



Le ciel variable :

LSST – Observatoire Vera-Rubin

Pierre Antilogus

LPNHE-IN2P3,

Universités de Paris & Sorbonne

Collège De France

22 novembre 2022

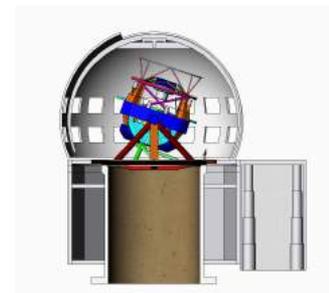
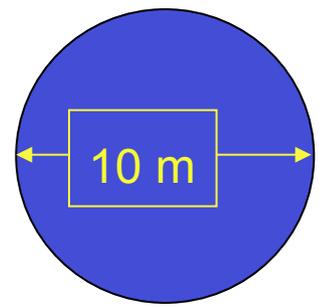
LSST & les point clefs pour « voir » / étudier le ciel variable

Miroir primaire
diamètre

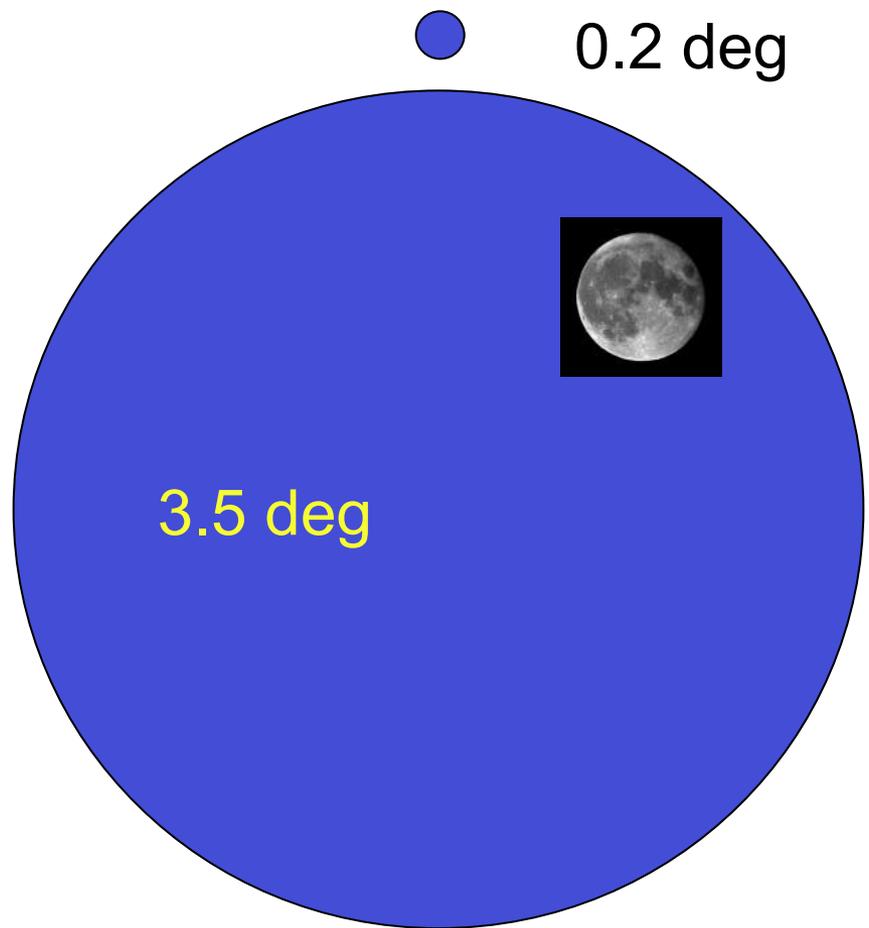
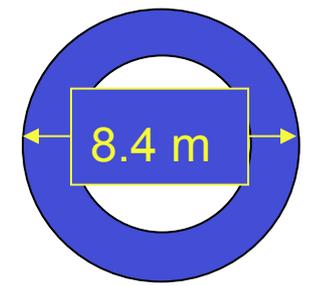
Champ de vue
Pleine lune= 0.5 deg



Keck
(Hawaii)



LSST



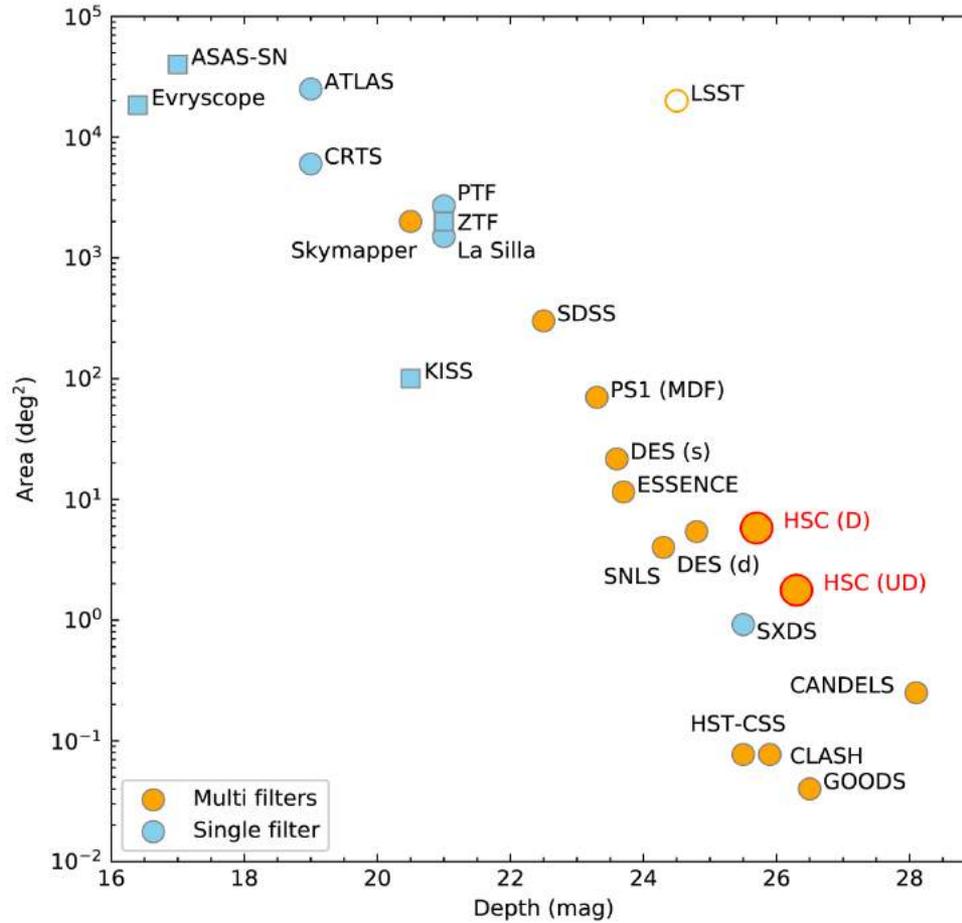
Etendue = Surface du miroir * Champ de vue
 ~volume d' Univers ~ (~distance accessible) * (~surface de ciel)

- **Augmentation de l'Etendue par**
 - Une faible augmentation de la surface des miroirs
 - Forte augmentation du champs de vue et donc des pixels de la camera

Remarque : depuis le sol l'atmosphère limite la sensibilité dans l'infrarouge : accroître la taille du miroir au delà une sensibilité de ~ 26.5 mag, ne permet pas d'accroître de façon significative le volume d'univers sondé / la densité de galaxie par unité de surface de ciel: les objets à grand décalage dans le rouge sont dans un domaine spectral hors d'atteinte depuis le sol.
- **Augmentation du temps dédié aux relevés systématiques**
 - LSST est le premier télescope de cette taille avec 1 programme de relevé unique 100% du temps
 - LSST = 1 telescope + 1 camera + 1 programme d'observation
 - Minimiser les temps morts : Pointé rapide du télescope , lecture rapide des CCD , changement rapide des filtres ...
- **Voir le ciel variable = revenir souvent sur la même portion de ciel**
 - ZTF (mag lim ~ 20 , hémisphère nord , 2017+) et LSST (mag lim ~ 24 , hémisphère sud , 2023+) , sont les deux survey phares, à couvrir le « ciel complet » en continue .

➔ **l'objectif : maximiser le volume d'univers observé en « continue »**

Telescope	Année de mise en service	Etendue en $m^2 \text{deg}^2$ ~	Miroir eff. Diam en m	Champ de vue en deg^2	Nb CCD science (+focs&guide)	Nb pixels "science" 10^9	Read out time+clear	Obs. time pour survey	Survey pour Transitoire
LSST	2023+	319	6.6	9.6	189 (+12)	3.092	2s	100% x 10 ans	4000 deg^2 par nuit
ZTF	2017+	53.1	1.2	47	16	0.605	8s	100%	3750 deg^2 par heure
HSC/ Subaru	2011+	92	8.2	1.77	104 (+12)	0.872	20+~15s	HSC sur ciel ~25% du temps	SSP-SN ~8 deg^2 (quelques lunaisons)
DECam/ CTIO	2011+	32	3.9	3.0	62 (+12)	0.520	17+3s	758 nuits/6 ans (fin 2019)	SN 30 deg^2
Megacam/ CFHT	2003+	10.2	3.6	1.0	36(+2) (CFHTLS)	0.340	40s	100 nuits/an x 5 ans	CFHTLS 2x2 deg^2



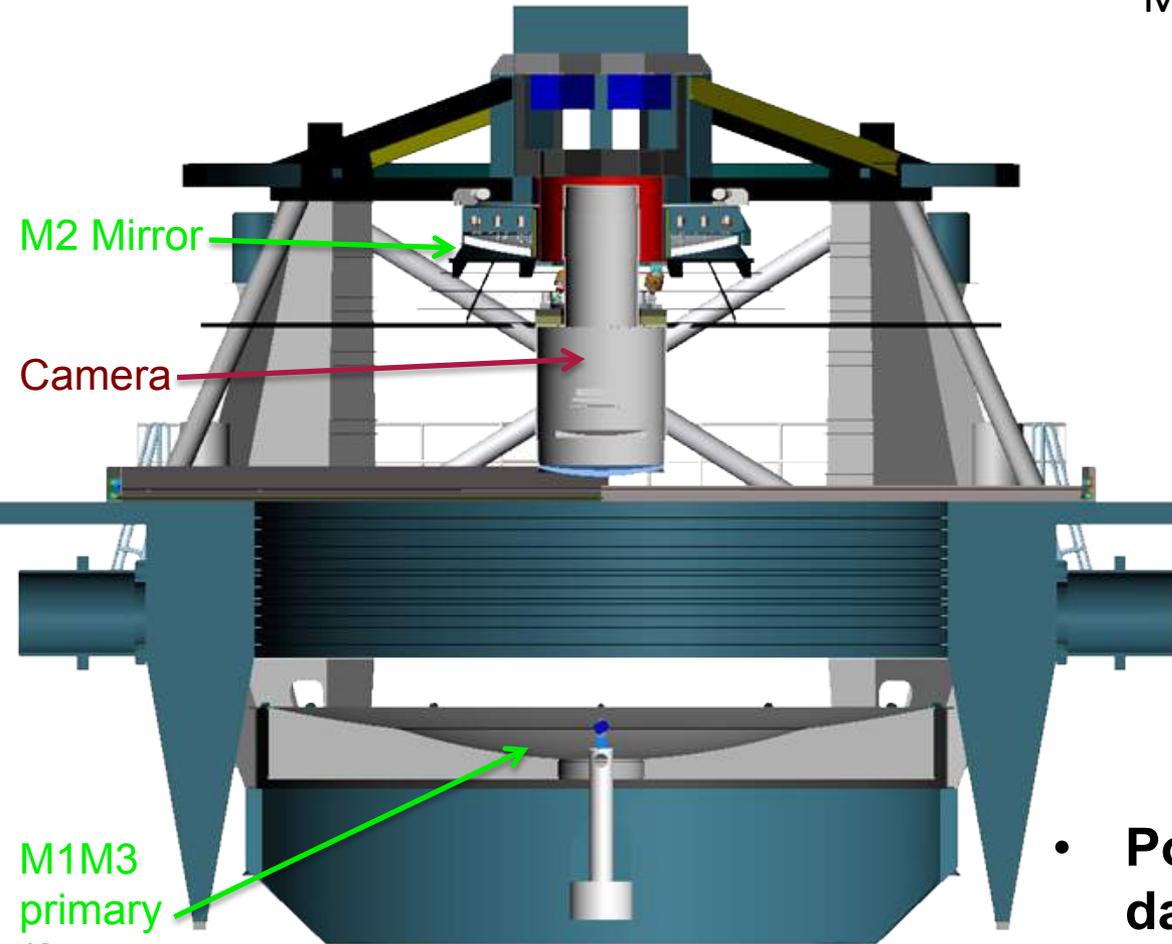
Le survey LSST (Legacy Survey Space & Time) sera réalisé à partir de 2024 au Rubin Observatory qui est en cours de construction . On peut souligner à son sujet :

