

# LE CFHTLS STRONG LENSING LEGACY SURVEY



R. Cabanac<sup>1</sup>, B. Fort<sup>2</sup>, G. Soucail<sup>3</sup>, P. Gomez<sup>4</sup>, C. Alard<sup>2</sup>, M. Dantel-Fort<sup>2</sup>, R. Gavazzi<sup>3</sup>,  
J.-P. Kneib<sup>5</sup>, O. Le Fèvre<sup>5</sup>, Y. Mellier<sup>2</sup>, R. Pello<sup>3</sup>, J.F. Sygnet<sup>2</sup>, D. Valls-Gabaud<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Canada-France-Hawaii Telescope, 65-1238 Mamalahoa Hwy., HI 96743, USA, <sup>2</sup> Institut d'Astrophysique de Paris, 98bis Bvd Arago, 75014, Paris, FRANCE, <sup>3</sup> Observatoire Midi-Pyrénées, 14, avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, FRANCE, <sup>4</sup> Gemini Observatory, Northern Operations Center 670 N. A'ohoku Place, Hilo, Hawaii, 96720, USA, <sup>5</sup> Observatoire de Marseille, Traverse du Siphon-Les trois Lucs, BP8-13376 Marseille Cedex 12, FRANCE

<http://www.cfht.hawaii.edu/~cabanac/SL2S/>

**Résumé:** Nous proposons de constituer et d'étudier une base de données de plusieurs centaines de lentilles gravitationnelles fortes présentes dans le CFHTLS. Cette base de données serait dans les prochaines années la plus grande base de données de systèmes d'arcs et d'anneaux gravitationnels disponibles pour étudier la géométrie (triaxialité) et les caractéristiques des profils des halos de matière noire (cusps et existence de sous halos) ainsi que leur évolution en fonction du décalage spectral. La base de données pourrait aussi fournir quelques éléments statistiques comme la profondeur optique de diverses classes de lentilles comme les arcs géants, pour comparaison avec les prédictions des simulations numériques. Elle peut nous révéler quelques objets fortement amplifiés parmi les plus lointains de l'univers et éventuellement de nouvelles classes de lentilles encore jamais observées faute de sondages systématiques sur de grands champs profonds comme le CFHTLS.

**Introduction:**  
Le ciel contient des centaines de milliers d'objets massifs qui sont d'actives lentilles gravitationnelles fortes (Miralda-Escude 1992, 1993a, 1993b et Marshall et al. 2005). Ces lentilles peuvent produire des mirages d'images multiples des galaxies d'arrière-plan que l'on peut classer historiquement en arcs géants (images fusionnées, Soucail et al. 87, Fort et al. 1998), systèmes d'arcs (dont les paires gravitationnelles radiales, Fort et al. 1992) et anneaux gravitationnels (Warren et al. 1996 et réf. dans Cabanac 2005).

Comme la profondeur optique attendue (Oguri 2004) est respectivement comprise entre  $10^{-4}$  à  $10^{-3}$  pour chacun de ces événements, il y a plus d'un dizaine de lentilles par degré carré sur des images profondes du ciel comme celles que produiront des satellites comme DUNE ou SNAP. Ce domaine de recherche connaît donc un bel essor dans les prochaines années à l'ère du JWST. Nous proposons d'utiliser les champs du CFHTLS release (DEEP et WIDE) pour nous préparer à cette échéance et utiliser notre expertise pour conduire quelques projets scientifiques bien ciblés et compétitifs au plan international. Ce projet a été récemment baptisé CFHTLS Strong Lensing Legacy Survey (SL2S).

**Objectifs scientifiques:**  
Les lentilles gravitationnelles fortes fournissent un incomparable outil pour mesurer et décrire la distribution de masse des halos d'une grande variété d'objets comme les galaxies (Kochanek et al. 2001, Keeton 1998, 2001, McLeod 2001), les amas ou les groupes compacts (Pello et al. 1991, Mellier et al. 1993, Fort & Mellier 1994, Kneib et al. 1993, 1994, 2000, 2003). Sans être exhaustif on peut citer quelques résultats comme la première contrainte sur la valeur maximum de  $\lambda$  ( $<0.9$ ) pour un univers plat par Kochanek et al. (1992), la première mise en évidence de l'extrême concentration de masse au centre des amas (Mellier et al. 93), ce qui traduit peut-être les effets de triaxialité des halos ou implique de revoir les conditions initiales des scénarios, l'évaluation directe de la masse des galaxies dans leur rayon optique, la détection des objets les plus lointains de l'Univers par effet de télescope gravitationnel (Pello et al. 2004, 2005, Kneib et al. 2004). Tous ces travaux ont cependant révélé que cet outil n'avait pas exprimé toute sa puissance car les échantillons (essentiellement des arcs d'amas et des images de quasars multiples) étaient extrêmement limités en nombre. La découverte des mirages est aléatoire et couvre un vaste espace de paramètres (surface, seeing et longueur d'onde de la détection initiale, sensibilité variables). Il en résulte des biais mal contrôlés dans l'analyse statistique des mirages, lentilles et des sources. Pour illustrer ce point, on peut rappeler qu'à ce jour l'échantillon le plus grand et le plus homogène de lentilles fortes qui concerne les QSOs multiples (survey CLASS, <http://www.jb.man.ac.uk/research/gravlens/class/class.html>) ne comporte que 22 lentilles. Par comparaison, les premiers champs disponibles démontrent déjà que le CFHTLS-Wide (172 degré carré) va fournir environ 200 + /- 30 arcs géants et au moins deux fois plus d'anneaux gravitationnels et systèmes d'arcs multiples effectivement détectables autour des galaxies massives et des groupes de galaxies.

**Le CFHTLS représente donc potentiellement la plus grande base de données de « strong lensing » pour les cinq ans à venir** (voir les encadrés pour quelques exemples de candidats).

