

# TERAPIX <http://terapix.iap.fr>

*A. Baillard (Doctorant), E. Bertin (Project Manager, 90%), M. Dantel-Fort (2004-fin 2007 ; 80%), L. Domisse (2004-Mars 2007 : 100%), F. Magnard (100%), J.-C. Malapert (CDD, 2004-2006 : 100%), C. Marmo (CDD, 2005-2008: 100%), Y. Mellier (PI, 100%), H.J. McCracken (70%), M. Schultheis (30%), G. Sémah (CDD, 2007-2009 : 100%), G. Tissier (CDD, terminé en 2004: 100%).*

*A noter les départs de L. Domisse en mars 2007 et celui de M. Dantel-Fort en décembre 2007.*

TERAPIX (Traitement Élémentaire Réduction Automatique des PIXels) est un centre de traitement d'images astronomiques. Il a été créé en 1998 pour produire des outils logiciels et disposer de ressources informatiques à la mesure des besoins des nouveaux grands détecteurs panoramiques visibles et infrarouges comme MEGACAM et WIRCam et pour assurer le traitement du grand relevé Canada-France-Hawaii-Telescope Legacy Survey (CFHTLS). TERAPIX a trois objectifs prioritaires:

1. Le développement de logiciels rapides et optimisés pour le traitement des grandes images astronomiques et la construction de chaînes automatiques de traitement des images et des grands relevés astronomiques,
2. La production des données scientifiques calibrées et prêtes à l'exploitation scientifique pour la communauté. Cela concerne plus particulièrement le relevé CFHTLS, mais aussi des programmes PI utilisant les détecteurs MEGACAM et WIRCam du CFHT. Les produits en sortie de TERAPIX sont des séries d'images astronomiques calibrées, ré-échantillonnées, co-additionnées, des images de cartes de pondération et de carte de contexte des pixels, des catalogues d'objets, un ensemble de méta-données qualifiant les propriétés cosmétiques, astrométriques, photométriques et la caractérisation de la réponse impulsionnelle des images. Une base de données, dont une partie est ouverte à la communauté, permet d'accéder à l'ensemble des informations, mais l'archivage et la distribution du CFHTLS sont assurés par le CADC.
3. L'assistance technique aux utilisateurs qui disposent de données MEGACAM ou WIRCam et qui souhaitent bénéficier de l'expérience et des ressources de TERAPIX pour le traitement de leurs images.

TERAPIX est un centre national qui a pour vocation de servir la communauté astronomique dans son ensemble. Ainsi, outre l'assistance et la production de données, TERAPIX met ses logiciels à la disposition de l'ensemble des astronomes et physiciens. Par ailleurs, les produits logiciels TERAPIX sont pour la plupart suffisamment génériques pour permettre une utilisation autonome et d'étendre leurs applications à quasiment tous les détecteurs ou tous types d'images numériques visibles et infrarouge proches, voire au-delà.

Les sources de financement et les appuis logistiques de TERAPIX proviennent de l'INSU, du PNC, des contrats européens FP5 AVO (terminé en 2004) et AstroWise (terminé en 2006), de l'ACI FIGI et de l'IAP. L'essentiel des ressources sert à financer l'environnement informatique (machines, disques, réseau). TERAPIX dispose actuellement d'un réseau Gigabit, d'un cluster de 25 machines totalisant 69 CPUs et d'environ 100TB de disques montés sur une série de baies RAID sécurisés. L'ensemble est installé à l'IAP.

Au cours de la période 2004-2007 les activités de TERAPIX se sont concentrées sur

1. Le développement d'outils logiciels pour le traitement des images panoramiques
2. La mise en place d'une nouvelle chaîne de traitement des données pour WIRCam
3. L'installation et l'opération des pipelines TERAPIX, et la production des releases du CFHTLS et celles des données PI MEGACAM et WIRCam
4. L'exploitation scientifique des grands relevés dont TERAPIX a la charge (en totalité ou en partie): CFHTLS, COSMOS, WIRDS. Ce dernier point concerne une communauté plus large que l'équipe TERAPIX. Il s'agit de collaborations nationales et internationales. On ne décrira ici que les projets scientifiques qui impliquent une participation où l'IAP joue un rôle moteur.

## **Développements logiciels à TERAPIX**

TERAPIX développe et maintient depuis l'origine tous ses logiciels de manipulation des images, catalogues et méta-données, depuis la simulation d'images astronomiques jusqu'à leur analyse, en passant par les bibliothèques de gestion des formats de fichiers. Ces développements « maison » effectués au plus bas niveau (la majorité des codes est en C et accède directement aux pixels sans recourir à des bibliothèques) permettent une efficacité de traitement maximale à la fois en vitesse et en usage mémoire, et minimisent le recours aux opérations de lecture/écriture de fichiers, toujours coûteuses en temps. Les outils créés à TERAPIX sont sous licence GPL (logiciel libre) et sont rapidement délivrés à la communauté internationale sous forme de « paquetages » portables, documentés, et d'installation facile. Outre les versions « officielles », celles en développement sont immédiatement accessibles à tout moment via une interface<sup>1</sup> web. Cette approche s'avère bénéfique à la fois pour la robustesse et la flexibilité des codes, au travers du retour quasi-quotidien provenant des quelques centaines d'utilisateurs réguliers de par le monde, professionnels ou amateurs. Le remplacement en 2006 des listes de courriels par un forum internet<sup>2</sup> pour le support technique a considérablement facilité l'accès des utilisateurs extérieurs aux informations les plus techniques.