- Le survey LSST collectera des données du ciel optique en continue pendant 10 ans , couvrant à la fois de grandes surfaces et en allant profond , le tout à haute cadence (deep, wide , fast) . Il repose sur un télescope grand champ au sol de la classe des 8m (6.6 m effectif) , avec un plan focal record de $3.2 \cdot 10^9$ pixels et un traitement en temps réel du volume énorme des données collectée .
- Sur une décade , LSST va acquérir , analyser et rendre disponible , plus de 5 millions d'images et des catalogues avec plus de $37 \cdot 10^9$ d'objets , on total de plusieurs 10 aine de milliard d'évènements transitoires seront détectés et rendus disponibles en temps réel.
- LSST couvrira un large domaine de recherche , utilisant une base de donnée commune et un système d'alerte public. Ces études couvriront entre autre le "ciel variable" allant à la détection des petits/faibles objets du système solaire, les étoiles variables dans notre galaxie , et tous les transitoires optiques galactiques et extra-galactiques (Nova, KiloNova , Supernova , Noyaux actifs de galaxies ...). Un autre champ majeur de la science dans LSST concerne la cosmologie et la fourniture de contraintes clef sur la matière et l'énergie noire.

La monture compacte du télescope permet des déplacements et une stabilisation rapides

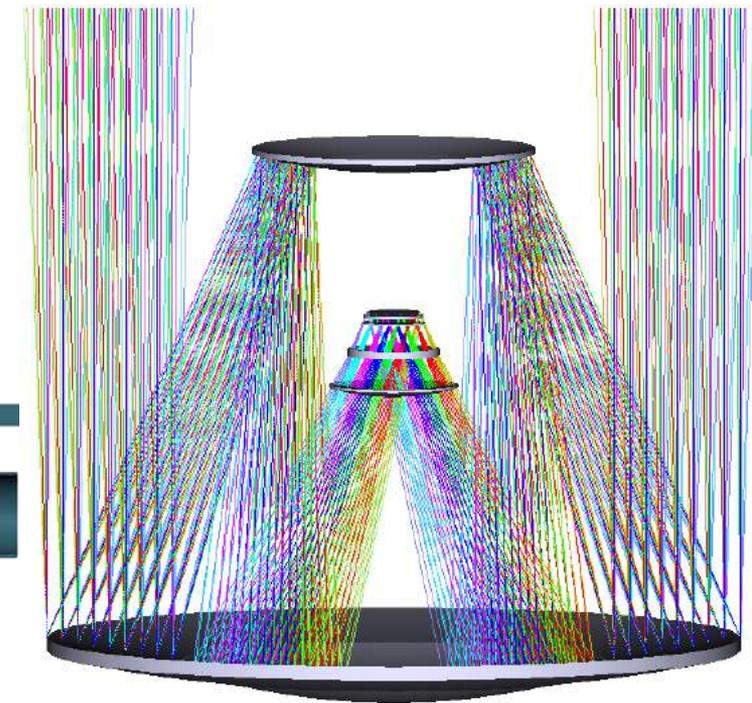
LSST Etendue : $319 \text{ m}^2 \text{ deg}^2$

Modified Paul-Baker Optical Design



M1M3
primary
(8.4m,
effective
6.7m) &
Tertiary
mirrors

Structure en Mouvement 350 tones
Système optique : 60 tones

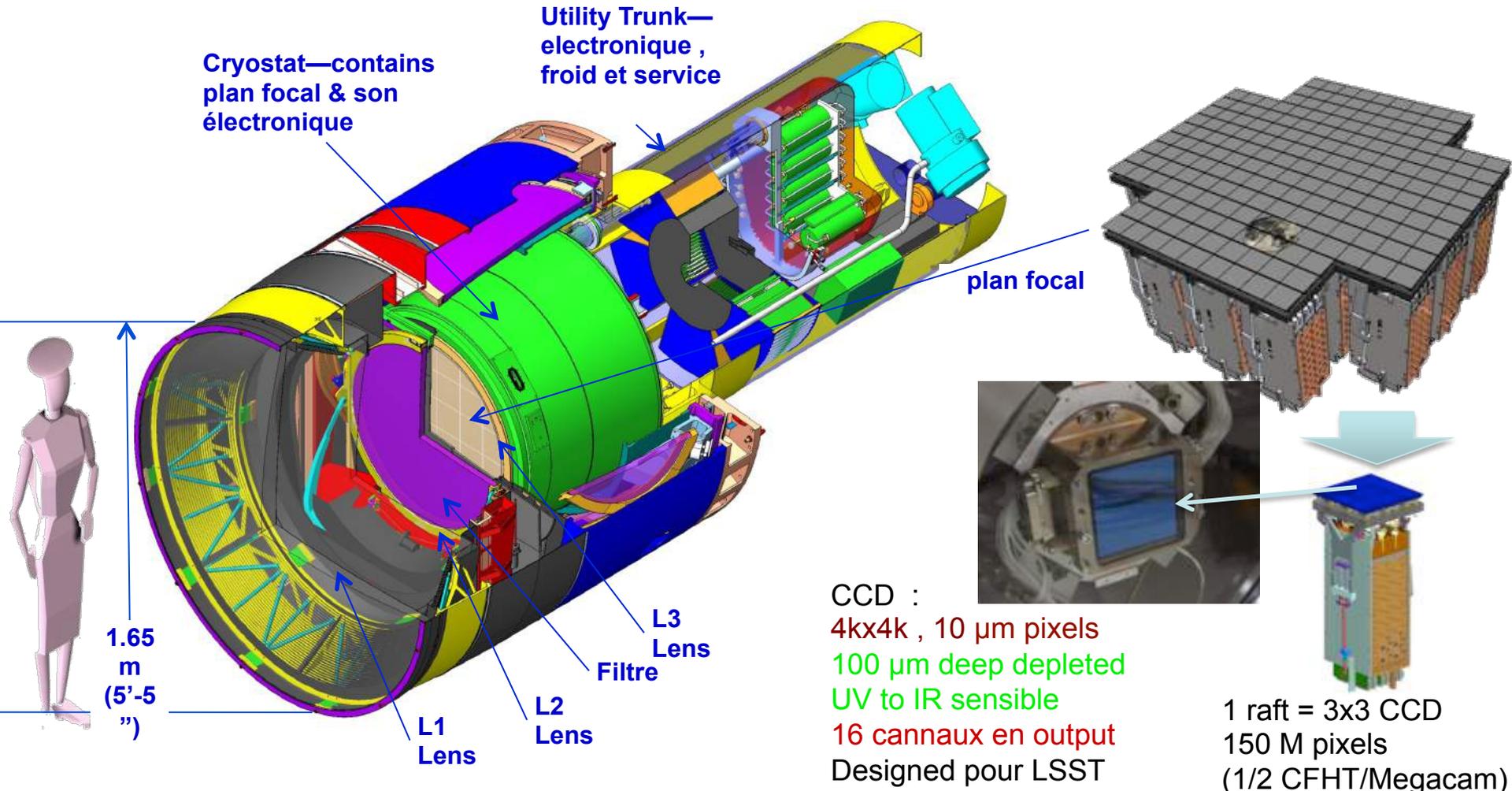


- **Pointe une nouvelle position dans le ciel toutes 39 seconds**
- **Déplacement de 3.5° du télescope vers le champ adjacent en ~ 4 seconds**

Champ de vue : 3.5 deg (9.6 deg² = .023% ciel)

Diamètre du plan focal : 64 cm ; 189 science CCD (21 rafts)

3024 canaux de lecture >3 10⁹ pixels ; Lecture en 2s



6-band Survey: ugrizy 320–1070 nm

Survey(s) Area (with 0.2 arcsec / pixel) →

Main : at least 18,000 square degrees to an uniform depth

Other : ~10% of time ~1h/night (Very Deep + fast time domain + special regions : ecliptic, galactic plane , Magellanic clouds)

Total Visits per unit area and Visits per filter (Main survey)

	u	g	r	i	z	y
Nb Visit	56	80	184	184	160	160
1 visit mag	23.9	25.0	24.7	24.0	23.3	22.1
10 year	26.1	27.4	27.5	26.8	26.1	24.9

Image Quality

Mean seeing at the site is ~ 0.7 arcsec

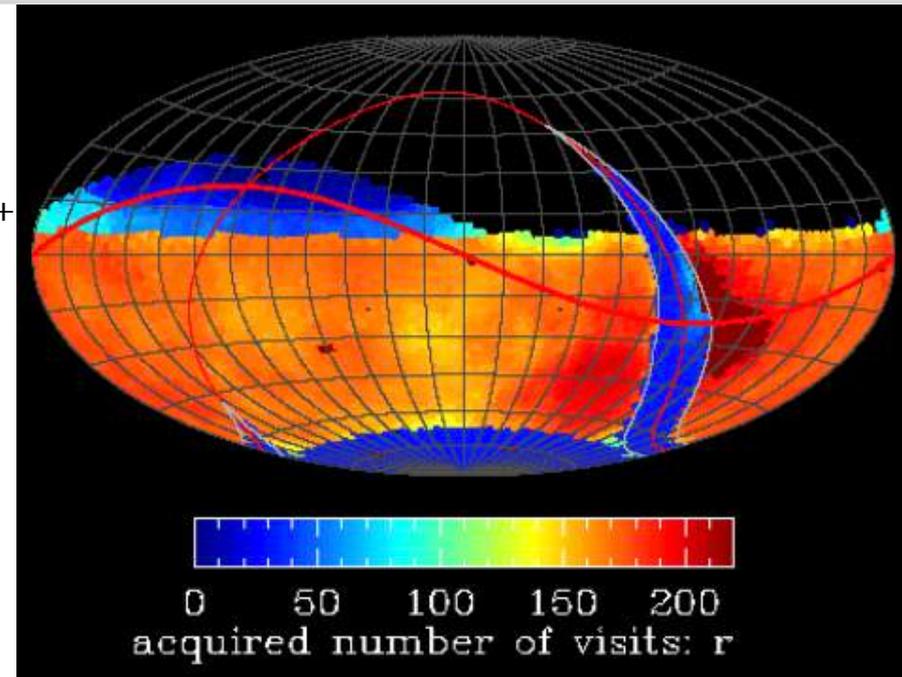
PSF FWHM < 0.4 arcsec (no atmospheric seeing).