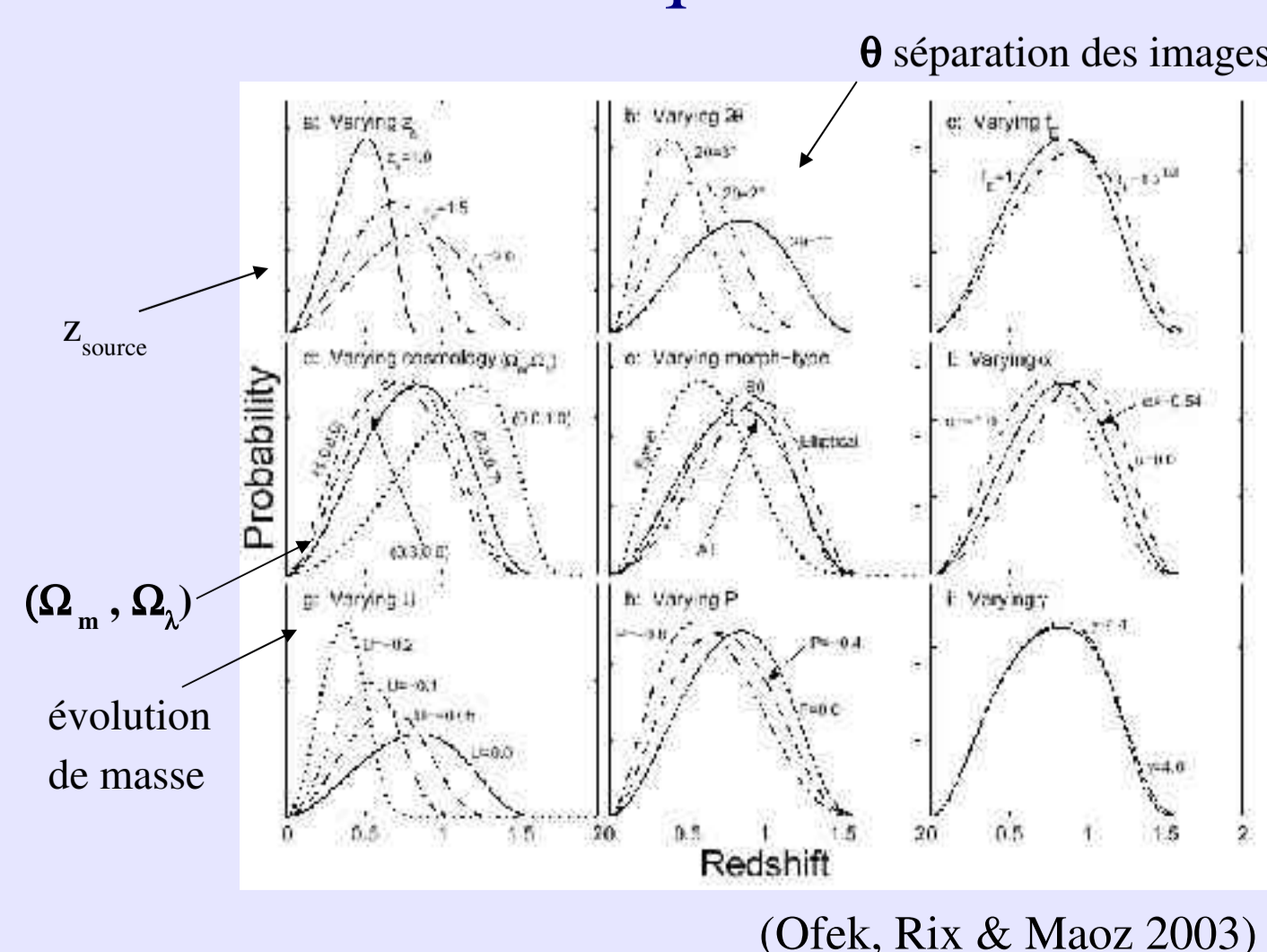
Les objectifs scientifiques qui peuvent être poursuivis à partir d'une base de données SL2S sont nombreux. Notre priorité de travail concernera en premier lieu la description des déflecteurs et des sources. Les tests cosmologiques de la géométrie de l'univers et de son évolution avec le temps nécessiteront de plus grands échantillons (projet DUNE). Nos méthodes de détection laissent toutefois ouverte la possibilité de découverte de nouvelles classes de mirage comme des « dark lenses ». Trois principaux centres d'intérêt se dessinent :

- l'étude des distributions de masse dans la partie centrale des halos, habituellement étudiés indirectement à partir de luminosités avec des mesures de dispersion de vitesse, des courbes de rotation ou des observations X. Dans le cadre de la relativité générale, la configuration géométrique seule donne directement la masse totale de la lentille, profil de masse (Williams et al. 1999), l'ellipticité des halos (De Filipis, et al. 2005, Gavazzi 2005, Oguri 2005, Broadhurst et al. 2005, Mandelbaum et al. 2005), les effets perturbatifs de sous structures sur les images conjuguées d'arcs (Keeton et al. 2005, 2003, Koopmans 2005, Rozo et al. 2005, Hagan, et al. 2005, An 2005, Dobler & Keeton 2005). Pour les amas et les groupes l'interprétation des images radiales couplée à l'analyse de Weak Lensing (Gavazzi et al. 2003) fournira un bon échantillon de paramètres de concentration à comparer avec les simulations numériques (à ce jour, les trop rares mesures semblent 2 à 3 fois plus grandes ce qui implique peut-être de revoir les conditions initiales des scénarios de formation des halos (Lin & Ostriker 2002, 2003).

- Pour les rings nous proposons l'étude de la distribution de masse des galaxies dans leur rayon optique et leur évolution en fonction du temps cosmique ( $M_{DM}$  et  $M/L$ ; Ofek et al. 2003, 2005; Chae 2005). La détection de  $S^{th}$  image proche du centre de masse de la lentille, dans des follow-up HST de ring brillant, nous permettrait peut-être d'attaquer le problème de la caractérisation de la singularité centrale des halos. De même, quelques systèmes d'arcs de galaxies spirales « edge-on » permettraient de décrire la géométrie de quelques halos au niveau du diamètre optique (domaine de forte compétition avec follow-up HST indispensable).

- La caractérisation de la statistique des grands arcs et la comparaison des résultats avec les simulations numériques (Oguri 2003, Bartelmann et al. 2003, Dalal et al. 2004).