Durant la période 2004-2007, TERAPIX a délivré à la communauté cinq nouveaux logiciels, portant à une douzaine le nombre d'outils officiellement maintenus: **libVOTable** (accès simplifié aux tables dans le format de l'observatoire virtuel), **QualityFITS** (synthèse des diagnostics de qualité des images), **SCAMP** (calibration optimale et totalement automatique de l'astrométrie et de la photométrie de tous types d'images du ciel), **PSFEx** (mesure et la caractérisation automatiques de la réponse impulsionnelle des images astronomiques), et **MissFITS** (manipulation performante des fichiers au format des astronomes). Les outils préexistants ont bénéficié d'une vingtaine de mises-à-jour majeures, avec en particulier le support du format XML VOTable destiné à simplifier l'intégration des logiciels TERAPIX dans les structures de l'observatoire virtuel, et des feuilles de style XSLT pour faciliter la gestion et l'affichage des méta-données au sein des pipelines de production.

---

<sup>1</sup> <http://terapix.iap.fr/wsvn>

<sup>2</sup> <http://terapix.iap.fr/forum>

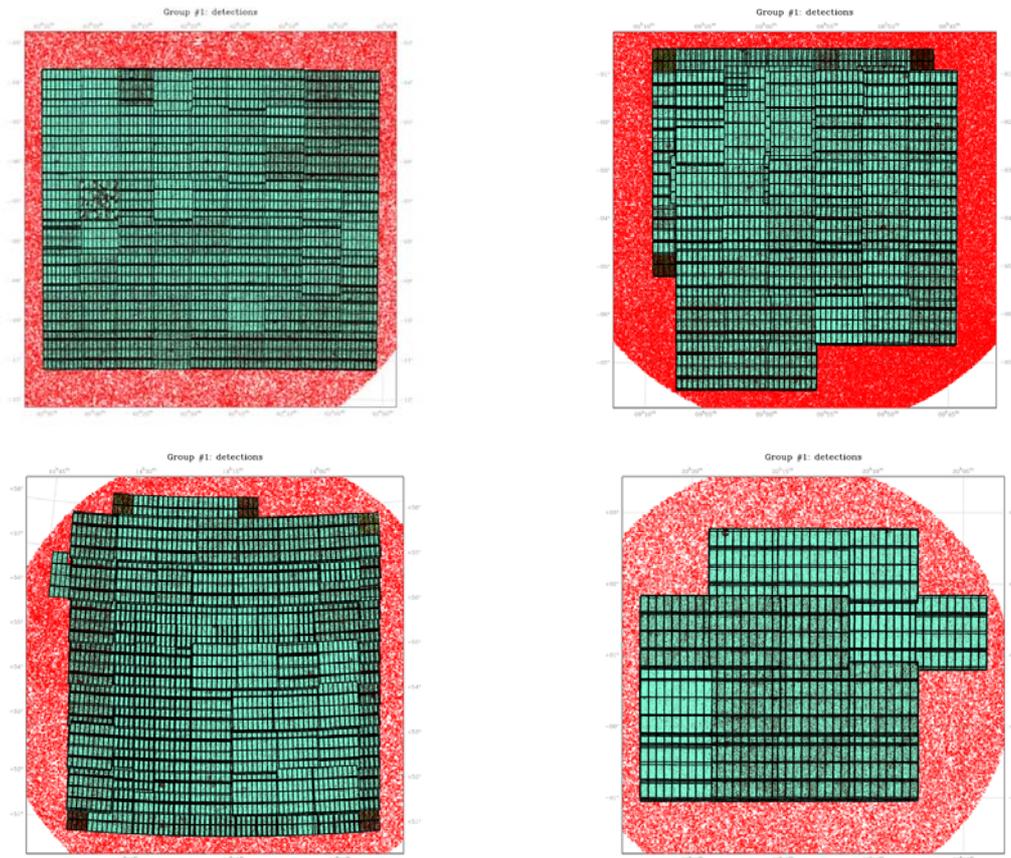


Figure 1 : illustration du traitement des quatre champs Wide du relevé CFHTLS par TERAPIX. Les champs W1 à W4 sont montrés dans l'ordre, mais pas à la même échelle : W1 est le plus vaste ( $82 \text{ deg}^2$ ) et W4 le plus petit ( $16 \text{ deg}^2$ ). Chaque petit rectangle représente un CCD de MEGACAM, chaque carré élémentaire qui se dessine est un champ MEGACAM. L'ensemble des champs MEGACAM tracés sur ces figures a été automatiquement sélectionné par le logiciel SCAMP pour construire une solution astrométrique globale que la chaîne de traitement utilise ensuite champ par champ pour construire la release. Les points rouges sont les étoiles du catalogues 2MASS identifiées dans les champs, les points verts montrent les étoiles 2MASS repérées dans les champs MEGACAM.

