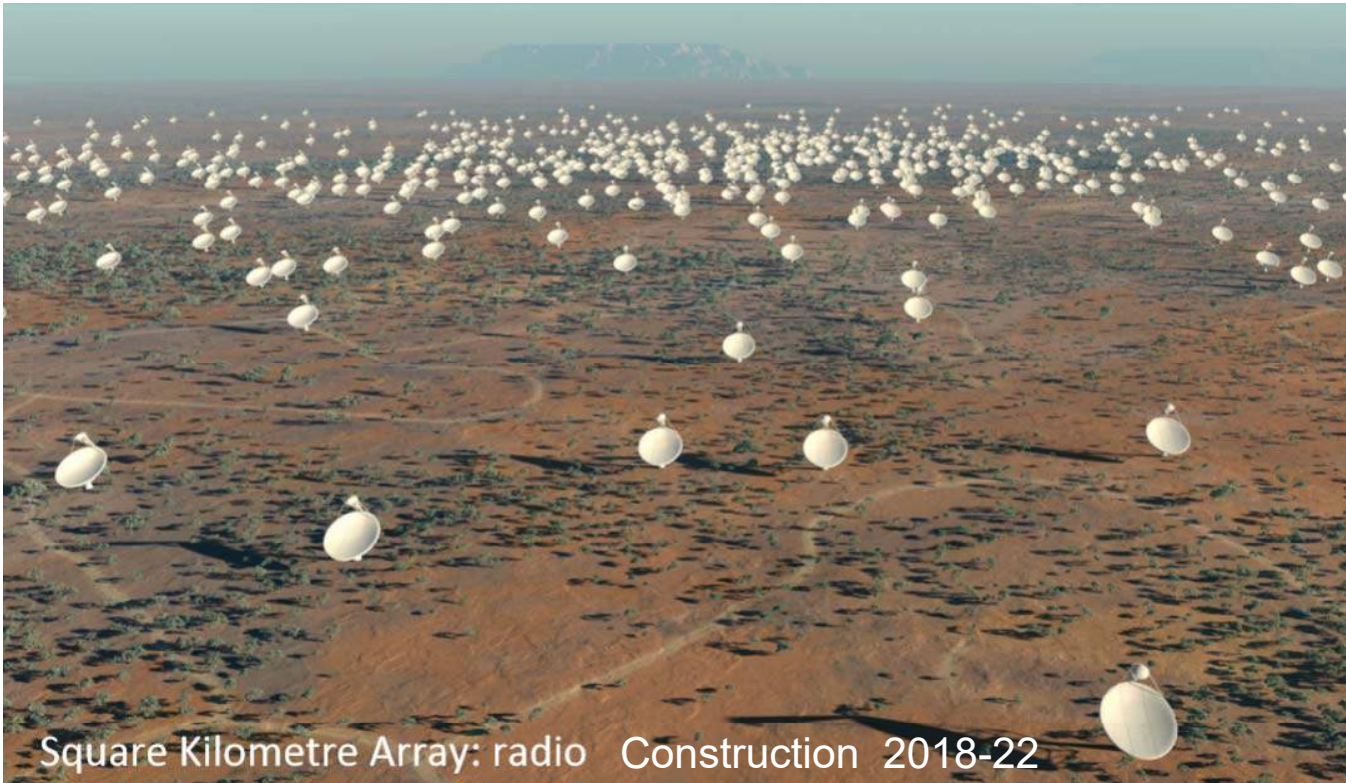
Bien que Planck ait déjà donné des contraintes avec le CMB lensing

# Maximum redshift for a 360 hour integration with SKA

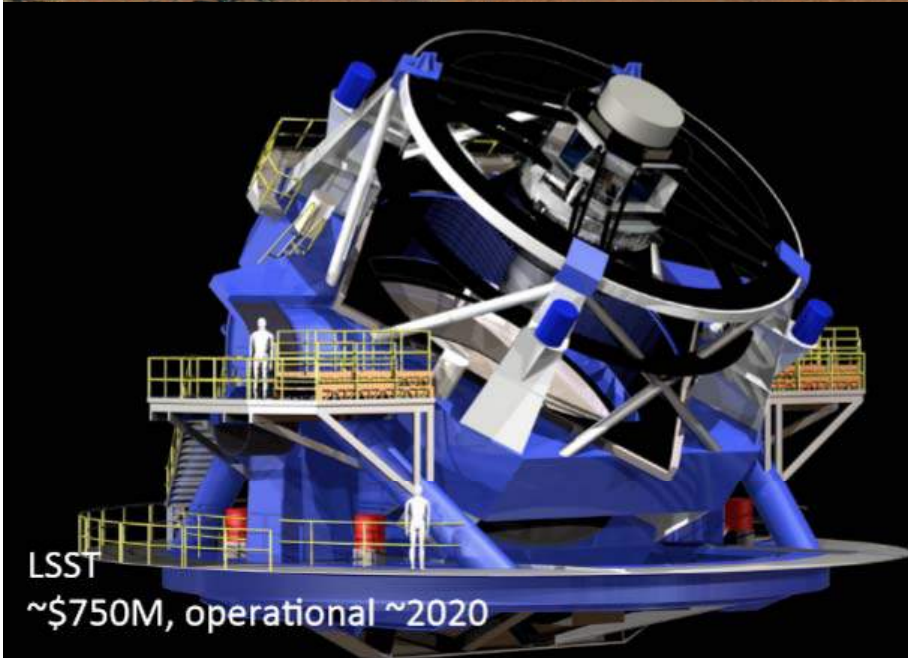


Aujourd'hui, HI détecté à  $z < 0.2$   
dans les surveys profonds

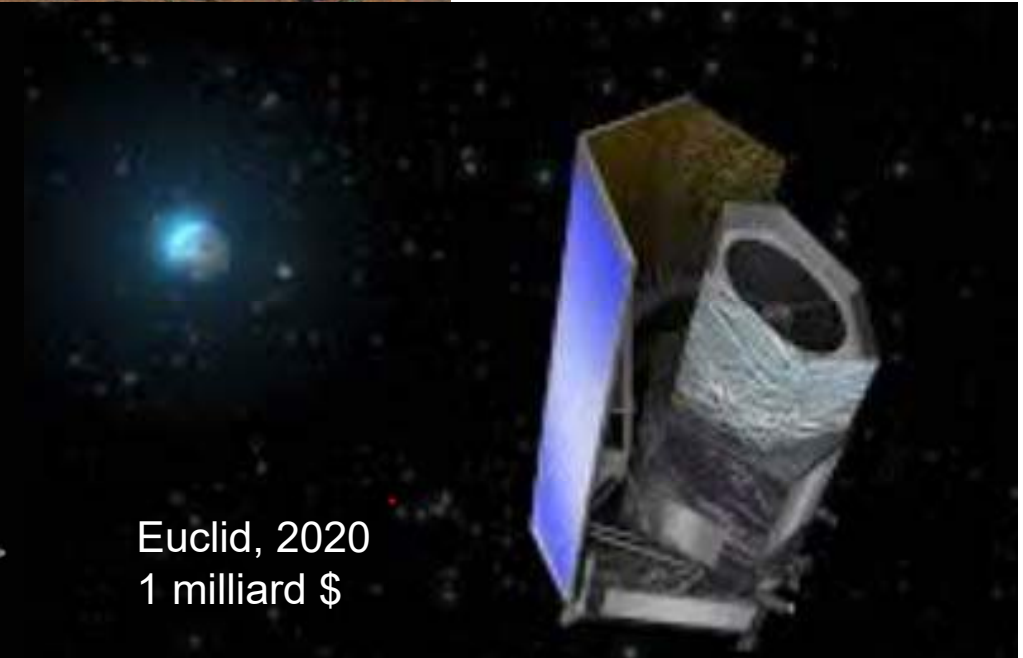
# Grand champ et milliards de galaxies



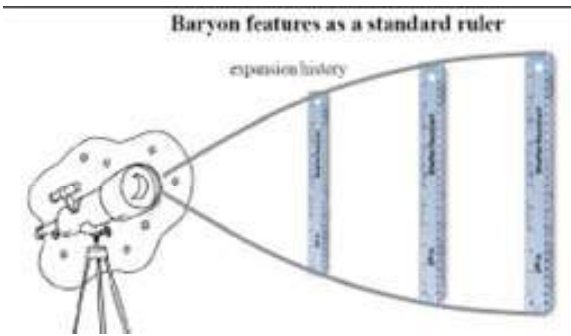
Square Kilometre Array: radio Construction 2018-22



LSST  
~\$750M, operational ~2020



Euclid, 2020  
1 milliard \$

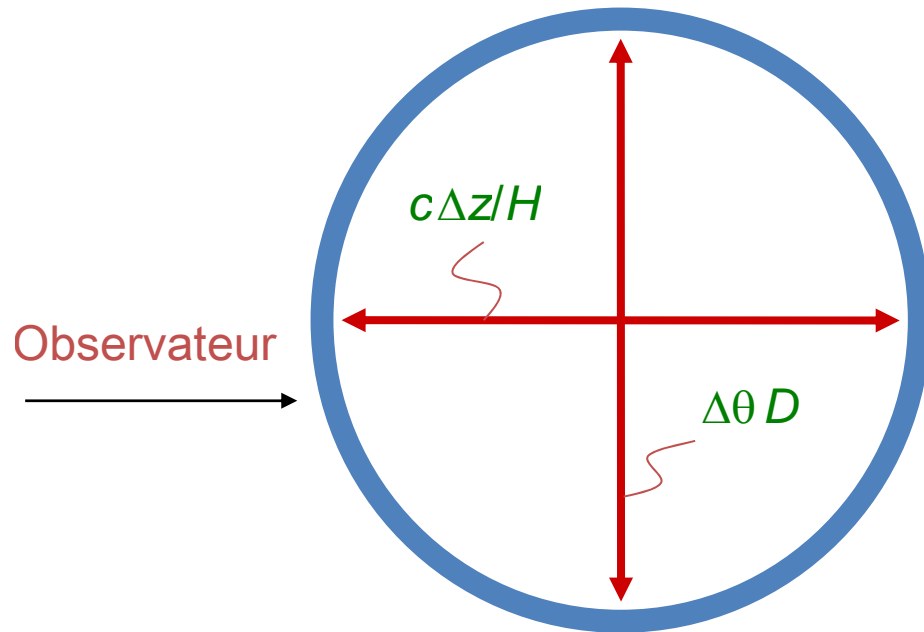


# BAO: Règle standard

## BAO dans la forêt Ly $\alpha$ à $z=2.3$

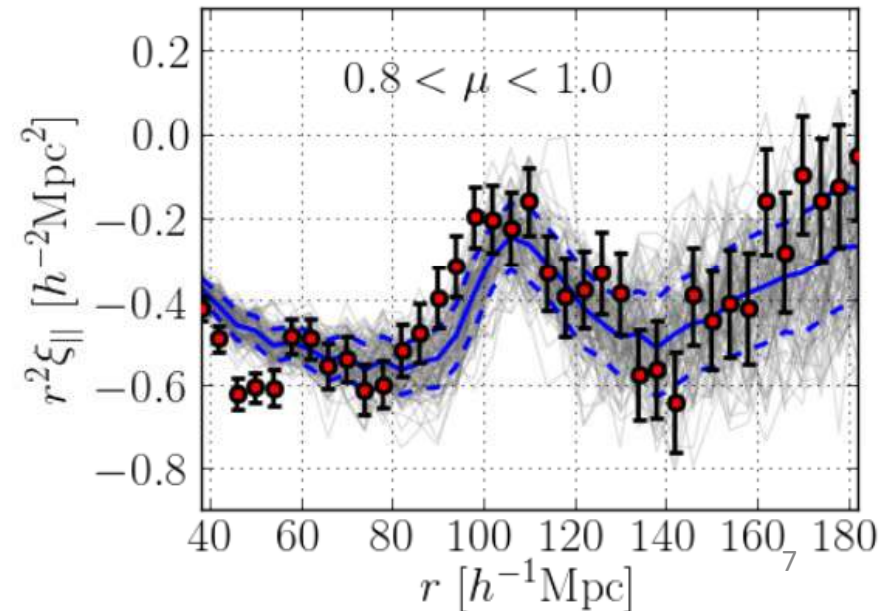
*Delubac et al 2014*

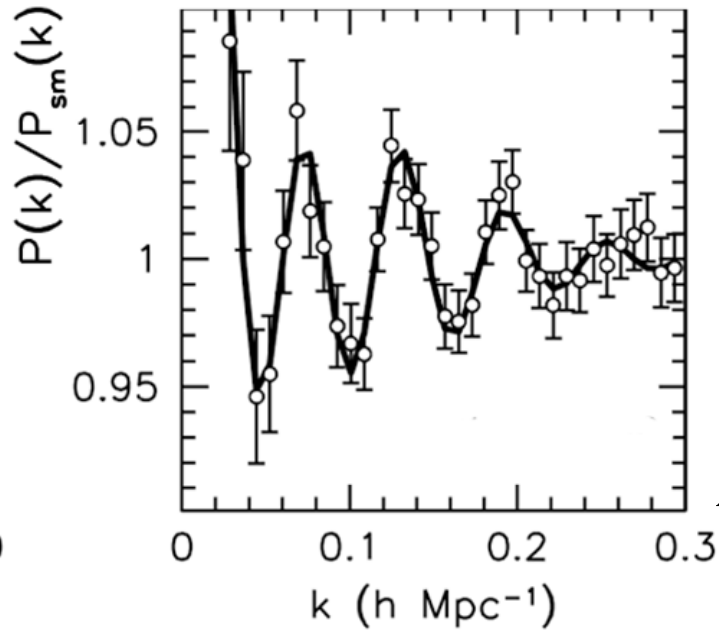
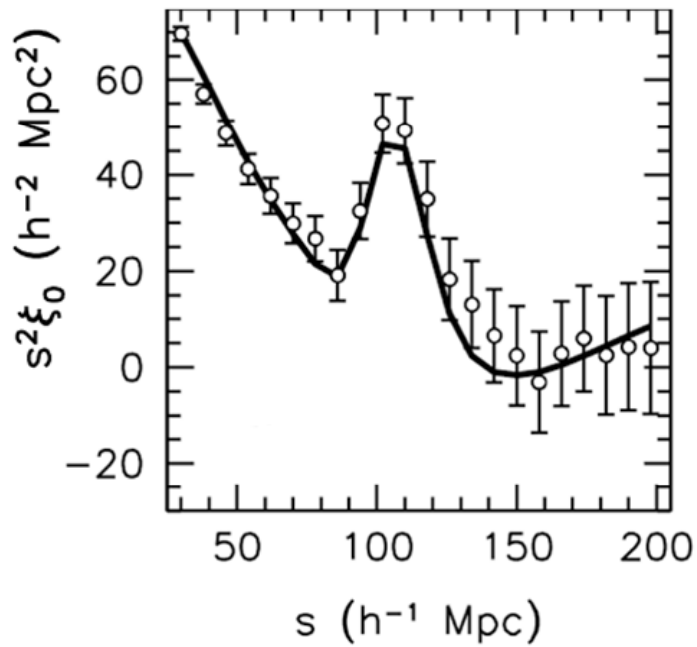
Points rouges comparés à la simulations des quasars (gris)  
 $r_d$  horizon sonore à l'époque  
 $D_A$  dist. angulaire,  $D_H = c/H$   
 Tension avec Planck à  $2.5\sigma$



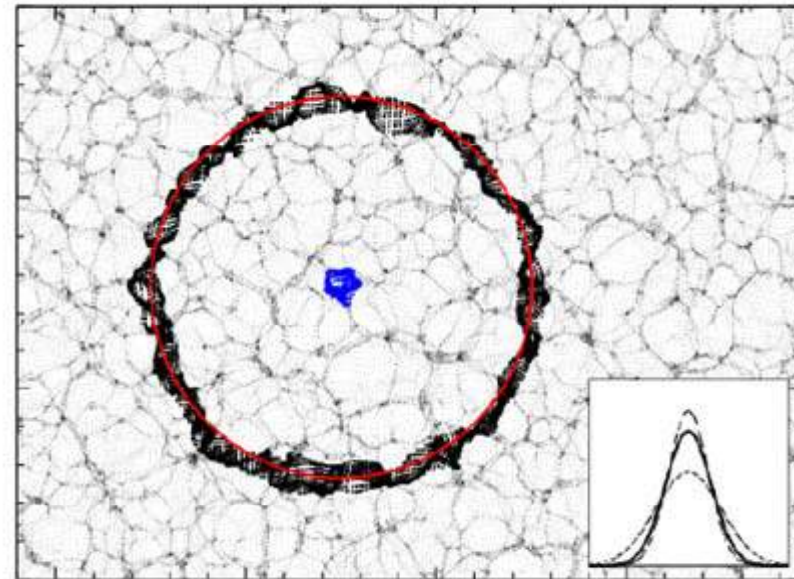
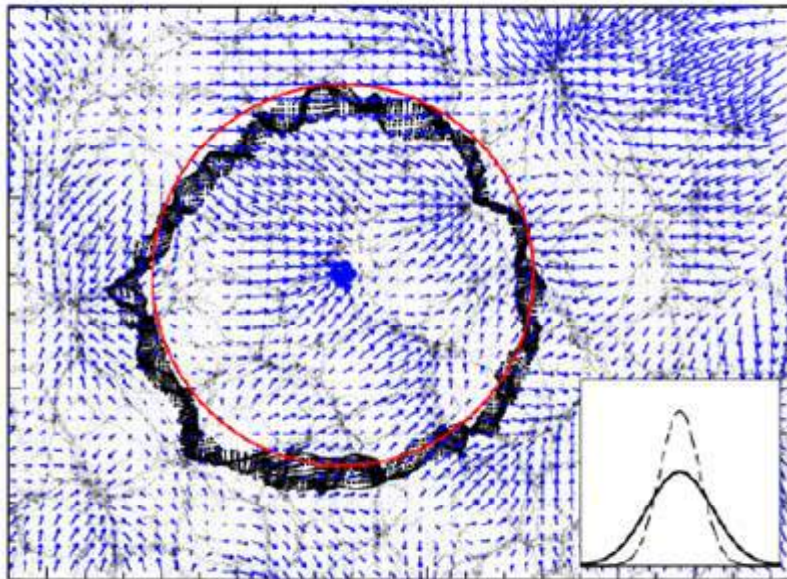
$$c\Delta z/H = \Delta\theta D$$

→ Possibilité de déterminer  $H(z)$





Une onde spatiale  
( $100/h \text{ Mpc}$ )  
→ Oscillations dans  
 $P(k)$ , autour de  
 $k=0.1 \text{ h/Mpc}$   
*Anderson et al 2014*



Corrections des vitesses particulières: *Padmanabhan et al 2012*



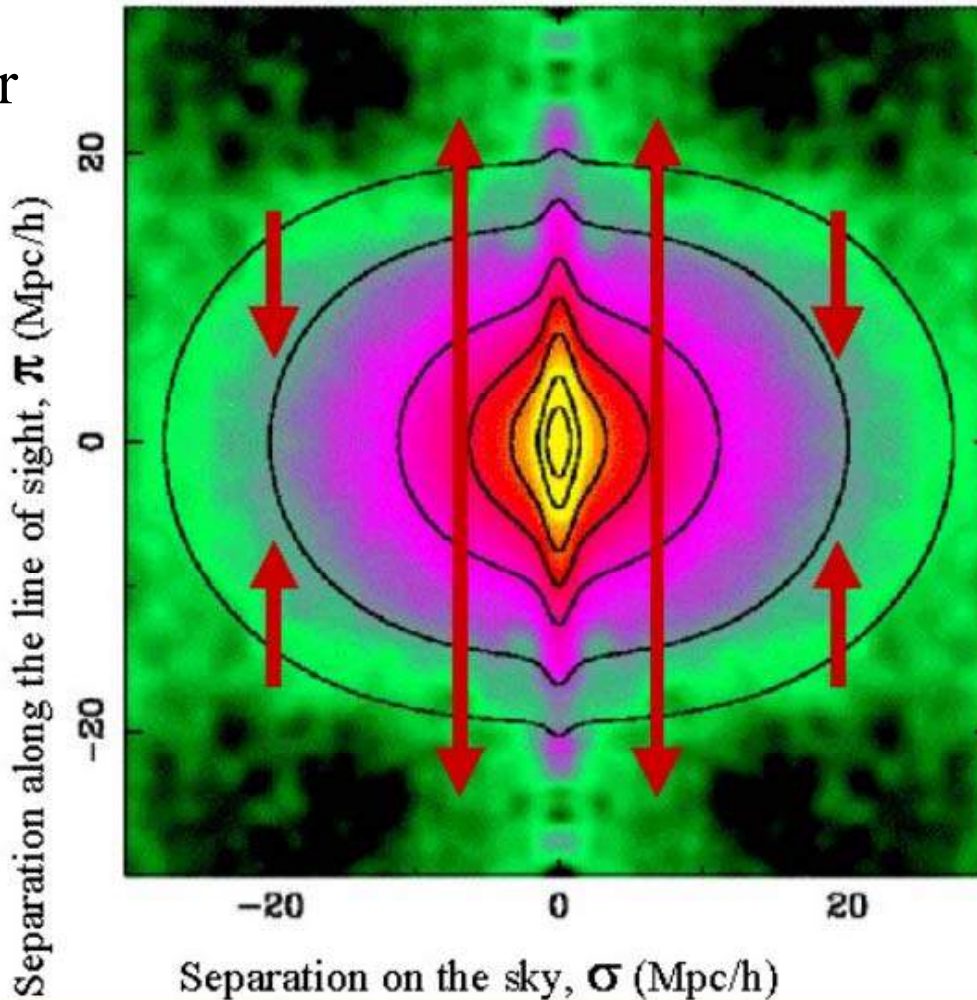
# RSD « Redshift space distortions »

Distortions dues aux vitesses particulières sur la ligne de visée (doigts de Dieu!)

Effet Kaiser dans les amas: accrétion systématique

Non aléatoire; permet de déterminer

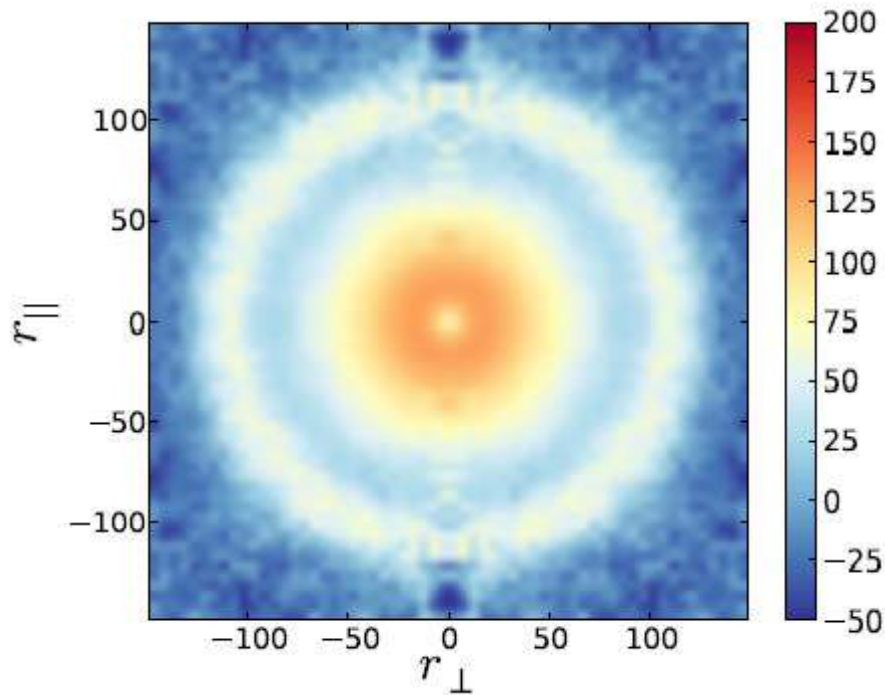
$\beta = \Omega_m^{0.6}/b$   
biais  $\delta_{\text{galaxies}} = b (\delta_{\text{mass}})$   
et  $\sigma_{\text{gal}}$



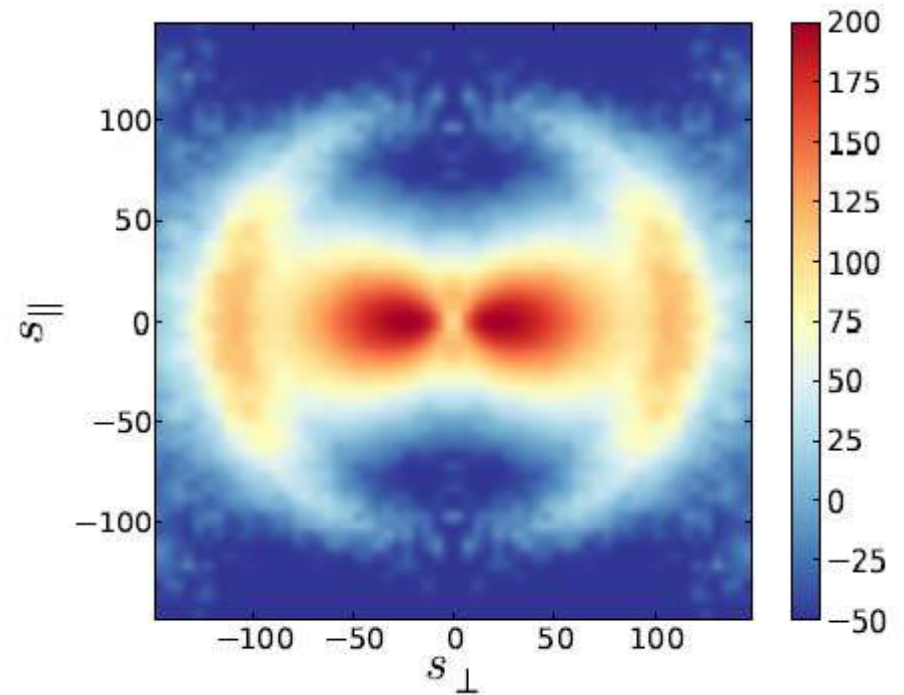
The 2dF Galaxy Redshift Survey Team (2001)

# Simulation des corrélations

Espace réel



Espace des redshifts

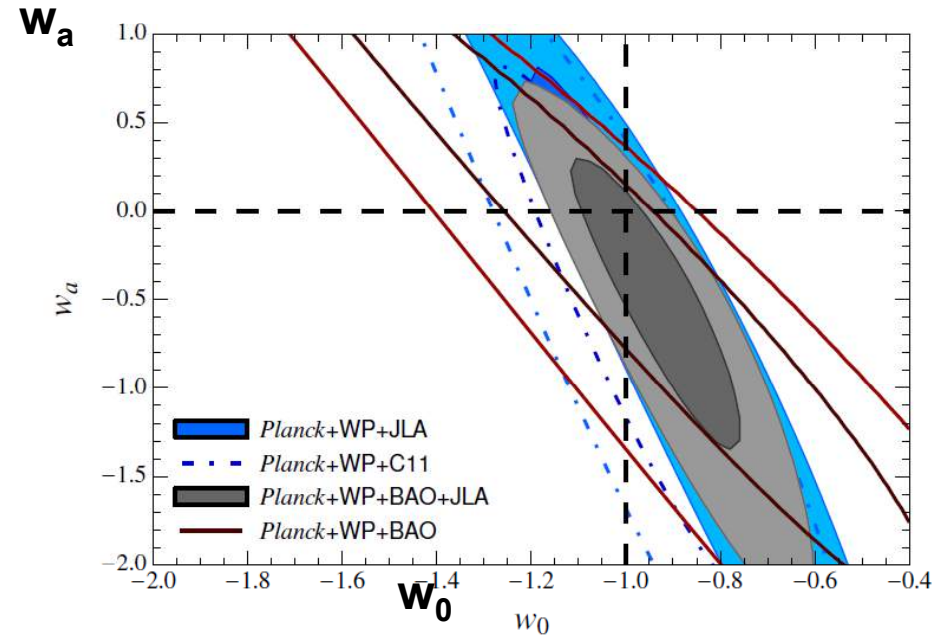
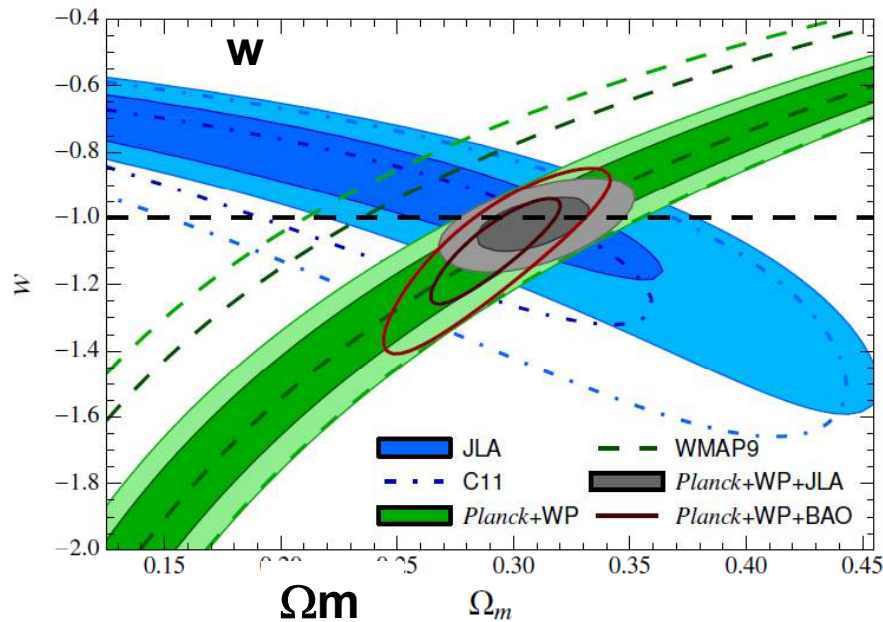


Fonction de corrélation des galaxies dans 160 simulations  
Perpendiculaire ( $\perp$ ) et parallèle ( $\parallel$ ) à la ligne de visée