## Tests cosmologiques avec les statistiques d'arcs



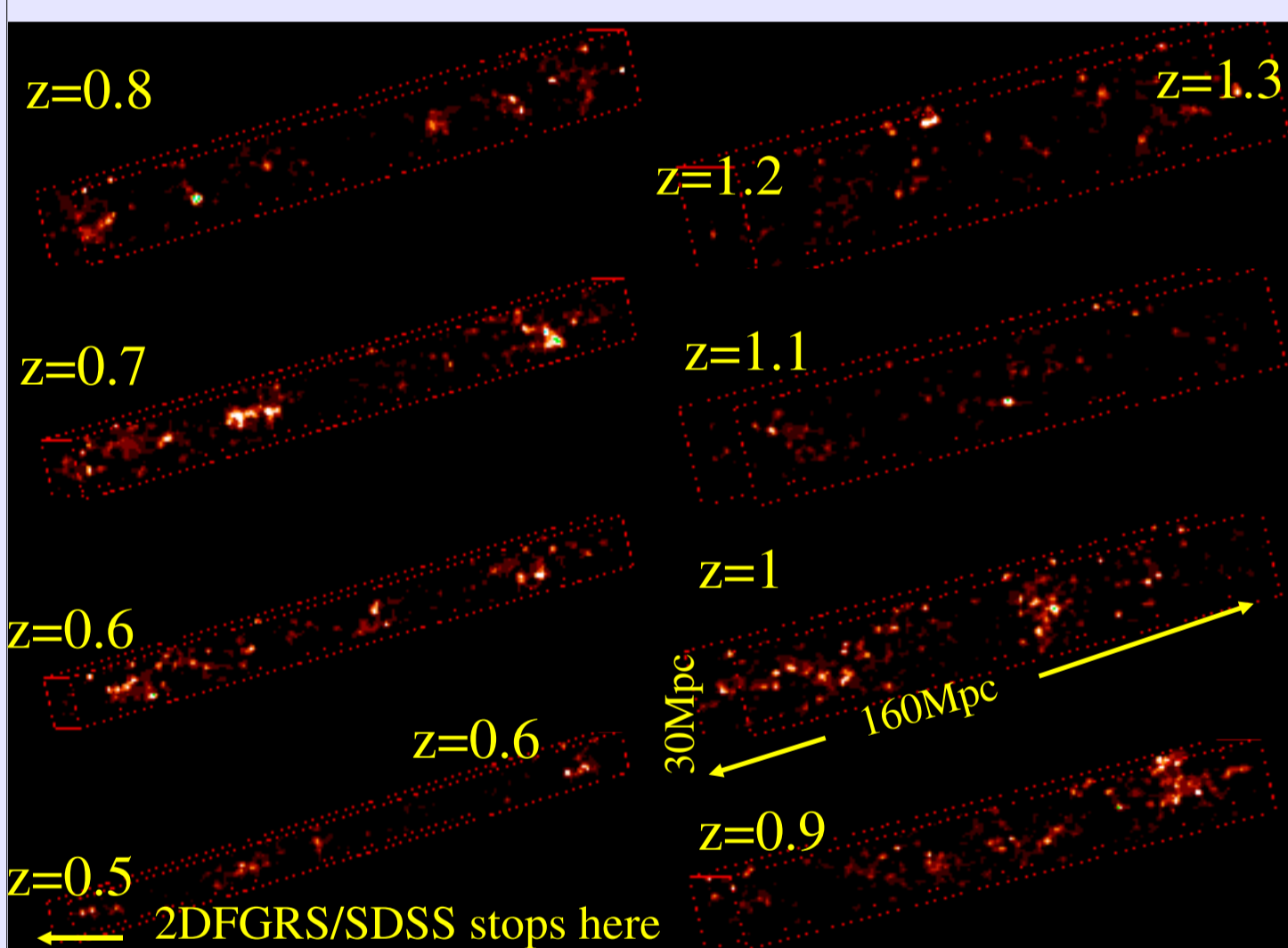
Fréquence des mirages vs redshift varie significativement pour:  
 $z$ , redshift des mirages (sources),  $2\theta$  séparation des images,  $U$  évolution de masse (lentille),  $(\Omega_m, \Omega_\Lambda)$  cosmologie, type morphologique des lentilles

## CFHTLS / VIMOS

- CFHTLS-Deep: champs profonds  
 $4 \times 1^\circ$ , U, G, R, I, Z,  $I_{AB} < 28.4$
- + VLT VIMOS Spectroscopie Deep  
40 000 spectres,  $R = 5000$   
tout objet avec  $I_{AB} < 24$ ,  $\langle z_{spectro} \rangle = 0.76$