PSF Ellipticity < 0.04

(referenced to 0.6 arcsec FWHM circular Gaussian)

Photometric precision:

0.01 mag absolute; 0.005 mag repeatability & color



Plus de $2.75 \cdot 10^6$ visites & $5.5 \cdot 10^6$ images

suivant la séquence:

15 s pose + 1 s shutter + 2 s lecture + 15 s pose

+ 1s shutter + 5s nouveau pointé en lisant

→ **Pointe une nouvelle position sur le ciel toutes les 39 seconds**

Nombre de visites par nuit : 800-1000 ($\sim 8500 \text{ deg}^2$)

Universal Cadence Strategy du suvey principal:

Revisite après 15-60 minutes

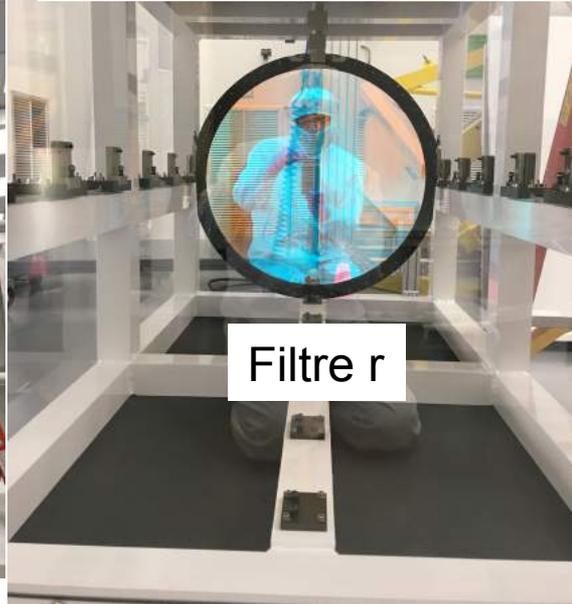
Visite une paire chaque 3-4 nuits

Nombre d'objets	$\sim 37 \cdot 10^9$ (20 10^9 galaxies /17 10^9 Etoiles)
Nombre total de mesure	$\sim 37 \cdot 10^9 * 825 \sim 30 \cdot 10^{12}$
Nombre Moyen d'alerte (=transitoire) par nuit	$2 \cdot 10^6$ (10^7 plan galactique inclus)
Volume de données collecté par 24h	~ 15 TB
Image brute (total-10 ans)	24 PB
Volume sur Disque (total-10ans)	0.4 EB (400 PetaBytes)
Base de Donnée (total-10ans)	15 PB

Changeur de filtre
opérationnel



Integration de l'optique
Fev 2022



Telescope , Photo : Avril 2021



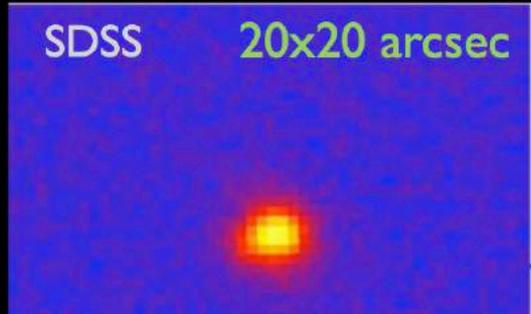
Plan Focal opérationnel

La camera sera envoyée des US au Chili fin 2022,
La première lumière de l'ensemble fin 2023

SDSS, 3x3 arcmin, gri

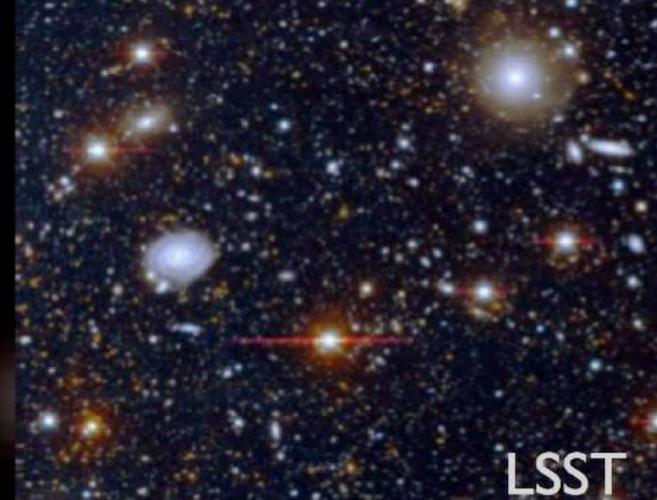


SDSS 20x20 arcsec



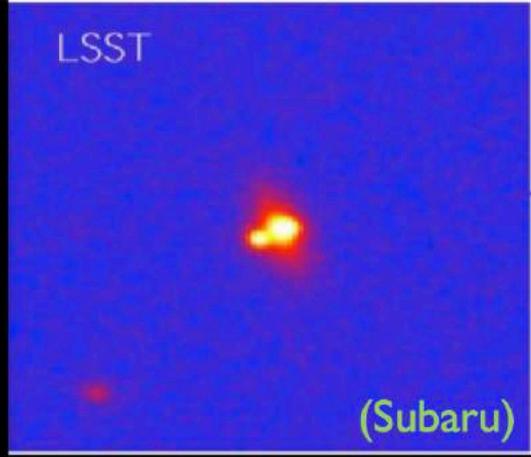
LSST & Le ciel variable :
Quelques exemples

(Deep Lens Survey)

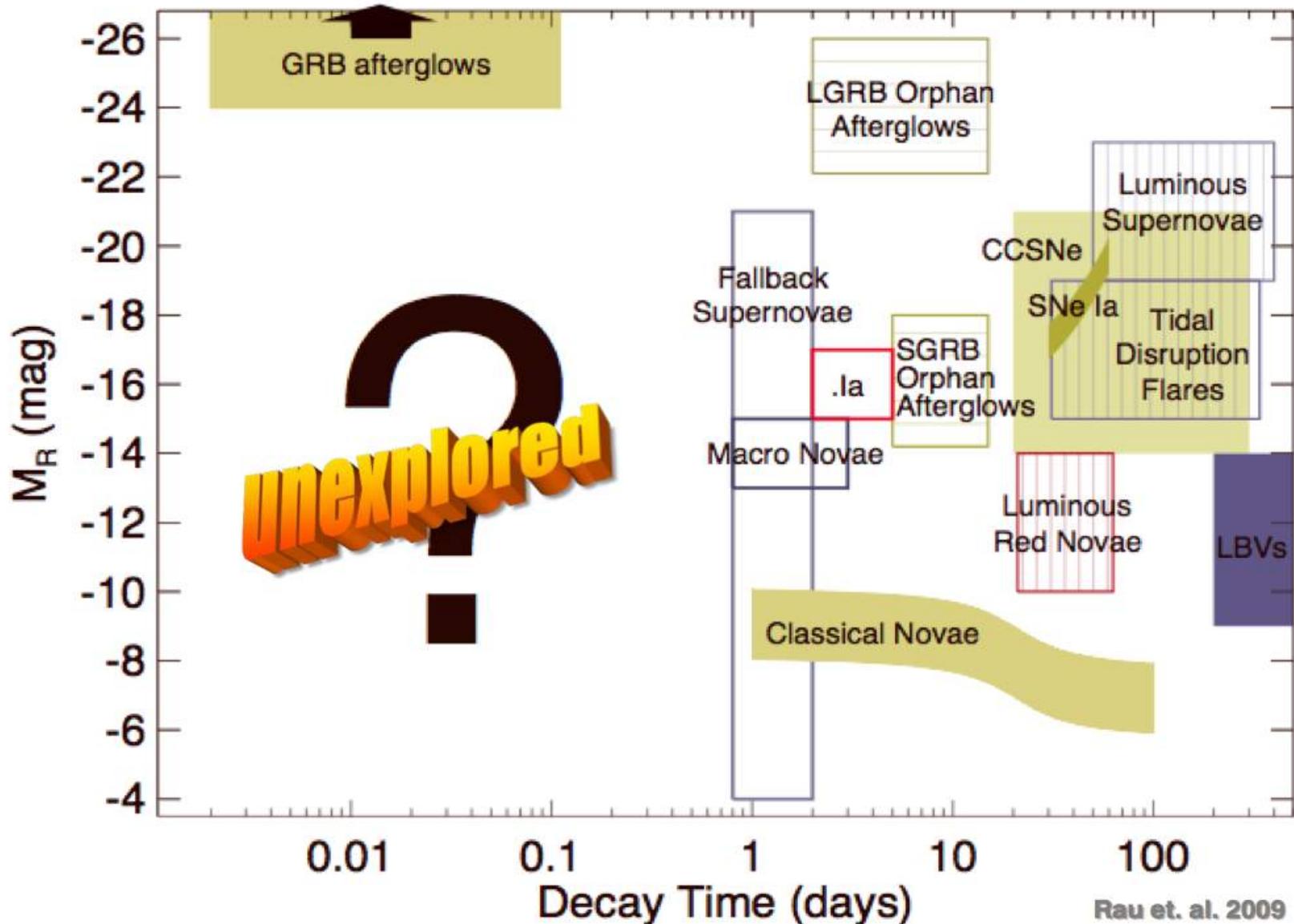


LSST

LSST



(Subaru)



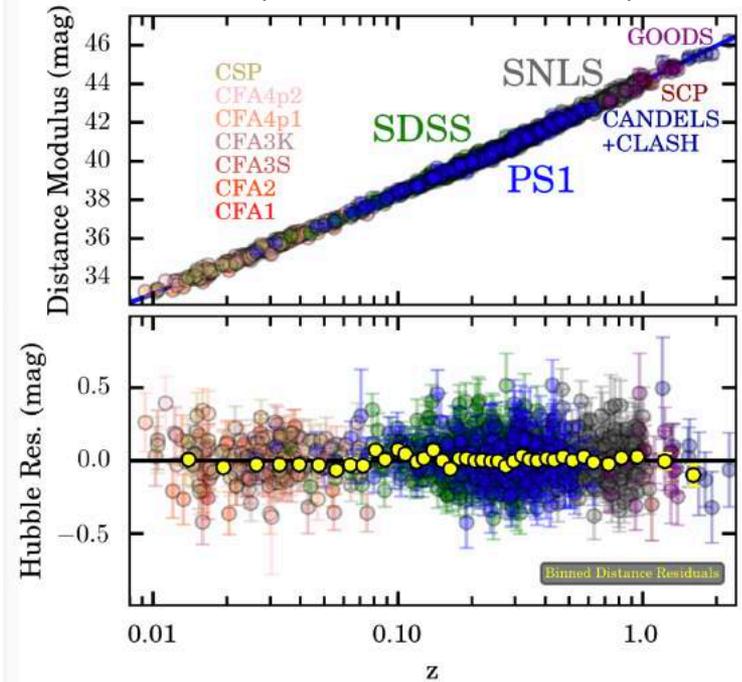
LSST & les Supernovae de type Ia

Les SuperNovae de Type Ia , sont un outil clefs de la cosmologie : ce sont des chandelles standards/standardisables , permettant de réaliser un diagramme de hubble (Distance vs redshift) sur un grand domaine de redshift : on peut donc observer l'évolution de l'expansion de l'univers et en déduire en particulier des contraintes sur l'équation d'état de l'énergie noire