# Univers en accélération: SNIa

2003-2008 SNLS survey, collaboration France-Canada +SDSS=JLA  
 SNLS-II (5 ans) avec calibrations -- 740 SN  $0 < z < 1$

$$\Omega_m = 0.295 \pm 0.034 \quad w = -1.018 \pm 0.057$$



*Betoule et al 2014*

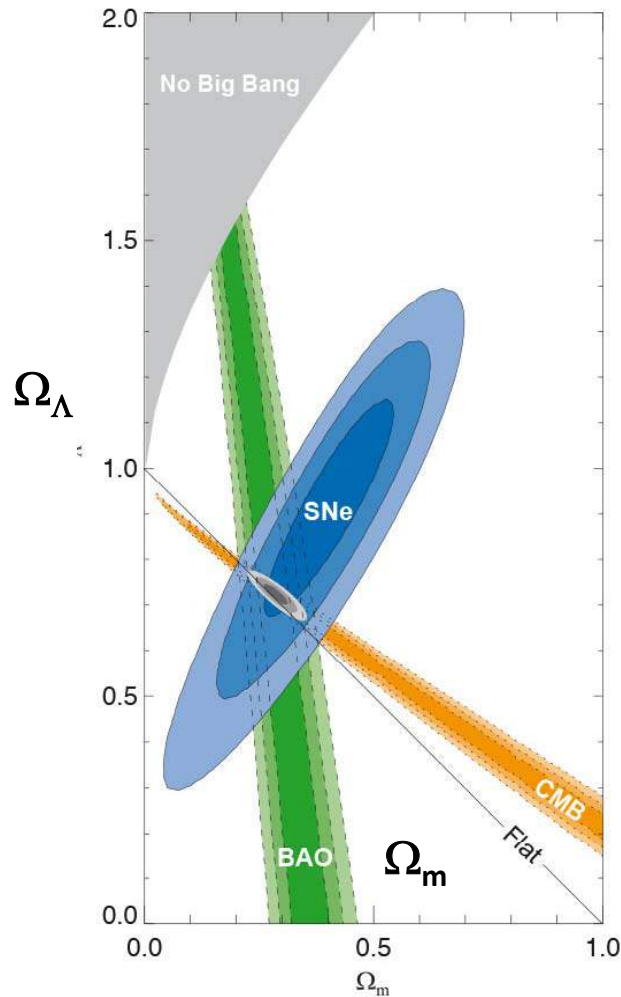
En supposant l'univers plat

$$P = w \rho \quad w(a) = w_0 + w_a (1-a)$$

avec  $a = 1/(1+z)$



*Kowalski et al 2008*



# CMB et énergie noire

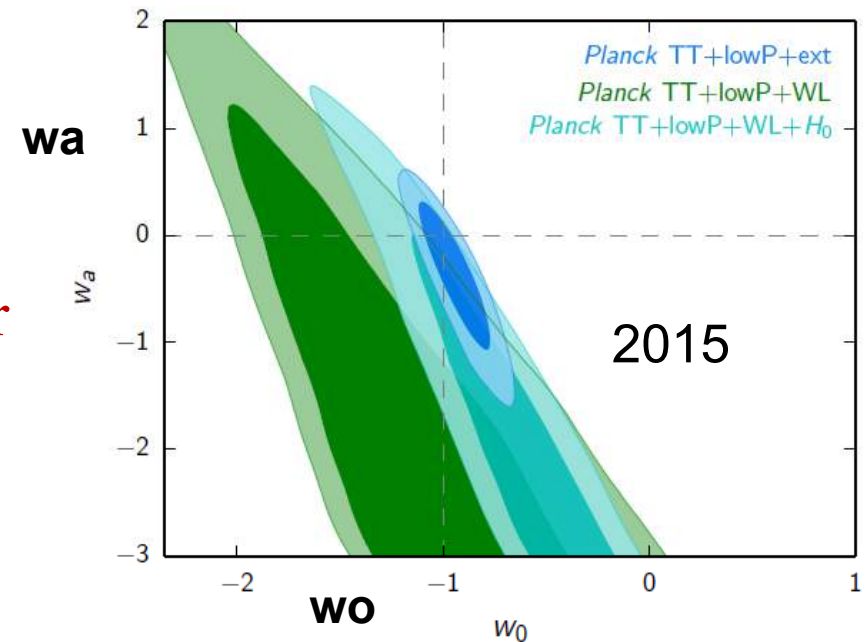
**Modèle de concordance**, entre CMB,  
Supernovae Ia, Structures à grande échelle  
(lentilles faibles, BAO=Oscillations Baryoniques

$$P = w \rho \quad w(a) = w_0 + w_a (1-a)$$

$$w_0 \sim -1$$

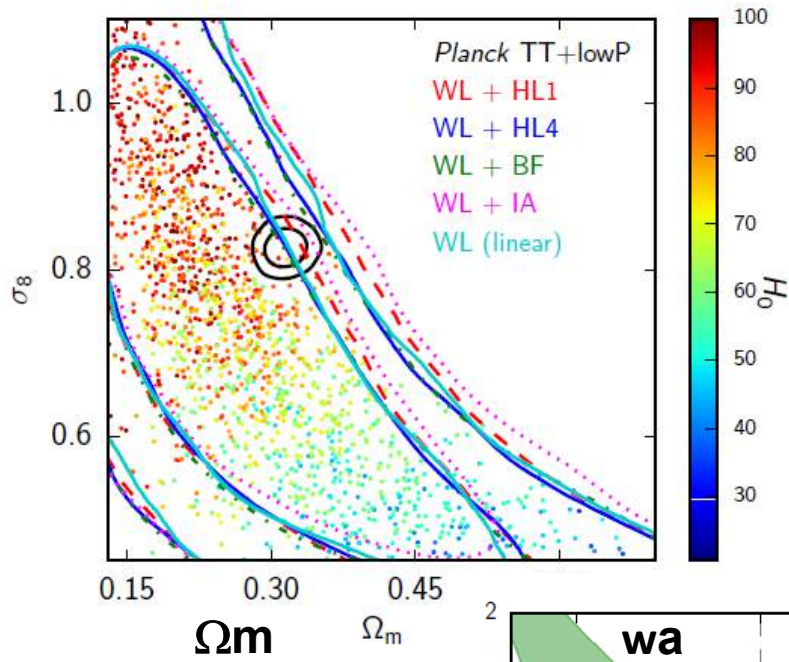
$$w_a \sim 0$$

**Tension pour**  
 $H_0$  et  $\sigma_8$



# Contraintes récentes: Planck + autres

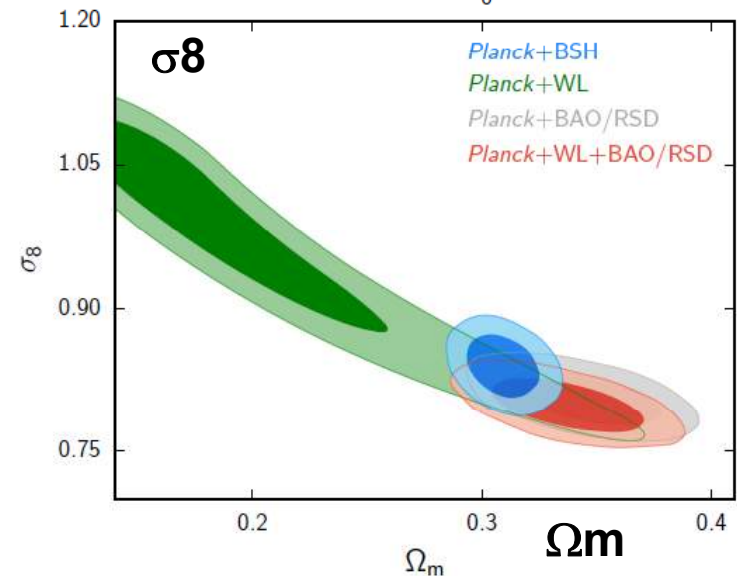
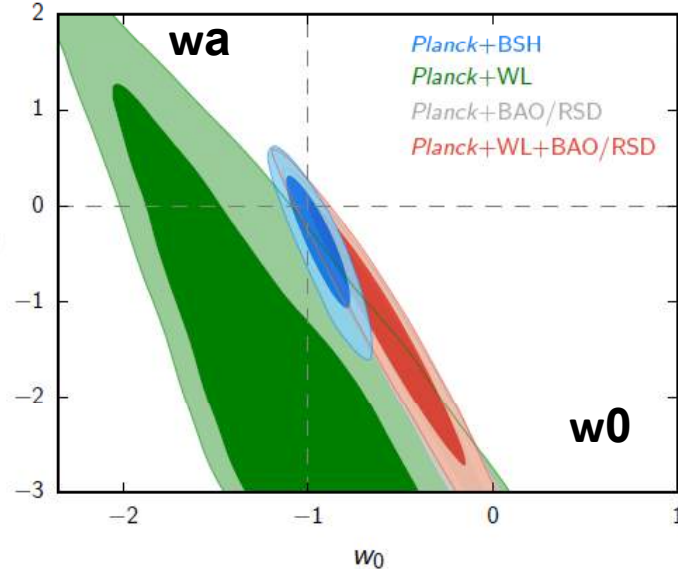
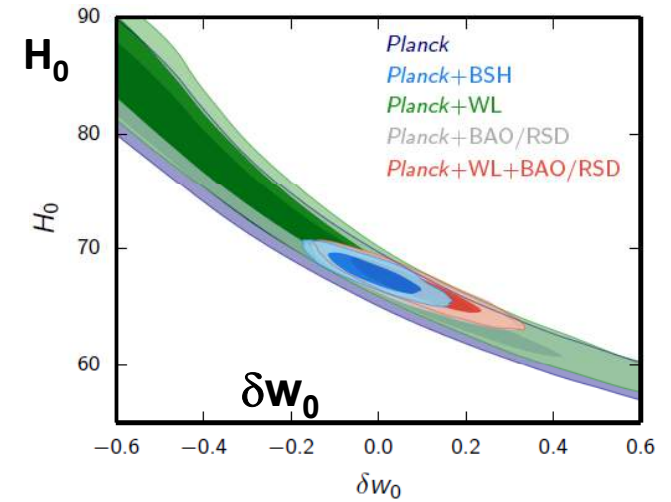
$\sigma_8$



HL: Halo Fit, BF:AGN feedback

IA :intrinsic alignment

BSH:  
BAO+SNIa+ $H_0$



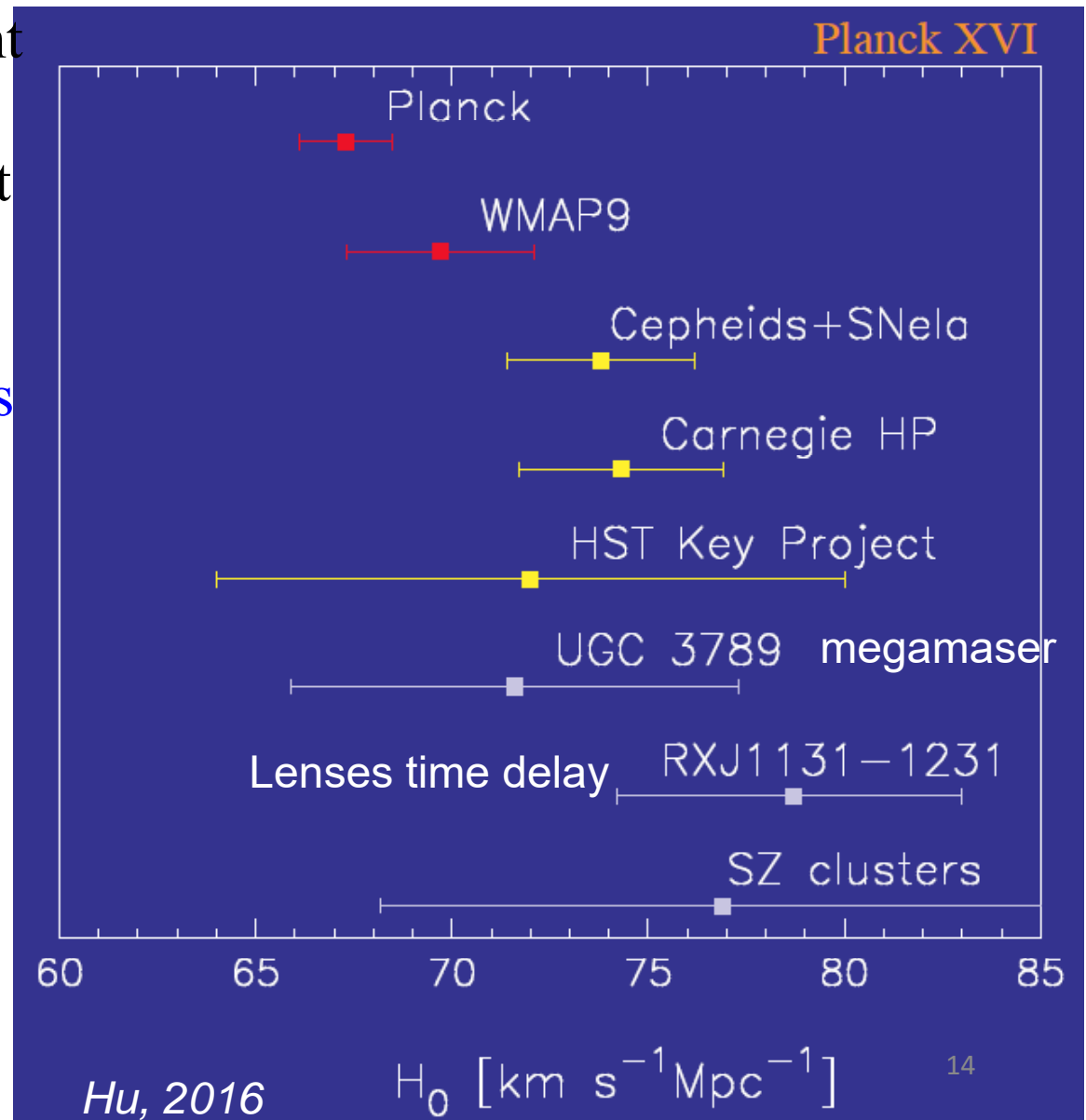
# Determination de $H_0$

Les mesures directes donnent des valeurs plus grandes que celles déduites indirectement du CMB

→ Tension: changement dans le modèle?  $\nu$ , DE?  
Variations avec  $z$ ?

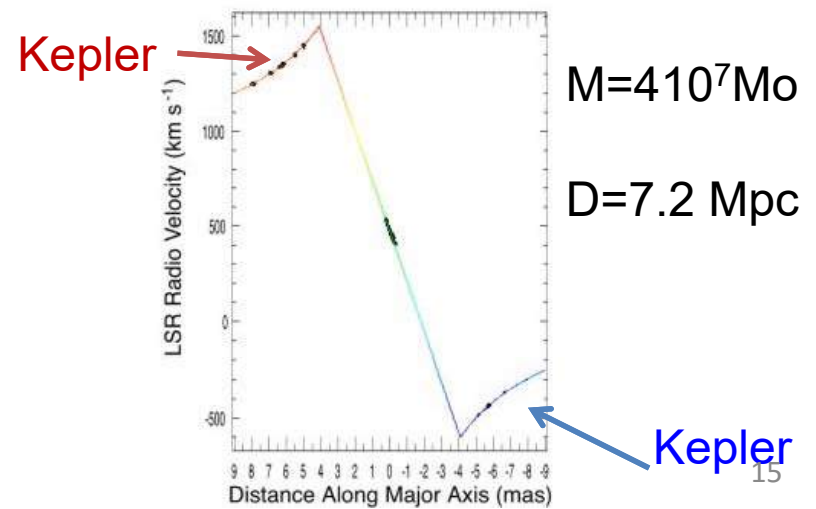
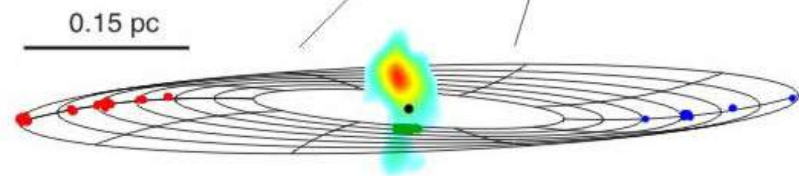
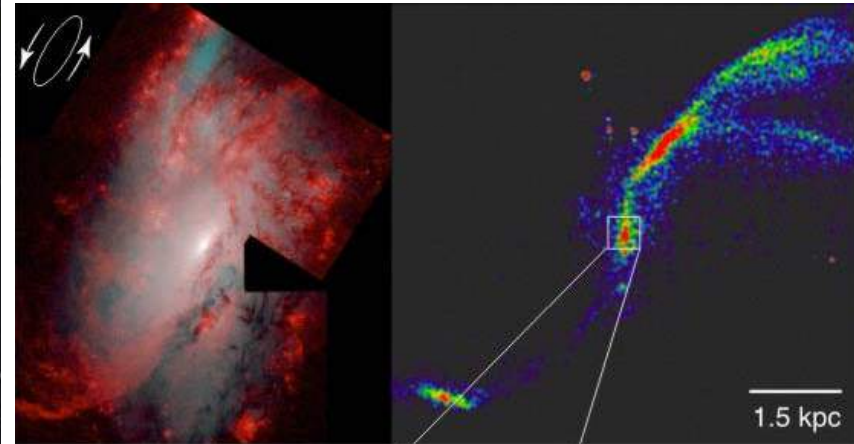
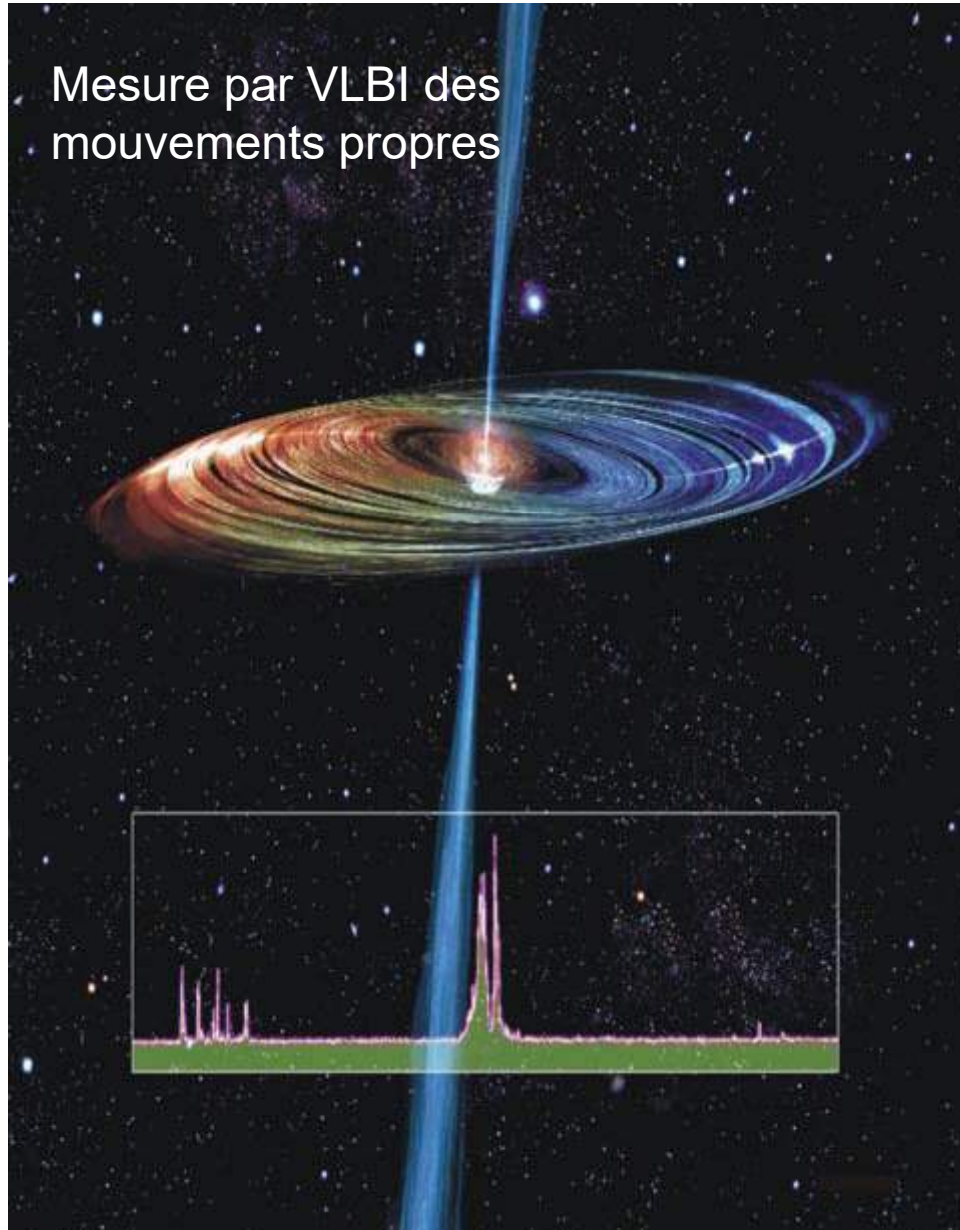
Pour faire remonter  $H_0$  déduit du CMB, il faut  $\Delta w = -0.23$

→ Change l'expansion à  $z$  intermédiaire



# NGC 4258: masers H<sub>2</sub>O

Jets radio

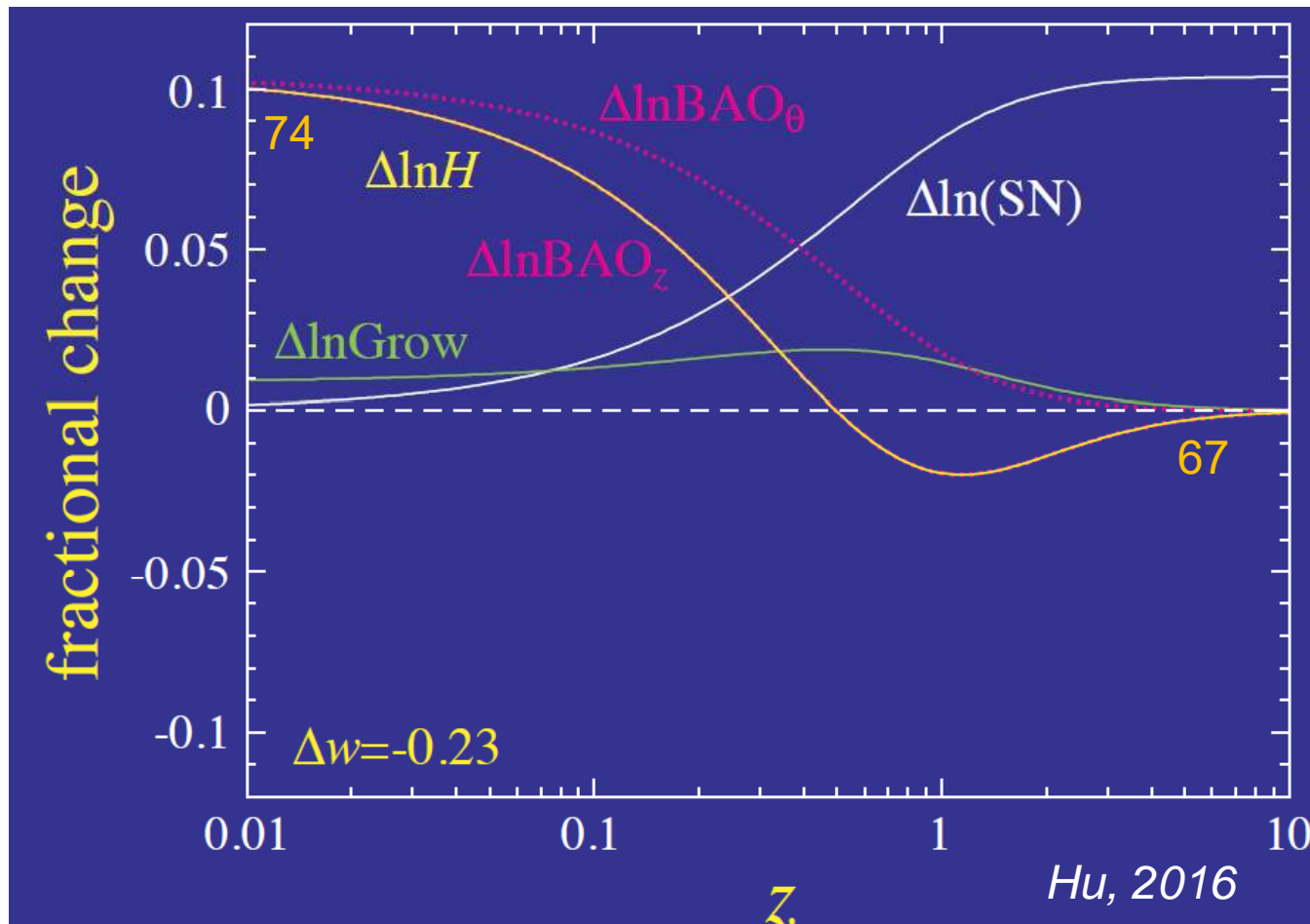


# Implications sur les autres tests de $H_0$

$$H^2(z) = \frac{8\pi G}{3} [\rho_M(1+z)^3 + \rho_R(1+z)^4 + \rho_{DE}(z)] - \kappa(1+z)^2$$

BAO<sub>θ</sub> perpendiculaire à la ligne de visée  $\theta = d/D_A \rightarrow$  mesure  $D_A$

BAO<sub>z</sub> parallèle, mesure  $\Delta z/H \rightarrow$  mesure  $H$



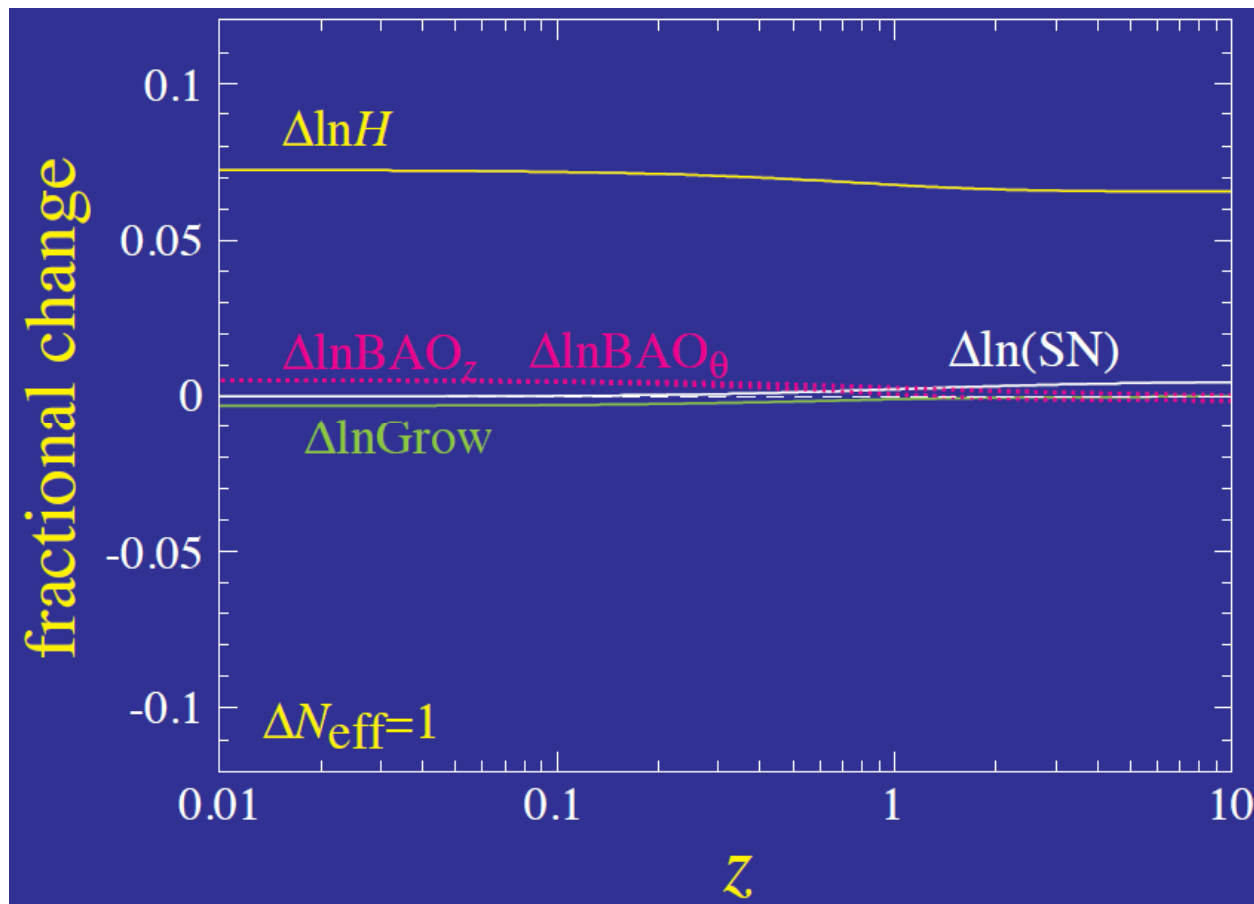
Problèmes avec les SNIa  
+Croissance des Structures

→ Une vraie tension



# Possibilité de neutrinos supplémentaires

L'existence d'une espèce relativiste ( $\sim eV$ ) supplémentaire à la recombinaison, pourrait faire revenir  $H_0$  en accord avec les mesures locales directes



→ Tous les indicateurs en accord

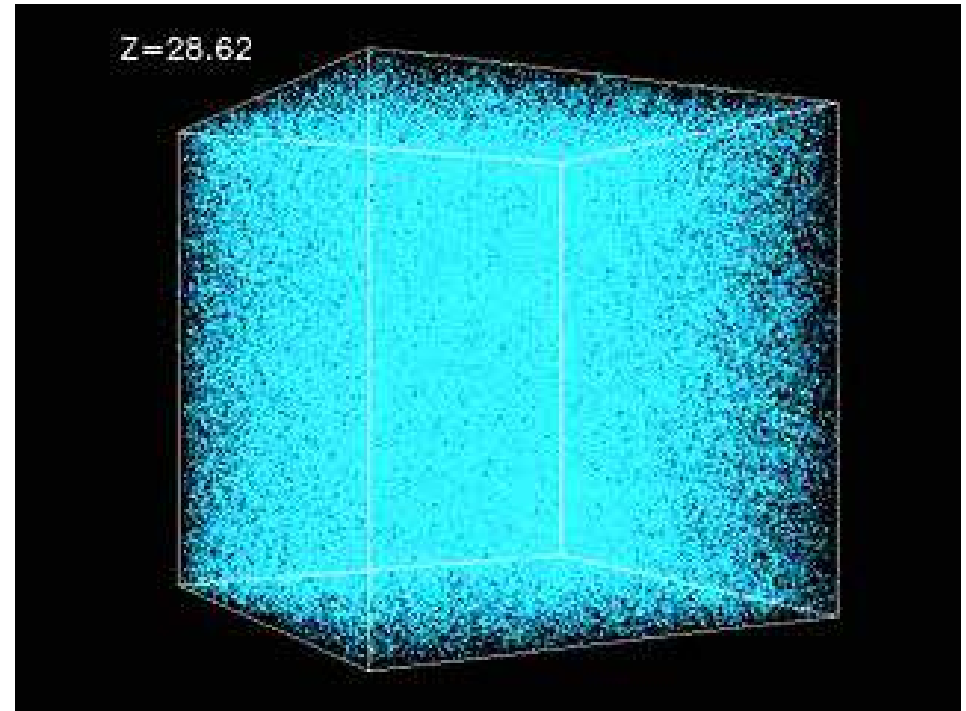


## Taux de croissance comme test de la gravité

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

Taux de croissance  $\gamma = d\log(\delta) / d\log(a)$

La croissance produit des vitesses particulières → RSD



Le taux de croissance sera mesuré par

1- lentilles faibles (WL) et tomographie

2- Amas de galaxies et « redshift-space distortions » (RSD)