- CFHTLS-Wide: grands champs  
 $170^\circ$ ,  $I_{AB} < 24.5$

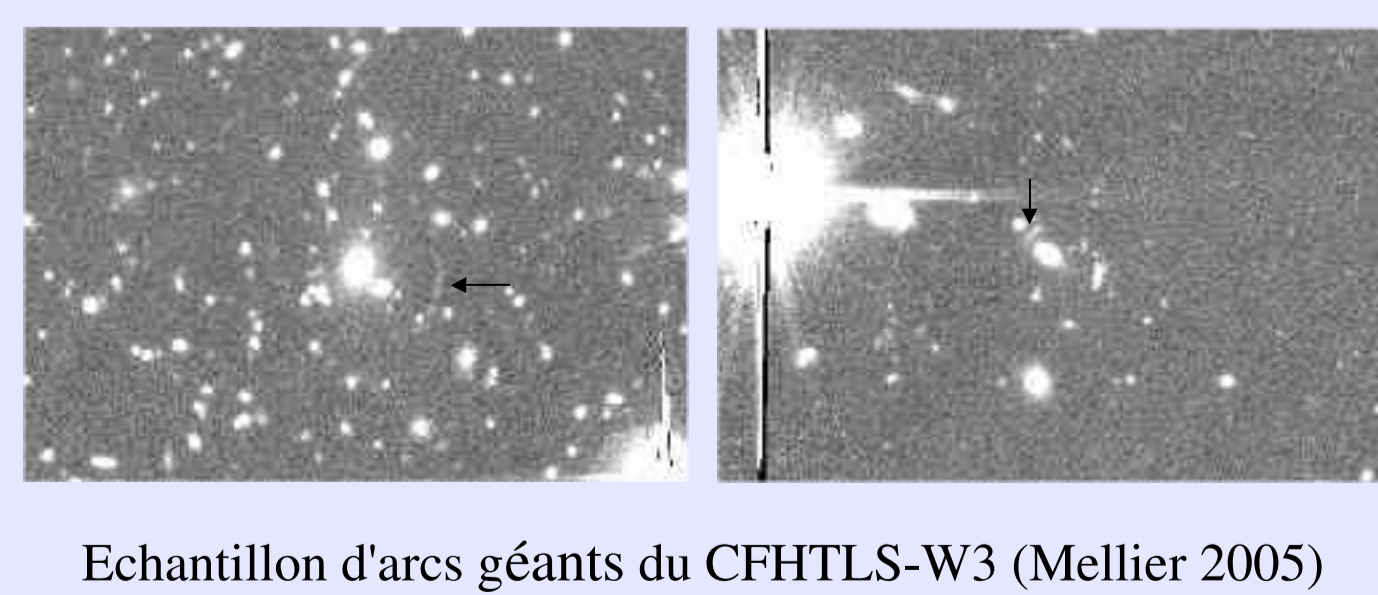
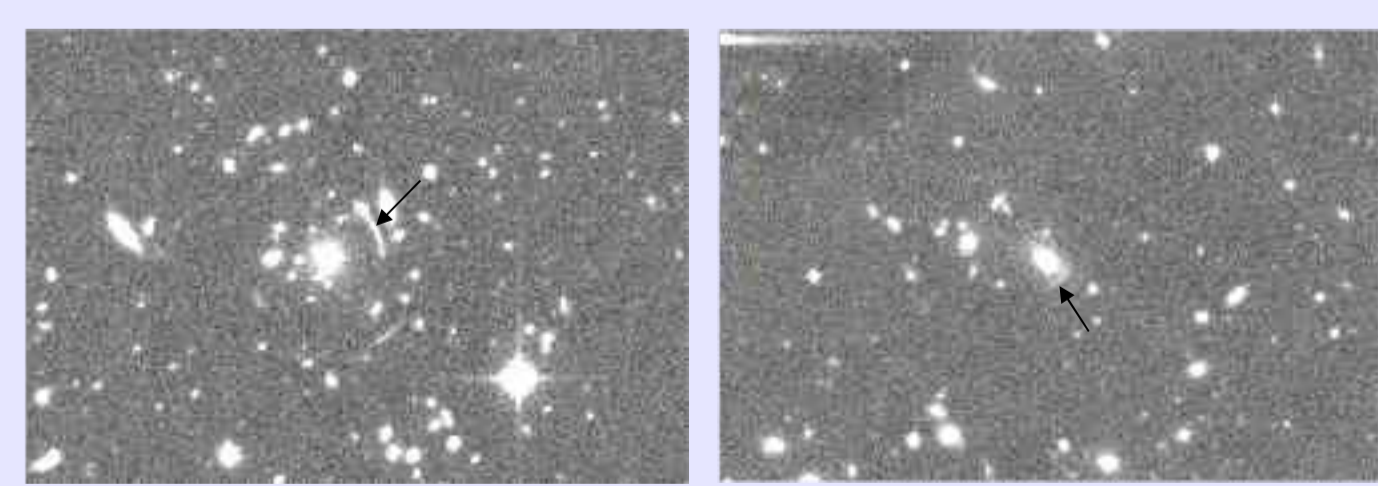
## VVDS 0226-04 cone: 6217 galaxies (Olivier Le Fèvre et al. 2004)



## CFHTLS: nombre prédit de mirages (complétude $I_{AB} < 26.5$ )

| Type                           | prédiction [deg <sup>-2</sup> ] | observé [deg <sup>-2</sup> ] | Ref             |
|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------|-----------------|
| arcs géants                    | ~ 0.1                           | ~ 1                          | Mellier 2005    |
| arc(lets) dans groupes et amas | ~ 10-20                         | ?                            |                 |
| mirages isolés                 | ~ 50-70                         | beaucoup                     | HST, GOODS, ... |
| anneaux (surtout E)            | > 10-100                        | ?                            |                 |
| autres (DM, cordes)            | ~ 0 - ?                         | ?                            |                 |

## CFHT-SL2S: arcs géants dans les amas de galaxies



Recherche d'arcs autour de galaxies dans GOODS:  $r = 0.1$  arcsec,  $0.3$  arcsec  $< R_E < 3$  arcsec  
 $< \text{GOODS}$

est équivalent à la recherche d'arcs autour de groupes dans CFHTLS:  
 $r = 0.8$  arcsec,  $3$  arcsec  $< R_E < 60$  arcsec  
même rapport  $R_E / r$   
 $< \text{CFHTLS-D3}$

Ho & White 2005, Li et al. 2005, Chen 2005) sera poursuivie puisque Y. Mellier à indiquer que leur nombre est d'au moins un par degré carré soit 3 à 10 fois plus que prévu.

- Enfin, l'avantage d'une grande base de données est de pouvoir sélectionner des cas rares et intéressants, jusqu'alors inobservés, comme des systèmes d'arc se produisant très près de l'axe optique lorsque la source d'arrière plan est à faible décalage spectral.

**Programme de travail**  
Les très grands sondages au sol et spatiaux nécessitent de mettre au point des logiciels automatisés ou d'aide à la détection des effets de lentilles. Trois logiciels « prototypes » sont en cours de développement et d'évaluation dans notre groupe de travail :

**Arlets** (auteurs Dantel-Fort, Fort et Sygnet) vise à détecter des (mini) arcs multiples au centre des amas et surtout des groupes. Ces systèmes (profondeur optique probable de l'ordre de  $10^{-4}$  à  $10^{-3}$ ) sont difficilement repérables à l'œil à cause des effets de seeing surtout quand le rayon d'Einstein est modeste (4-10 seconde d'arc). Une des idées serait aussi de mettre en évidence l'existence de halos communs à plusieurs galaxies ou des halos très peu lumineux

**Ring** (auteurs Sygnet, Schulmann, Alard, Fort) vise à la détection automatique des candidats anneaux d'Einstein (profondeur optique de l'ordre de  $10^{-3}$ ) autour des galaxies (principalement elliptiques massives à  $z < 0.4$ ). Il doit y en avoir plus d'une dizaine par degré carré détectables sur des images spatiales. Compte tenu des effets de seeing du petit rayon d'Einstein ( $0.5$  à  $3''$ ) Ring n'en détecte qu'une fraction par degré carré. Avec le CFHTLS/Wide, on pourra néanmoins se constituer une base de donnée (quelques centaines) dépassant rapidement celle des QSOs multiples.

**GiantArc** (développé par C. Alard) concerne la détection automatique des arcs lumineux géants pour avoir des critères de sélection plus objectifs (surface de champ analysé, attributs des arcs : comme longueur et brillance de surface, etc.) afin de comparaison avec les prévisions des simulations numériques en limitant les effets de biais statistiques.