## **Installation et opération de la chaîne de traitement TERAPIX**

La chaîne de traitement des images MEGACAM, SPICA, développée au cours de la période 2001-2007, fut surtout validée au cours de la période 2003 à 2007. Elle s'articule autour des outils logiciels de traitements et calibration des images et de productions des catalogues décrits ci-dessus, d'outils gérant le transfert des images depuis/vers le CADC ou le CFHT, et d'une base de données qui gère les étapes du traitement et la distribution des données sur le réseau de machines TERAPIX. SPICA construit automatiquement la chaîne des commandes du traitement, étape par étape, effectue une série de sélection sur les images selon des requêtes établies avec les PI ou le CFHTLS *Steering Group*, attribue automatiquement les fichiers de configuration nécessaires lors de chaque phase du traitement et gère les requêtes et les informations nouvelles pour la base de données.

Le traitement se déroule en trois grandes étapes :

1. Une phase d'évaluation des images individuelles et de production des images de cartes de pondération associées. Cette étape se termine par un contrôle visuel d'une série de

données d'évaluation puis par une note attribuée à chaque image. Pour les données CFHTLS ces informations sont ensuite transférées au CADC.

2. Une phase de calibration et de « réduction » automatique des données conduisant aux images co-additionnées finales et prenant en compte les filtres de sélection des images. Cette étape gère des séries d'images monochromatiques (i.e. par filtre) et s'achève par une procédure d'évaluation identique à celle des images individuelles.
3. Une phase d'analyse et de contrôle qualité panchromatique qui exploite simultanément les données produites avec au moins trois filtres pour construire des images « chi2 », des images en couleur et des diagrammes couleur-couleur. Avec ces informations il est alors possible de vérifier la qualité photométrique et astrométrique des images et catalogues produits par TERAPIX.

La base de données conserve toutes les informations se rapportant à chaque produit de sortie ainsi que les informations des images individuelles ayant servi pendant l'une des phases de la production. Ces données sont conservées pour chaque release. Une fraction est transférée vers le CADC pour la distribution aux utilisateurs.

### ***Traitement et analyse des données WIRCam***

Les activités reliées à la camera infrarouge proche grand-champ WIRCam, installée au CFHT, ont commencé à TERAPIX en aout 2005. TERAPIX a participé dès le début à la définition du format des images WIRCam en interaction avec le CFHT. L'environnement informatique, les outils logiciels et certaines interfaces TERAPIX utilisés pour le traitement et l'exploitation des données MEGACAM ont été étendus pour WIRCam. Des outils plus spécifiques aux images infrarouges ont faits l'objet d'importants développements. Ils se sont avérés utiles au traitement des images MEGACAM qui a ainsi bénéficié de cet effort. Cette généralisation infrarouge et la définition d'une stratégie correcte de traitement pour ces données ont occupé les premiers mois de travail sur le nouveau détecteur.

Les services offerts par TERAPIX à la communauté des utilisateurs de WIRCam pendant l'année et demie écoulée sont principalement:

1. le traitement des données de la caméra issues des programmes PI;
2. le développement et la mise à disposition des logiciels nécessaires au traitement des images WIRCam. Ils s'accompagnent d'un support technique aux PI qui préfèrent traiter eux-mêmes leurs données, avec les logiciels TERAPIX.

Concernant le premier point, une procédure de traitement a été conçue et organisée en pipeline. Tout comme les programmes MEGACAM-PI, la variété des objectifs scientifiques et donc des propriétés des observations des programmes WIRCam-PI impose de construire une structure flexible et semi-automatique pour l'ensemble des procédures de traitement. Une documentation qui les décrit dans le détail a été rédigée et mise à disposition des utilisateurs sur le site web TERAPIX<sup>3</sup>. Grâce à l'interaction avec les astronomes PI et les astronomes et ingénieurs du CFHT, TERAPIX a acquis une expertise nouvelle en traitement de données dans l'infrarouge proche et participé activement à l'amélioration et à l'optimisation des procédures de prétraitement appliquée au CFHT sur les images WIRCam.