# Le concept Euclid

## Une mission de l'ESA

Télescope de 1.2m

### 2 instruments:

--Grand champ optique VIS 36 x 4k x 4k CCD  
576Mpixels, 0.11"/pix, 0.53 deg<sup>2</sup> FOV

--Proche IR NISP 64Mpix, 0.3 "/pix, Photomètre  
+ Grism slitless spectro

Orbite L2, Lancement en 2020

2 tonnes, 850 Meuros

Mission de 6.25ans + survey (exoplanètes, SN)  
15 000 deg<sup>2</sup> + 40deg<sup>2</sup> 2 mag plus profond



# EUCLID: lancement en 2020

**Photo-z:** Ground based Photometry and Spectroscopy

**Legacy = 12 milliard de sources, 50 million de redshifts**

SURVEYS In ~6 years					
	Area (deg <sup>2</sup> )	Description			
Wide Survey	<b>15,000 deg<sup>2</sup></b>	Step and stare with 4 dither pointings per step.			
Deep Survey	<b>40 deg<sup>2</sup></b>	In at least 2 patches of > 10 deg <sup>2</sup> 2 magnitudes deeper than wide survey			
PAYLOAD					
Telescope	1.2 m Korsch, 3 mirror anastigmat, f=24.5 m				
Instrument	VIS	NISP			
Field-of-View	0.787×0.709 deg <sup>2</sup>	0.763×0.722 deg <sup>2</sup>			
Capability	Visual Imaging	NIR Imaging Photometry			NIR Spectroscopy
Wavelength range	550– 900 nm	Y (920-1146nm),	J (1146-1372 nm)	H (1372-2000nm)	1100-2000 nm
Sensitivity	24.5 mag 10σ extended source	24 mag 5σ point source	24 mag 5σ point source	24 mag 5σ point source	3 10 <sup>-16</sup> erg cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> 3.5σ unresolved line flux
	<b>Shapes + Photo-z of <math>n = 1.5 \times 10^9</math> galaxies</b>			<b>z of <math>n=5 \times 10^7</math> galaxies</b>	

**Possibility other surveys:** SN and/or  $\mu$ -lens surveys, Milky Way ?



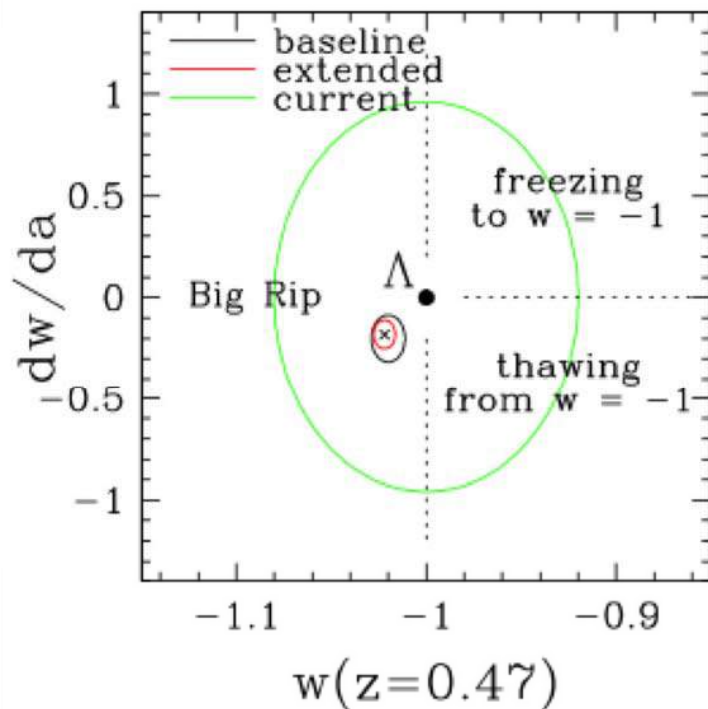
# WFIRST: Wide Field IR Survey Telescope

Même taille de télescope que Hubble, mais  
100 fois plus de champ!

Milliards de galaxies, + coronographe: image  
de 12 exoplanètes proches + découverte de  
2600 par micro-lentille



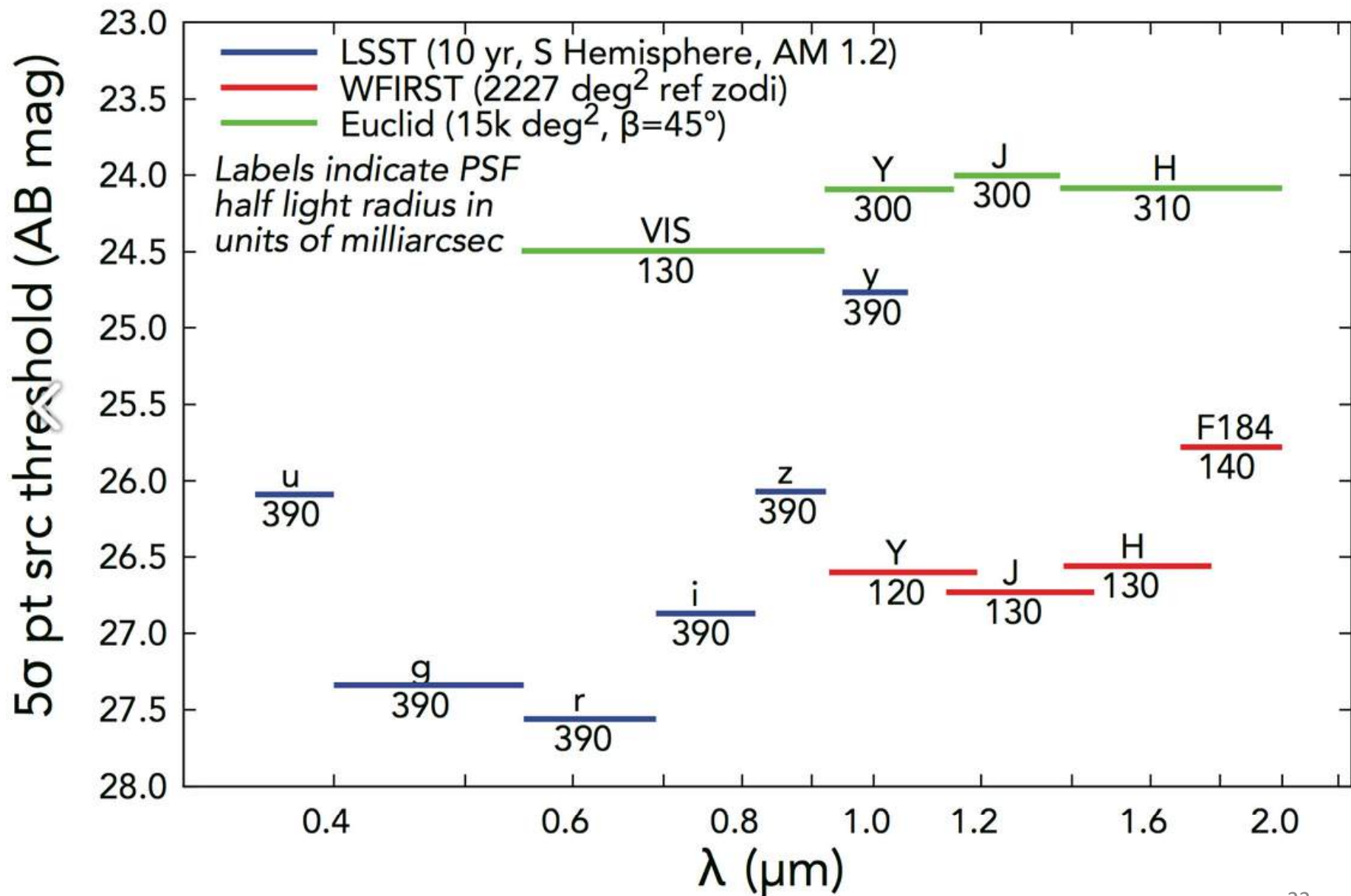
*Assemblage du miroir de 2.4m*



Orbite géo-stationnaire, opération 6 ans  
Lancement ~2025-30?

Pour l'énergie noire: BAO, SNIa,  
lentilles, Amas, RSD..

# Sensitivities of LSST, WFIRST, and Euclid



# Cosmologie avec le SKA

Carte d'intensité HI, surveys HI, Continuum radio

Lentilles faibles,

Oscillations baryoniques BAO

« Redshift Space Distorsions » RSD

Amas de galaxies, ISW

Ondes gravitationnelles

Constante de Hubble, Dipôle radio



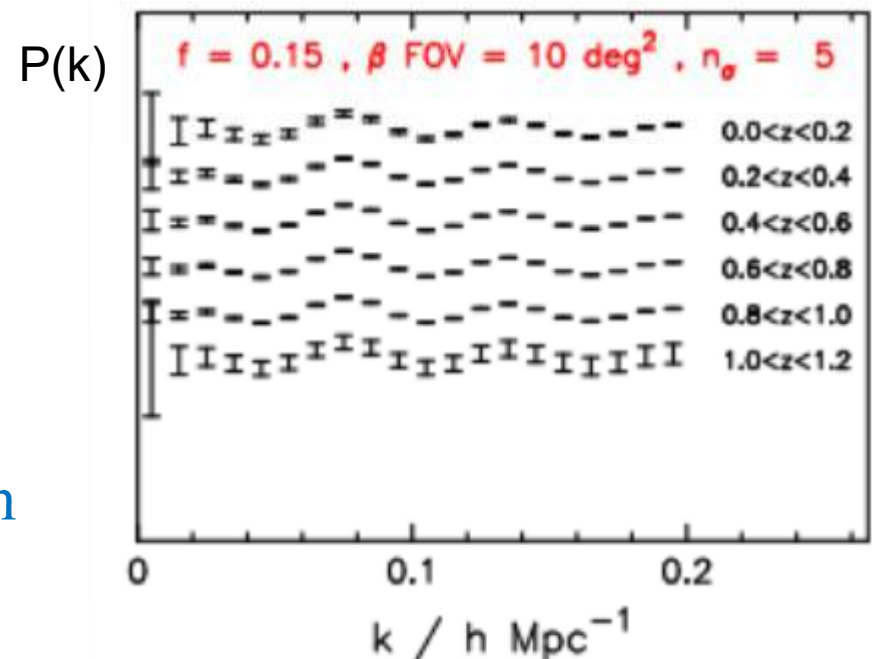
# Surveys de galaxies en HI (BAO avec SKA-1)

Sur tout le ciel:  $4 \cdot 10^6$  gal  $z=0.2$   $3\pi$  sr  
Grand champ:  $2 \cdot 10^6$  gal  $z=0.6$   $5000 \text{ deg}^2$   
Survey profond:  $4 \cdot 10^5$  gal  $z=0.8$   $50 \text{ deg}^2$

**Plus rapide:** HI « intensity mapping »  $30\,000 \text{ deg}^2 \rightarrow z=3$   
Grand champ ou profond, grands volumes, ~comme Euclid

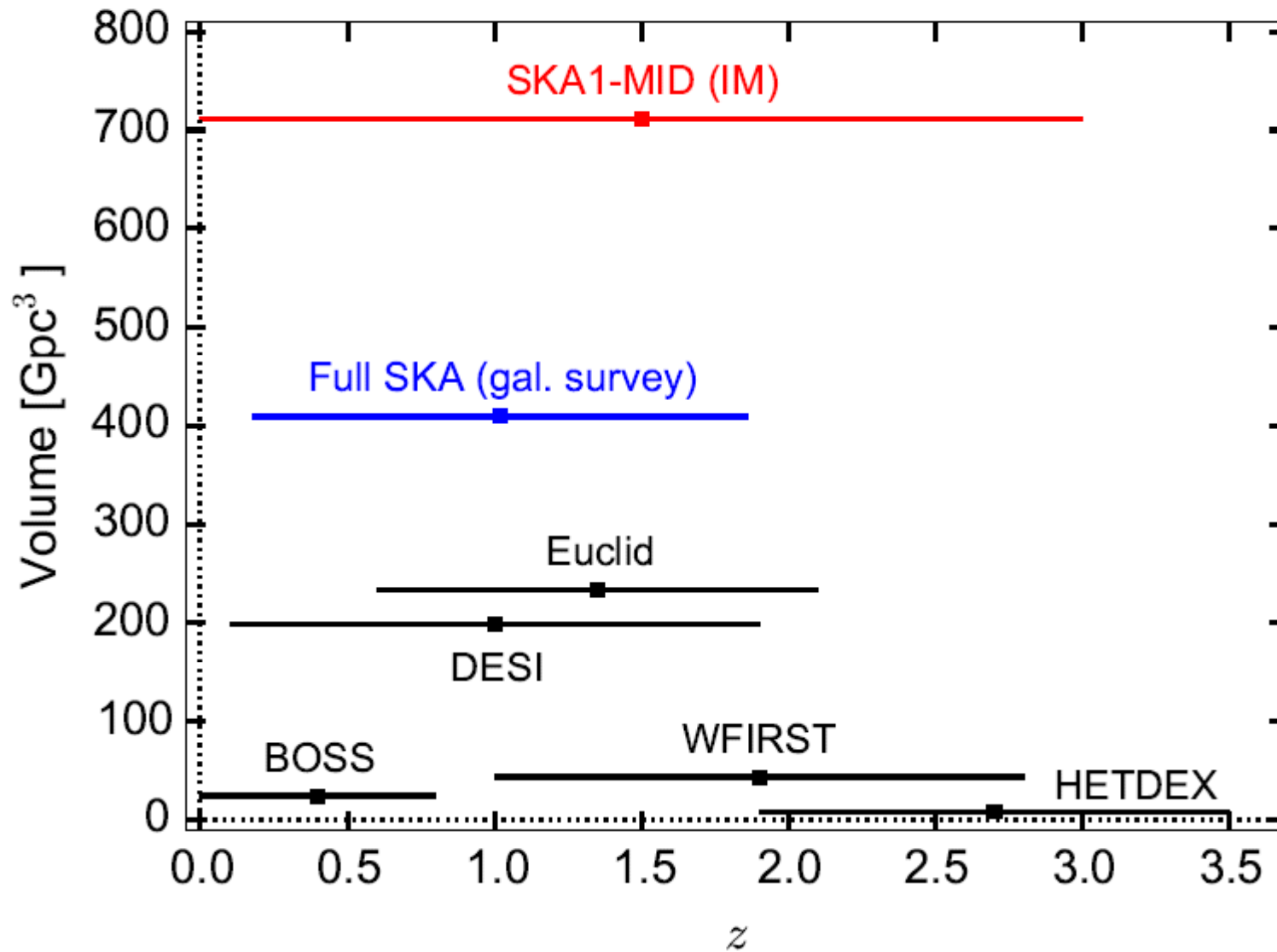
**SKA2** fournira un échantillon pur  
1 milliard de galaxies HI au total

**Lentilles faibles**  
10 milliard de galaxies en continuum

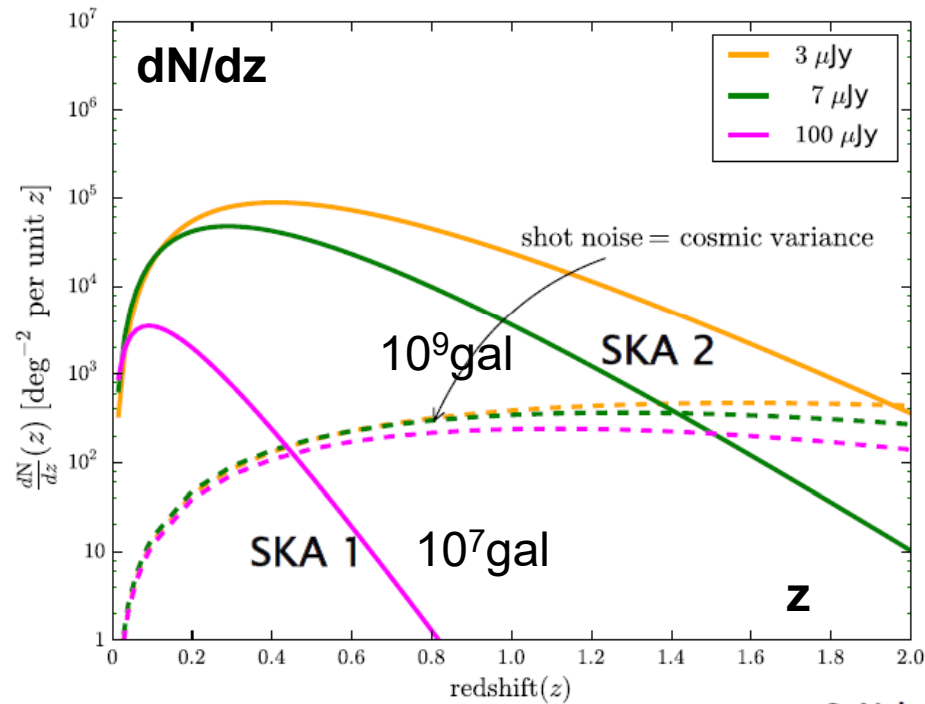




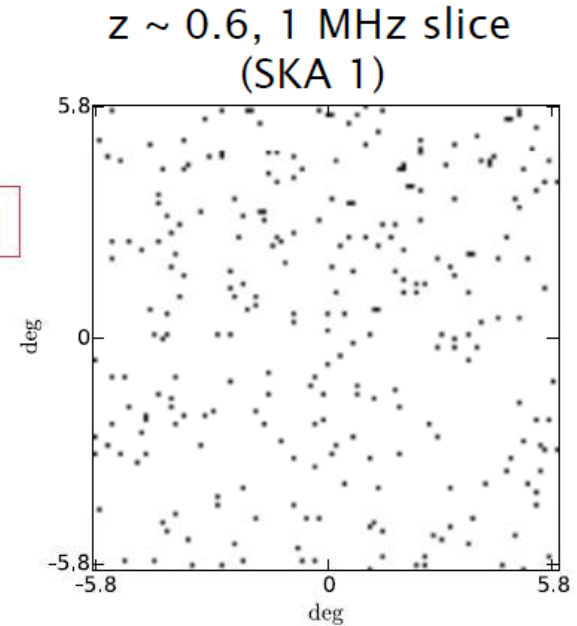
# Comparison des volumes couverts



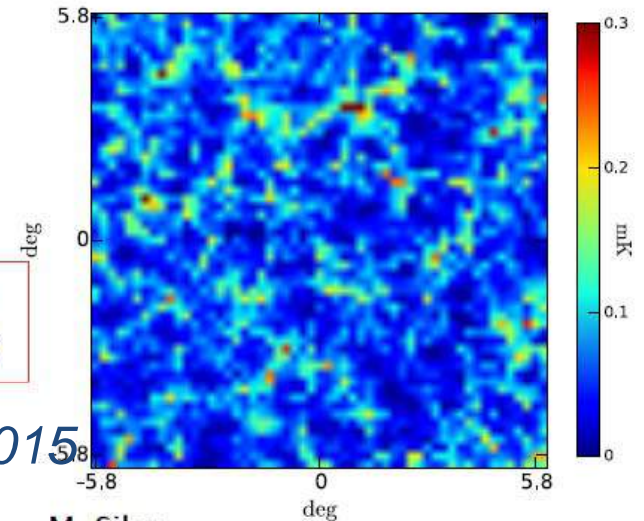
# Survey de galaxies HI vs intensity mapping



Galaxies



Maps of intensity



M. Silva

HI intensity mapping: principal problème les avant-plans, dus au continuum

1000 x le signal attendu

Pas plus lisse en fréquence, mais moins de degrés de liberté dans le spectre *Switzer et al 2015*

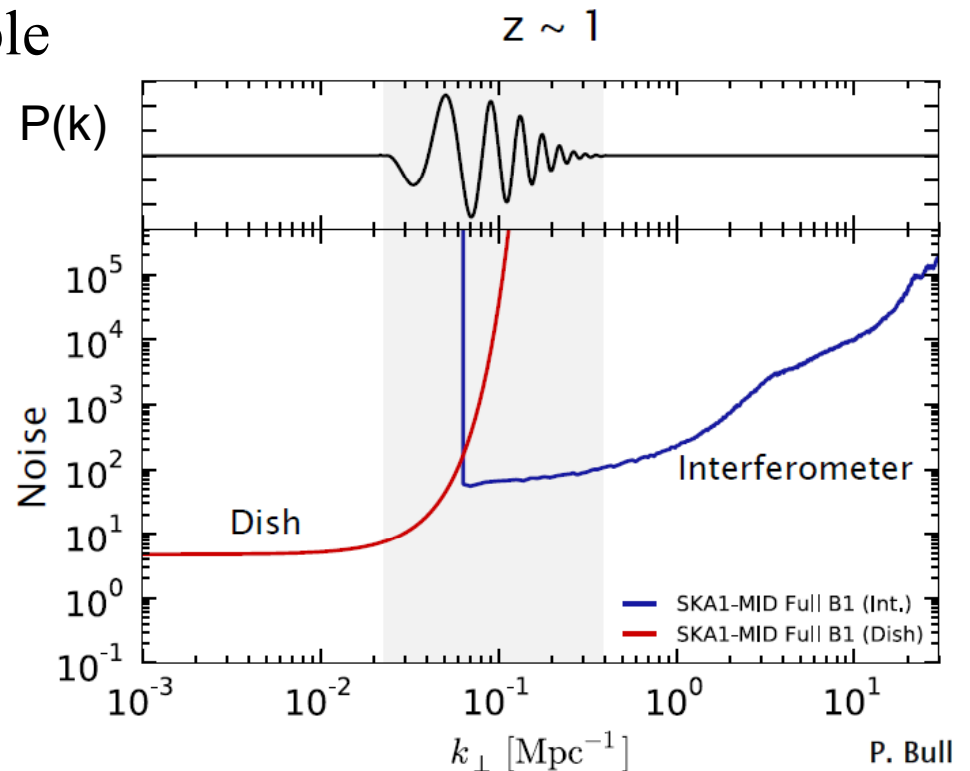
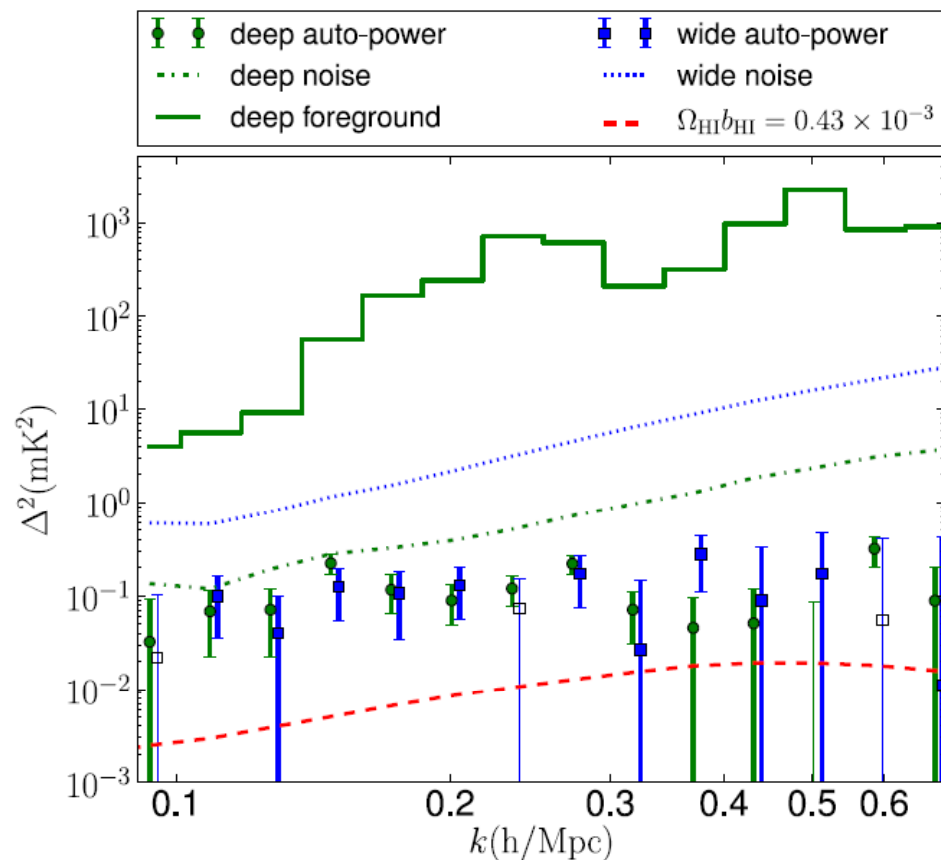
# Premiers résultats de l'intensité HI (GBT)

Avantages comparés des **antennes uniques** ou **interféromètres**

Taille des antennes (Il faut 20m pour les BAO)

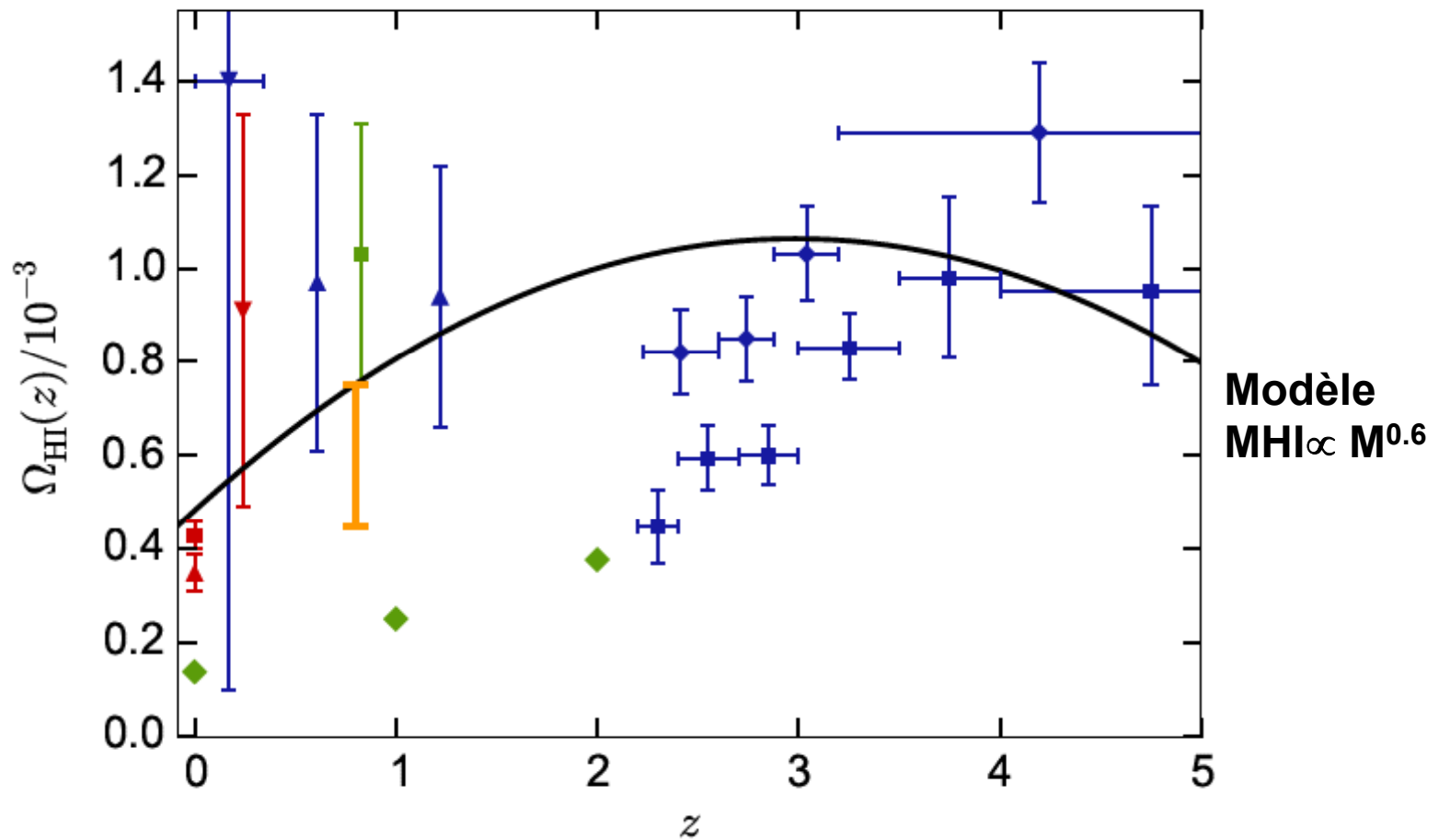
→ utiliser les N antennes ensemble

(auto-corrélation)