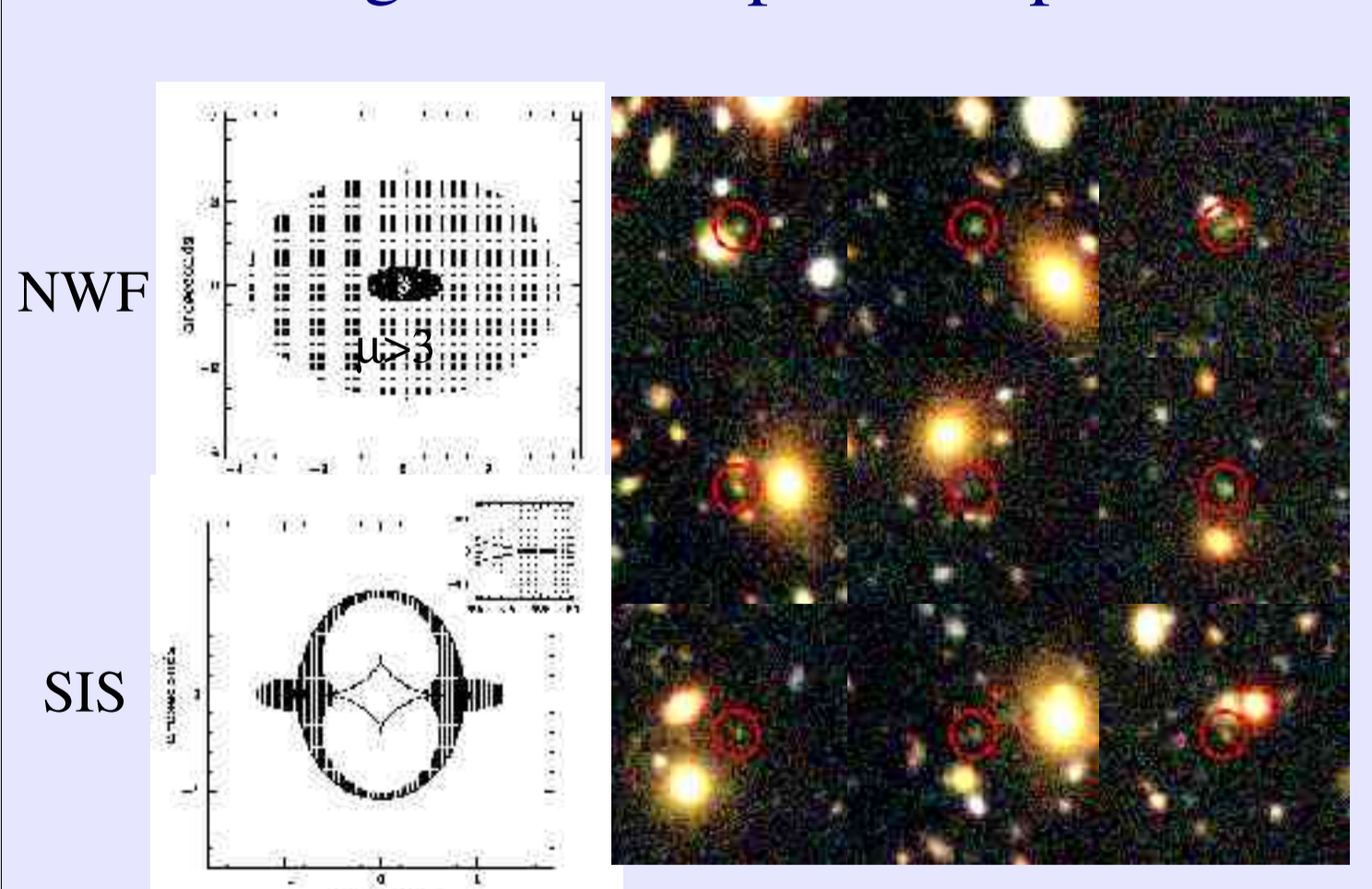
**La mesure spectroscopique du décalage spectral** des images multiples des sources et des lentilles constituera un volet très important du travail à fournir : sélection minutieuse des candidats après une rapide modélisation utilisant les  $z$  couleurs, préparation des demandes de télescope et réduction des données. L'imagerie optique à haute résolution sur le HST devra aussi être préparée et réalisée pour les cas astrophysiques les plus intéressants

**La modélisation des lentilles** s'appuiera sur l'expertise accumulée en France avec le logiciel de Jean-Paul Kneib et de Raphaël Gavazzi qui permettent maintenant de travailler très rapidement sur des systèmes complexes (effets perturbatif de sous halos) et qui convergent rapidement sur les modèles optimum (utilisation de chaînes de Markov) avec des possibilités de reconstruction de l'image des sources et de comparaison des résultats.

**Organisation et calendrier du projet**  
Nous avons déjà détectés une bonne dizaine de bons candidats sur les deux premiers champs disponibles du survey CFHTLS (D1,D3). La sélection de candidats s'effectuera au fur et à mesure de la mise à disposition des données avec des tests (évolutifs) des performances de nos algorithmes sur des champs bénéficiant de quelques images du HST comme la Groth strip de CFHT-LS-D3.