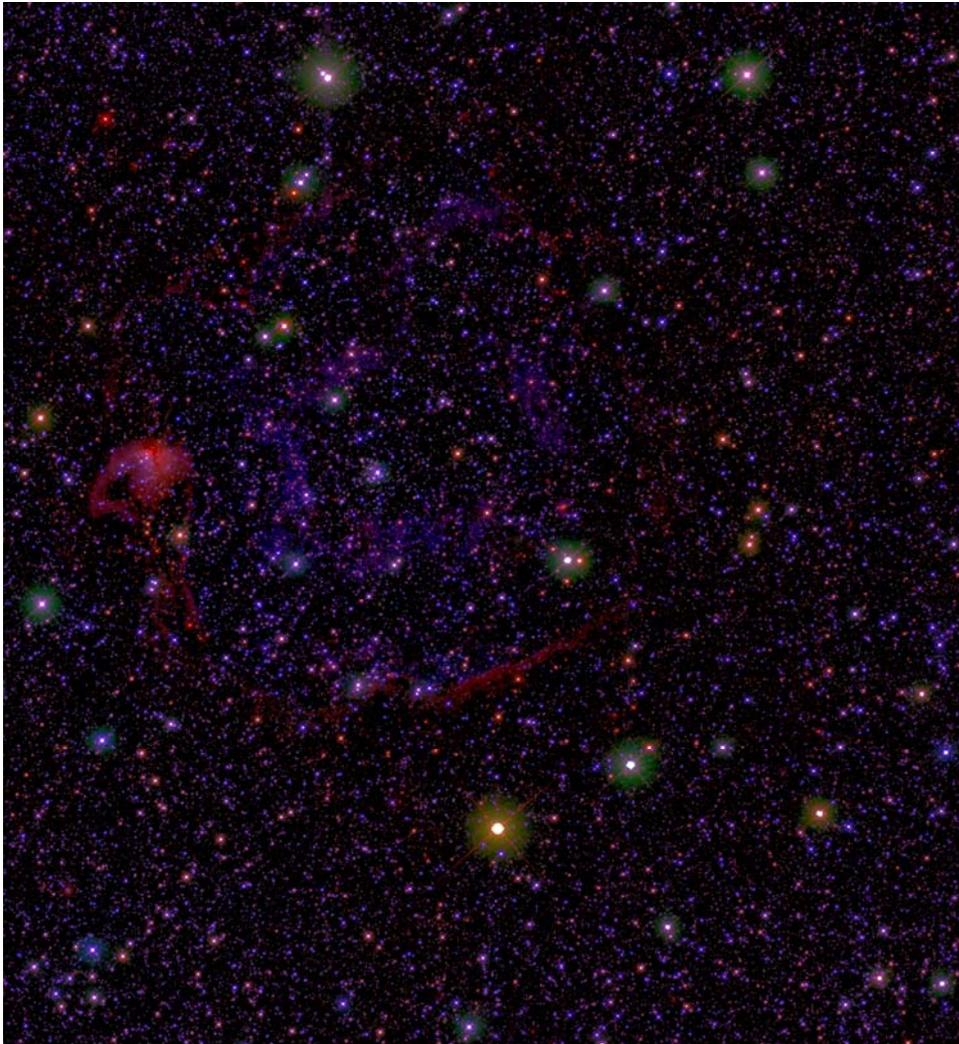
Le deuxième point concerne le travail de développement spécifique aux données WIRCam. Le logiciel **EyE** a été mis à jour puis utilisé pour le filtrage des mauvais pixels, qui affectent les détecteurs infrarouges plus que les optiques. Un travail d'analyse de la qualité de la PSF en utilisant le logiciel **PSFEx** a démarré cette année, ayant comme but principal une notation automatique des images sur la base de leur exploitabilité scientifique. La nécessité de

---

<sup>3</sup> <http://terapix.iap.fr/wircam>

manipuler efficacement les fichiers FITS WIRCam a permis de finaliser le développement du logiciel **MissFITS** et de mettre à jour le logiciel **WeightWatcher**.

La communication avec les utilisateurs est maintenue grâce à la mise à jour constante des pages web concernant WIRCam à TERAPIX et à l'indication des nouveautés sur le forum<sup>4</sup>.



*Figure 2 : image composite WIRCam J, H, K d'un champ stellaire construite par la chaîne de traitement TERAPIX-WIRCam. Le champ couvert est de  $12 \times 13$  arcmin<sup>2</sup>. L'image est le résultat du traitement de 105 poses WIRCam en bande H, 172 en bande J et 73 en K qui totalisent pour ces filtres 525, 3020 et , 73 secondes, respectivement.*

## **Opération et production à TERAPIX**

Avec les images WIRCam, les programmes PI-MEGACAM et le CFHTLS, TERAPIX consacre depuis 2004 plus de 70% de ses activités à la production de données. Pour MEGACAM, les programmes PI forment environ 30% à 40% du volume, mais le CFHTLS représente plus de 80% du travail de production. En effet, la nature « Legacy » des produits implique une gestion des données initiales et finales et un contrôle qualité plus formel et rigoureux, ainsi que la production d'un ensemble de méta-données plus large et global.

---

<sup>4</sup> <http://terapix.iap.fr/forum>

En ce qui concerne les programmes PI, TERAPIX a, à ce jour, traité 22 programmes WIRCam concernant 14 PI différents, et 49 programmes MEGACAM concernant 22 PI différents. Les nationalités (instituts) des PI sont principalement la France, le Canada, Hawaii, et le CFHT (Discrétionnaire) mais nous avons aussi des programmes de Taiwan, du Royaume-Uni, d'Italie et des Etats-Unis (hors Hawaii).