Switzer et al 2014, avec GBT (100m) <sup>27</sup>

# Corrélation croisée avec WiggleZ (optique)



DLA  
 Damped Ly $\alpha$   
 absorptions

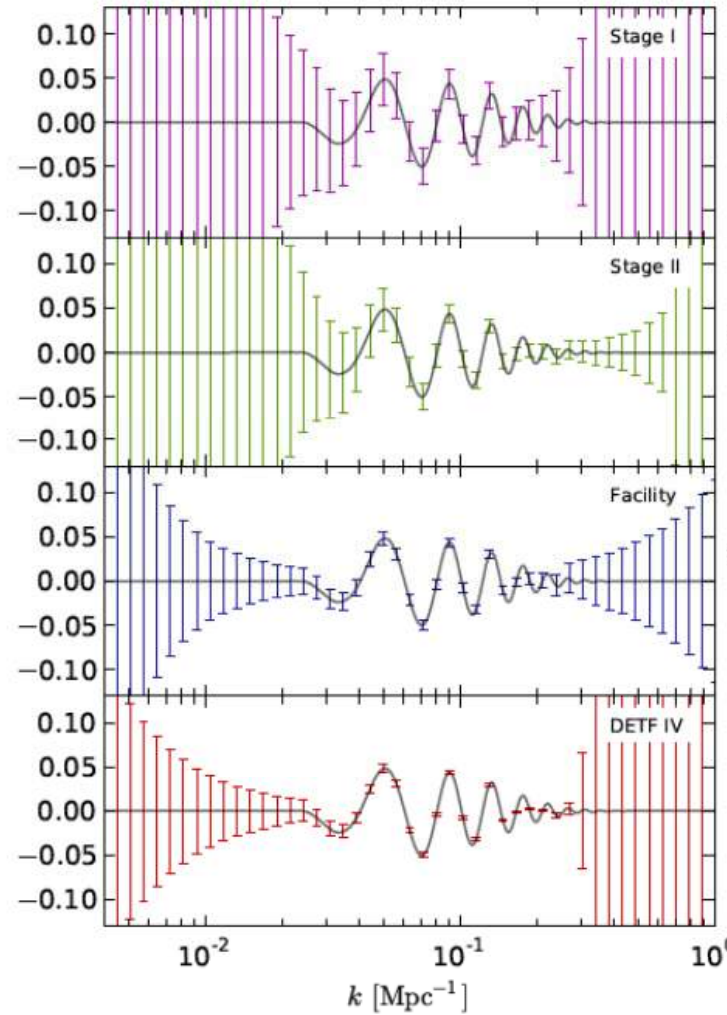
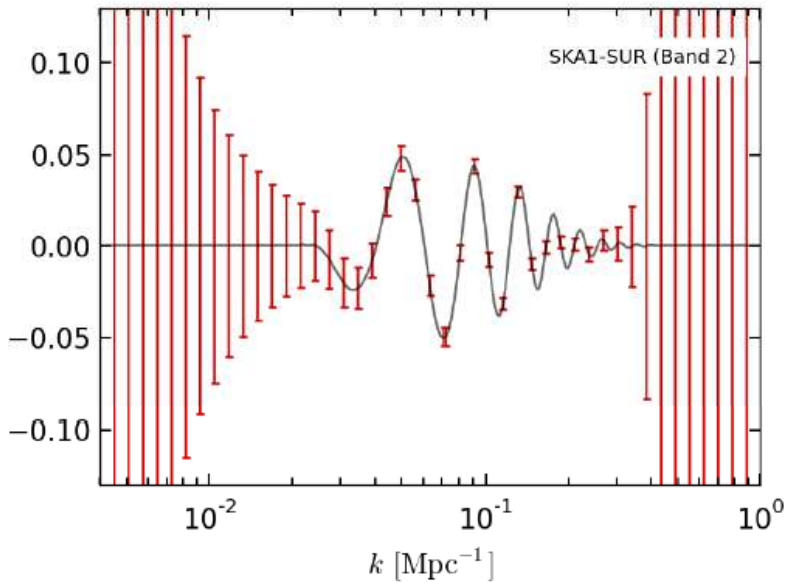
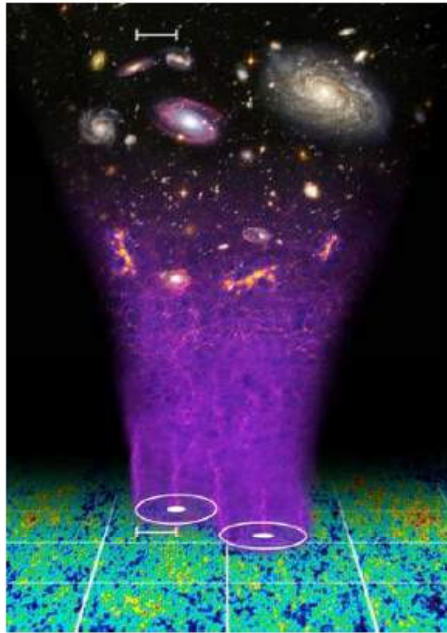
- COS / Meiring (2011)
- SDSS-DR5 / Prochaska (2009)
- SDSS-DR7 / Noterdaeme (2009)
- ▲ HST / Rao (2005)
- GBTxWiggleZ / Masui (2013)

- ALFALFA / Martin (2010)
- ▼ GMRT / Lah (2007)
- ▲ HIPASS / Zwaan (2005)
- Sim. / Khandai (2011)
- ◆ Sim. / Duffy (2012)

HI-21cm

Simulations

# BAO avec SKA1 Intensity mapping



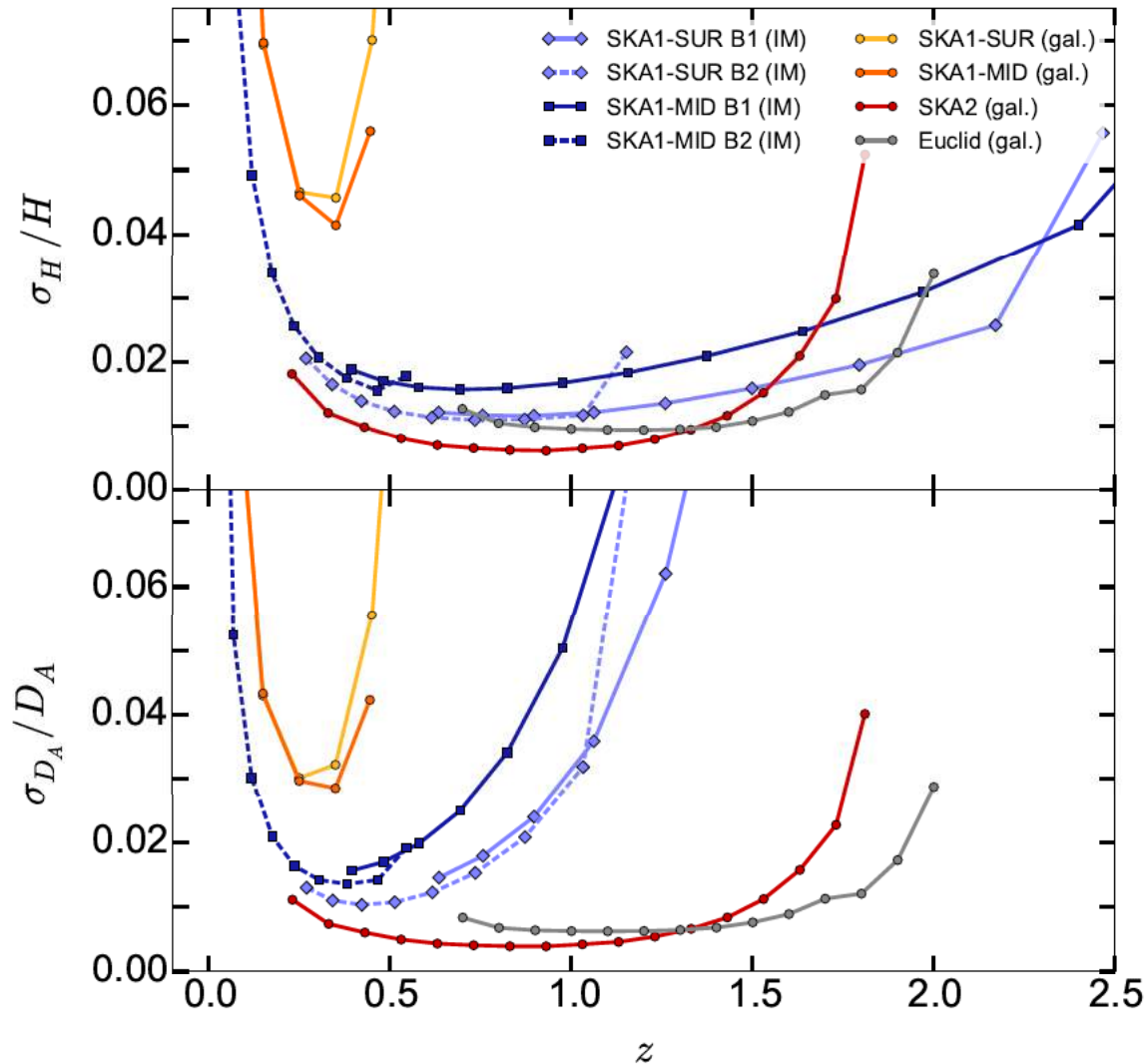
40m  
 ~ BINGO  
 $z=0.13-0.48$

~ MeerKAT

~ SKA1-Mid base  
 (up to  $z \sim 2.0$ )

~ Euclid

# BAO directions radiale et transverse



IM: HI Intensity mapping  
Gal: surveys de galaxies HI

B1 basse-fréquence  
B2 haute-fréquence

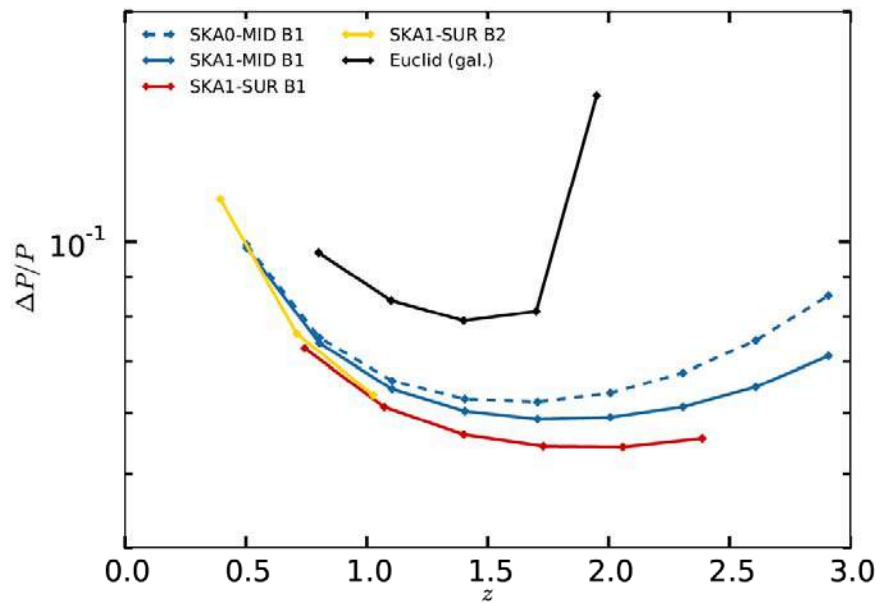
Erreurs en taux de Hubble  
et distance angulaire

# Contraintes sur l'énergie noire avec les surveys de galaxies HI

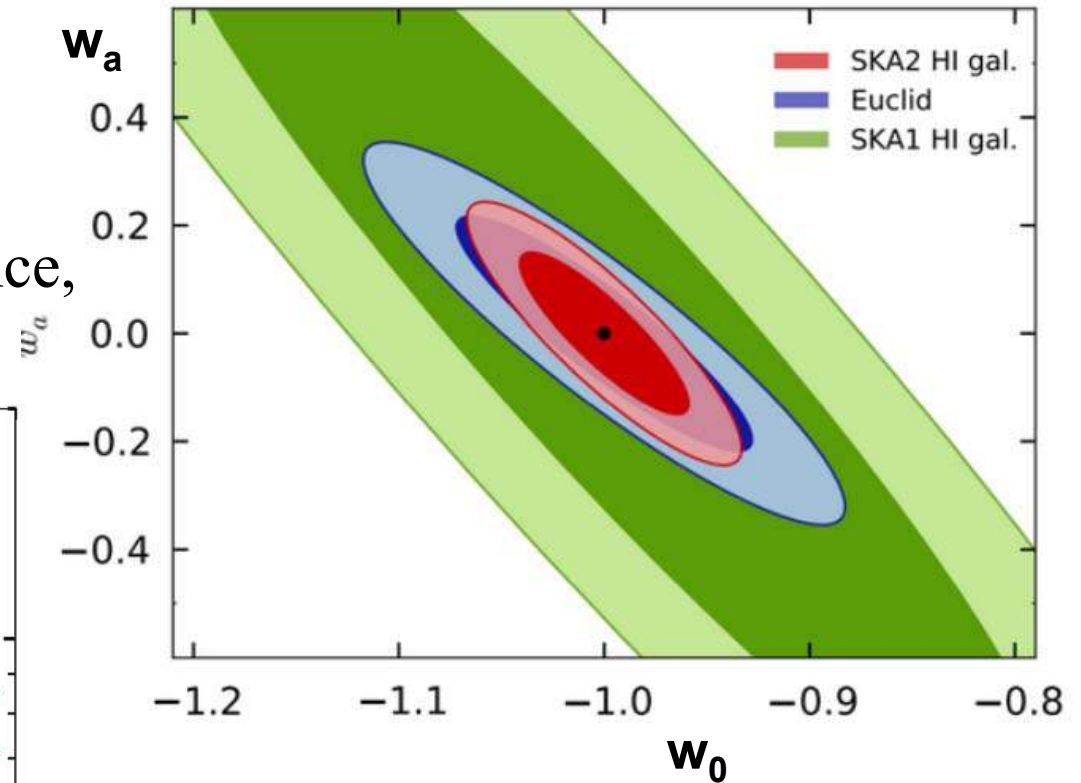
$$P = w\rho,$$

$$w = w_0 + w_a (1-a)$$

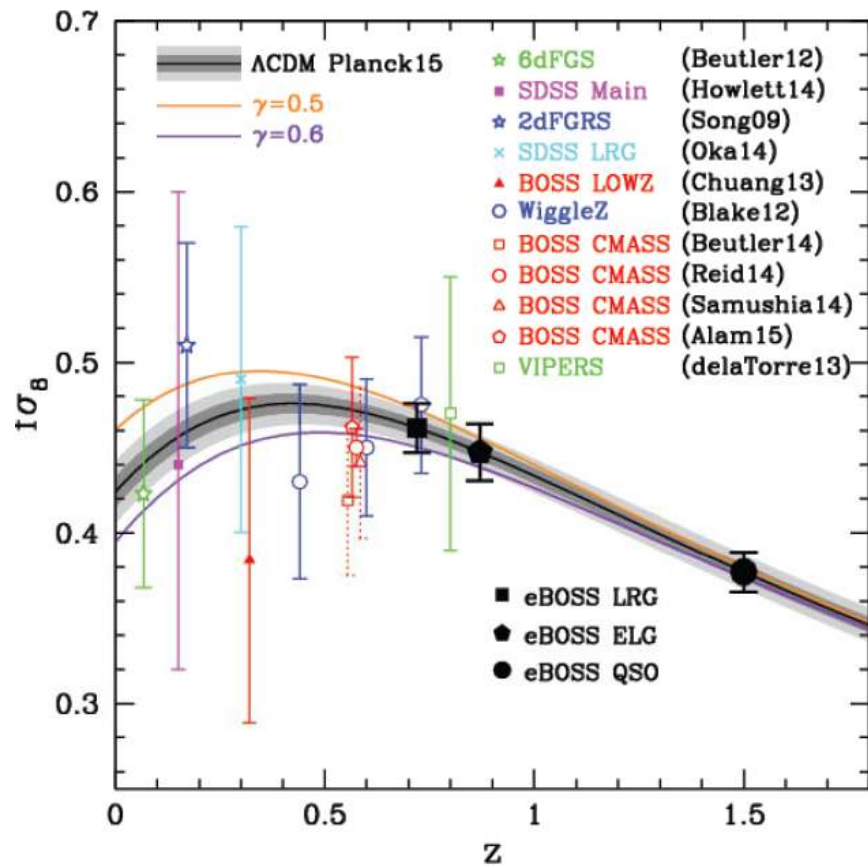
Erreurs sur le spectre de puissance,  
avec SKA1 et Euclid



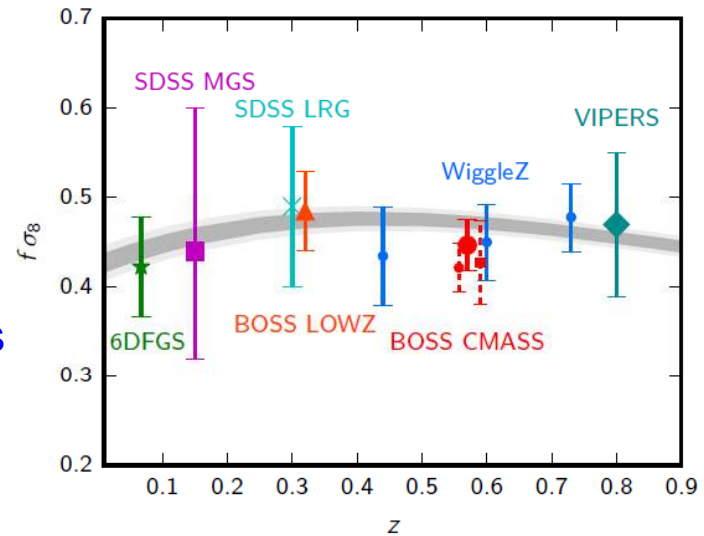
*Santos et al 2015*



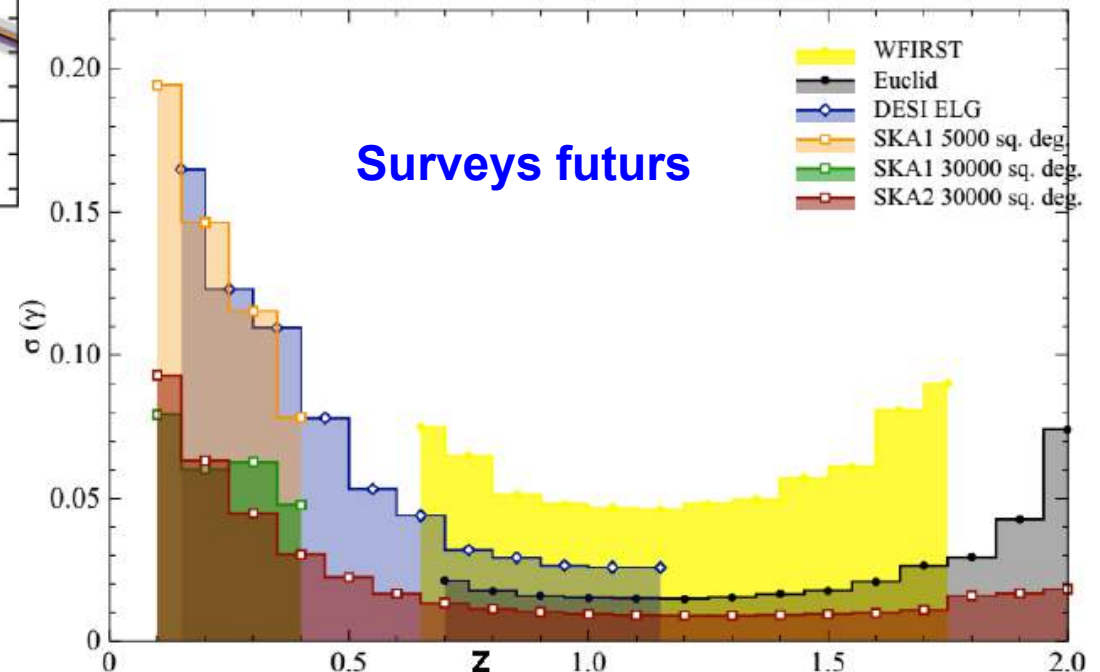
# RSD: Redshift Space Distortions



→ zoom  
(surveys actuels)



**Ligne grisée: gravité GR**  
 Lignes en couleur  
 Gravité modifiée  
 DGP (Dvali et al 2010)  
 Modèles  $f(R)$ , etc.





# Surveys en continuum avec SKA1

**En 2ans, obtention de rms=3  $\mu$ Jy  $\rightarrow$   $\approx$ 4 galaxies arcmin<sup>2</sup> ( $>10\sigma$ )**

Le lobe est d'excellente qualité (gaussienne circulaire) sur 0.6 – 100''  
Avec une couverture du ciel quasi uniforme de  $3\pi$  sr

**$\rightarrow$  Total de 0.5 milliard de radio sources, pour le survey complet avec des lentilles faibles et l'effet Sachs Wolfe intégré (WL, ISW)**

Grand champ (5000 deg<sup>2</sup>) rms=2  $\mu$ Jy  $\approx$ 6 galaxies arcmin<sup>2</sup> ( $>10\sigma$ )

Survey profond (50deg<sup>2</sup>) rms=0.1  $\mu$ Jy,  $\approx$ 20 galaxies arcmin<sup>2</sup> ( $>10\sigma$ )

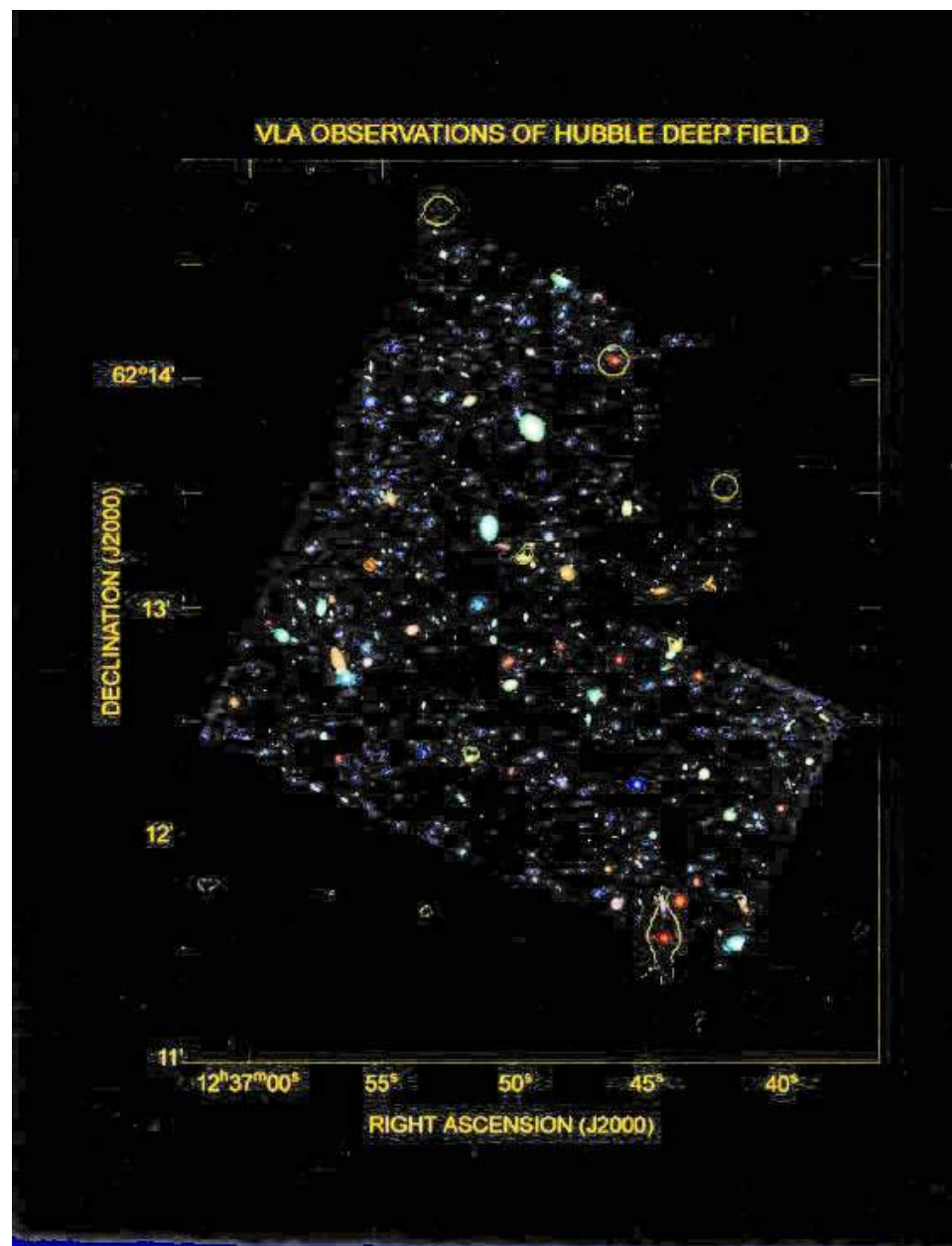


# Statut actuel des surveys radio

**HDF-N 5 x 5 arcmin  
Survey jusqu'à  
~29<sup>th</sup> magnitude en I**

*Fomalont et al. (1997)*

**6 sources détectées au  
VLA avec  $S_{8.4} > 12 \mu\text{Jy}$   
(50 heures  
d'observation)**



Ciel radio profond  
10' size, @ 1.4GHz

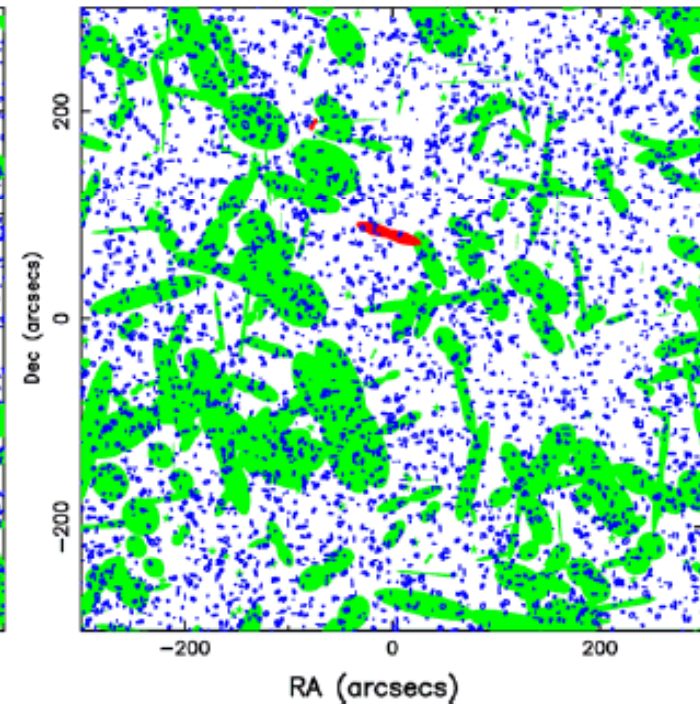
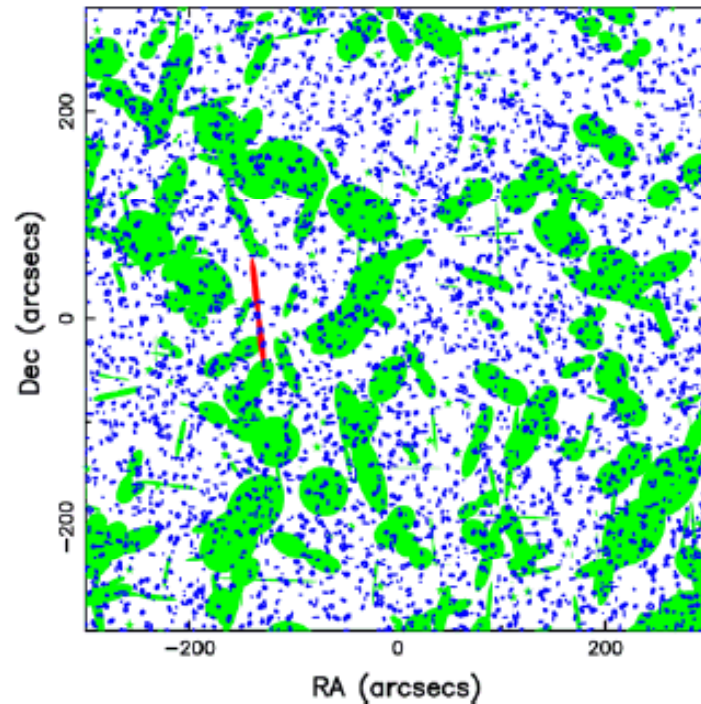
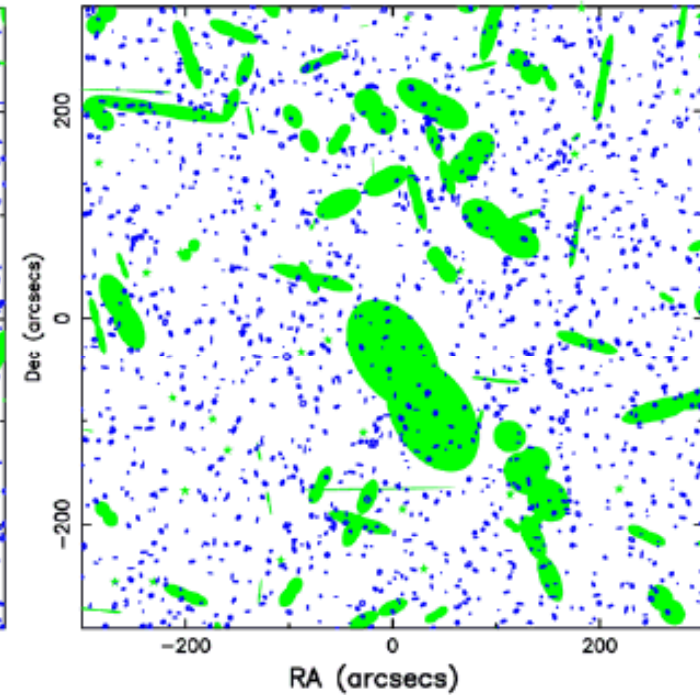
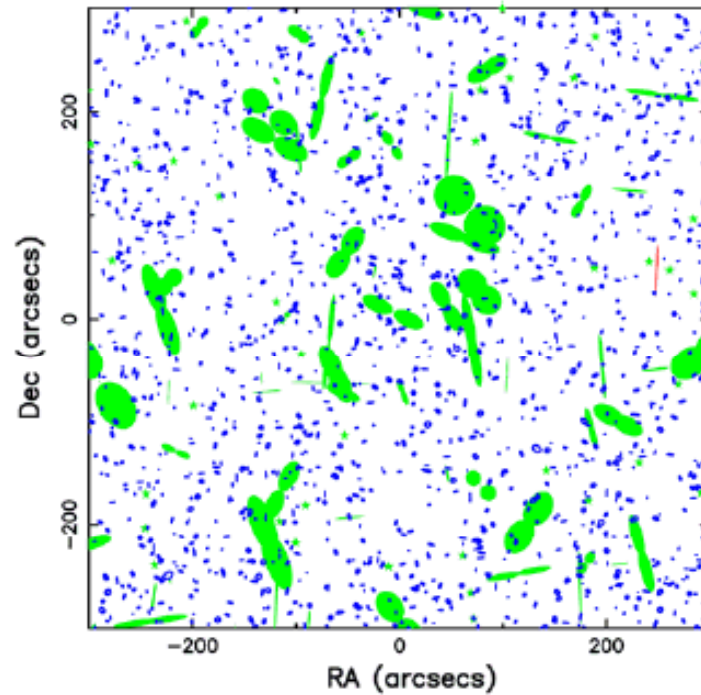
1 $\mu$ Jy en haut  
100nJy en bas