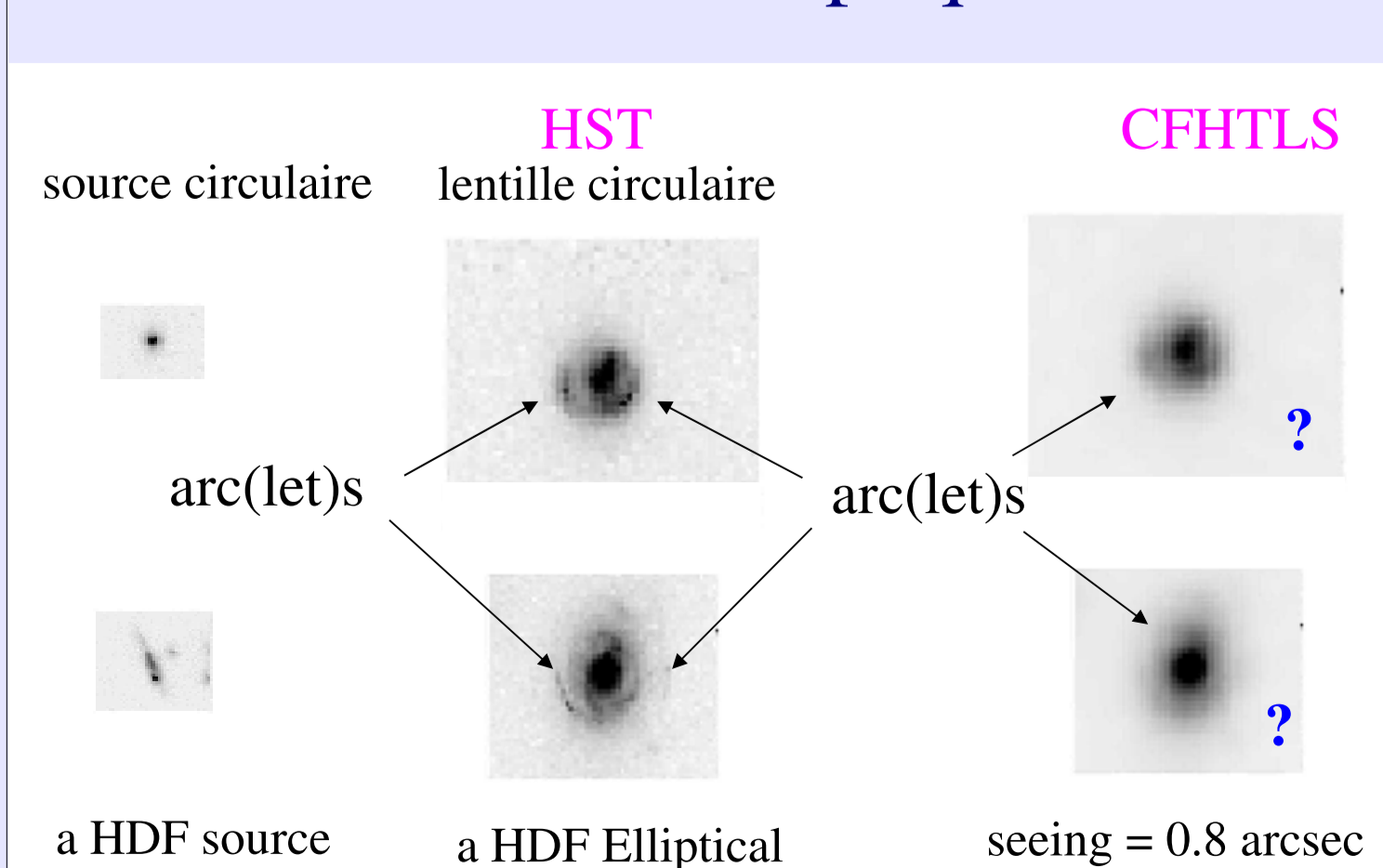
Nous avons déjà présenté une demande d'observation de lentille du champ nord sur GEMINI et sur un dark radio lens sur le VLBA. Nous préparons activement les demandes VLT, puis Grantecan après sa première lumière.