Concernant le CFHTLS, au cours de la période 2004-2007, TERAPIX a produit les releases T0001 (novembre 2004), T0002, T0003 et T0004 (fin mai 2007). Elles portent principalement sur les relevés Deep (D1 à D4) et Wide (W1 à W4) et dans une moindre mesure sur le relevé Very Wide. L'ensemble des 4 releases constitue un volume de plus de 100 000 images MEGACAM individuelles (images scientifiques et les images carte de pondération qui sont produites par TERAPIX), représente la production de plus de plus de 10 000 images finales co-additionnées et de plus de 3 millions de fichiers de méta-données. L'ensemble est disponible au CADC ou sur les pages publiques TERAPIX (par exemple [http://terapix.iap.fr/cplt/tab\\_t03ym.html](http://terapix.iap.fr/cplt/tab_t03ym.html) pour T0003 avec les userid : cfhtls et pwd : terastat).

Le rythme de production des releases était initialement fixé à une par semestre. Comme aucun projet scientifique ne peut s'achever sur une si courte période, que ce rythme de production était impossible à soutenir et mettait TERAPIX sous une pression trop soutenue et permanente, il a été décidé en 2006 de passer à une release par an.

La perception de la communauté sur la qualité des productions de TERAPIX est un point important. Si l'on se réfère aux remerciements dans les papiers scientifiques que nous tentons de suivre ( [http://terapix.iap.fr/article.php?id\\_article=597](http://terapix.iap.fr/article.php?id_article=597) ), il y a à ce jour 64 articles scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture qui proviennent directement des données de TERAPIX, dont 44 entre 2004 et 2007 et 19 qui exploitent des données du CFHTLS (ne sont pas pris en compte les articles des chercheurs qui récupèrent et utilisent les logiciels produits à TERAPIX et qui ne citeraient TERAPIX que via une *footnote* précisant l'URL TERAPIX). Le récent Users Meeting du CFHT qui s'est déroulé les 9, 10 et 11 mai 2007 à Marseille a montré que TERAPIX semble remplir sa mission de façon satisfaisante.

### ***Exploitation et valorisation scientifique à l'IAP des grands relevés cosmologiques produits par TERAPIX***

Les astronomes impliqués dans TERAPIX participent à l'exploitation scientifique de plusieurs grands relevés dont la production des données est assurée, en partie ou en totalité, par TERAPIX. La contribution technique de TERAPIX à l'exploitation scientifique est importante. Outre le dynamisme qu'engendre la motivation des chercheurs pour mener à bien ces grands relevés et qui contribue à valoriser scientifiquement ses produits, TERAPIX a mis en place un réseau de machines et de disques indépendant du réseau de production. Son usage, qui est exclusivement orienté vers l'exploitation scientifique du CFHTLS, des relevés comme COSMOS ou le suivi photométrique du VVDS, contribue à un retour scientifique maximal. Les releases publiques du CFHTLS y sont déposées, permettant aux chercheurs de disposer de ressources de calcul confortables et à la mesure des besoins. TERAPIX apporte son assistance technique pour l'installation et le fonctionnement de ce réseau et fournit aux astronomes les conseils et les informations utiles concernant les données. Ce réseau construit à l'initiative de TERAPIX est financé principalement par le PNC, mais aussi par le PNG, l'IAP, l'ANR SL2S, et, dans une moindre mesure, par le PNPS.

### ***Lentilles gravitationnelles***

**Cisaillement gravitationnel cosmologique (cosmic shear): E. Bertin, J. Coupon (doctorant), L. Fu (doctorant), M. Kilbinger (post-doctorant), H.J. McCracken, Y. Mellier, C. Schimd (doctorant), E. Semboloni (doctorant), I. Tereno (doctorant), J.-P. Uzan**

Les grandes structures de l'Univers qui modifient les faisceaux lumineux émis par les galaxies lointaines engendrent un champ cohérent de déformation qu'on appelle un cisaillement gravitationnel, ou *cosmic shear*. D'un point de vue observationnel, il se manifeste sous la forme d'une distribution cohérente du vecteur ellipticité des galaxies. Les propriétés de ce champ reflètent celles de la géométrie de l'Univers et du spectre de puissance de la matière noire. Le cosmic shear analyse et exploite ce signal à partir de grands échantillons de galaxies pour contraindre la normalisation du spectre de puissance  $\sigma_8$ , les paramètres de densité  $\Omega_m$  et  $\Omega_w$  et l'équation d'état de l'énergie sombre que caractérise  $w$ .

Au cours de la période 2004-2007 l'essentiel des efforts s'est concentré sur l'analyse du cosmic shear dans les premières données du CFHTLS Deep et Wide puis dans le relevé COSMOS. Les résultats du CFHTLS sont rapportés dans cinq articles (Tereno et al 2005), Semboloni et al (2006), Hoekstra et al (2006), Schimd et al (2007) et Benjamin et al (2007, sous presses). Ils font l'objet de trois thèses soutenues à l'IAP (Semboloni 2006, Tereno 2007, Fu 2007) et d'une quatrième en cours. Les contraintes obtenues sur les paramètres cosmologiques sont en bon accord avec les autres méthodes. Il faut noter que celles concernant l'équation d'état de l'énergie sombre sont les secondes obtenues dans le monde avec le cosmic shear et les toutes premières qui exploitent la différence de distribution en redshift entre les galaxies du CFHTLS Deep et du CFHTLS Wide. De même, l'analyse des contraintes sur les champs de quintessence conduite par Schmid et al (2007) avec les données conjointes du CFHTLS, des Supernovae du HST et de WMAP3 est la première du genre.