Gauche-droite  
Variance cosmique

FRI: vert, double  
FRII: rouge, double

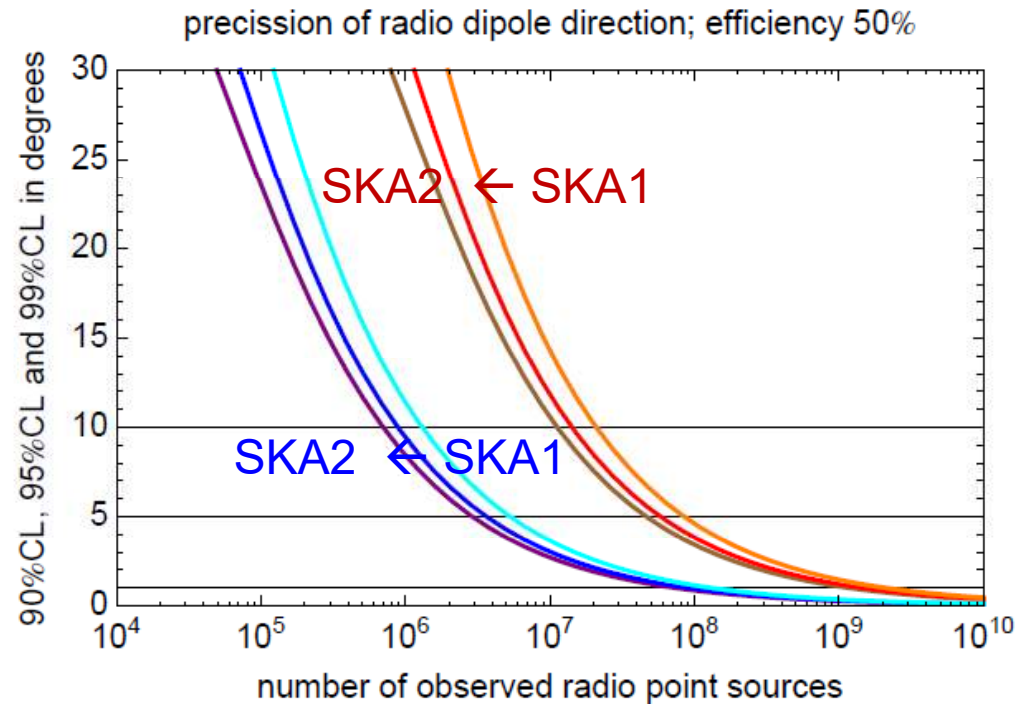
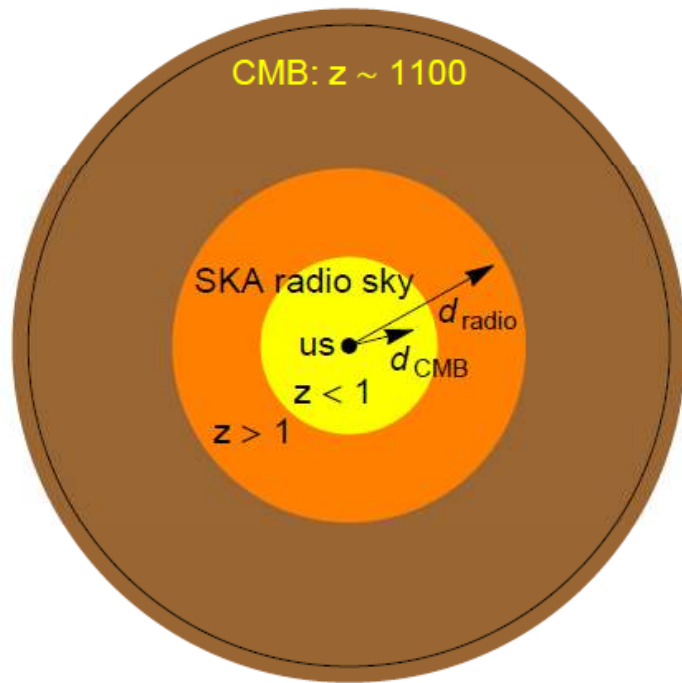
FRI amplifiées par  
effet Doppler:  
Points verts  
Idem FRII:  
Points rouges  
Formation d'étoiles

*Jackson 2004*



# Dipôles Radio et CMB

Les radio sources et AGN ( $z > 1$ ) vont permettre de mesurer notre vitesse particulière par rapport au CMB, sur des échelles  $>$  horizon



Bleu:  $d_{\text{radio}} = 4d_{\text{CMB}}$

Rouge  $d_{\text{radio}} = d_{\text{CMB}}$

*Mesures actuelles: amplitude  
du dipôle radio  $\sim 4$  dipole CMB*

*Contributions d'autres phénomènes?  $\rightarrow$  curvaton*

# Lentilles faibles et structures en radio

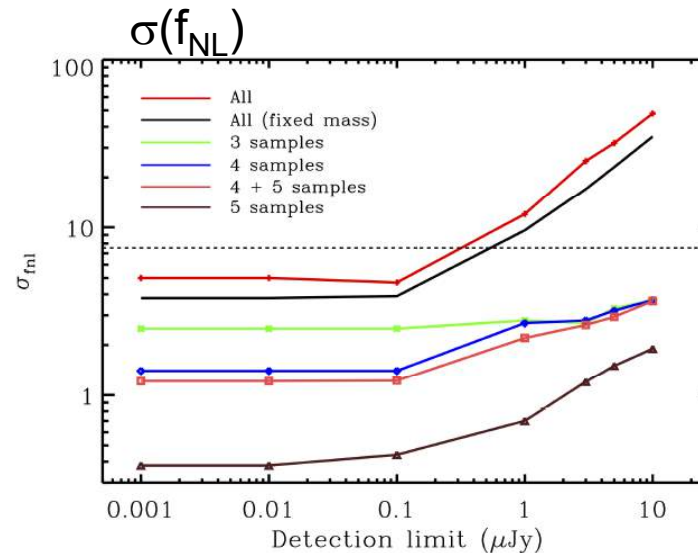
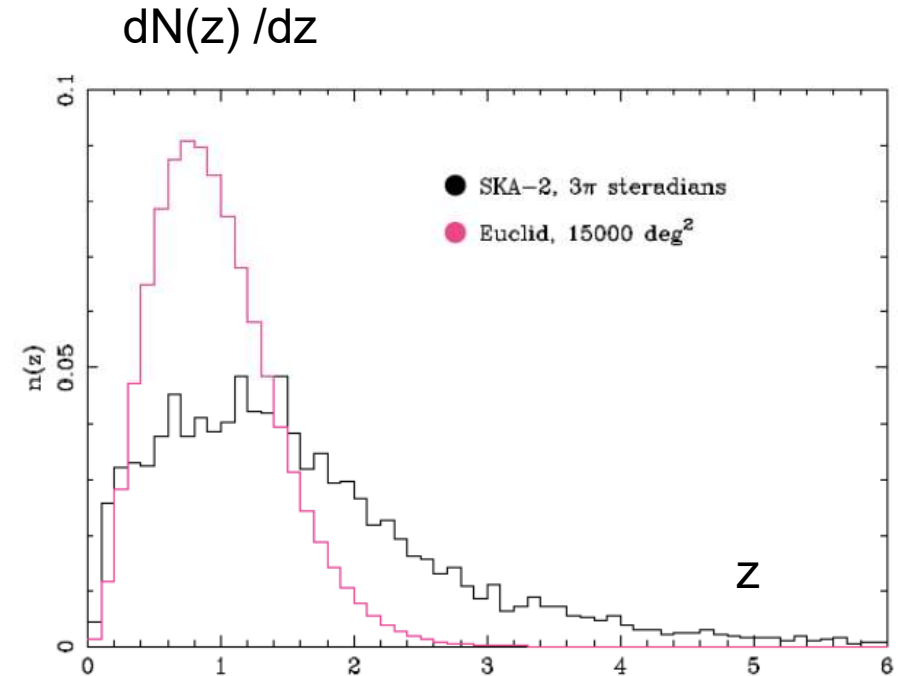
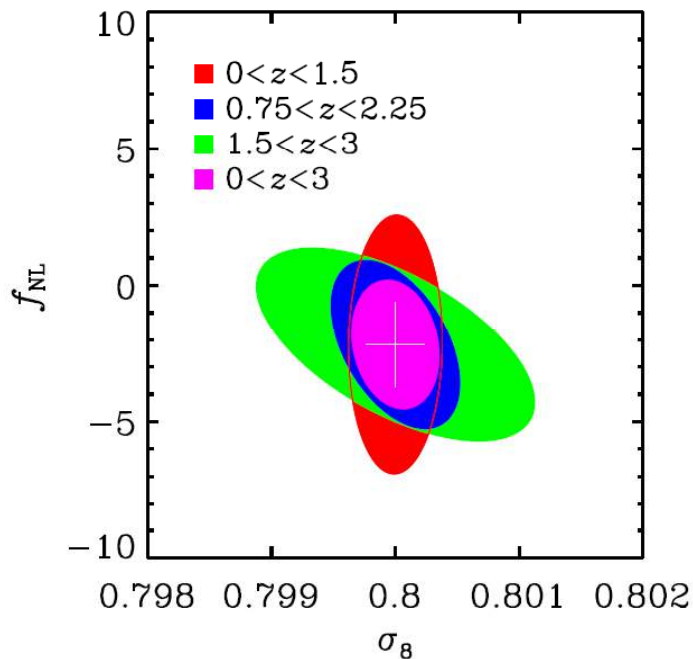
Le nombre d'objets s'étend à plus grand  $z$  avec SKA2

L'amplitude de la non-gaussianité

$f_{\text{NL}} = -2.2$  standard GR

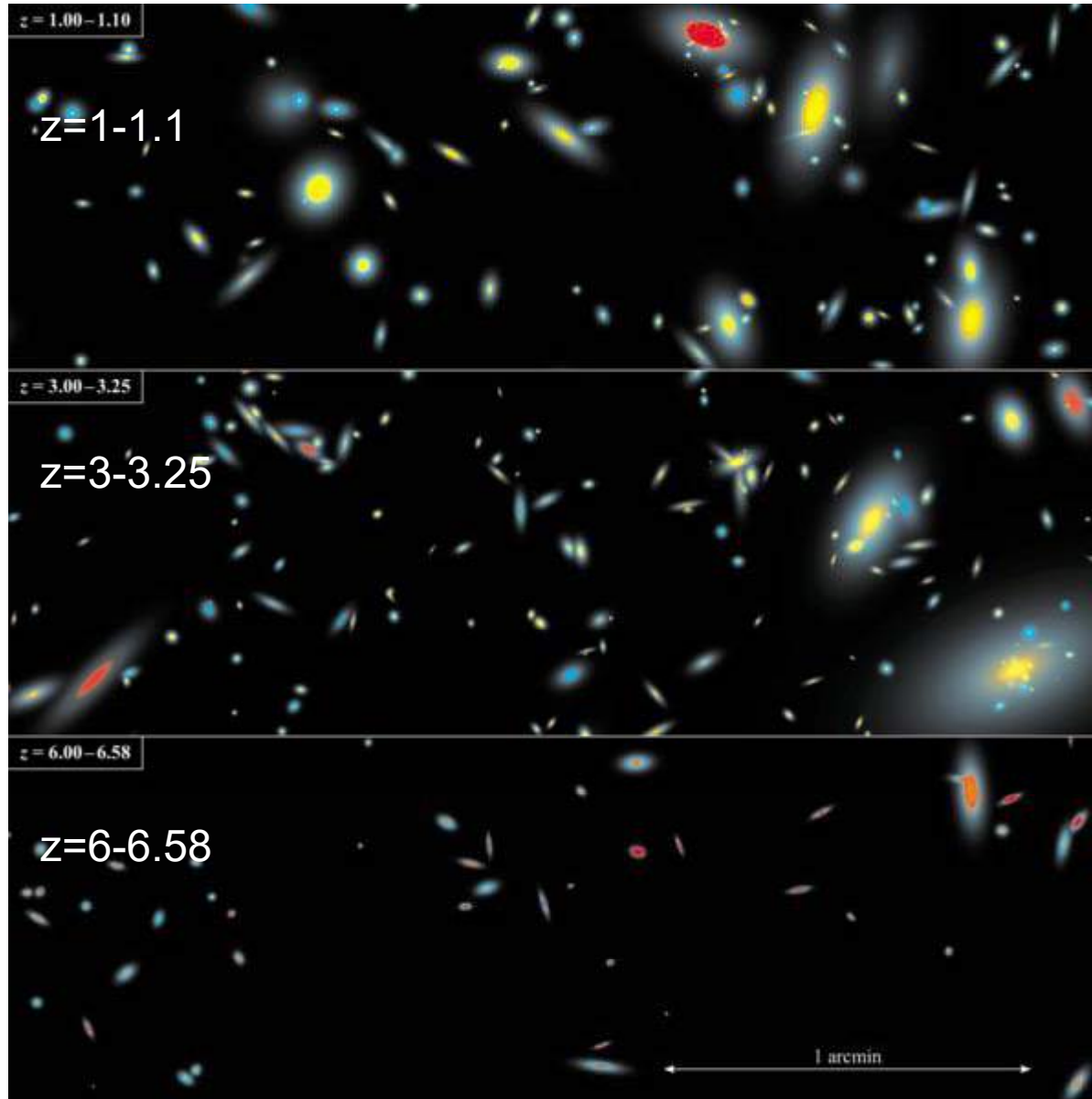
$\sigma(f_{\text{NL}}) = 7.5$  (Planck)

$= 2.3$  (SKA1) &  $= 1$  (SKA2)



SKA1 &  
SKA2  
Radio  
 $\sigma(f_{\text{NL}})$

# Simulation du ciel, $z=1, 3, 6$



*Obreschkow et al 09*

$z=3$  échelle  $\times 10$

$z=6$  échelle  $\times 100$

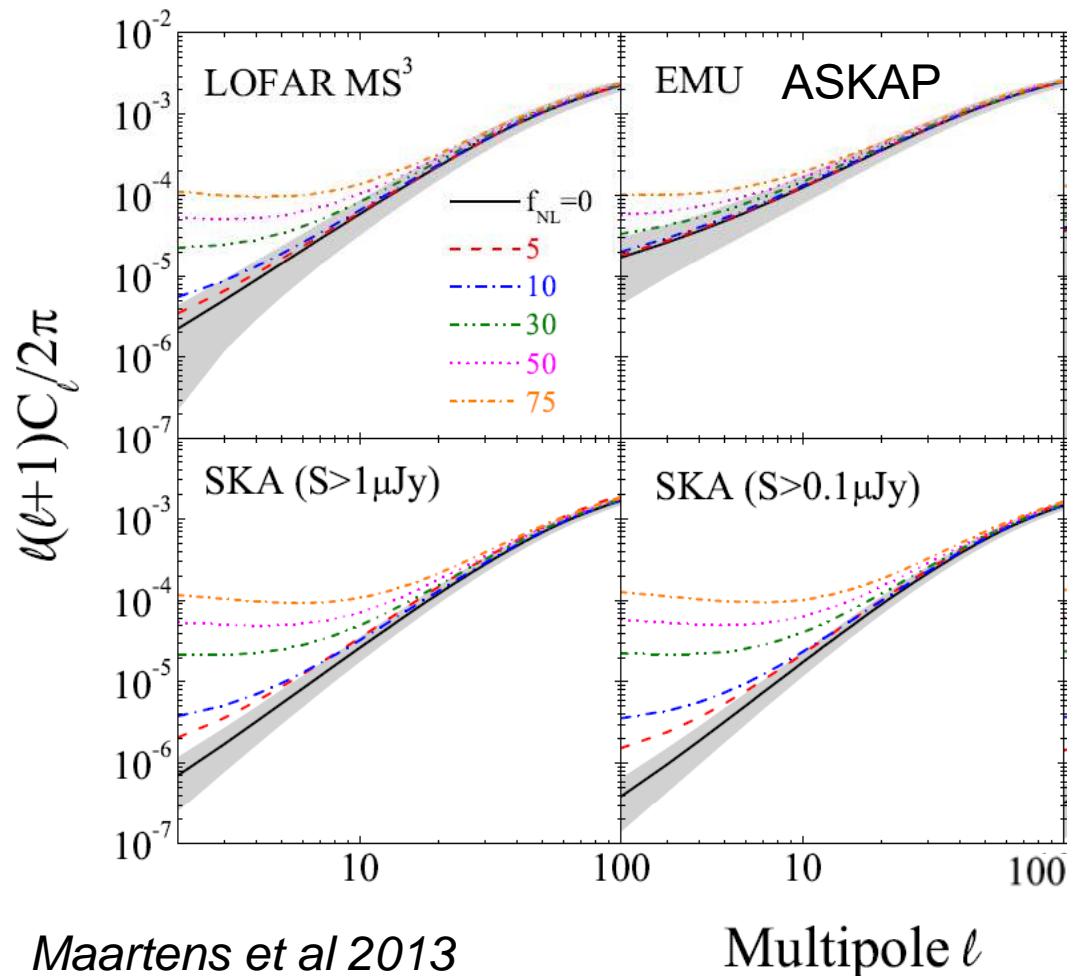
240 Mpc taille comobile  
3 x 1 arcmin<sup>2</sup> de surface

Raies HI et CO (rouge)



# Détection des non-gaussianités

Observations du spectre de puissance dans les cartes de sources continuum radio: les faibles  $f_{\text{NL}}$  se distinguent peu de la variance cosmique (grisé) → nécessité de SKA (0.1 ou 0.01  $\mu\text{Jy}$ )

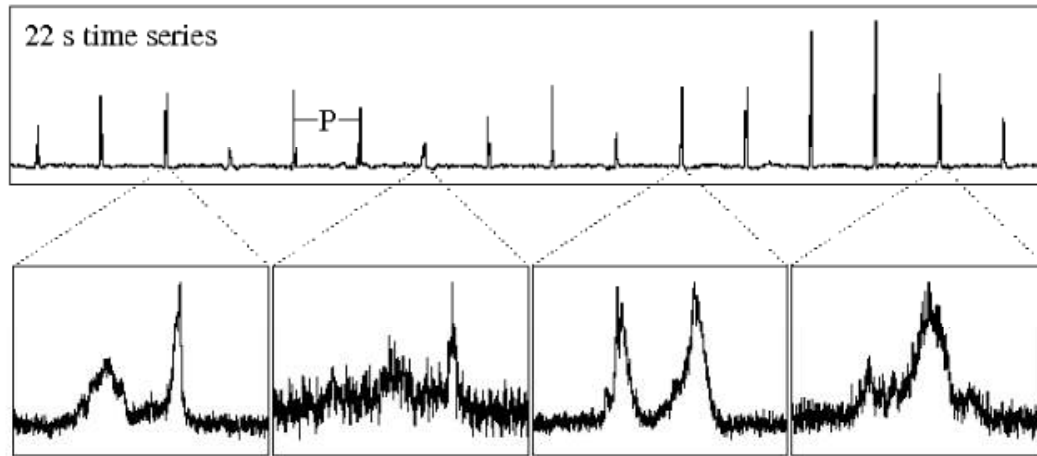


Corrections relativistes:  
+fortes à grande échelle  
( $>$  horizon), mais variance  
cosmique

→ La comparaison avec  
Euclid est nécessaire

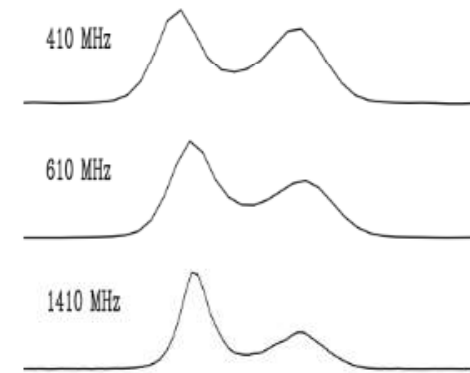
→ Avec les surveys SKA  
HI-21 cm, le redshift lève  
la dégénérescence

# Ondes gravitationnelles et Pulsars



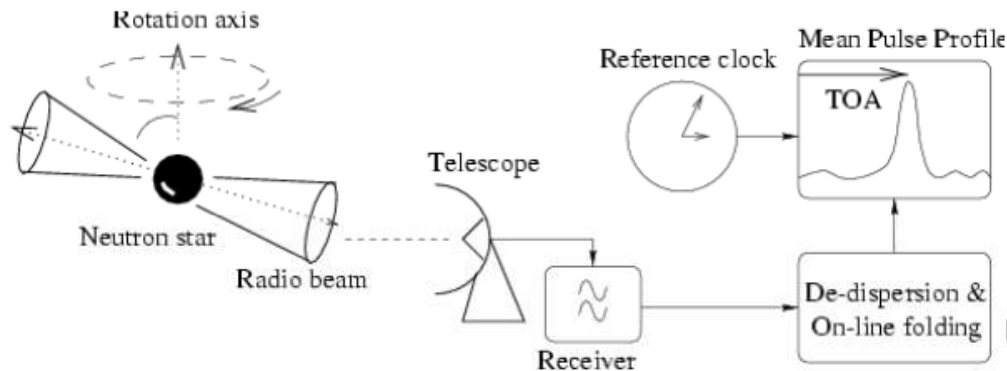
individual pulses

> 1000s  
of  
pulses  
→



mean profile

Time of arrival (TOA)



Binaires, et ondes gravitationnelles

From Lorimer & Kramer, *Handbook of Pulsar Astronomy*

**Physique des naines blanches et étoiles à neutrons: matière condensée avec forts champs magnétiques B. Haute sensibilité**



# Deux sortes de pulsars

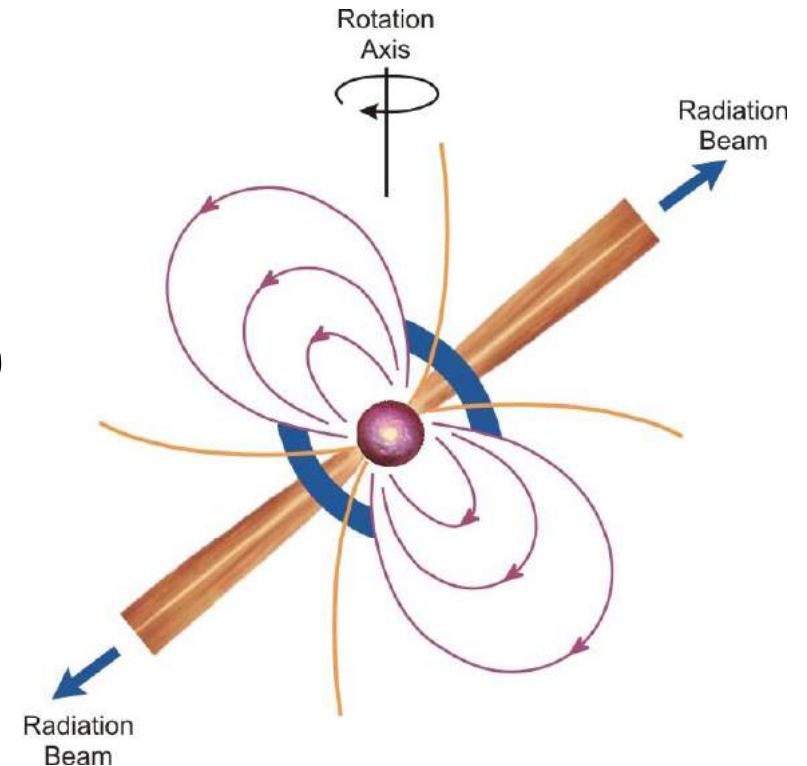
Les pulsars sont des étoiles à neutrons,  
en rotation rapide: *Bell & Hewish (1968)*

Taille  $\sim 10\text{km}$ , Masse  $\sim 1-2\text{ Mo}$ ,

**Densité centrale  $>$  noyaux! ( $10^{15}\text{g/cm}^3$ )**

Gravité de surface  $10^{11}\text{ g}$ ,

Champ magnétique  $B \sim 10^{12}\text{ G}$



2000 pulsars « normaux » connus

Rotation de **période**  $\sim 1\text{sec}$  (pulsar du Crabe 0.03), explosion SN

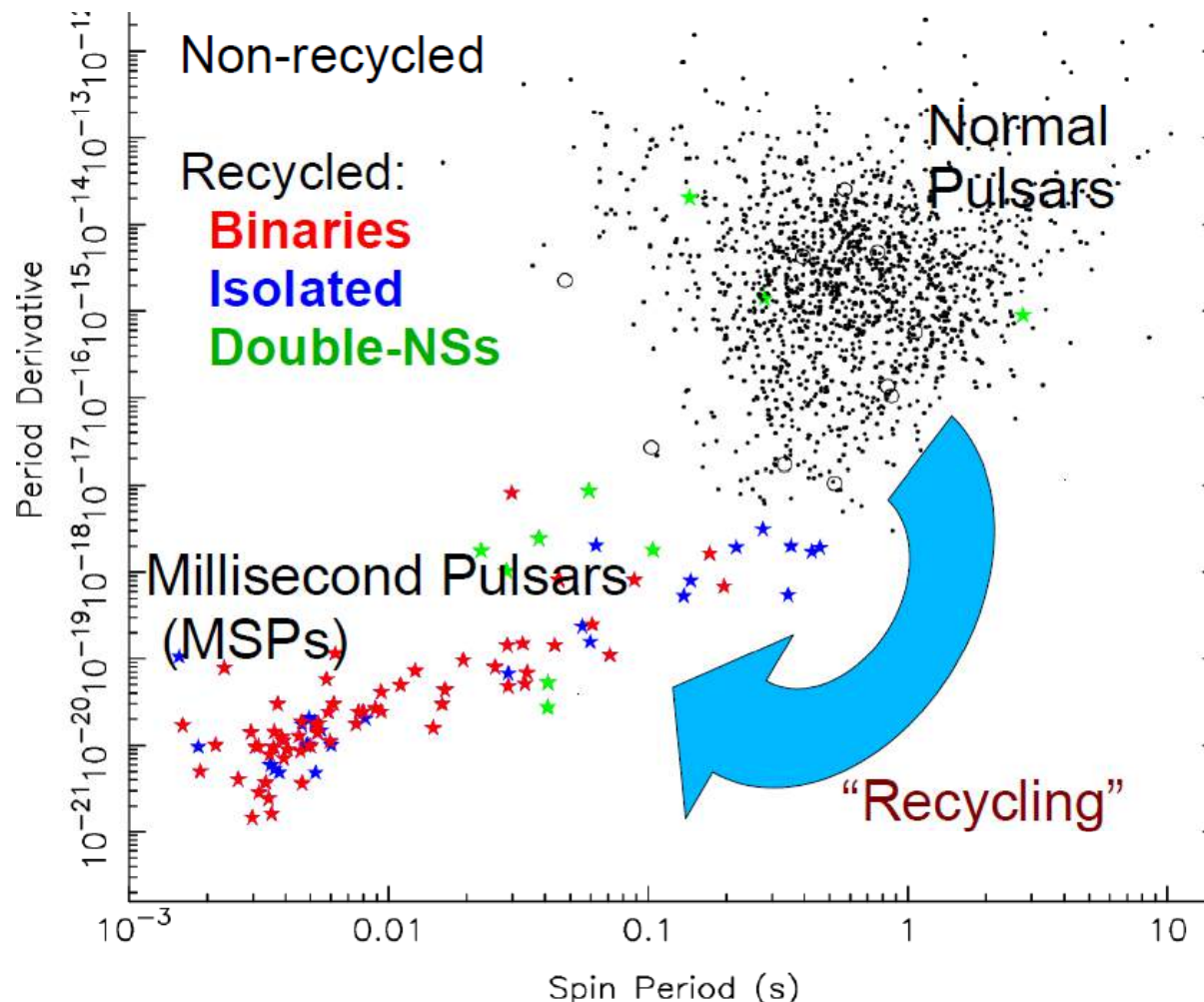
Ou **milli-seconde (MSP)** quand ré-activés dans les binaires-X

Durée de vie pulsar isolé 100Myr, mais **dans une binaire**, le compagnon transfère masse et moment angulaire, en phase géante, accélérant le pulsar. Comme  $B$  est bas ( $10^8\text{G}$ ), la rotation peut durer des milliards d'années

# Timing des pulsars

MSPs, J0437–4715, l'un des plus précis a maintenant  
 $P = 5.7574518599879 \text{ ms} \pm 1$  du dernier chiffre (13<sup>ème</sup>)

**Ce chiffre croît de 1 chaque 1/2h**



Perte par radiation et vent relativiste

Les 6 premiers chiffres sont les mêmes pendant mille ans

TOA mesuré à la  $\mu\text{s}$  pendant plusieurs années

→ 14 chiffres

# Ondes gravitationnelles

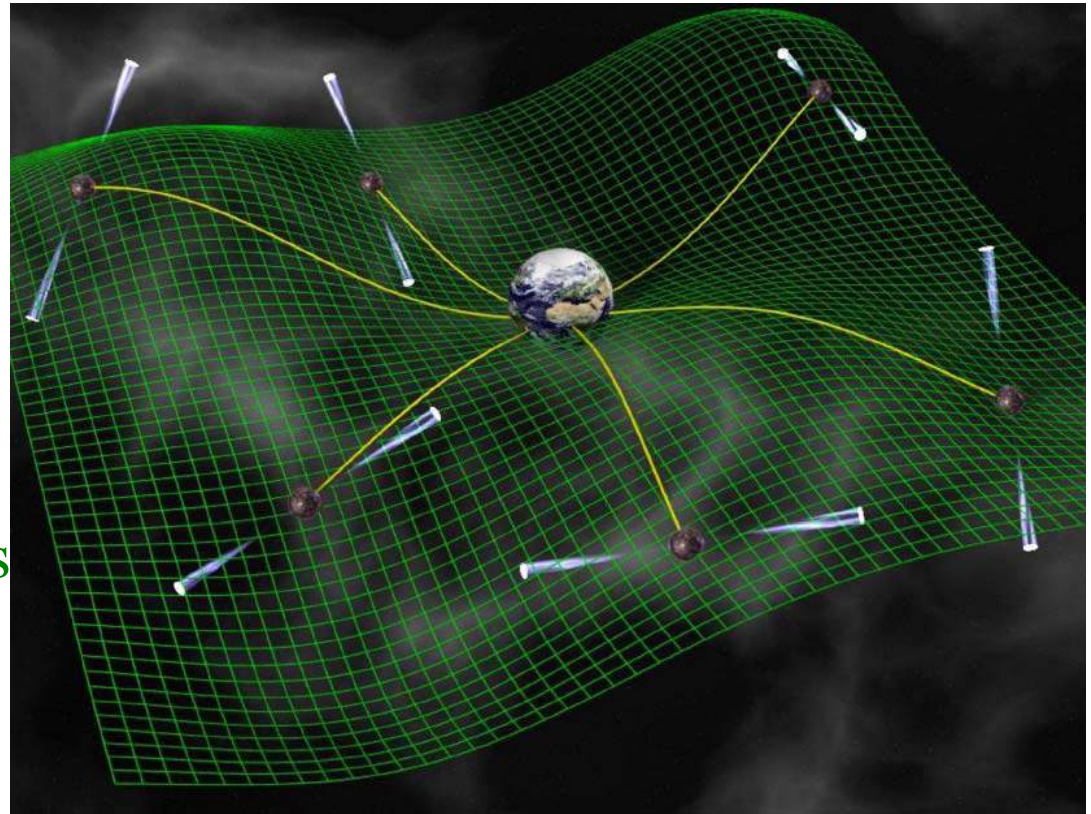
**PTA: pulsar timing arrays.** Suivre plusieurs pulsars milli-seconde  
GW ont des fréquences nanoHz ( $\lambda \sim$ année-lumière)