SN Ia Statistique : Demain

Projet	Data (non-publié)	SN qualité cosmo	redshit
HSC/HST	2017-2020	250	$z < 1.1$
		50	$z > 1.1$ (+HST)
ZTF-ZTFII	2018-2024	~4000	$z < 0.08$
LSST	2023-	~100000	$z < 0.4$
		TBD (~2000)	$0.4 < z < 1.1$

Panteon sample : D. M. Scolnic *et al* 2018 *ApJ* **859** 101

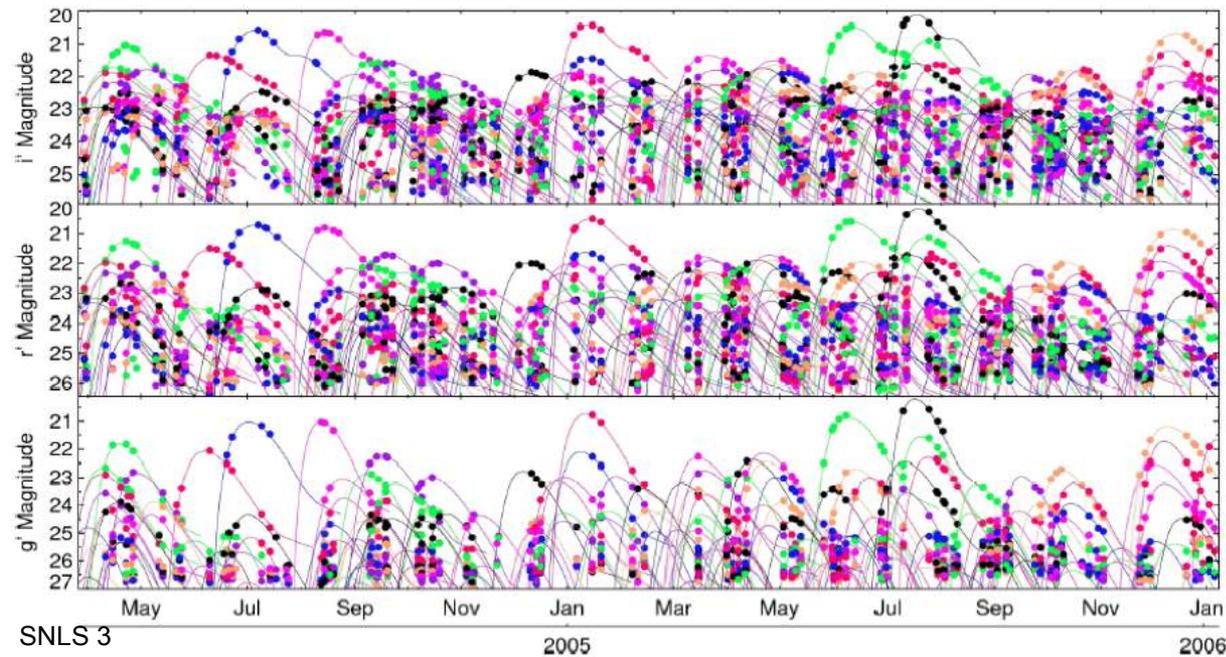
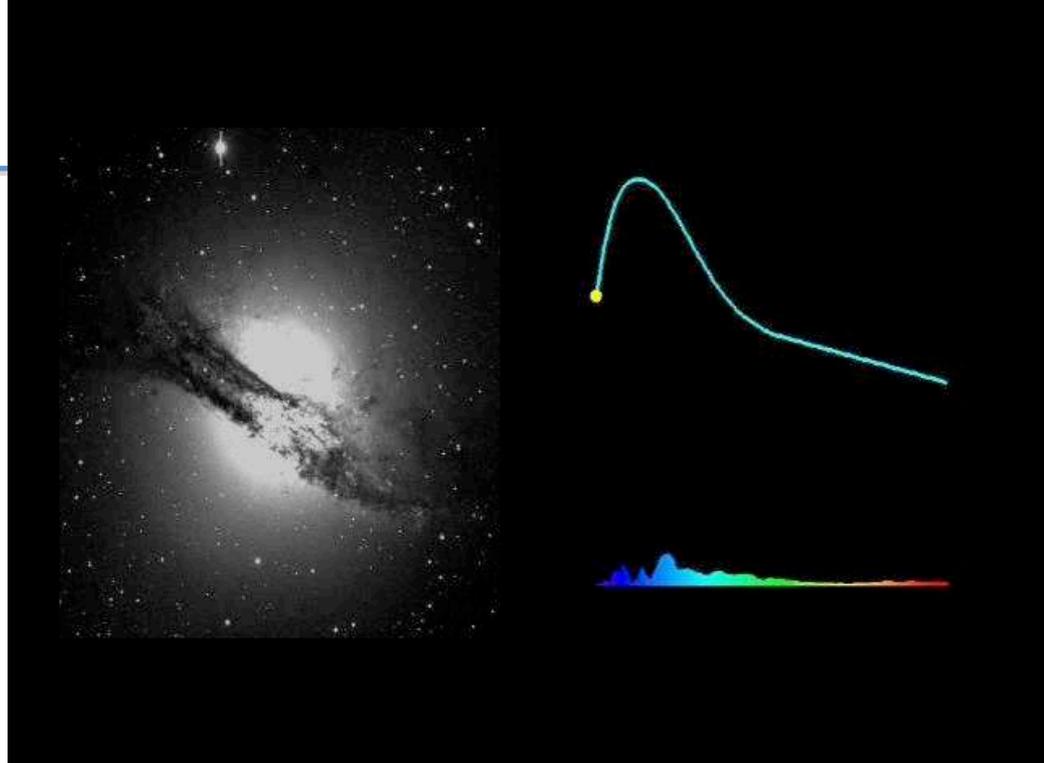


SN Ia Statistique Aujourd'hui

Sample	Number	Mean z
CSP	26	0.024
CFA3	78	0.031
CFA4	41	0.030
CFA1	9	0.024
CFA2	18	0.021
SDSS	335	0.202
PS1	279	0.292
SNLS	236	0.640
SCP	3	1.092
GOODS	15	1.120
CANDELS	6	1.732
CLASH	2	1.555
Tot	1048	

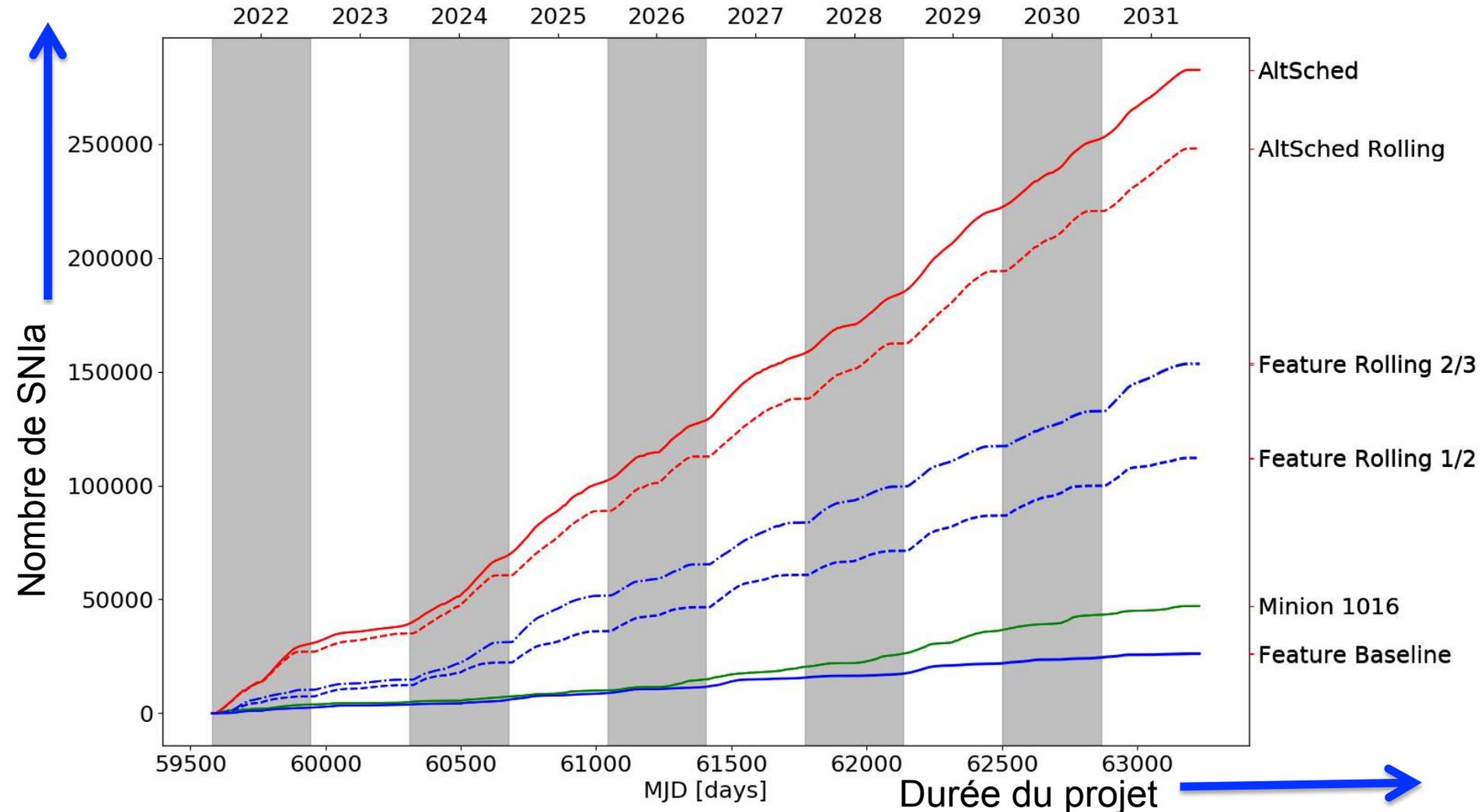
Rolling Search

Pour apporter de l'information cosmologique (=ici mesure de la distance), les explosions de SNIa ne doivent pas être seulement détectées mais on doit mesurer avec précision leur courbe de lumière (flux vs temps) en au moins 3 couleurs (=filtres).