## CFHTLS galaxies drop-out amplifiées



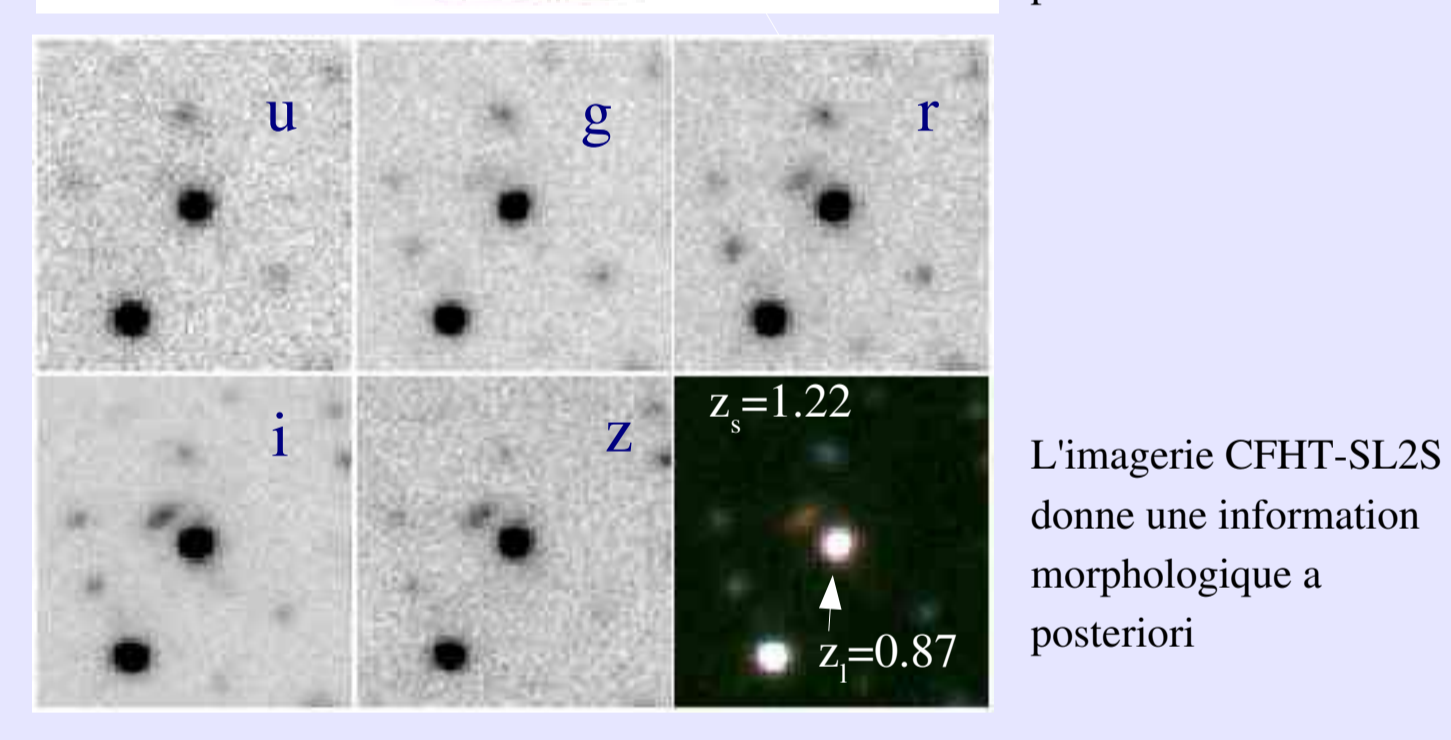
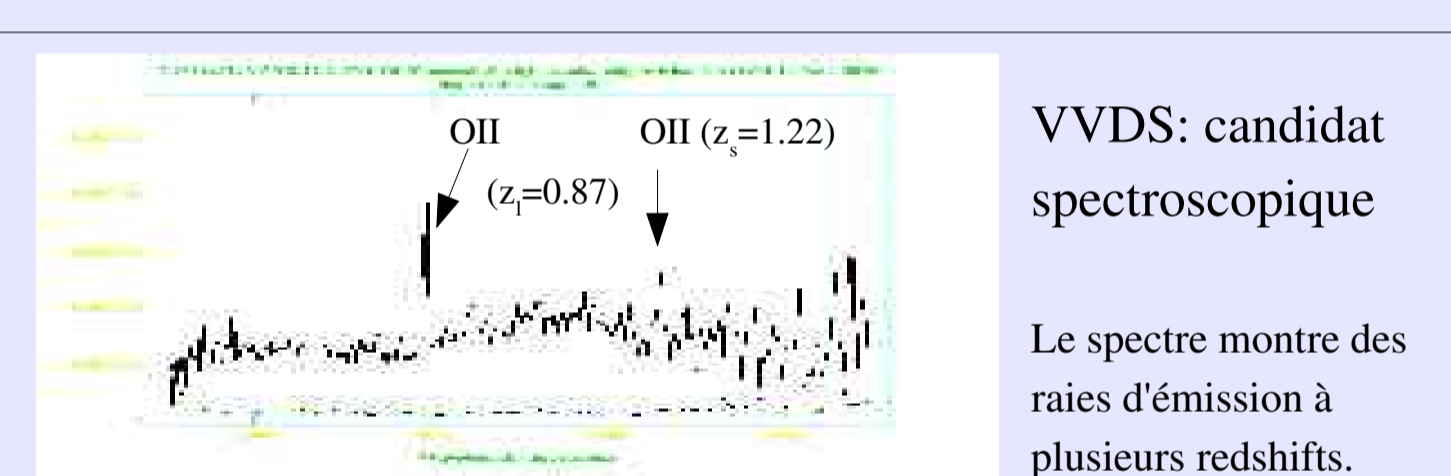
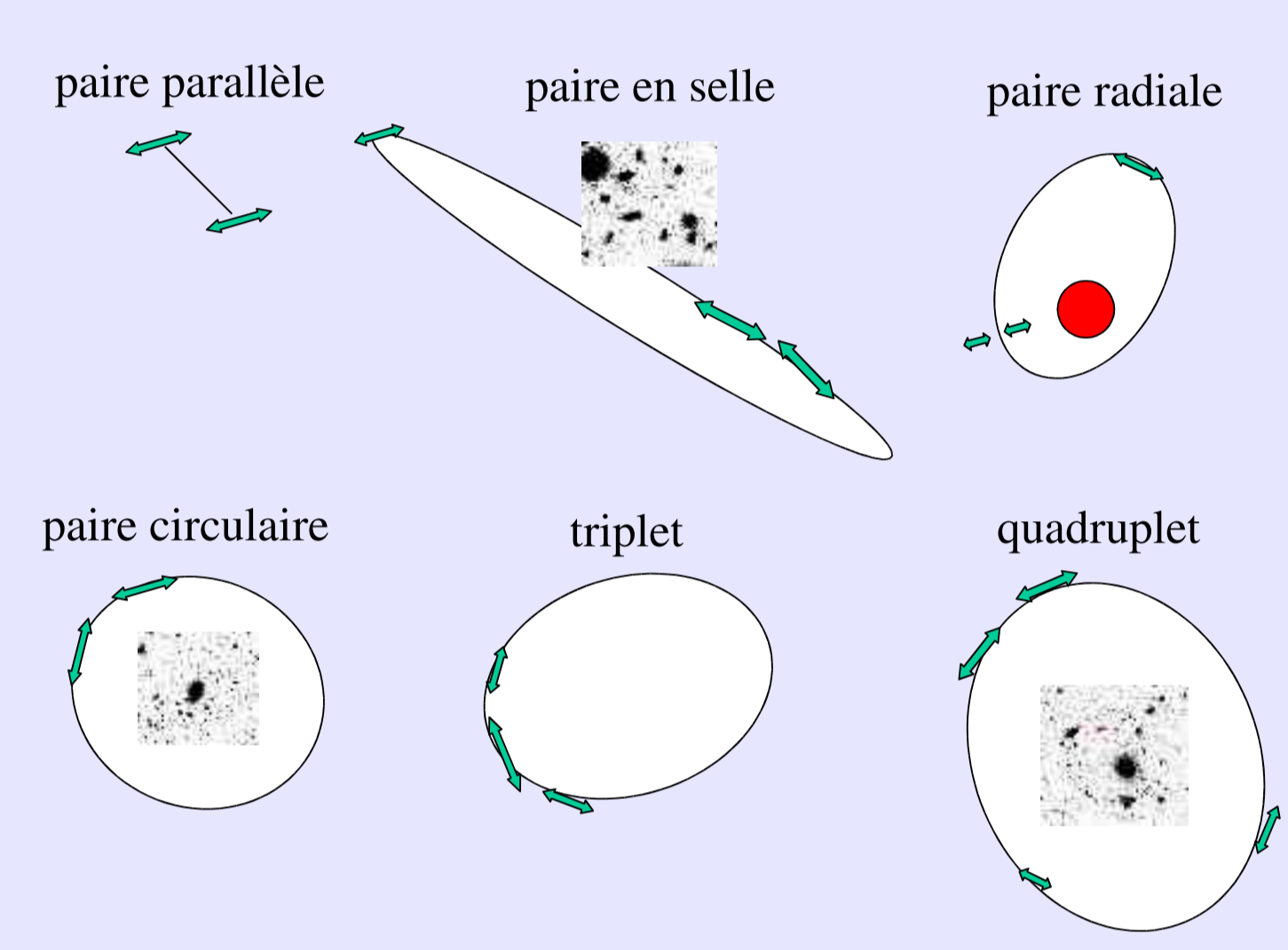
10 – 30 % de tous les objets distants sont amplifiés avec  $\mu > 10$  (Keeton's prediction 2005)