Corrélation entre le TOA  
de plusieurs pulsars  
Traceurs de l'extension de  
l'espace

→ détecte GW  $\lambda \gg \lambda$  LIGO

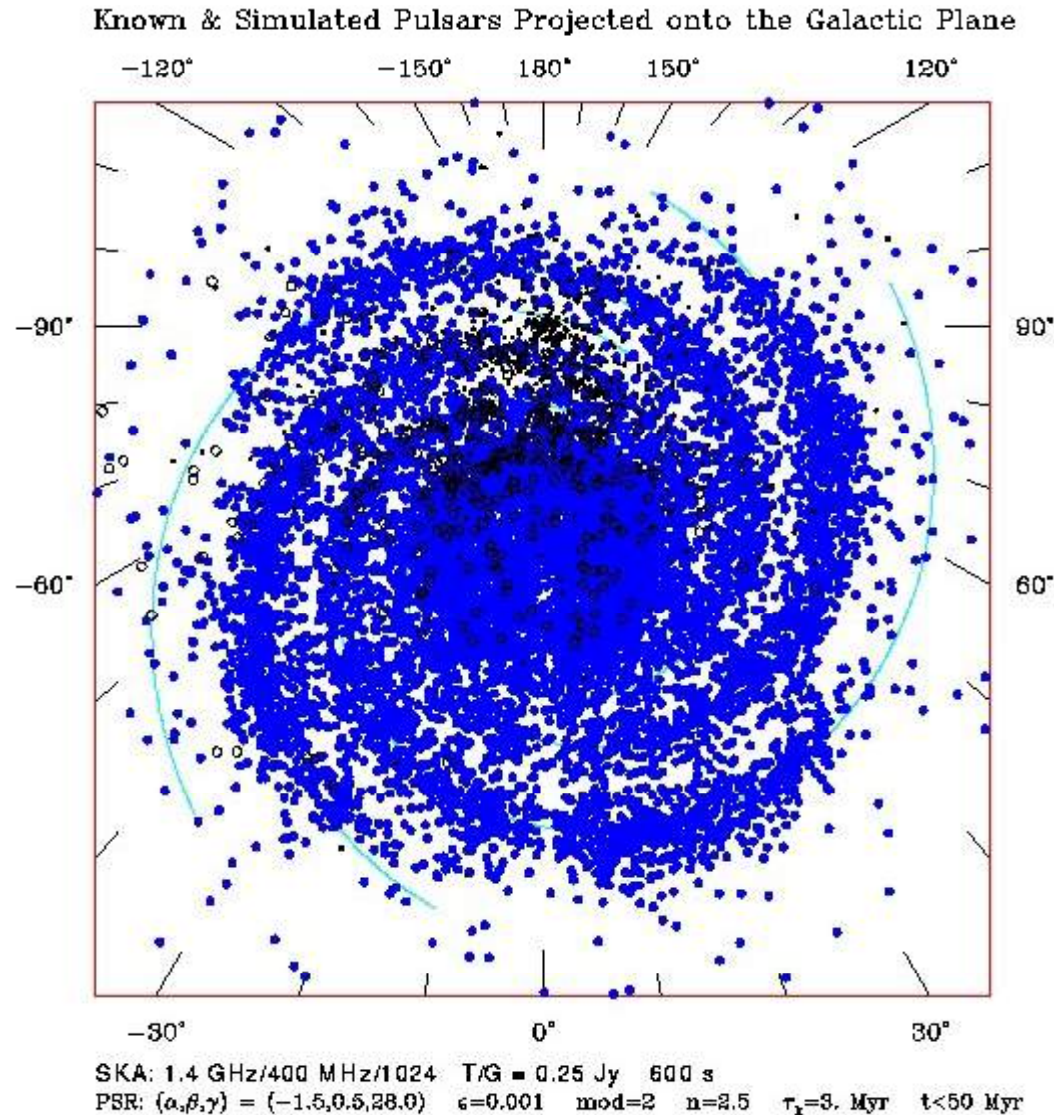
GW venant de la fusion de trous  
noirs, si assez proches  
Plusieurs longueurs d'onde,  
selon leur masse

Ou bruit de fond dû à l'ensemble des  
fusions (fond stochastique) + fond dû à l'inflation



# Pulsars avec SKA

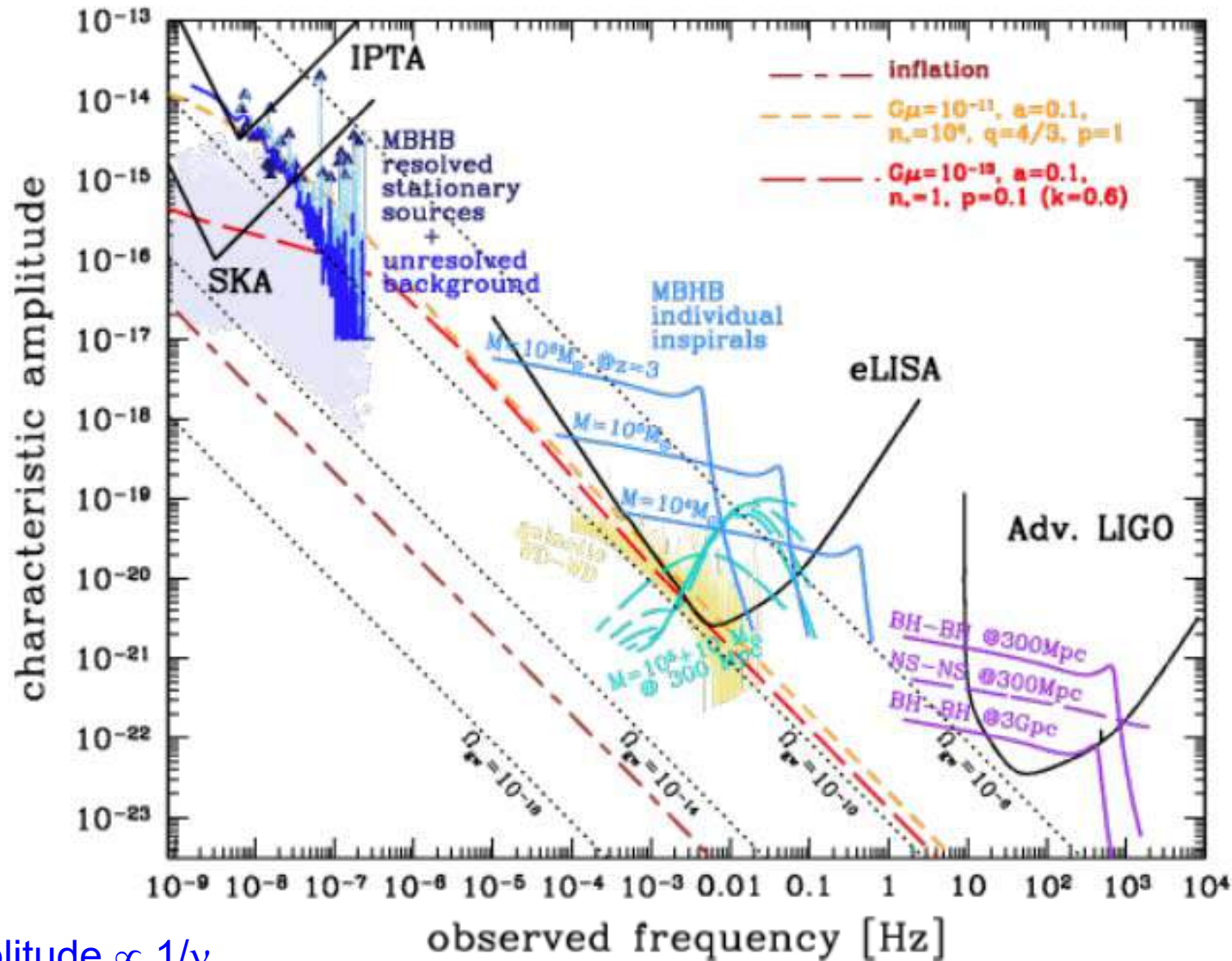
*J Cordes, 2004*



MW: 30 000 PSR,  $10^4$  MSP  
~20,000 possiblement  
détectables avec SKA  
MSPs et RRATs =  
**Rotating Radio Transients**  
*(irréguliers, peut-être  
plus abondants?)*

- SKA1 a le potentiel de trouver une grande fraction (~50%?) de ces pulsars

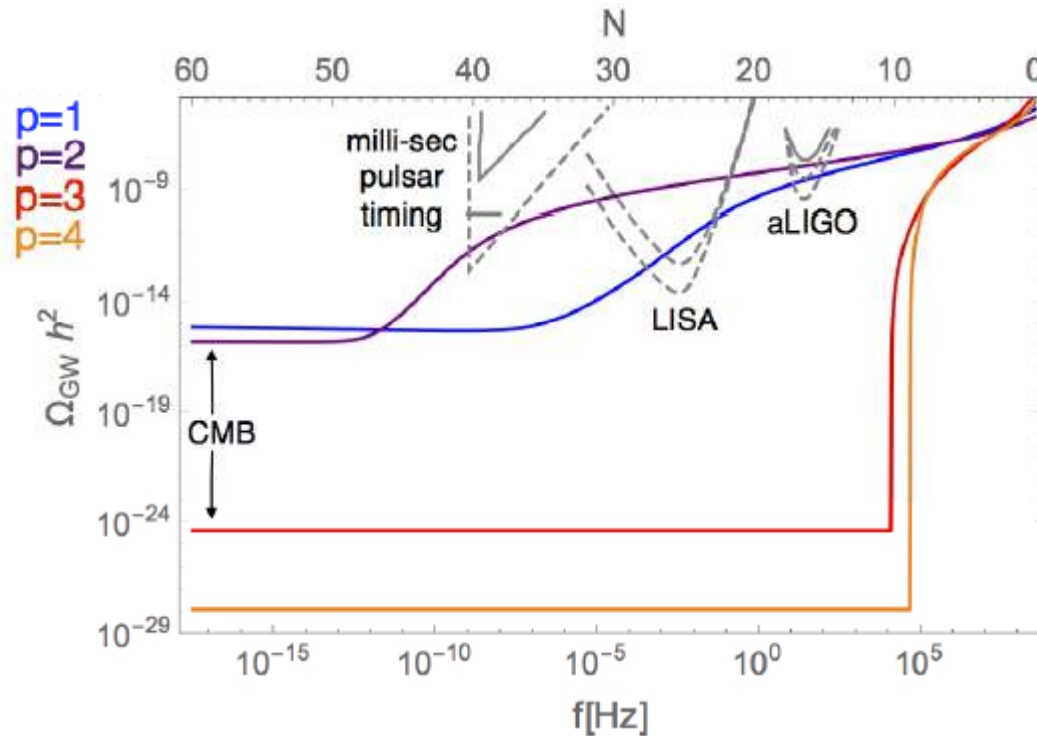
# Détection des ondes gravitationnelles



Amplitude  $\propto 1/\nu$

Janssen et al 2015

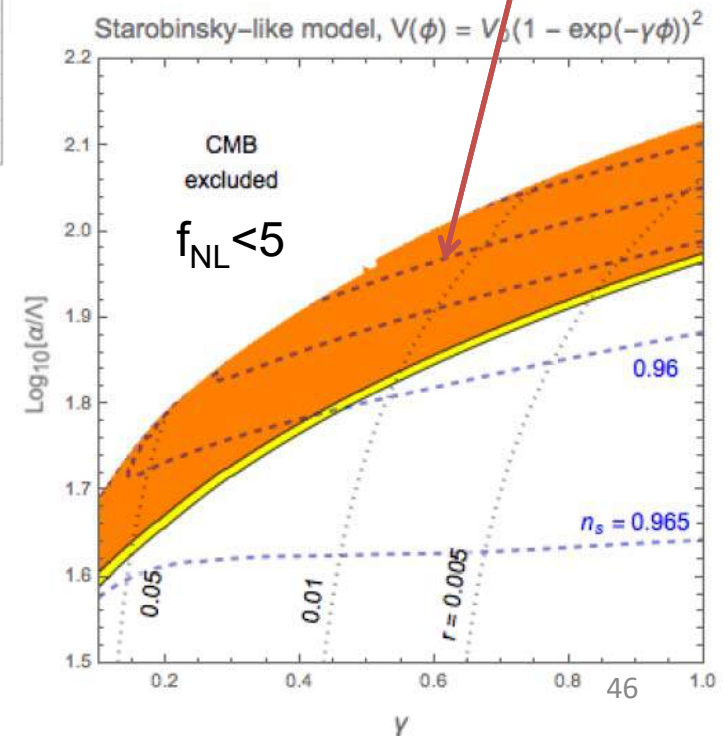
# Différents modèles d'inflation



Dans le futur, il sera possible de contraindre l'inflation

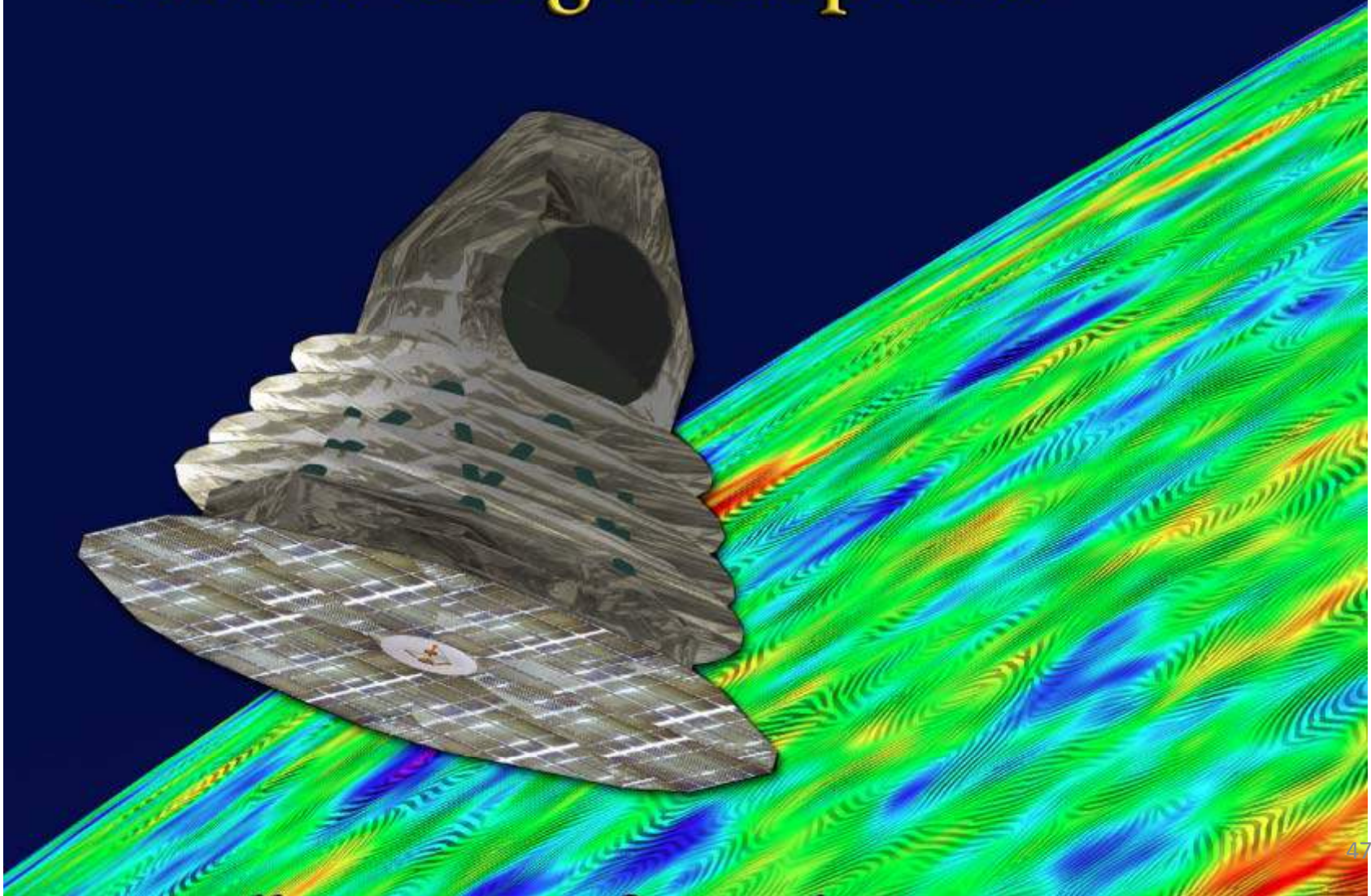
*Zone accessible LISA*

- p=1 chaotic inflation
- p=2 Starobinsky-like1 inflation
- p3, 4 two implementations of hilltop inflation



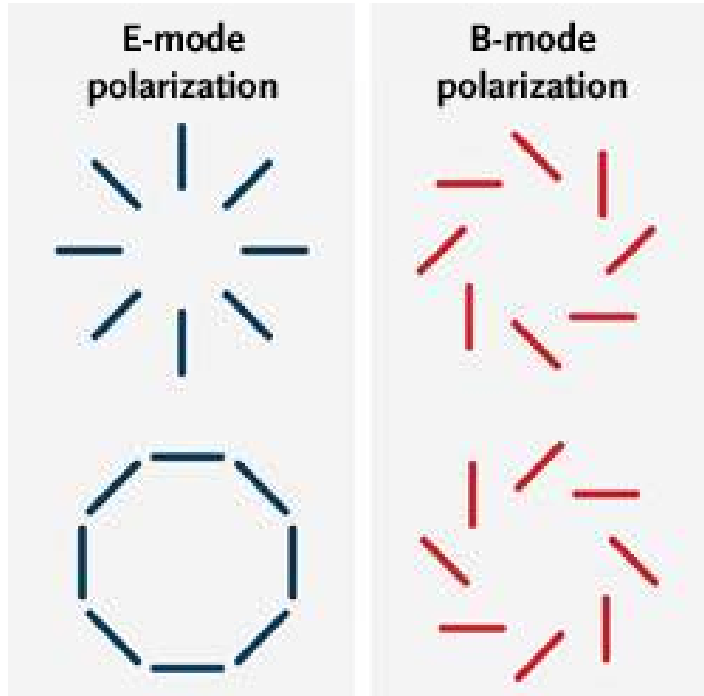
# CORE

## Cosmic ORigins Explorer

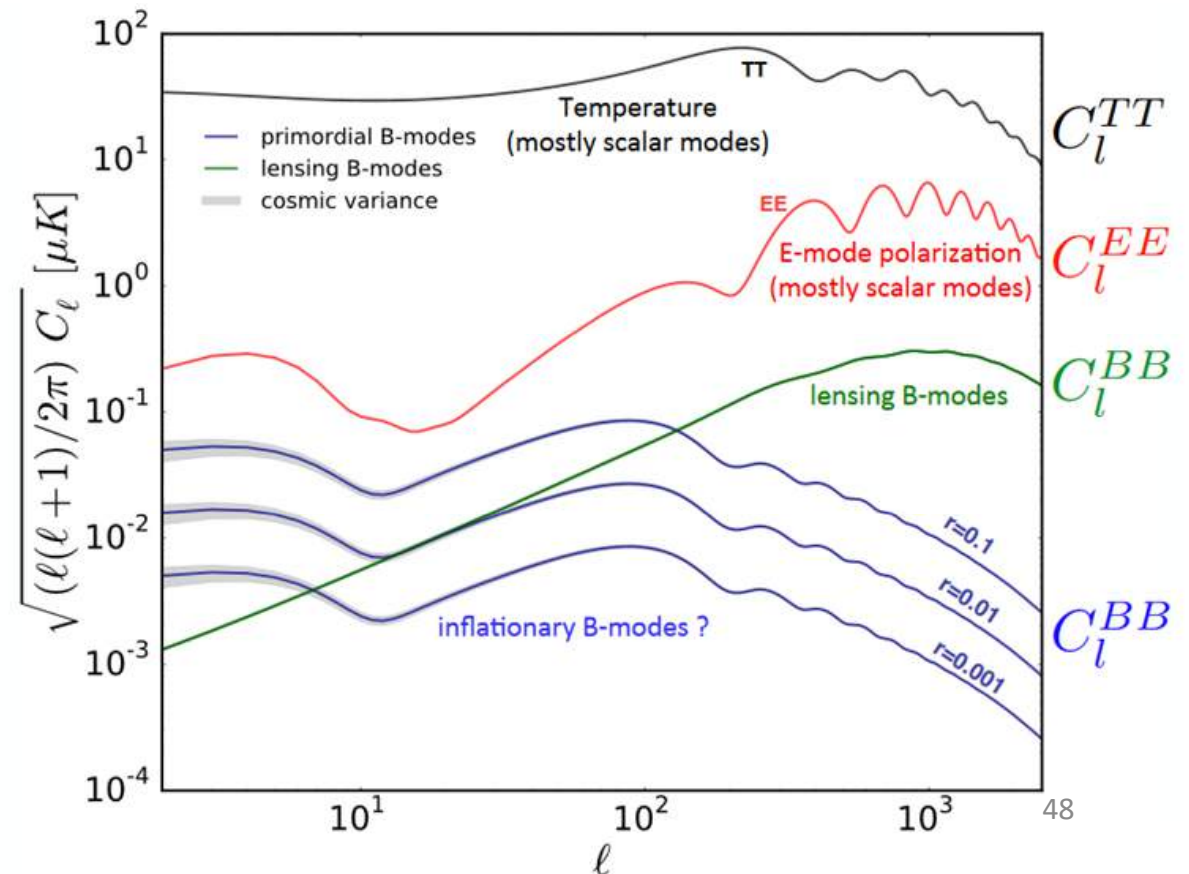


# Polarisation du CMB: mode-B

$r$  = rapport tenseur/scalaire

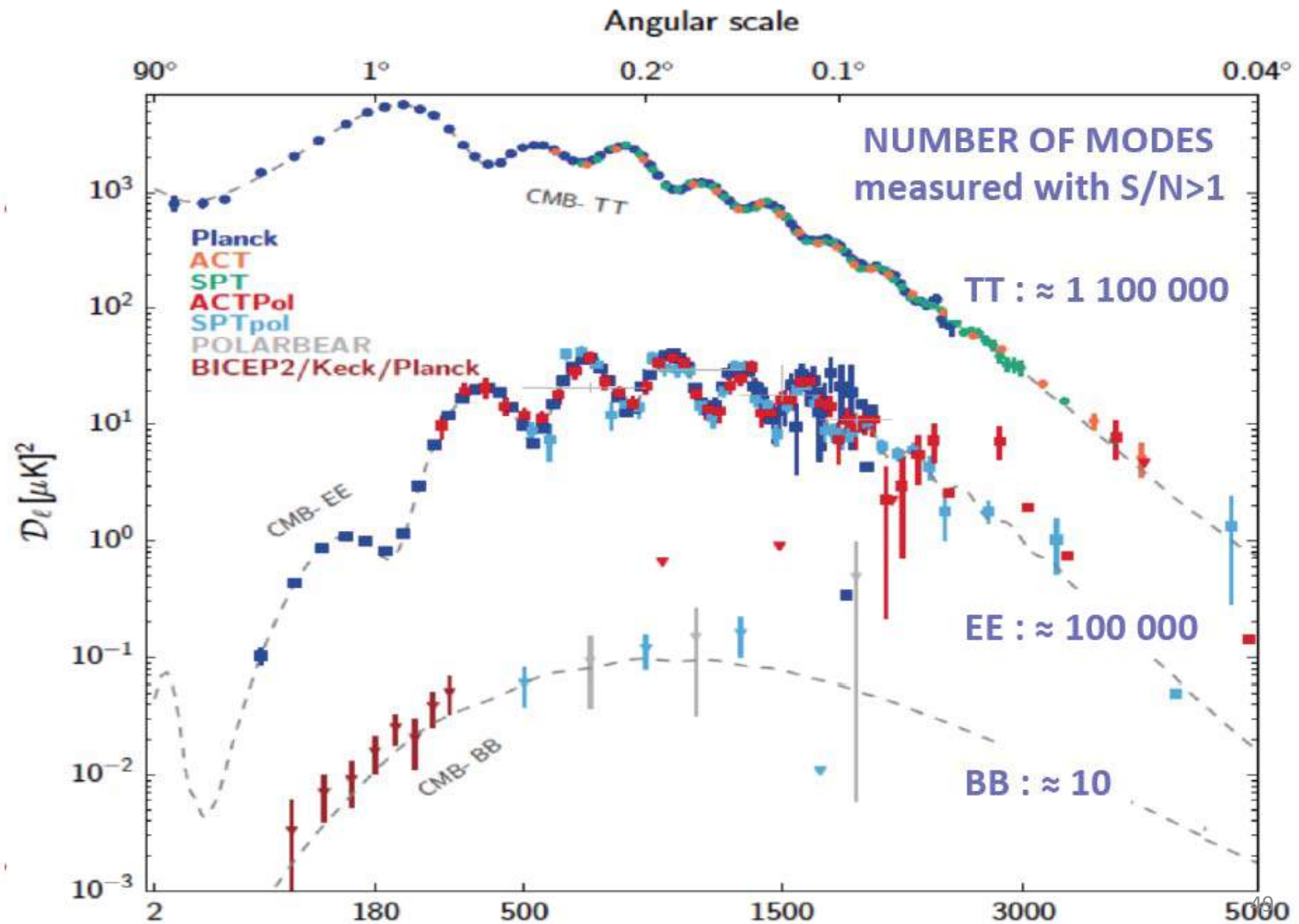


Les modes B de polarisation ne peuvent venir que des ondes gravitationnelles provoquées par l'inflation (mais 300 fois  $< T$ )





# Etat de l'art, en 2017





## Buts du projet d'origine

**Projet (~2020-30) pour un radiotélescope géant**  
**Dans les longueurs d'ondes  $\lambda$  centimétriques-métriques**

- **un kilomètre carré de surface collectrice**

**50-100 x plus sensible** que les radio télescopes actuels  
pour les observations *de raies*

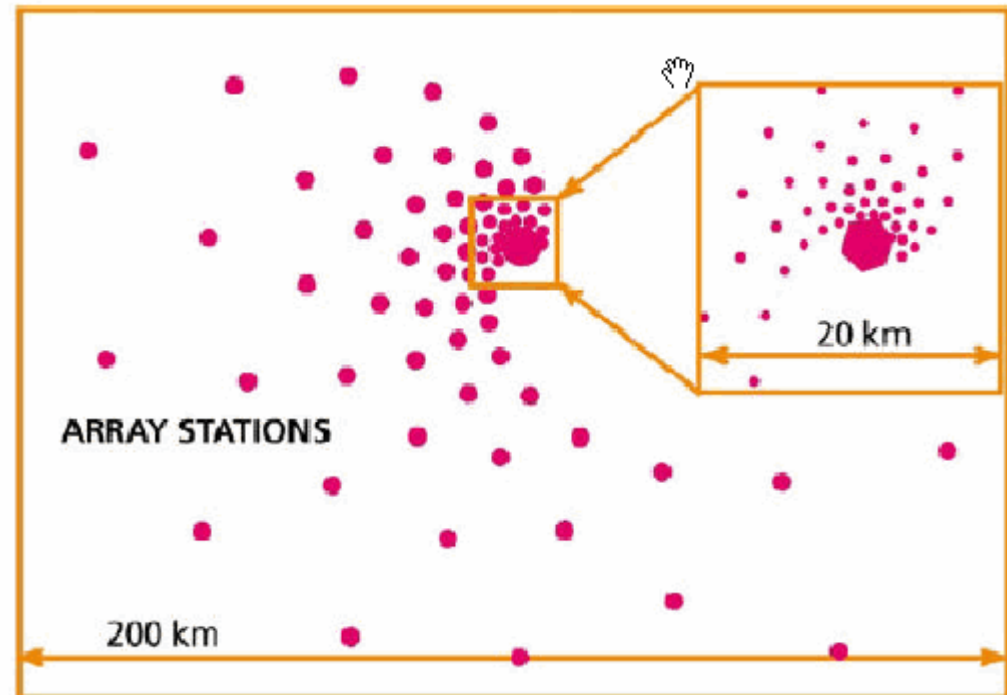
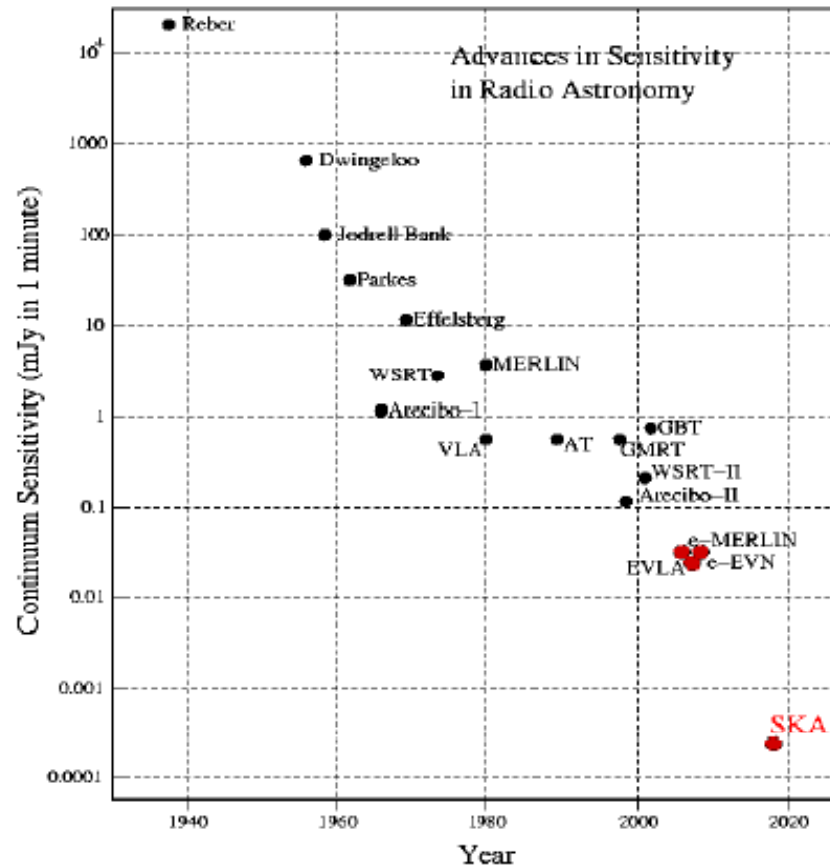
**1000 x plus sensible** que les radio télescopes actuels  
pour les observations en *continuum*