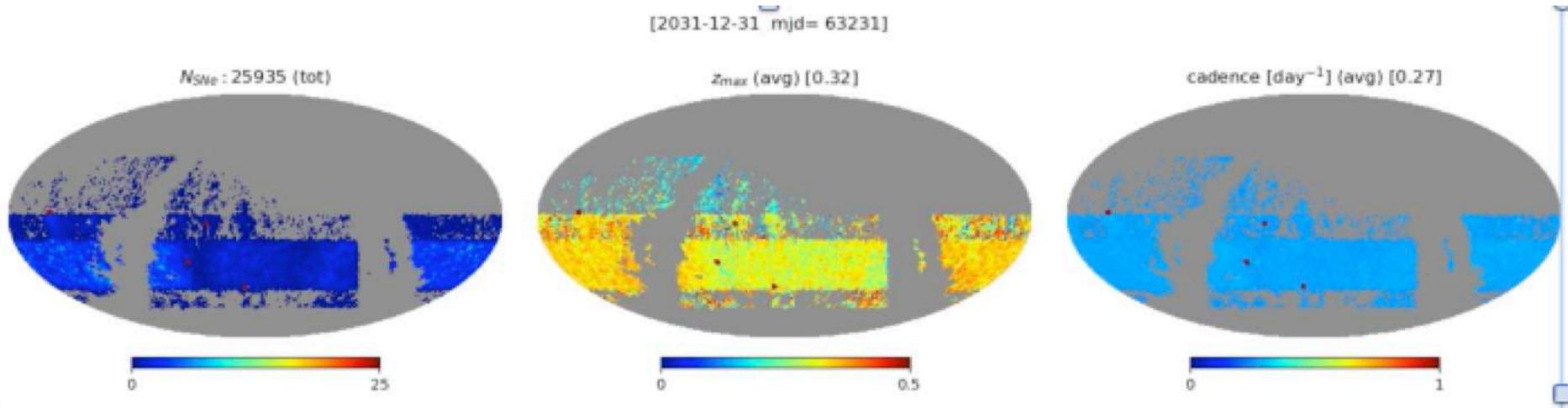


L'utilisation des mêmes images pour faire les découvertes de nouveaux transitoires et pour mesurer avec précision le développement des courbes de lumière des objets précédemment détectés est appelé "Rolling search". C'est la méthode de référence depuis ~2004/SNLS pour les survey grand champ.

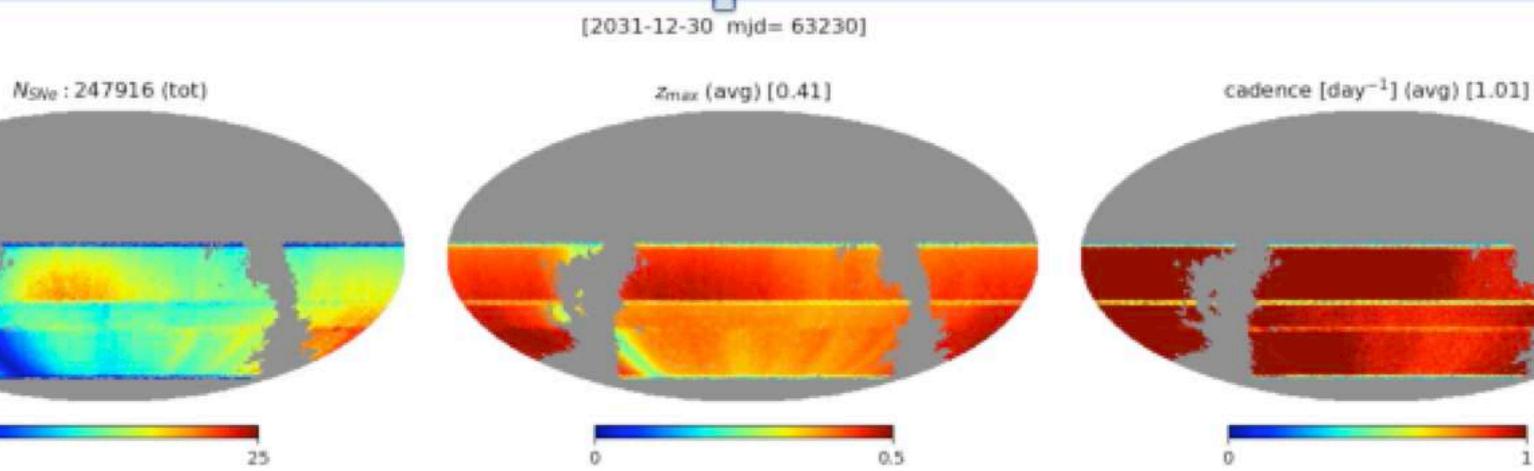
L'optimisation de la cadence pour les objets variables est un « hot topic » aujourd'hui dans LSST



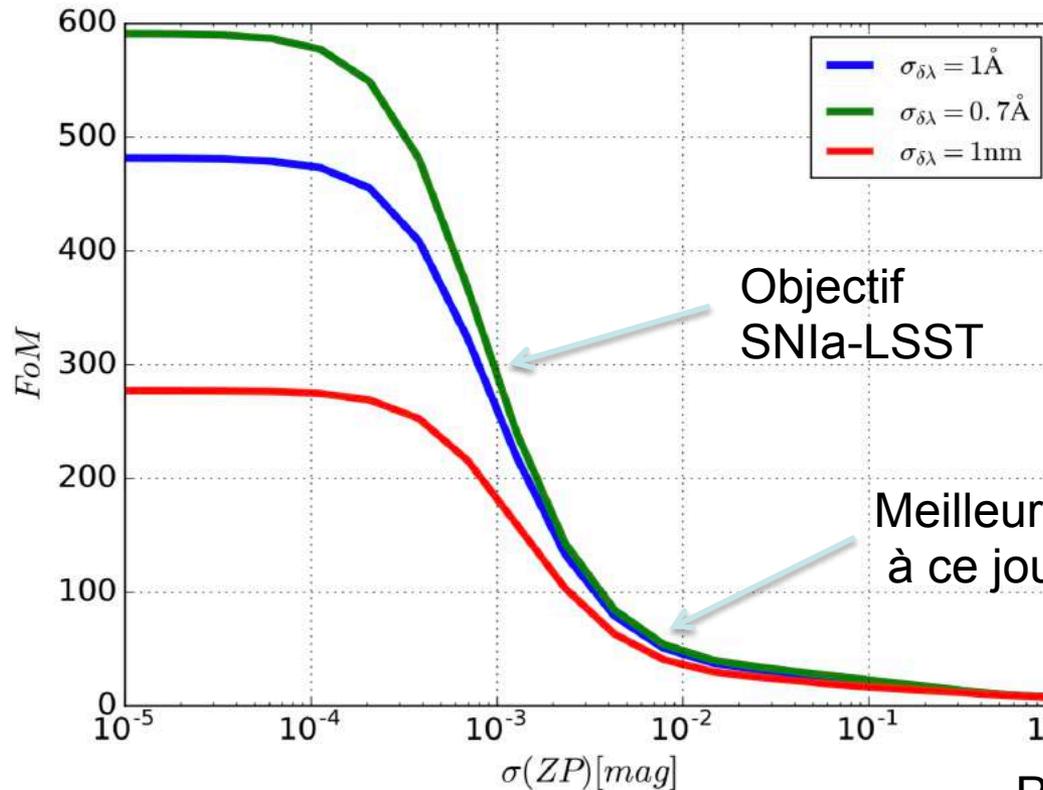
Le nombre de supernovae avec des courbes de lumière de qualité « cosmologique » dépend fortement de la cadence suivi (facteur ~ 50)



Example (2/2) : Cadence Optimisée SNIa (N.Regnault-Ph.Gris)



La qualité de la Calibration en Flux sera un point clef pour bénéficier du gain en statistique apporté par LSST !



Connaissance de la bande passante des filtres de LSST

Objectif SNIa-LSST

Meilleur résultat à ce jour

Précision sur la mesure de flux

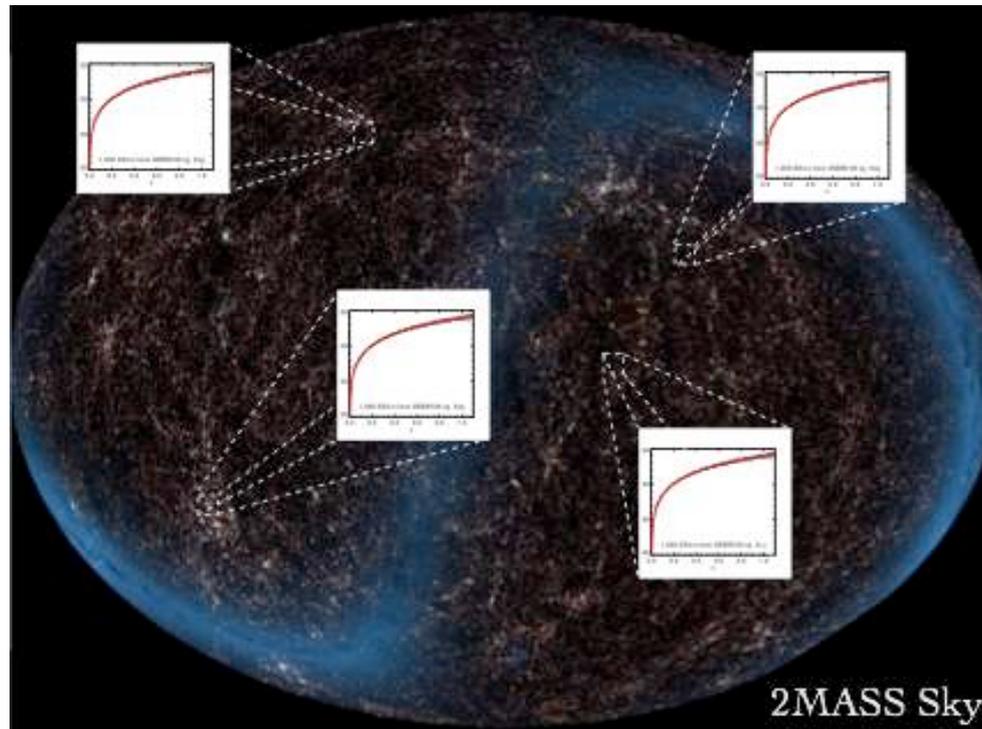
Figure de Mérite ("1/Précision") Pour l'équation d'état de l'Energie Noire (= responsable de l'accélération de l'expansion de l'univers)

Découvrir des transitoires / Supernovae , c'est bien ...
Les mesurer avec précision (Courbe de lumière et calibration en flux)
pour en tirer des contraintes sur la cosmologie est indispensable

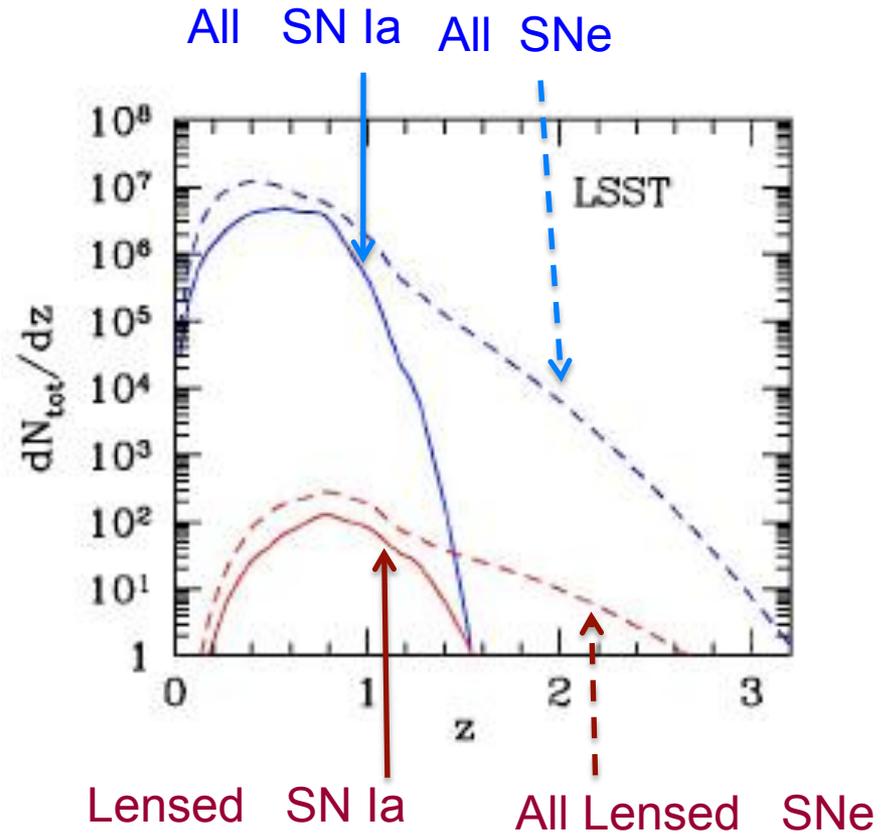
LSST & Transitoires optiques :

Un volume d'univers sondé sans égal à ce jour

Ainsi LSST va être capable de tester l'isotropie de l'expansion de l'univers : La grande statistique de SNIa couvrant l'ensemble du ciel de l'hémisphère sud , va permettre de construire des diagramme de Hubble pour différente direction dans le ciel .