## Simulations d'arcs autour de lentilles elliptiques

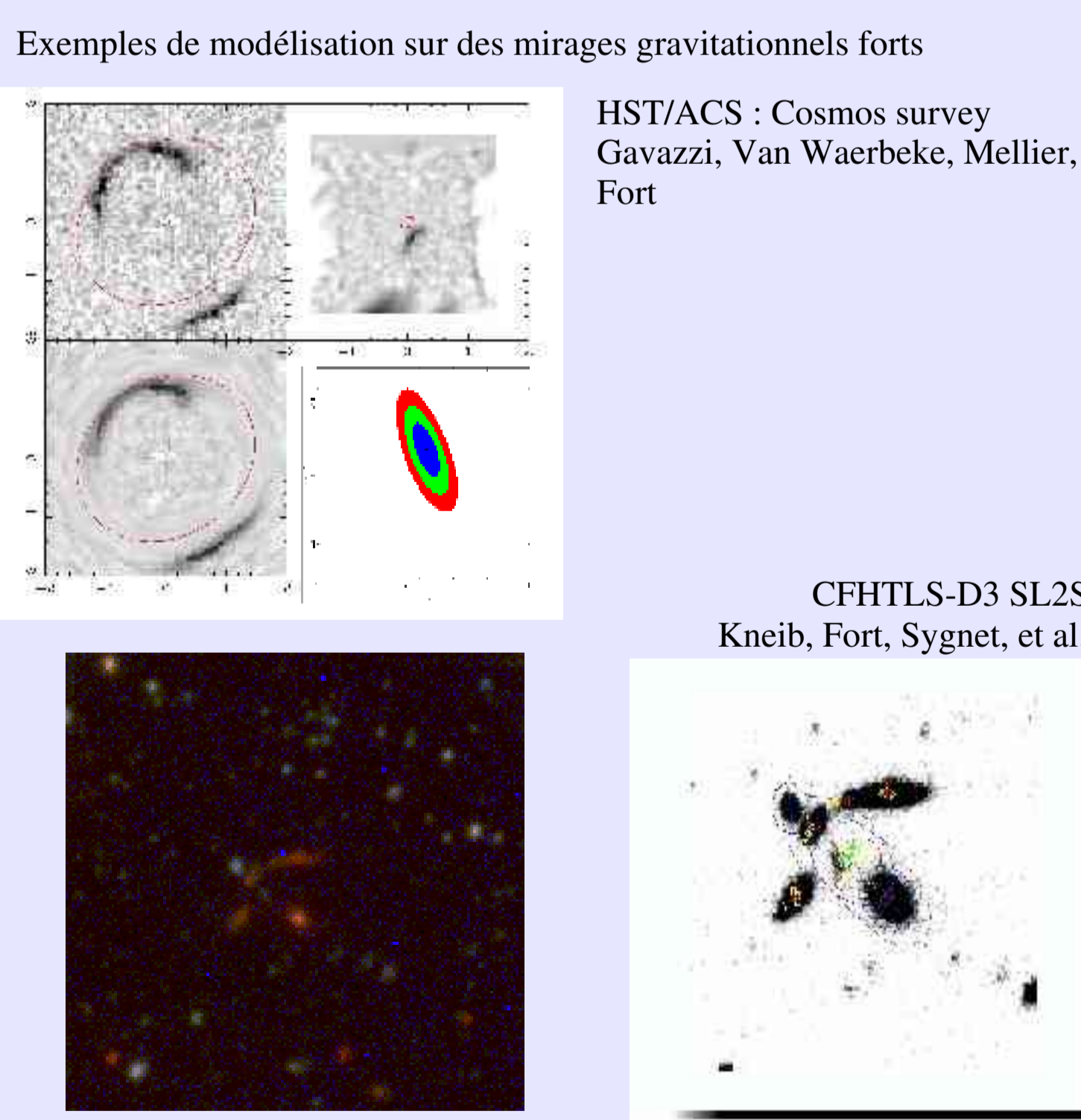


En raison du seeing, seul un suivi spectroscopique permet parfois de distinguer les vrais mirages des bras spiraux « face-on ».

## Arclet: Sélection générique d'arcs



## Modélisation



## References

An, 2005, MNRAS 356, 1409  
Bartelmann et al., 2003, A&A 409, 449  
Broadhurst et al., 2005, ApJ 619, 143  
Cabanac, et al., 2005 A&A 436, L21  
Chae, 2005, ApJ 630, 764  
Chen, 2005, ApJ 629, 23  
Dalal et al., 2004, ApJ 609, 50  
De Filipis et al., 2005, ApJ 625, 108  
Dobler & Keeton, 2005, astro-ph/0502436  
Fort et al., 1998, A&A 200, L17  
Fort et al., 1992, ApJ 399, 125  
Fort and Mellier, 1994, A&ARv 5, 239  
Gavazzi 2003, A&A 403, 11  
Gavazzi, 2005, IAU Symp 225, 179  
Hagan et al., 2005, astro-ph/0504557  
Ho & White, 2005, ApJ 621, 257  
Keeton, C., 1998, PhD T., Harvard U, 153p  
Keeton, C., 2001, ApJ 562, 160  
Keeton et al., 2003, ApJ 598, 138  
Keeton et al., 2005, ApJ 621, 559  
Keeton et al., 2005, astro-ph/0503452  
Kneib et al., 1993, A&A 273, 367  
Kneib et al., 1994, A&A 286, 701  
Kneib et al., 2000, IAP Meeting 2000  
Kneib et al., 2003, ApJ 598, 804  
Kochanek et al., 2001, ApJ 547, 50  
Koopmans, L., 2005, MNRAS 890  
Li et al., 2005, astro-ph/0503172  
Lin & Ostriker, 2002, ApJ 566, 652  
Lin & Ostriker 2003, ApJ 595, 603  
Mandelbaum et al., 2005, astro-ph/0509026  
Marshall et al., 2005, astro-ph/0501328  
McLeod, 2001, ASPC 237, 177  
Mellier et al., 1993, ApJ 407, 33  
Miralda-Escude, 1992, MNRAS 259, 31  
Miralda-Escude, 1993a, ApJ, 403, 497  
Miralda-Escude, 1993b, ApJ, 403, 509  
Ofek et al., 2003 MNRAS 343, 639  
Ofek et al., 2005, astro-ph/0510465  
Oguri M., 2003, IAUJD 10, 49  
Oguri, M., 2004, PhD T., Univ. Tokyo, 174p  
Oguri, M., 2005, IAU Symp 225, 407  
Pello et al., 1991, ApJ 366, 405  
Pello et al., 2004, A&A 416, 35  
Pello et al., 2005, astro-ph/0510180  
Roza et al., 2005, astro-ph/0506573  
Rusin et al., 2005, ApJ 627, 93  
Soucail et al., 1987, A&A 184, L7  
Williams et al., 1999, ApJ 527, 535