- fréquences: 70MHz – 25 GHz ( $\lambda$  1.2cm – 4m)
- champ de vue: 1 ( $\rightarrow$  100?) degrés carrés à  $\lambda$  21 cm / 1.4 GHz  
8 champs de vue indépendants
- résolution angulaire: 0.01 arcsec à  $\lambda$  21 cm / 1.4 GHz  
 $\rightarrow$  lignes de base jusqu'à  $\sim$  3000 km



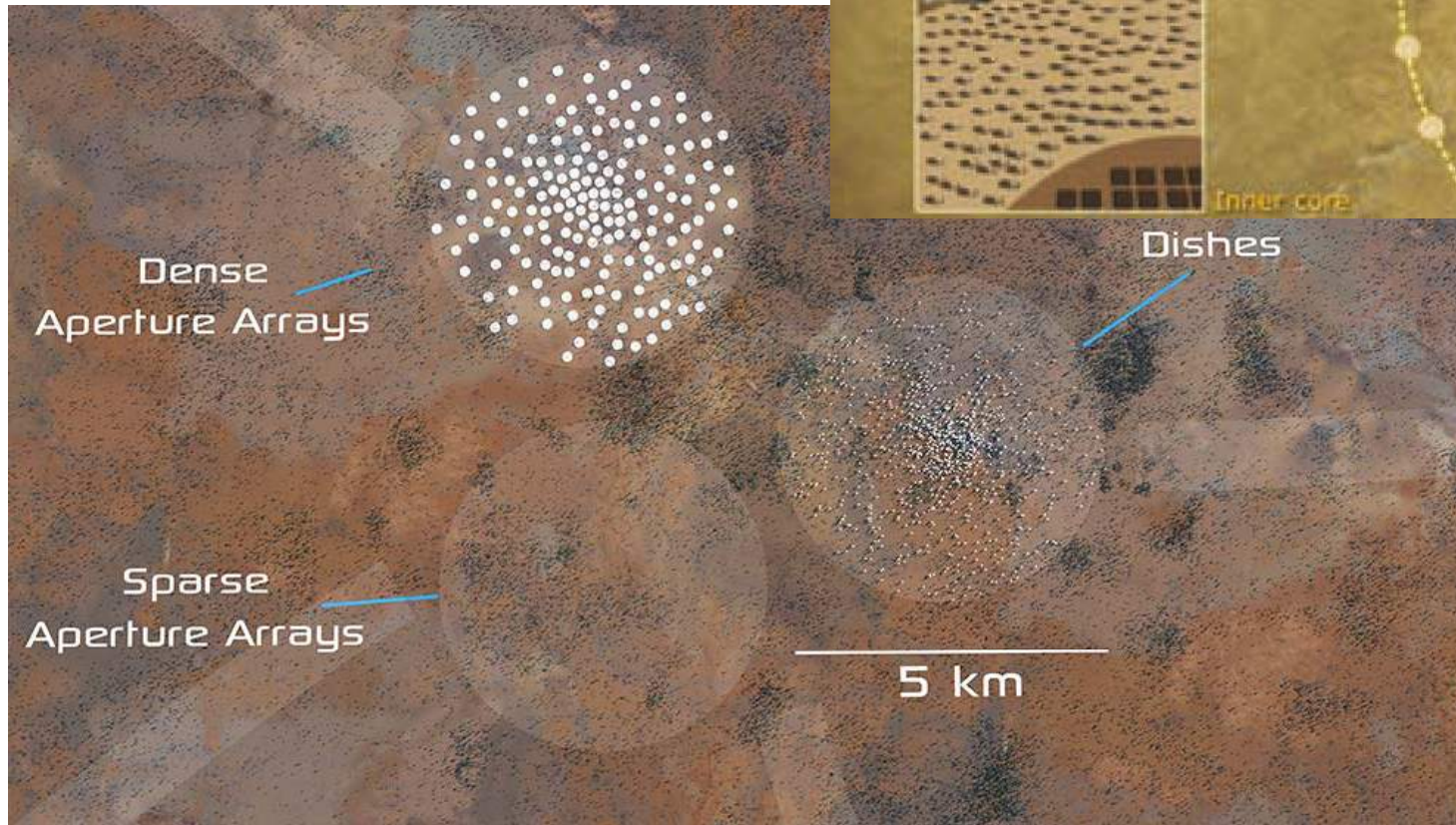
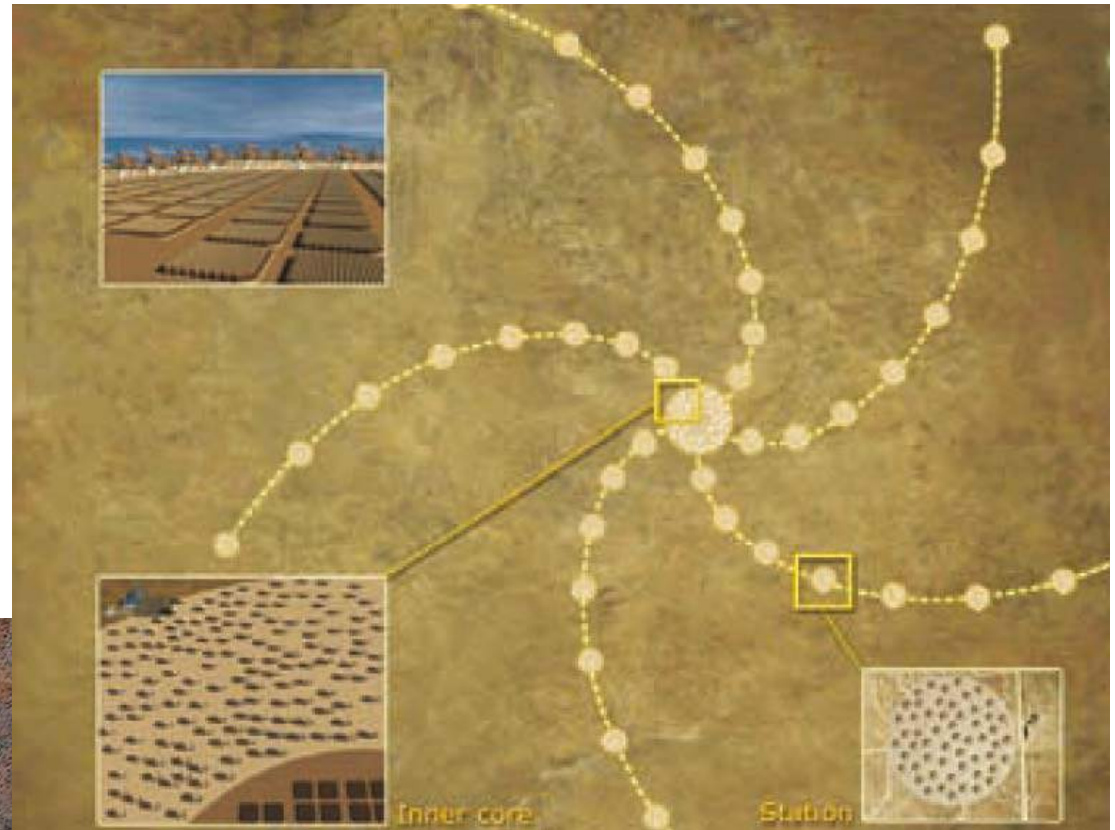
# SENSIBILITE

Sensibilité sources ponctuelles  
10 nano-Jy en 8heures



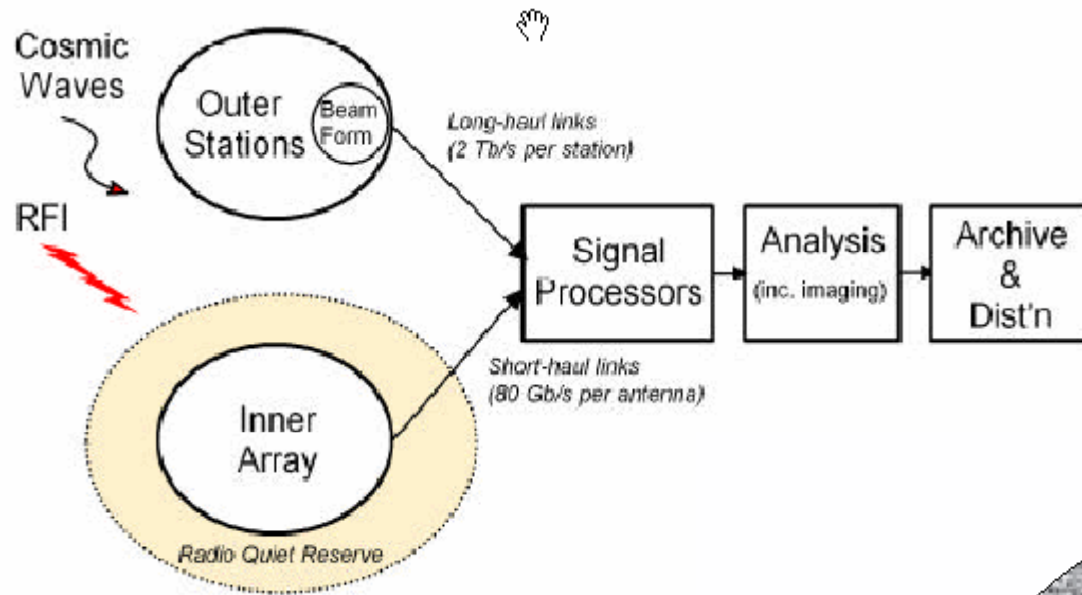
# CONFIGURATION

Disposition prévue pour le cœur du réseau

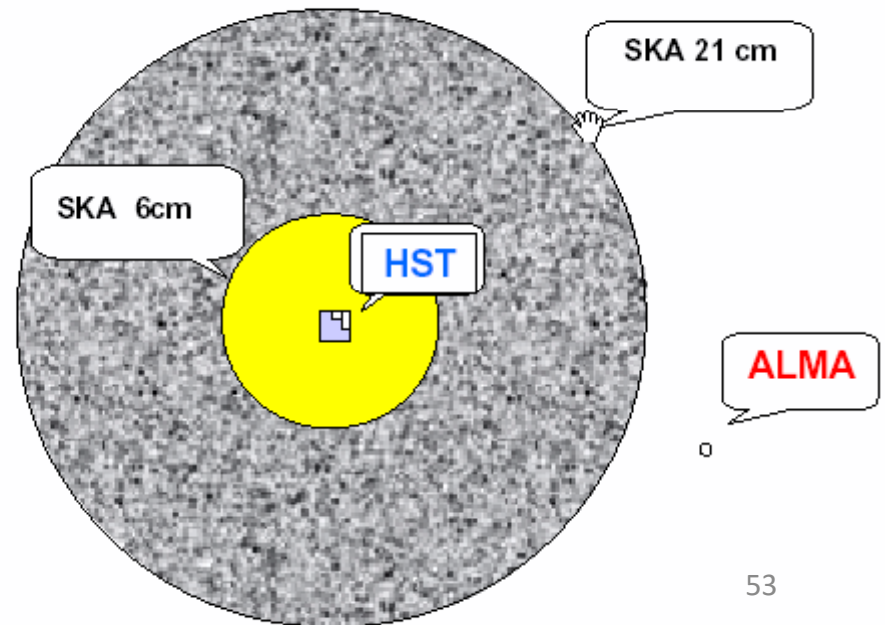




# Champ de vue

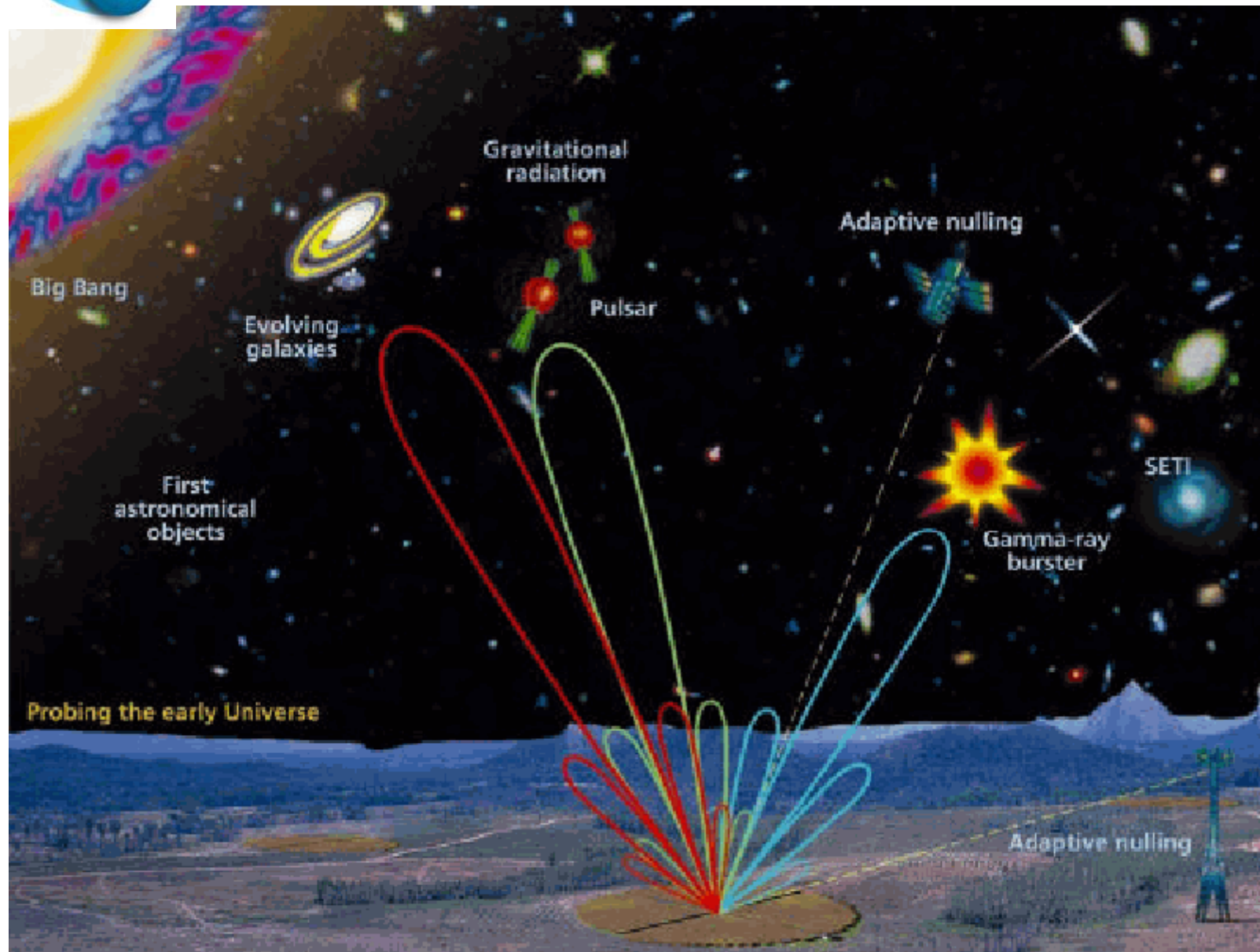


Au moins 1 degré carré  
But 50-100 deg<sup>2</sup>





# Multi-lobes

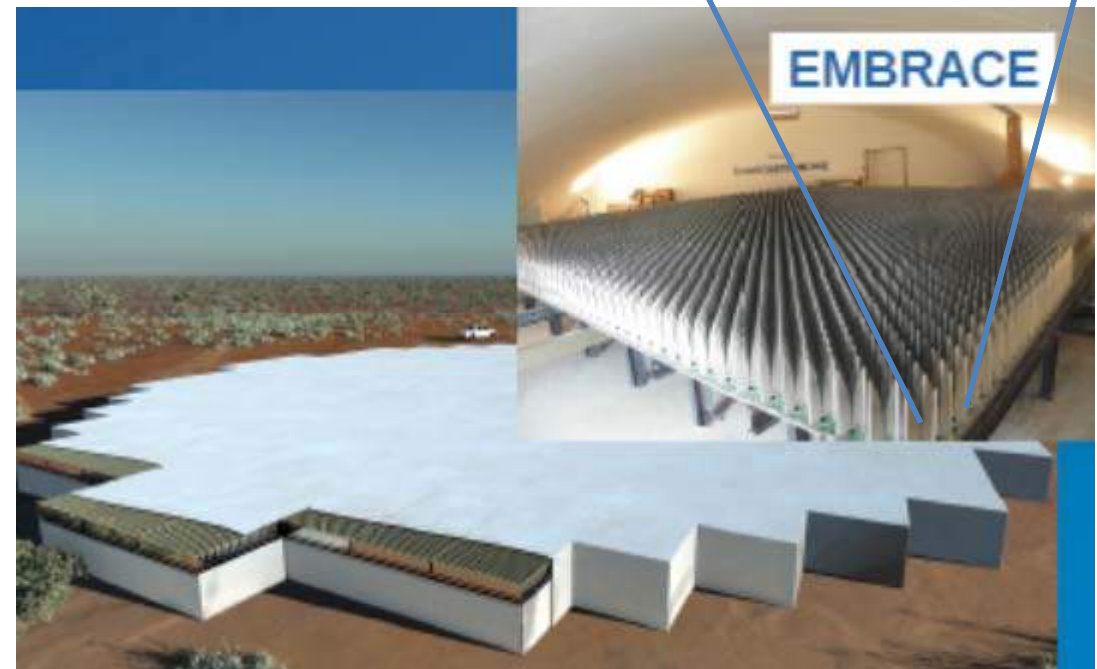
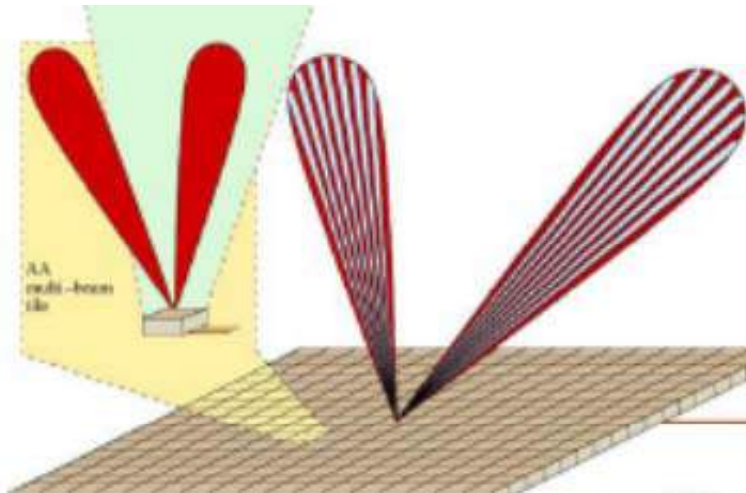




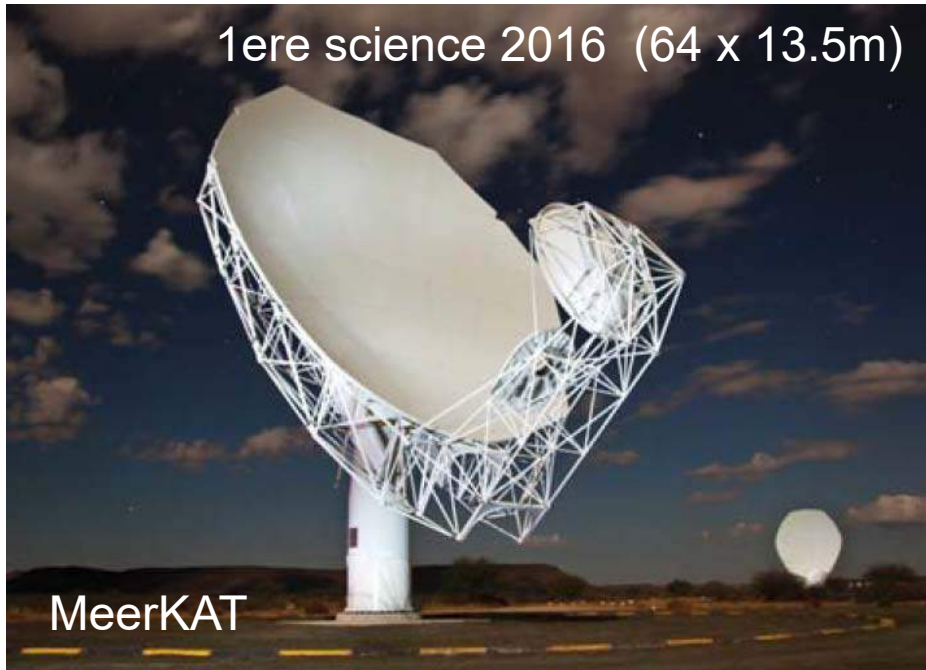
# Nouvelle technologie



**LOFAR:** problèmes des interférences RFI  
Brouillage de l'ionosphère (seeing), lobes secondaires des sources fortes, calibrations, etc..  
Basse fréquence: **EMBRACE** reconstruction de lobe



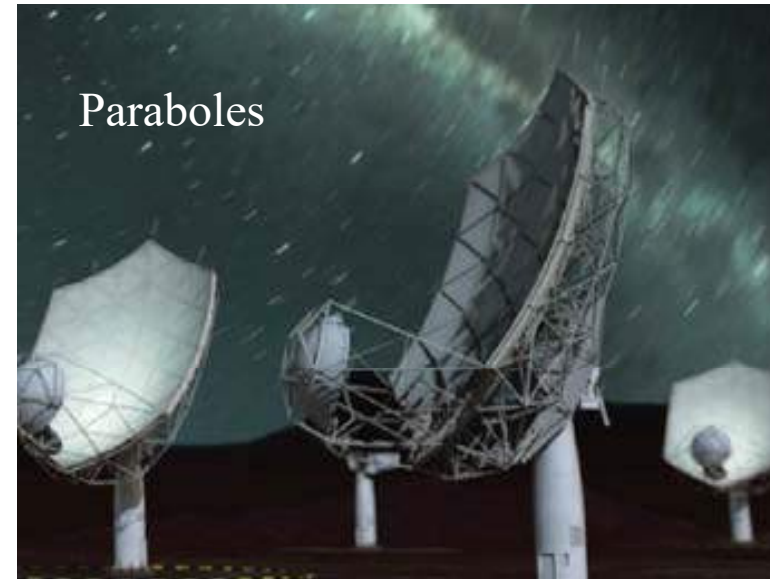
1ere science 2016 (64 x 13.5m)



MeerKAT

SKA1-mid +133 x 15m

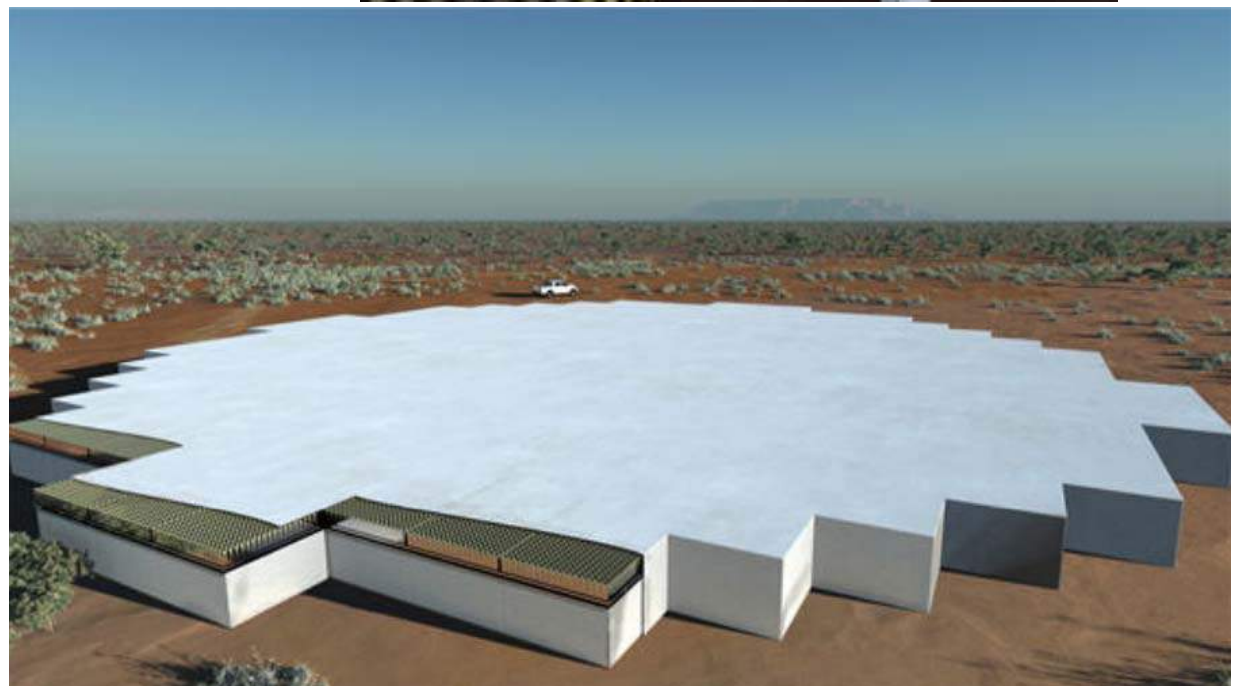
## Hautes fréquences (Afrique du Sud) SKA1



Paraboles



**Moyenne Fréquence**  
**Réseaux phasés**  
**SKA2**  
**(2500 ant ~1km<sup>2</sup>)**







## Basses Fréquences (Australie)

Plus de **900 stations**, chacune contenant environ  
**300 antennes individuelles dipolaires**, plus **96-paraboles**  
Télescope 'SKA1-Survey', incluant le réseau actuel de  
ASKAP à 36 paraboles

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



# Restructuration en 2015

Le SKA initial évalué à **1 milliard eu**

En 2014, le comité SKA limité  
à **650 Meuros**

- Délai pour le SKA1-survey
- Réduction de SKA1-mid de 70%
- Réduction de SKA1-low de 50%



Nouvelle ligne scientifique: 2000 pages, 135 chap, publié en 2015  
**Organisations de 10 pays** actuellement membres  
de l'organisation SKA – Australie, Canada, Chine, Inde, Italie,  
New Zealand, South Africa, Suède, Pays-Bas, UK  
**40% de la population mondiale!**

# Trois précurseurs de SKA

**ASKAP: Australie** Fréquence 0.7-1.8 GHz (HI à  $z=1$ )

36 × 12m antennes paraboliques: surface collectrice 4000 m<sup>2</sup>

Réseau phasé multi-lobes : champ de vue 30 deg<sup>2</sup>

Bande instantanée: 300 MHz, optimisée pour 30'' de résolution

**MEERKAT: Afrique du Sud** Fréquence 0.7-1.8 GHz (HI à  $z=1$ )

80 × 12m antennes paraboliques: surface collectrice 8000 m<sup>2</sup>

Récepteurs mono-pixel: champ de vue 1 deg<sup>2</sup>

Bande instantanée: 1 GHz, versatile en résolution: 6-80''

Les deux en construction, opérationnels en 2018

**MWA: Australie** 80-300MHz 2048 dipôles en 128 tuiles

Réseau fixe, Champ 25° à 150 MHz Résolution qqs ' (1.5km)

# Les phases 1 & 2 de SKA < 2015

Afrique



**SKA1**  
**400Me**  
**2017**

**SKA1\_MID**

**254 Dishes including:**  
**64 x MeerKAT dishes**  
**190 x SKA dishes**

Australie



**SKA1\_LOW**

**50 x Low Frequency Aperture**  
**Array Stations**



**SKA1\_SURVEY**

**96 Dishes including:**  
**36 x ASKAP**  
**60 x SKA dishes**

JVLA/meerKat → **SKA1-mid**

**Sensibilité**

6 xJVLA

**Vitesse de survey**

74

LOFAR → **SKA1-low**

16xLOFAR

520

ASKAP → **SKA1-surv**

6xASKAP

22



**SKA2\_MID**  
**2500 Dishes**

Afrique



**SKA2\_AA**

**Mid Frequency Aperture**  
**Array Stations**

**SKA2**  
**2022**



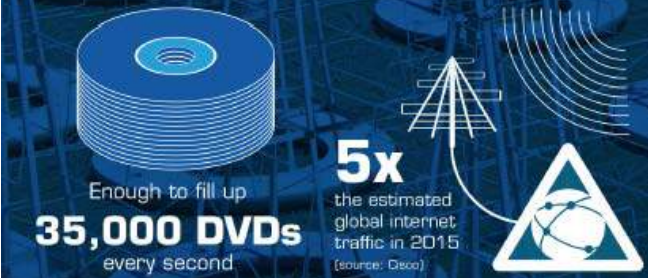
**SKA2\_LOW**

**Low Frequency Aperture**  
**Array Stations**

Australie

## SKA1 LOW - the SKA's low-frequency instrument

The Square Kilometre Array (SKA) will be the world's largest radio telescope, revolutionising our understanding of the Universe. The SKA will be built in two phases - SKA1 and SKA2 - starting in 2018, with SKA1 representing a fraction of the full SKA. SKA1 will include two instruments - SKA1 MID and SKA1 LOW - observing the Universe at different frequencies.