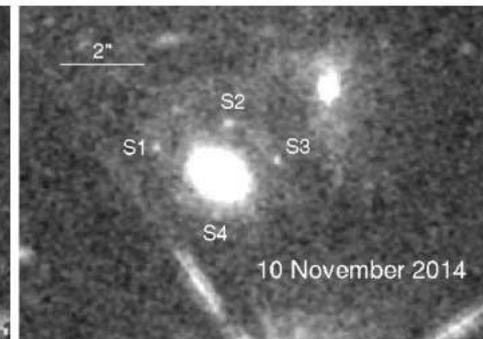
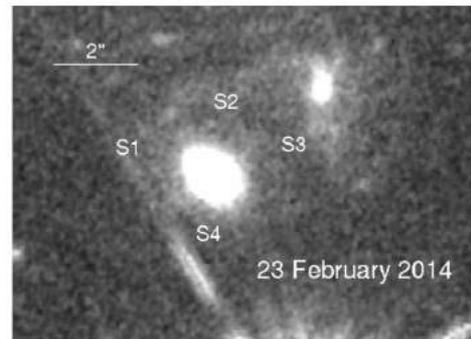


- LSST va fournir un échantillon sans précédent de lentilles fortes avec une information temporelle.
- C'est une capacité unique pour des évènements très rare (ex: Supernovae amplifié), qui fournissent des informations fondamentale sur l'expansion de l'univers et sur son contenu.
- Ces donnée vont fournir des information sur la sous-structure de la distribution de matière noire qui ne peut être obtenue autrement.

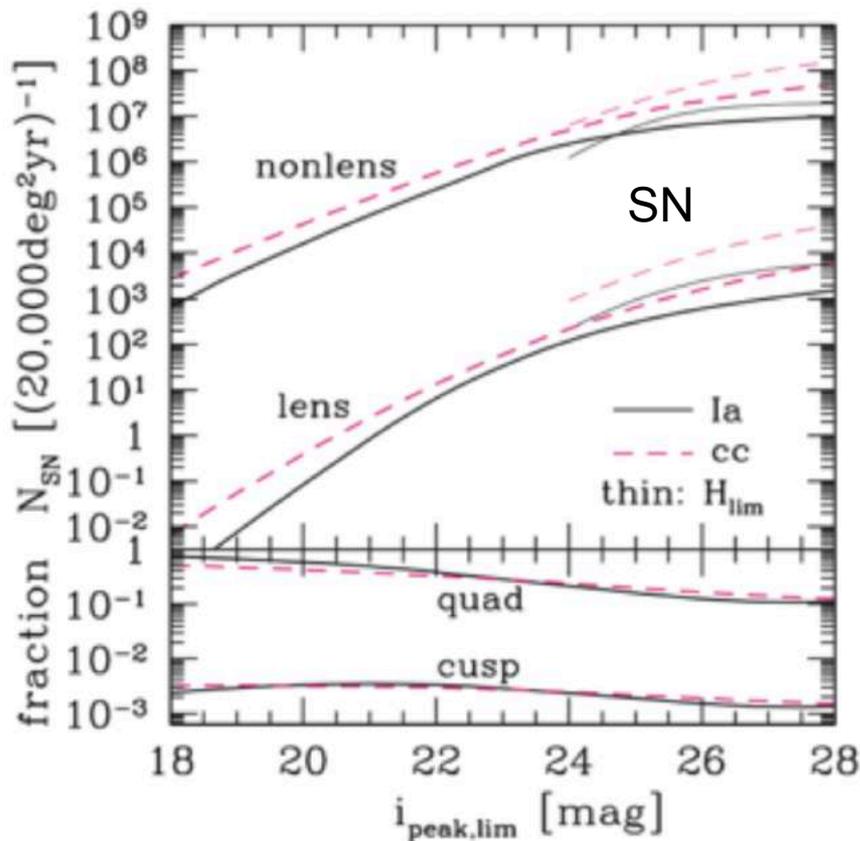
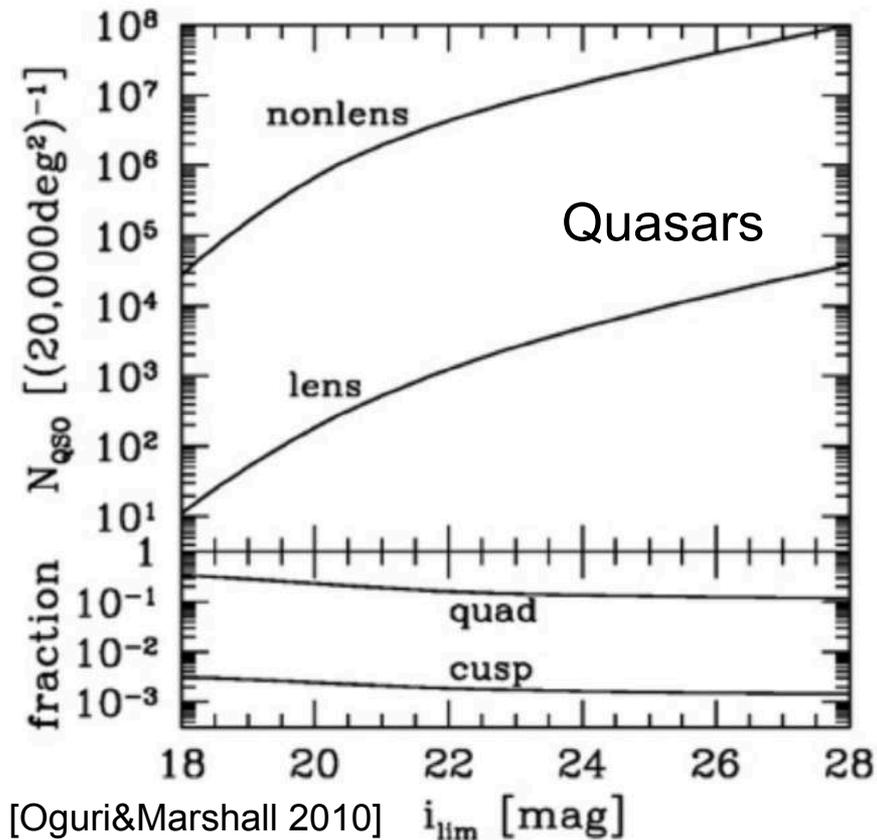


1 seule lentille forte de Supernovae à ce jour →

P.L.Kelly et al .arxiv.org/pdf/1411.6009.pdf



LSST : Lentilles fortes & Cosmologie avec des signaux retardés



Pour 18 000 deg² et $\theta_{\text{min_sep}} = 2/3 \theta_{\text{PSF}}$

Quasars résolus spatialement :

- ~ 8 000 quasars lensed
- ~ 15% quads (4-images)

SN résolus spatialement :

- ~ 130 Sne (la & cc)
- ~ 30% quads (4-images)

Remarque: Ici aussi la candence est importante

SN la résolus & non-réolus :

- ~ 900 SN la [Goldstein et al. 2018]

(~ x2 en précision sur param. Cosmo)

LSST &

la détection des contreparties optiques des Ondes Gravitationnelles

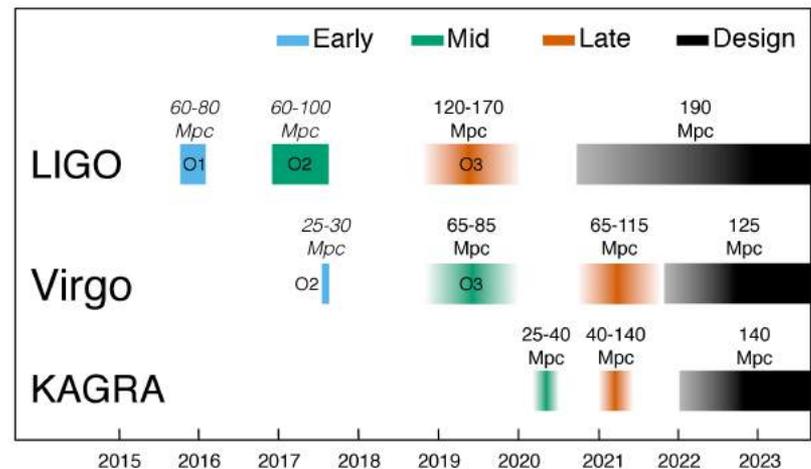
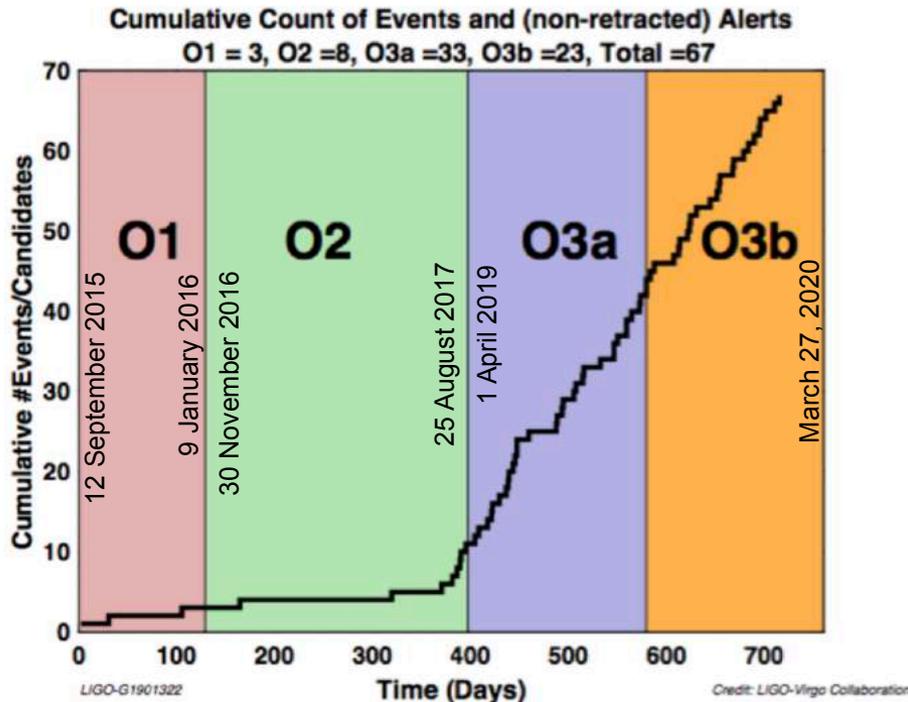
- L'observation en **Septembre 2014** du premier signal d'onde gravitationnel (GW) associé à la fusion de deux trous noirs (BH-BH) , a marqué l'ouverture d'un nouveau domaine de l'astronomie observationnelle associé aux événements transitoires susceptibles de produire des ondes gravitationnelles . C'est le résultat de nombreuses années d'effort qui a permis aux détecteurs d'onde gravitationnel d'atteindre la sensibilité nécessaire.
- Si il n'est pas attendu que la fusion de trous noirs ait une contrepartie optique significative , il y a par contre un espoir/fort intérêt pour la contrepartie optique de la fusion d'étoile à neutron (NS-NS) ou pour la fusion étoile à neutron avec un trou noir (NS-BH) :
 - Mesure de H_0 (taux d'expansion de l'univers aujourd'hui) = décalage spectral de la galaxie associé à la contrepartie optique / distance donnée par GW
 - Etude optique du « merger » produit : KiloNova => ex : meilleur candidat pour l'abondance des éléments lourd tel que l'or et le platine .