La comparaison avec la normalisation du spectre de puissance dérivée des données de WMAP3 a montré une tension ( $1.5 \sigma$ ) avec les premières données du CFHTLS. Une analyse approfondie sur l'origine de cet écart est en cours (Fu et al 2007 en préparation). Elle porte sur deux points difficiles : la détermination de la distribution en redshift des sources et les effets de correction de l'anisotropie de la PSF dans les données CFHTLS. Les redshifts photométriques mesurés sur les données du CFHTLS Deep produites par TERAPIX (Ilbert et al 2006) et nos tests et validations conduits dans le cadre du projet STEP (Heymans et al 2006, Massey et al 2007a) ont permis de mieux contrôler les erreurs systématiques puis de réduire significativement ces incertitudes (Benjamin et al 2007 sous presses).

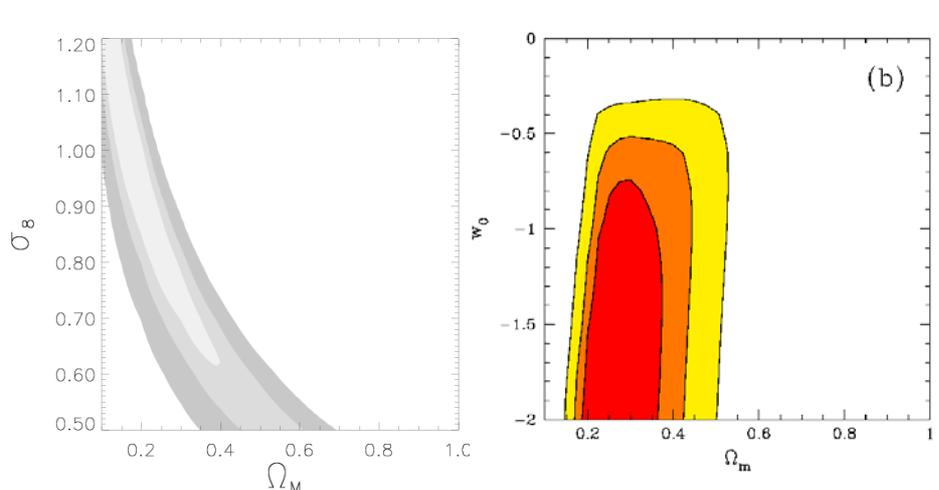


Figure 3 : contraintes sur les paramètres cosmologiques  $\sigma_8$ - $\Omega_m$  et  $\Omega_m$ - $w$  dérivées des analyses du cisaillement cosmologique dans les relevés Deep et Wide. A gauche, les toutes dernières analyses de Benjamin et al (2007,

*sous presses). Elles sont en bon accord avec WMAP3. A droite, celles sur l'énergie sombre établies par Semboloni et al (2006) et Hoekstra et al (2006).*

Il faut cependant noter que le cosmic shear donne toujours une valeur de  $\sigma_8$  supérieure à celle de WMAP3. L'analyse conjointe CFHTLS, Virgos-DESCART, RCS et GaBoDS et couvrant un champ de  $100 \text{ deg}^2$  (Benjamin et al 2007) confirme ce constat. Bien que l'on puisse suspecter que les analyses du cosmic shear surestiment ce paramètre, il est remarquable que notre analyse conduite avec le relevé HST COSMOS consolide cette tendance (Massey et al 2007b sous presses). Notre participation au programme cosmic shear du COSMOS *Treasury Survey* avec 640 orbites du HST et couvrant une zone du CFHT-LS est donc une fantastique opportunité d'établir la convergence des résultats du cosmic shear vers un  $\sigma_8$  légèrement plus élevé que WMAP3.

Nous poursuivons ces deux programmes, notamment avec les nouvelles données du CFHTLS qui portent aujourd'hui sur un champ 4 fois plus vaste. Par ailleurs nous participons à un programme identique à l'ESO et qui devrait porter sur  $3000 \text{ deg}^2$  avec le VST et VISTA. Il sera une magnitude moins profond que le CFHTLS Wide mais il comportera 9 bandes, 4 visibles et 5 infrarouges. Le projet sera conduit au sein d'un contrat européen FP6, DUEL, qui nous permet de financer un post-doc ainsi qu'un doctorant.

Sur le plus long terme nous participons à la conception des relevés de quatrième génération. Plus particulièrement, nous faisons partie du consortium DUNE qui propose un imageur visible et infrarouge proche dans le cadre l'appel d'offre Cosmic Vision de l'ESA. Notre implication concerne le traitement des données, la simulation des images DUNE, les mesures du cosmic shear et les interprétations cosmologiques du relevé.