## SKA1 MID - the SKA's mid-frequency instrument

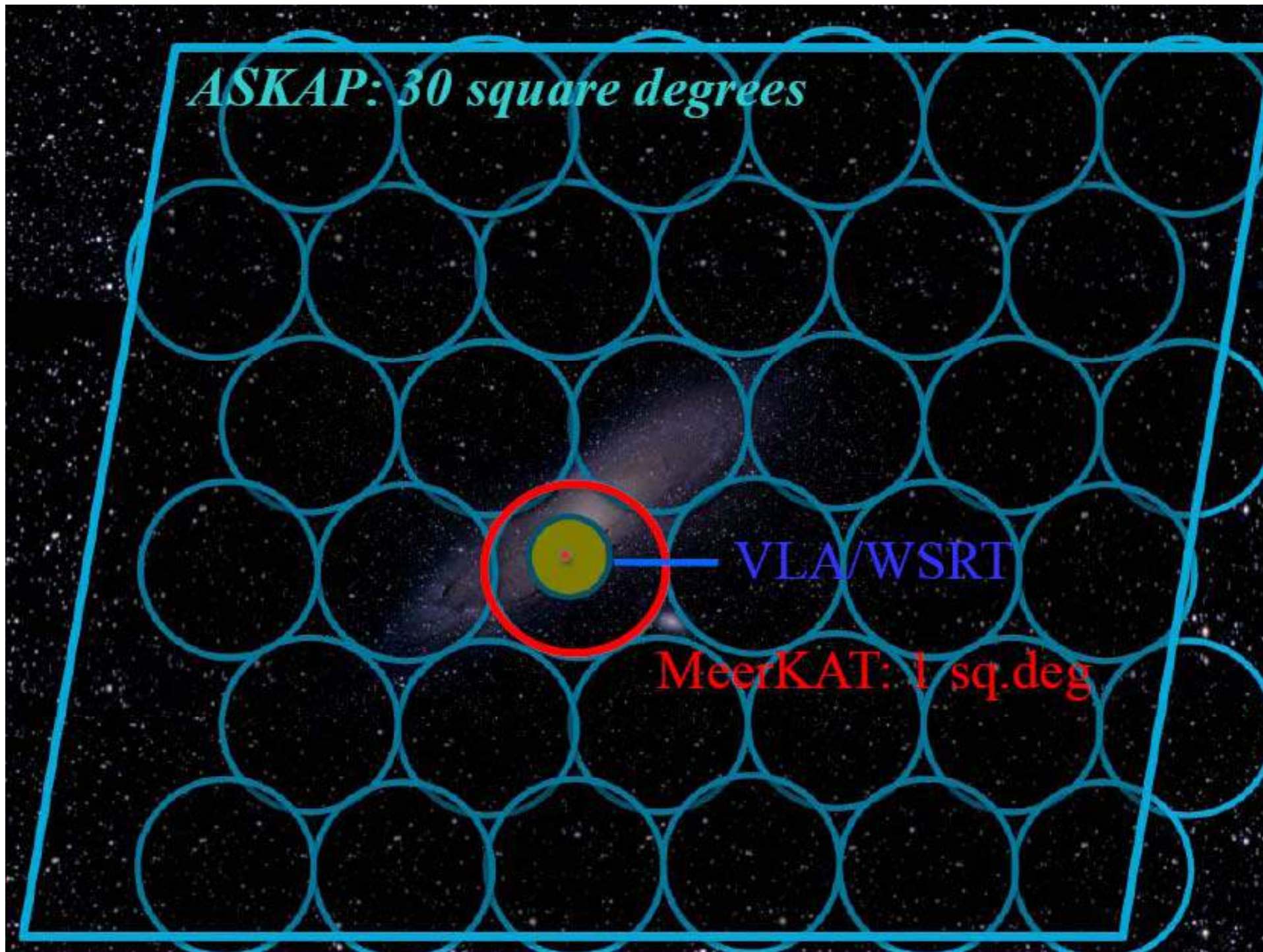
The Square Kilometre Array (SKA) will be the world's largest radio telescope, revolutionising our understanding of the Universe. The SKA will be built in two phases - SKA1 and SKA2 - starting in 2018, with SKA1 representing a fraction of the full SKA. SKA1 will include two instruments - SKA1 MID and SKA1 LOW - observing the Universe at different frequencies.



*ASKAP: 30 square degrees*

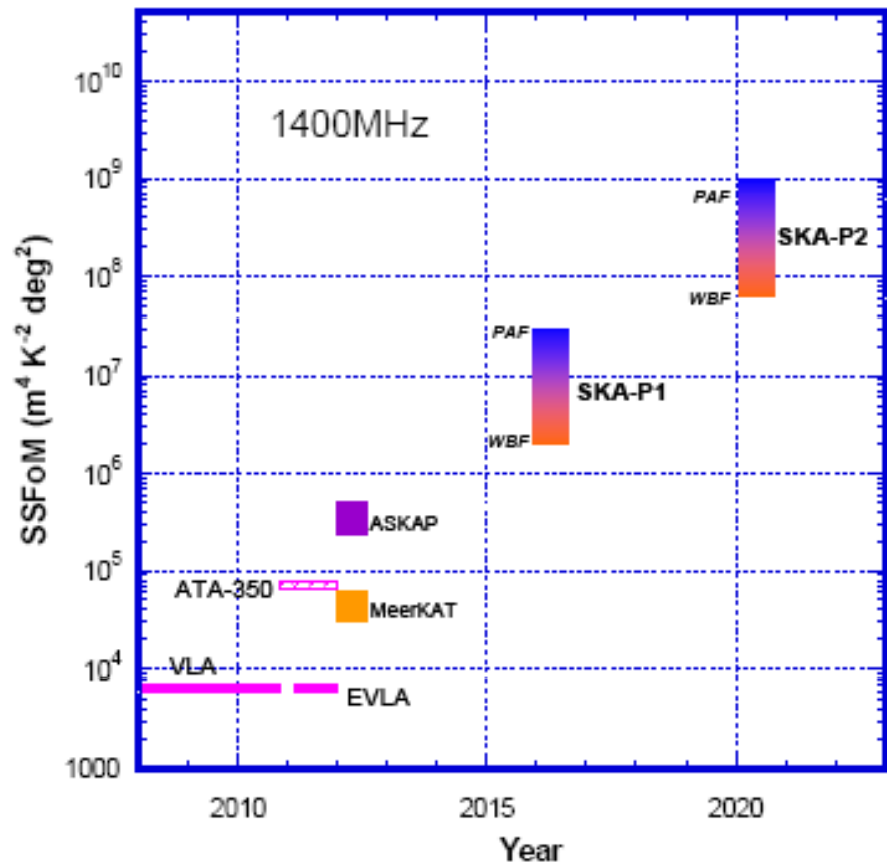
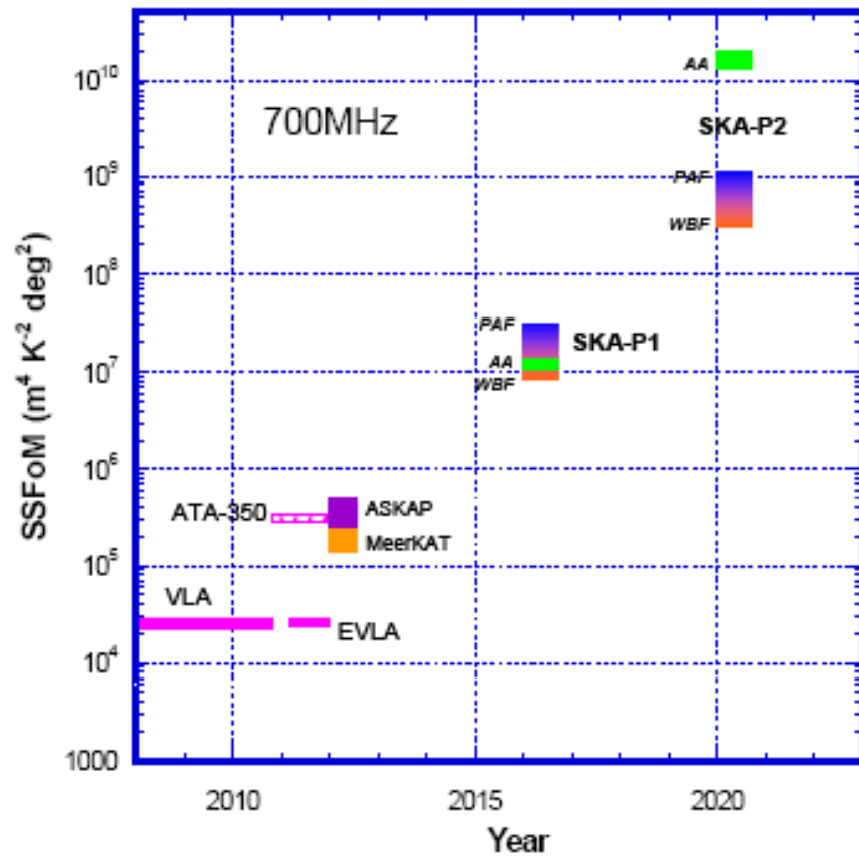
VLA/WSRT

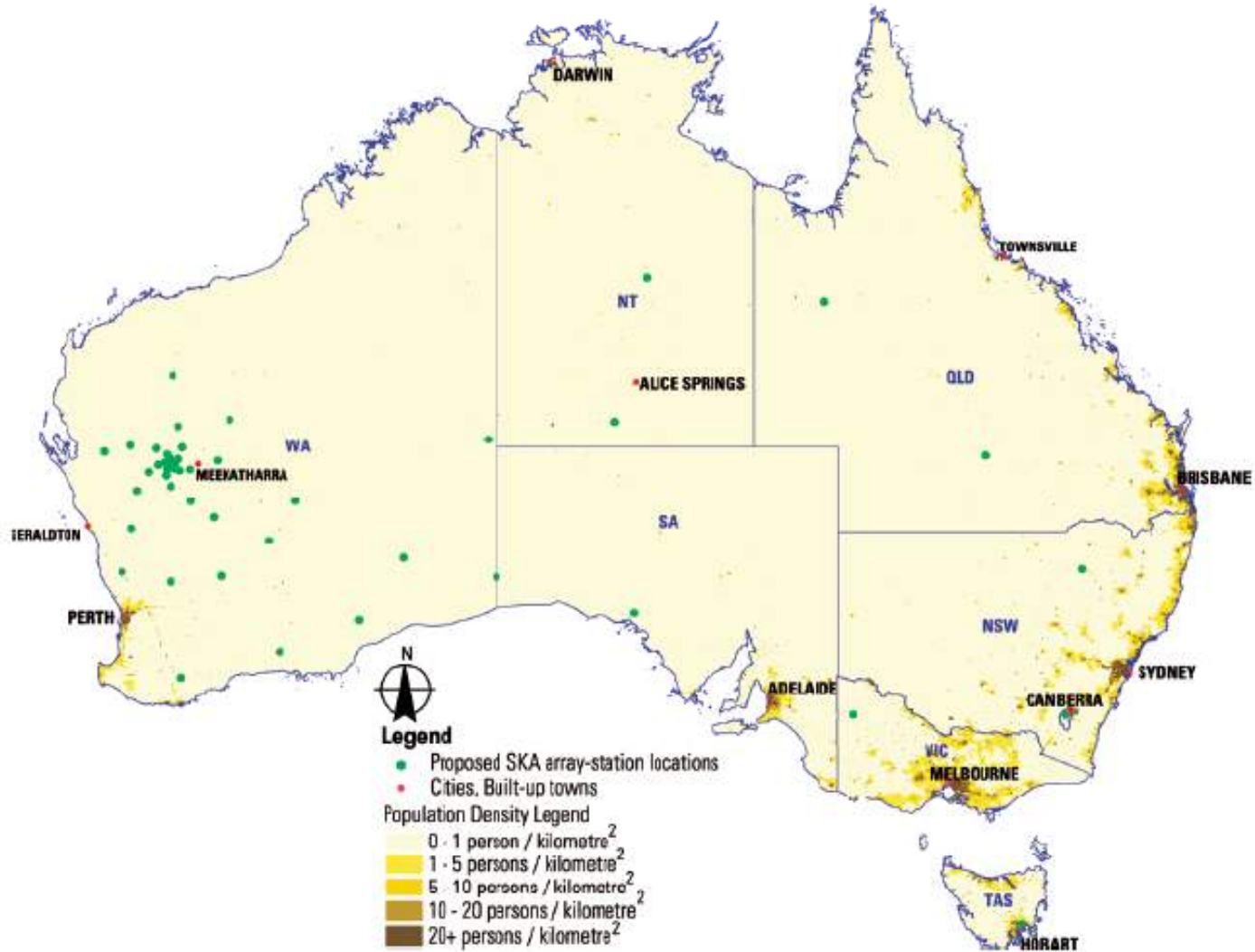
MeerKAT: 1 sq.deg





# Vitesse de survey

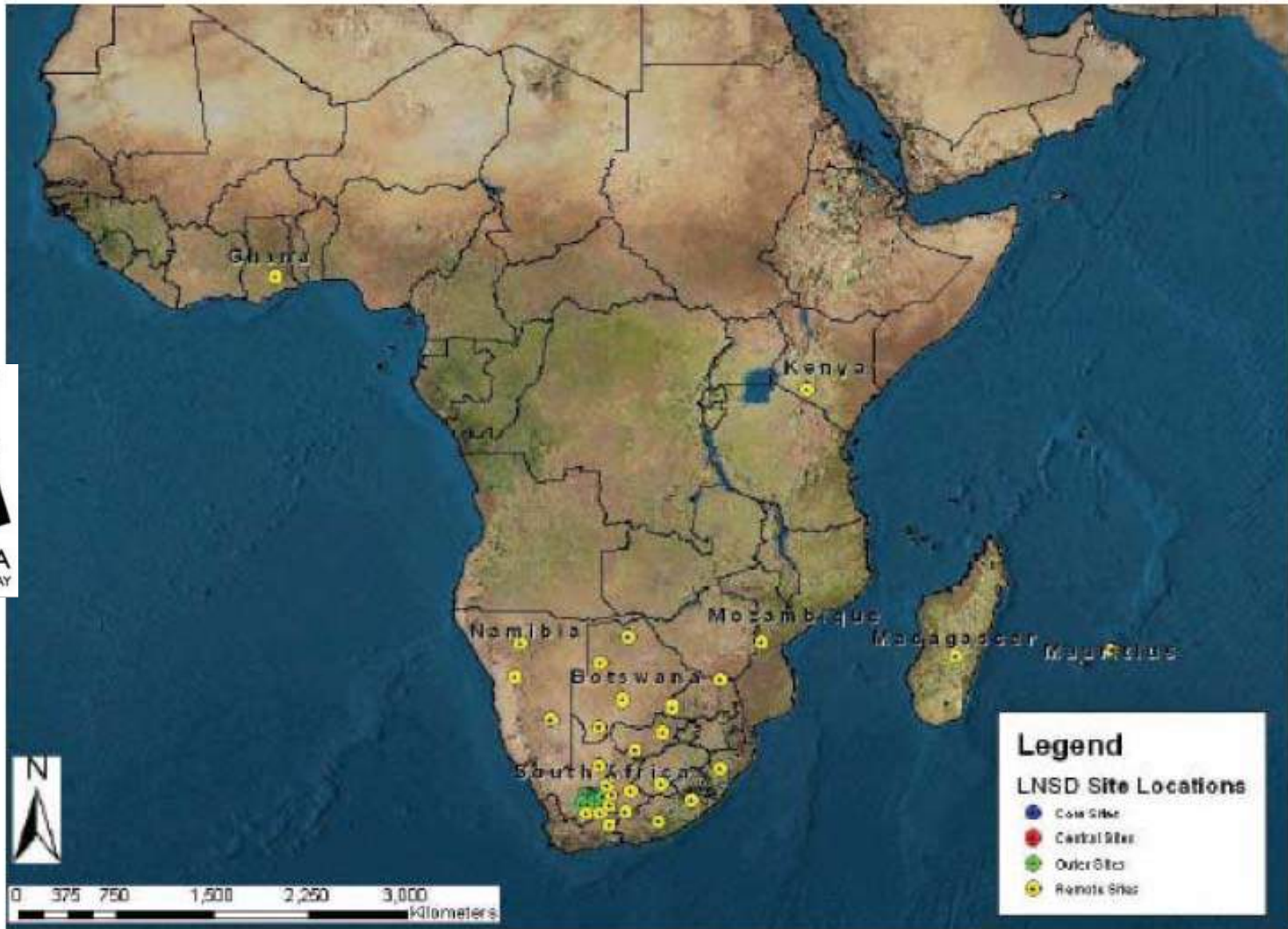








# South Africa + 7 countries



# Précurseurs et pathfinders: Complémentarité

Précurseurs

## **ASKAP:**

-grand champ/tout le ciel, surveys peu profonds

## **MeerKAT**

-petits champs, surveys profonds, résolution variable

Pathfinders

## **WSRT + APERTIF: (Pays-Bas)**

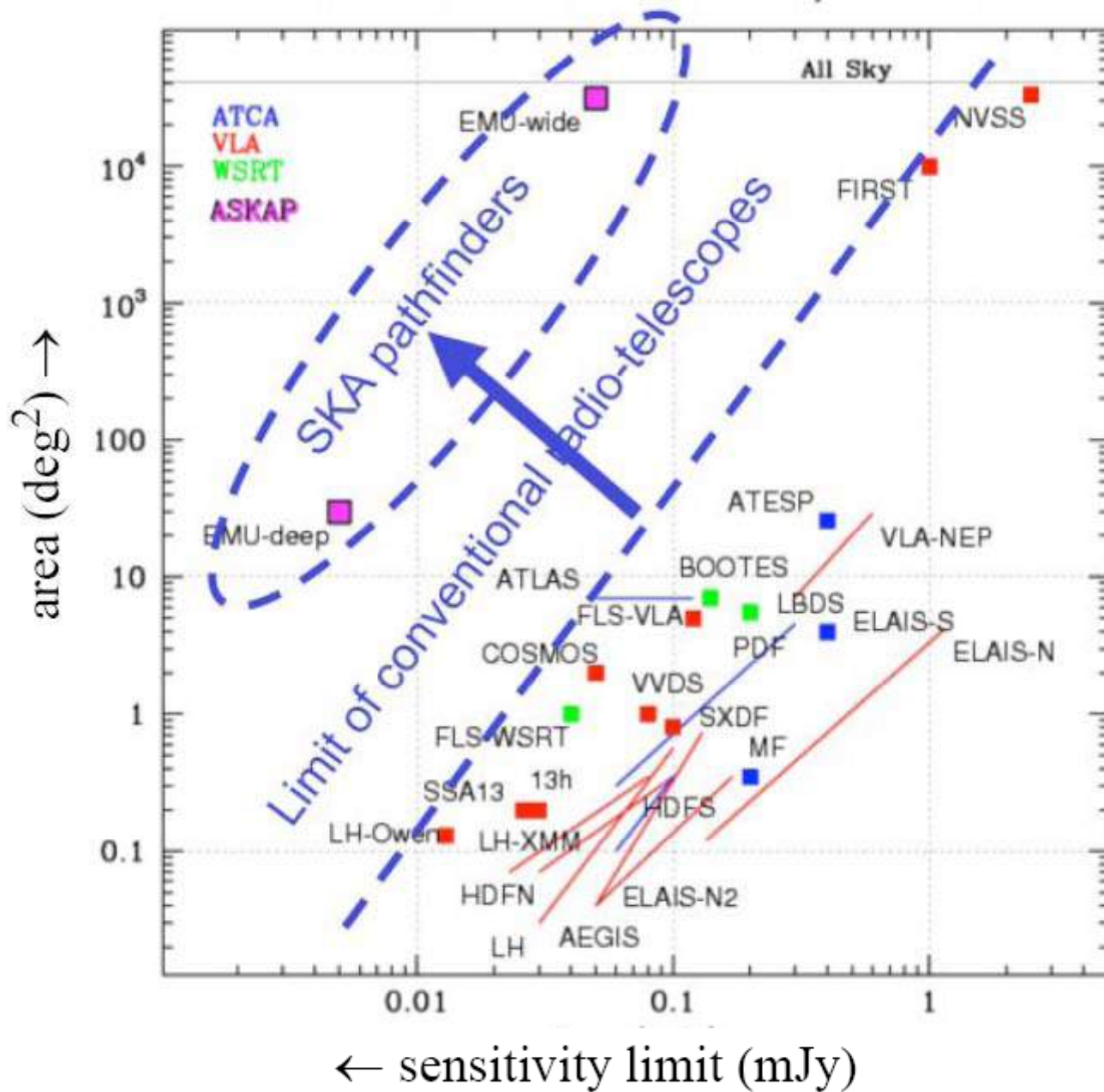
-hémisphère nord, en commun  $\delta+25^{\circ}$ - $30^{\circ}$

## **VLA: (USA)**

-longue intégration de petits champs,  $\delta-40^{\circ}$  seulement

**NENUFAR** (Nancay, France) la plus basse fréquence!

Major Deep Surveys @ 1.4 GHz (updated 2009)



# Le cœur de LOFAR

6 stations dans l'île circulaire, chacune avec 96 antennes BF, et 2 stations de 24 tuiles HF

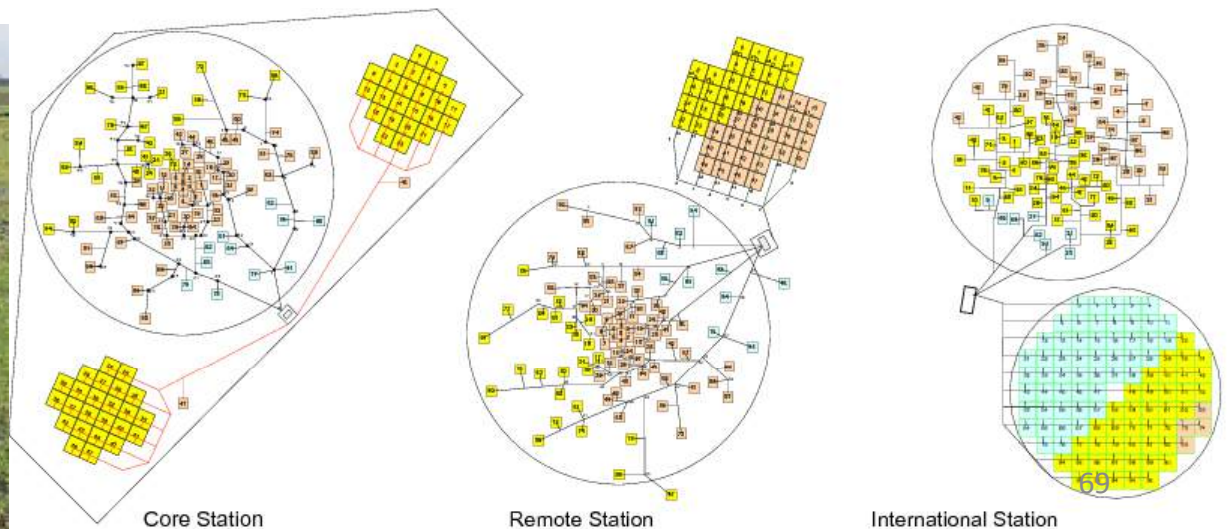


Basse fréquence 30-80MHz  
Hautes 110-250 MHz

Intérieur des 24 tuiles HF



Antennes dipôles BF



# La station LOFAR de Nançay + NENUFAR



# FAST: « Five hundred-m Aperture Spherical Telescope »



Chine: vallée, dépression Karstique, province de Guizhou



Télescope fixe,  
type Arecibo  
(300m)

Surface  $1/4\text{km}^2$

*Photo 2016*

# FAST: prêt aujourd'hui!

4600 panneaux triangulaires, 3 fois plus sensible que Arecibo  
Optique active, peut observer jusqu'à  $40^\circ$  du zénith  
Fréquence 0.3 et 3 GHz, Résolution  $4''$



Photo: Juillet 2015



# LSST « Large Synoptic Survey Telescope »

LSST observe tout le ciel austral à  $\delta=+15^\circ$  avec des poses de 10 sq.deg

**Deux surveys planifiés:**

**Le principal**

Survey étendu profond: 18 000 degrés carrés à une profondeur de  
u: 26.1 g: 27.4 r: 27.5 i: 26.8 z: 26.1 y: 24.9

**Survey très profond, focalisés**

10% du temps: ~30 champs sélectionnés  $300''^2$   
Continuellement poses 15sec. 1heure/nuit



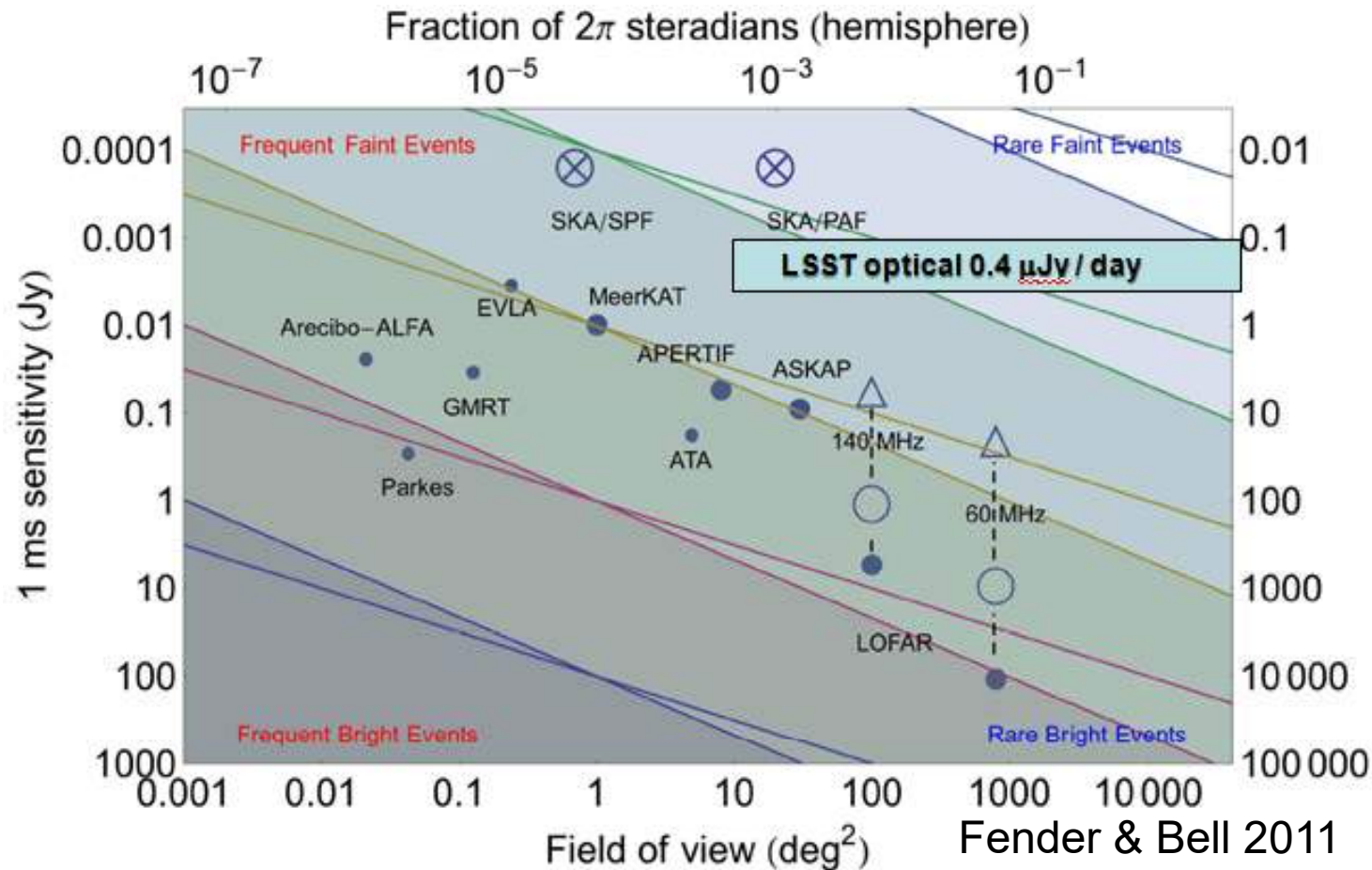
**Tout le ciel visité 800 fois avec des poses de 30s**

**Alertes sur les objets variables relayées partout dans les 60s.**

# Une nouvelle dimension: le ciel variable

5 FRB (Fast Radio Burst) par jour attendus avec SKA2  
 LSST ( Large Synoptic Telescope) millions d'alertes/jour

PopIII SN?



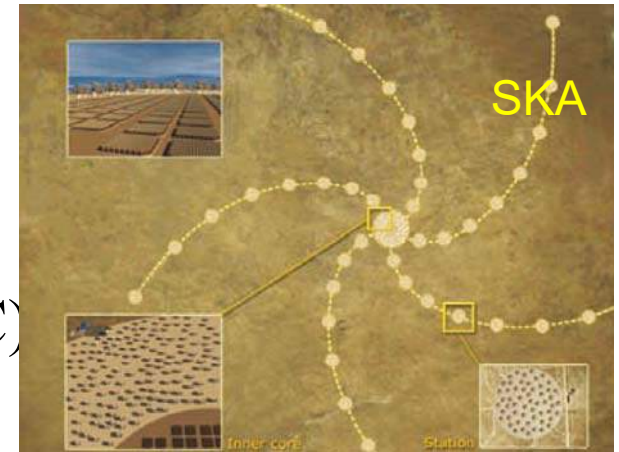
# Traitement des données

**Un énorme défi, SKA: qqs Petabytes/sec**

Machines Petaflops travaillant en continu ( $10^8$  PC)

Qq Exabytes/h, paraboles=10x internet global,

Réseaux Phasés =100x le trafic internet global!



**LSST: plus de la moitié du coût est dû aux data processing!**

**1-2 millions d'alertes par nuit, disponibles à tous en 60sec**

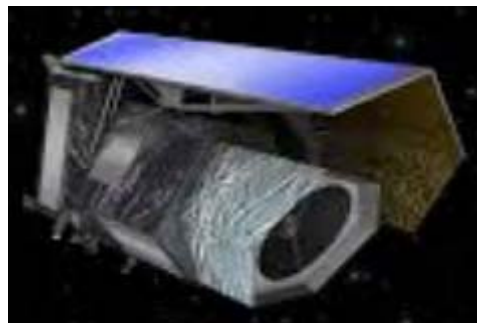
**15 Tbytes /nuit**

**Tous les 3 jours on observe tout le ciel 20 000 degrés carrés**

**3200 Mpixels, 10 deg<sup>2</sup>, 15s/pose**

**Euclid:**

**100Gb/jour**



# Conclusion: perspectives

→ **Nature de l'énergie noire** : diagnostics avec les 5 outils: BAO, WL, SNIa, RSD, amas de galaxies (Euclid, SKA, LSST, WFIRST)

→ **Gravité modifiée**: taux de croissance des structures (RSD, amas de galaxies, Euclid, SKA, LSST)

→ **Fluctuations primordiales**: amplitude  $\sigma_8$ , pente du spectre des fluctuations  $n$ , taux de non-gaussianité  $f_{\text{NL}}$

→ **Inflation**: réseau de pulsars, et ondes gravitationnelles (SKA, LISA) CMB, et rapport perturbations tenseur/scalaire (Core)

# Synergie des diverses longueurs d'onde