- A ce jour **une seule contrepartie optique** a été trouvée / étudiée pour un événement NS-NS : le **17 Aout 2017**, a-LIGO/Virgo a détecté un fort signal d'onde gravitationnelle consistant avec un événement NS-NS : GW170817 et a été capable de fournir sa localisation attendue (31 deg^{**2} avec 90% de chance de présence) et sa distance attendue ($40 \pm 8 \text{ mega-parsec}$) . La contrepartie optique a été cherchée de façon explicite dans les galaxie connues se trouvant dans le volume identifié et ce jusqu'à une mag < 20 , elle a été détecté $\sim 10\text{h}$ après l'événement GW avec $i = 17.476 \pm 0.018 \text{ mag}$ par la collaboration 1M2H à l'aide d'un telescope de 1m.



Pour être sensible à un transitoire optique avec une magnitude absolue aussi faible que -13 (plus faible que la contrepartie optique la plus faible associé à un short gamma ray burst):

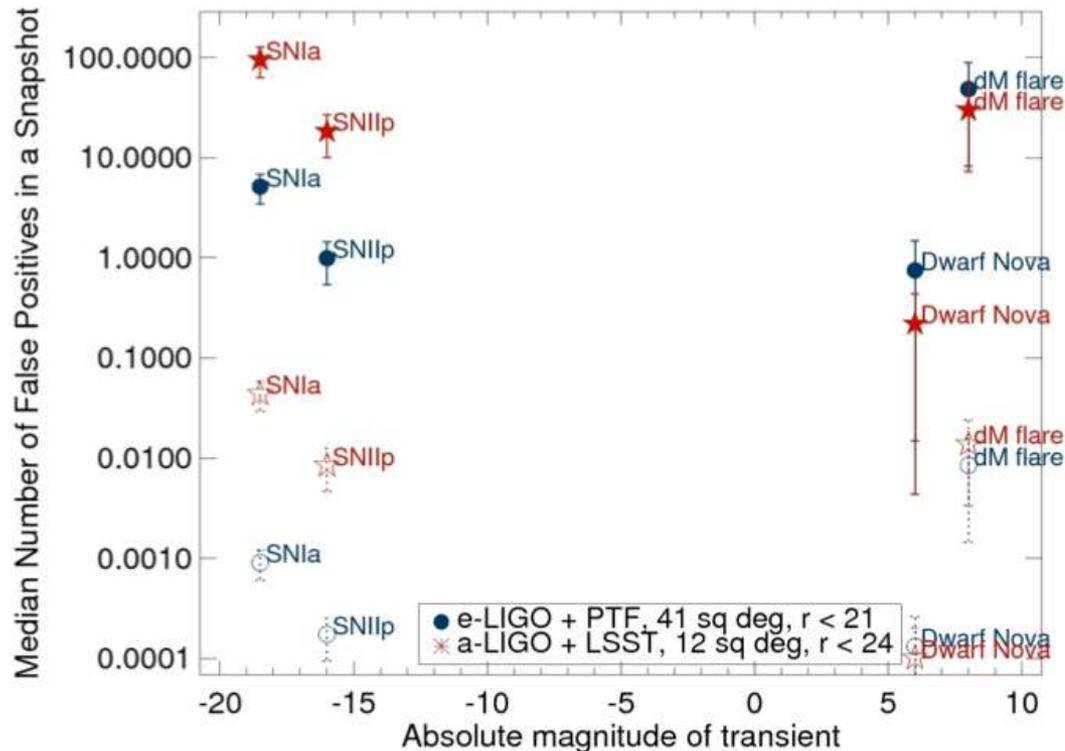
- Avec e-LIGO/Virgo nécessité d'un télescope de la classe des 1-m pour le suivi ($m < 21$ pour aller jusqu'à 50Mpc) et en pratique des stratégies du type ,« chercher dans des galaxies connues » marchent
- Mais avec advanced-LIGO/Virgo/KAGRA aujourd'hui on a besoin de télescope de la classe des 6/8-m ($m < 24$, ~ 200 Mpc) \Rightarrow LSST Like



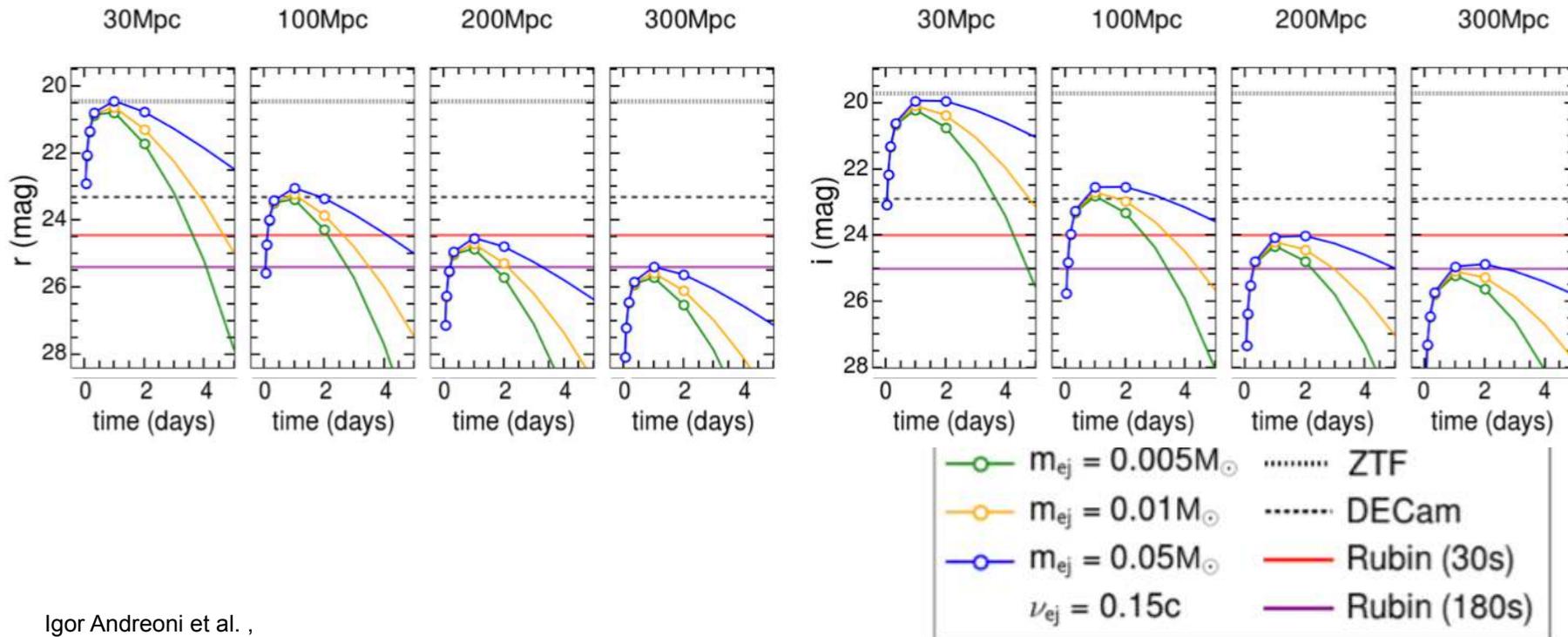
Distance max estimée pour une détection d'onde GW pour une fusion d'étoile à neutron

< 200 Mpc horizon pour l'astronomie des GW est une bénédiction : l'Univers est très dynamique et le nombre de faux positifs dans une seule image de LSST est énorme (symbole plein) mais si on se limite à < 200 Mpc (symbole vide) l'identification du candidat devient trivial.

Le red-shift de toutes les galaxies du champs , estimé à l'aide des red-shift photométriques , est la clef pour filtrer les images de recherche de la contrepartie optique des évènements GW .

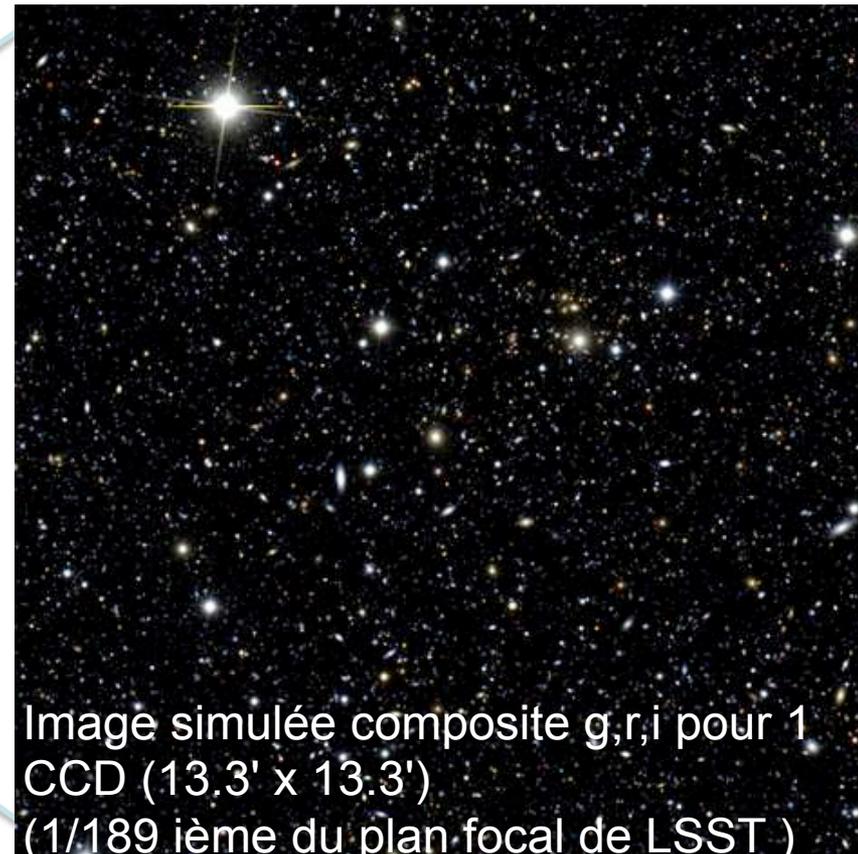
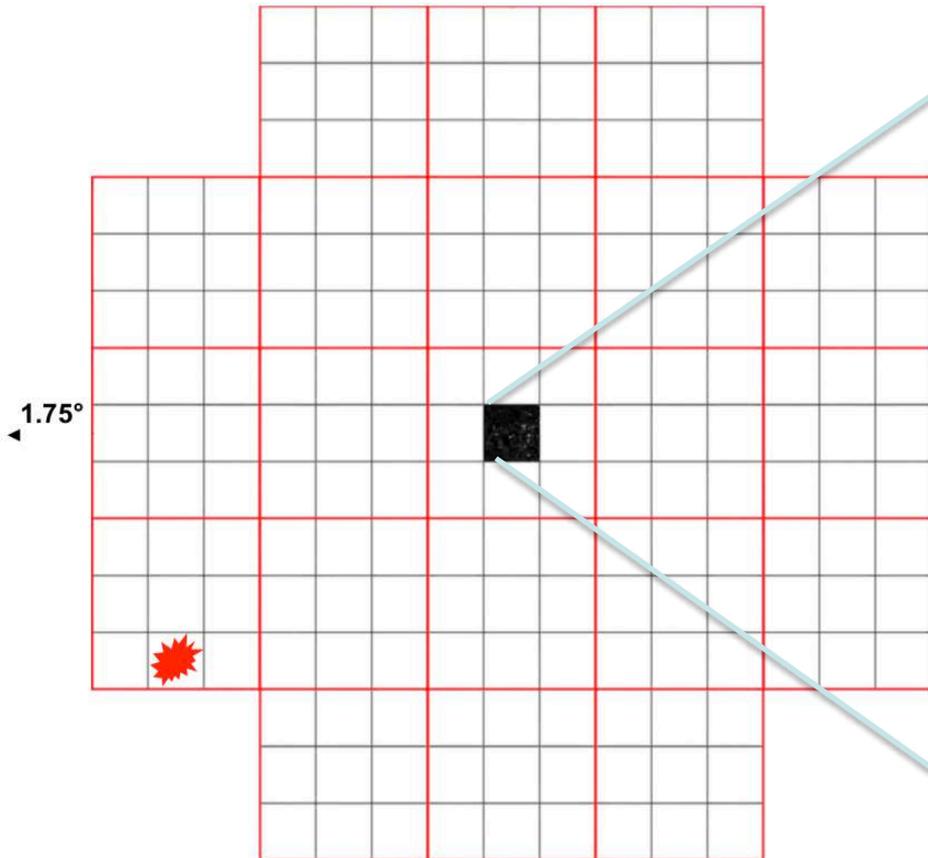