***Lentilles gravitationnelles dans le relevé CHFTLS SL2S : C. Alard, B. Fort, Y. Mellier, JF. Sygnet, H. Tu (doctorant)***

Ce travail s'inscrit dans la continuité des études visant à mesurer la distribution de masse dans les amas de galaxies à l'aide des effets de lentilles gravitationnelles. Les objectifs scientifiques sont de caractériser la distribution de la matière noire près du centre des halos et d'établir dans quelle mesure les prédictions des simulations numériques sont validées aux petites échelles par les observations: la valeur de la pente du halo près du centre (strong lensing), le profil de la densité de masse à grande distance (weak lensing), ainsi que l'anisotropie des halos.

Les problèmes à résoudre sont difficiles à cause des dégénérescences intrinsèques des solutions et des effets de projection. Nos principaux résultats concernent la mise en évidence d'effets de twist d'ellipticité des distributions de masse projetées, la compatibilité des profils avec celui d'un profil universel au-delà de 50 kpcs environ (Gavazzi et al 2007), et le couplage avec une analyse dynamique des dispersions de vitesse.

L'utilisation d'arcs situés au-delà du rayon d'Einstein, près de galaxies de l'amas nous a également permis d'étudier la pente du profil de densité et d'évaluer son écart relativement au profil isotherme (Tu et al 2007 en préparation). Le nouveau relevé CFHTLS apporte une dynamique nouvelle à l'approche de tous ces problèmes qui nous a conduit à présenter une demande d'ANR, en collaboration avec l'OMP et l'OM, qui fut acceptée fin 2006 ( ANR SL2S ; PI C. Alard)

Les premières releases de données CHFTLS ont montré que ce relevé possède un grand potentiel en ce qui concerne la détection d'arcs gravitationnels. La quantité de données et la surface des zones à couvrir exigent de recourir à des méthodes de détection automatiques. Le

premier travail de notre ANR fut donc de développer un algorithme permettant la recherche automatique des arcs dans les données CFHTLS. Il est fondé sur une estimation de l'élongation locale (Alard 2007). Cette procédure appliquée à la release CFHTLS T0002 a produit une liste de structures localement allongées qui ont permis de sélectionner plusieurs dizaines de lentilles, dont un bon nombre d'arcs autour de halo de masse intermédiaires (groupes de galaxies) ou d'amas lointains (Cabanac et al 2006). Pour confirmer et suivre cet échantillon SL2S, nous avons récemment du temps d'observation HST (130 orbites en mode *snapshot*, PI J.-P. Kneib). Nous étendons maintenant cette méthode à la recherche d'anneaux gravitationnels autour des galaxies elliptiques massives dont la population est 10 fois plus nombreuses (une demande VLT est acceptée pour le suivi spectroscopique de ces lentilles).



Figure 4 : image composite d'un remarquable système d'arcs gravitationnels détecté dans un des champs du CFHTLS par la collaboration SL2S.

Actuellement notre groupe s'oriente vers une reconstruction statistique des propriétés des arcs, et en particulier vers l'investigation systématique des déviations observées à la symétrie radiale des potentiels (perturbations des champs de déplacements). Cette approche devrait permettre d'évaluer l'importance des distorsions du potentiel liées aux sous structures de matière noire. Ces distorsions n'affectent pas seulement la morphologie des arcs, mais aussi la section efficace des lentilles et donc la statistique du nombre d'arcs observés. Comme pour les effets de fusion, qui allongent le périmètre des caustiques, cette contrainte additionnelle pourrait aussi fournir une estimation de l'amplitude des distorsions engendrées par les sous-structures de matière noire. Pour aller au-delà des modélisations actuelles de lentilles fortes, et compte tenu de la complexité des problèmes à traiter, des simulations numériques seront effectuées par des tracés de rayons dans les simulations cosmologiques Horizon. Ce travail de couplage de l'interprétation des simulations numériques avec les observations représente un gros investissement. A cet effet nous avons recruté un post-doctorant sur les fonds de l'ANR SLS2, Sébastien Peirani. Il commencera son travail cet été. Nous continuerons cependant à utiliser et à développer en parallèle l'analyse numérique des modèles analytiques simplifiés qui permettront de comprendre la nature des effets observés, et d'orienter le travail numérique.

## **Evolution et histoire de la structuration des galaxies : E. Bertin, H. McCracken, Y. Mellier**

Un aspect important de nos objectifs de recherche est de produire des mesures solides et robustes de l'évolution de la structuration des galaxies qui puissent être comparées avec les simulations numériques les plus récentes. Pour y parvenir, nous utilisons les données des deux grands relevés dans lesquels nous sommes impliqués fortement, le CFHTLS et COSMOS. Dans ces deux collaborations, TERAPIX produit les images et les catalogues du CFHTLS Deep ainsi que les images K et en bande u du projet COSMOS.