Magnitude attendue pour événement KiloNova (NS-NS) (Composante rouge seule)



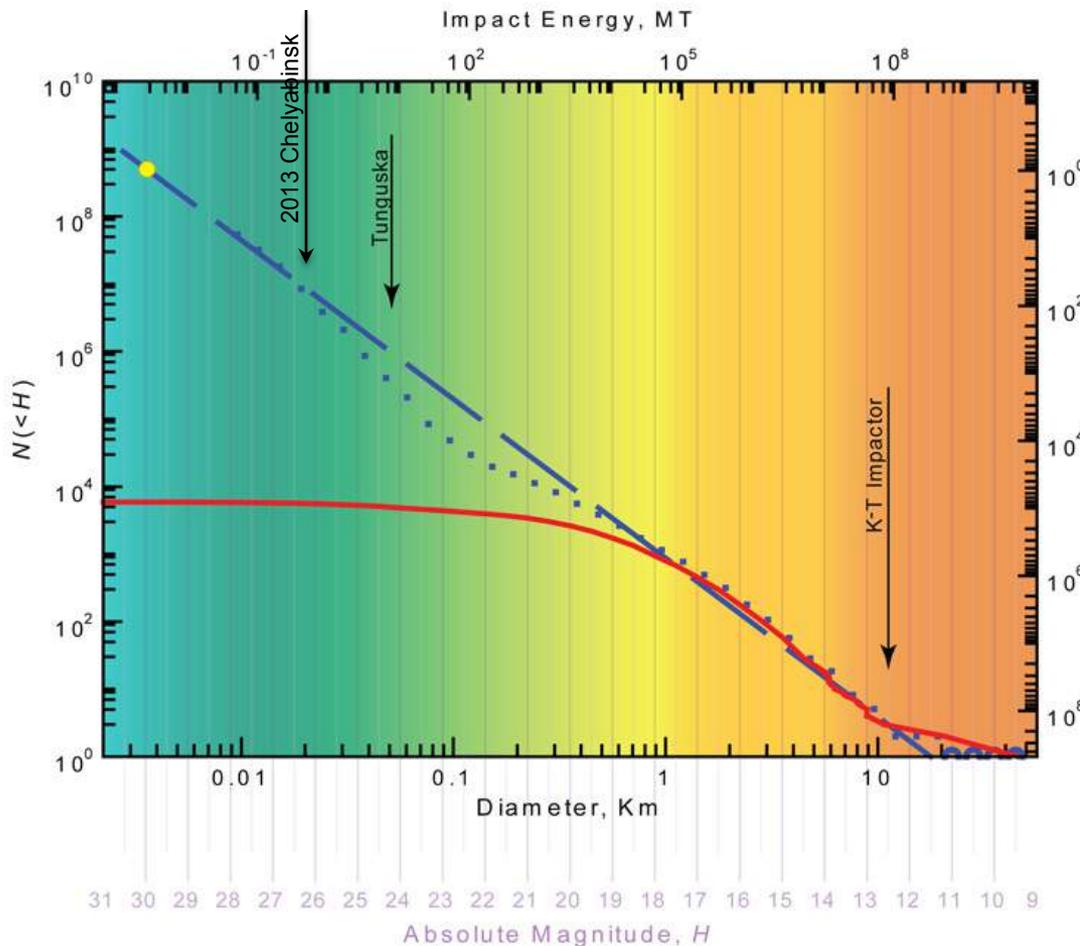
a-LIGO-Virgo-KAGRA est capable de fournir des alertes avec une précision de localisation attendue de la source dans des surfaces de l'ordre de grandeur du champ de vue de LSST : 1.75° de rayon .

→ la taille de son champ de vue (9.6 deg^2), de sa profondeur ($\sim 24 \text{ mag}$) et de sa couverture régulière de tout le ciel visible (référence) rendent le survey LSST optimal pour la localisation des contreparties optiques des détections de GW .



**LSST &
La détection de transitoires (objets en mouvement)
dans le système solaire**

POTENTIAL DAMAGE TO EARTH FROM NEO IMPACT



- • • • Estimated from discovered population
- Estimated from bolide observations
- Constant power law
- Discovered to 1.19.09

NO DAMAGE
D < 30 m (0.030 km)
Airburst in upper atmosphere, no significant ground damage.

AIRBURST
30 m < D < 100 m
Airburst in lower atmosphere, causes damage similar to nuclear bomb blast above ground. Over ocean, no damage.

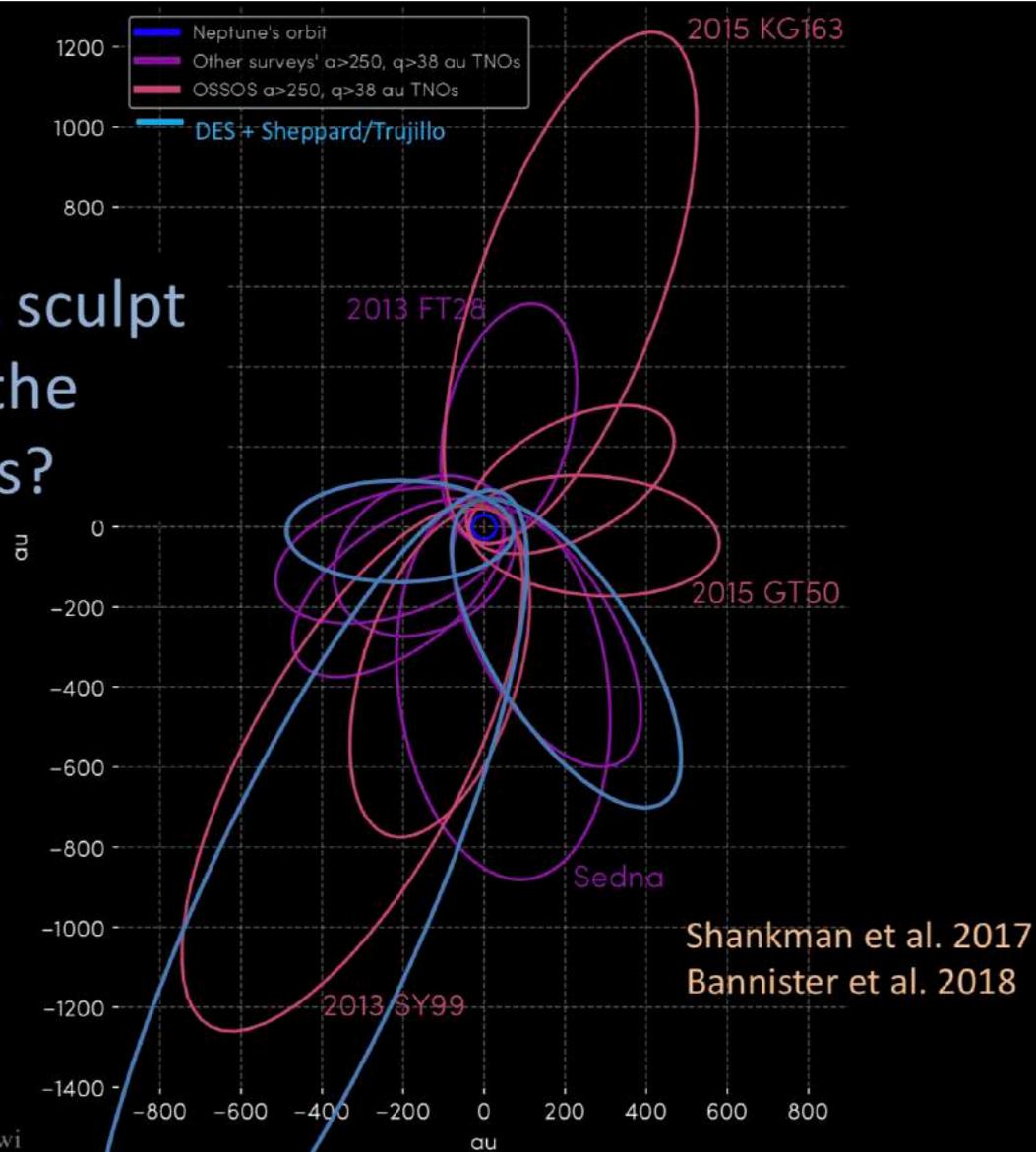
REGIONAL / TSUNAMI
100 m - 1 km
Surface impact, on land, makes crater a couple to a couple tens of km across. In the sea, raises a tsunami that can cause shoreline damage one to a few thousand km distant from the impact point.

GLOBAL
1 km - 10 km
An impact into land or sea may raise enough dust into the stratosphere to cause a global climatic catastrophe, leading to mass starvation, disease, and general disruption of social order.

EXTINCTION
10 km and larger - possibility of mass extinction, certainly of some species and possibly humans.

Image Credit: A. W. Harris, SSI/LSST

does a planet sculpt
the orbits of the
extreme TNOs?



- **Le ciel variable est un sujet d'observation/d'interrogation/de découvertes depuis la nuit des temps.**
- **Depuis le début des années 2000 , c'est un domaine de plus en plus actif, soutenu par de nouveaux instruments – méthodes observationnelles , et des moyens d'observation dédiés de plus en plus important.**
- **LSST est le produit de cette évolution. Il va à partir de 2023 , ouvrir un œil neuf sur l'univers variable :**
 - **En observant en continu la $\sim \frac{1}{2}$ du ciel visible .**
 - **En couvrant un vaste domaine temporel de variabilité allant de $\sim 15s$ à 10 ans .**
 - **En étant sensible à des objets très faibles – très lointains ... couvrant la majorité de "l'univers visible" depuis le sol.**



Fin de la Presentation