En ce qui concerne COSMOS, McCracken et al 2007 (APJs , COSMOS *special issue*, sous presses) ont mesuré la fonction de corrélation angulaire des galaxies qu'ils ont comparé aux prédictions des simulations Millenium (Springel et al 2005). L'accord avec les observations est remarquable. Même le changement de pente que prédisent les simulations est observé dans les données COSMOS. Cependant, ce relevé n'est composé que d'un seul champ de  $2 \text{ deg}^2$  et il est sensible aux effets de la variance cosmique. Les quatre champs du CFHTLS Deep, bien que moins profonds, constituent de ce point de vue un échantillon complémentaire. A partir des catalogues de la release T0003 du CFHTLS, Ilbert et al. 2006 ont construit un échantillon de redshifts photométriques calibrés sur environ 3000 spectres du relevé VVDS. Ce catalogue contient 100, 000 galaxies jusqu'à la magnitude  $I_{AB} \sim 24$ . Il a été exploité par McCracken et al (2007, soumis) pour étudier l'évolution de la structuration des galaxies en fonction du type spectral, du redshift et de la luminosité des galaxies. Ils ont ainsi montré pour la première fois qu'à redshift intermédiaire les galaxies elliptiques les plus faibles sont plus fortement structurées. Cette mesure est en accord avec un scénario où la population de galaxies elliptiques faibles résiderait dans les mêmes halos de matière noire que les galaxies elliptiques massives.

La compréhension des mécanismes de formation et d'évolution des galaxies elliptiques constitue un pilier pour aborder le problème général de la formation des galaxies. Les divers modèles théoriques sont aujourd'hui en mesure d'établir un certain nombre de prédictions observationnelles permettant de décider quand les objets massifs les plus vieux, comme les galaxies elliptiques, se sont formés. L'interprétation des données n'étant possible qu'à la condition de disposer de grands échantillons infrarouges de galaxies, nous participons à un grand relevé photométrique en bande K avec WIRCam, en collaboration avec Caltech et l'UH. Le relevé porte sur plus de 70 heures d'intégration. TERAPIX a déjà produit des images et des catalogues portant sur les 30 premières heures. Ces données ont été utilisées conjointement avec des données photométriques visibles pour mesurer la masse stellaire des galaxies. Ilbert et al (2007, en préparation) a ainsi pu établir que la plupart des galaxies elliptiques étaient déjà en place à  $z \sim 1$ .

En parallèle, les catalogues visible-infrarouges produits par TERAPIX sont exploités pour sélectionner les échantillons spectroscopiques zCOSMOS "deep" et "bright" . Ce projet a obtenu 600 heures de temps VLT pour la couverture spectroscopique (Lilly et al 2007). Comme le montre la figure n, les premiers tests de masques construits pour la période P69 à l'ESO/Paranal ont démontré que les catalogues visibles CFHTLS combinés aux catalogues WIRCam constituent un ensemble de données fiables et efficaces pour identifier des galaxies à  $z > 1.5$ .

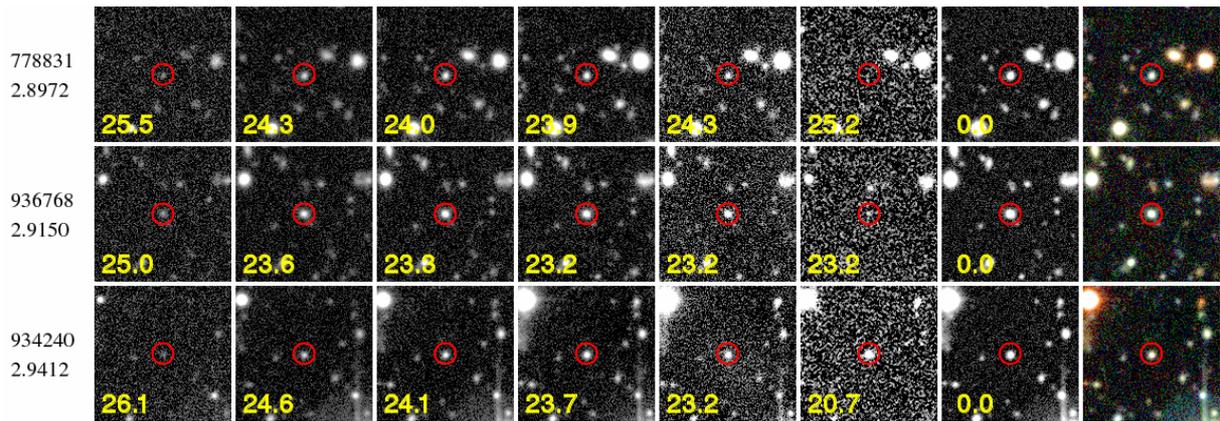


Figure 5: une sélection de galaxies de grand redshift confirmées par spectroscopie, extraites des catalogues TERAPIX CFHTLS + WIRCam et sélectionnées selon les critères de couleur visible+infrarouge proche. De gauche à droite : numéro d'identification et redshift spectroscopique, identifications sur des vignettes MEGACAM/WIRCam et magnitude,  $u$ ,  $g$ ,  $r$ ,  $i$ ,  $z$ ,  $K$ ,  $\chi^2$ , puis vignette couleur. Cet échantillon est le plus grand catalogue de galaxies de grand redshift à ce jour. Le catalogue « bright » est composé de 20000 galaxies pour lesquelles nous disposons d'un redshift spectroscopique, sélectionnées avec les images ACS et les données CFHT en bande  $i$  produites à TERAPIX.