

Une étude de l'Univers Local: Les grandes étapes d'un programme

Gilles Theureau

Astronome Adjoint à l'Observatoire de Paris
et au Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement à Orléans

Compte rendu de la conférence de l'assemblée générale du CLEA
en novembre 2002

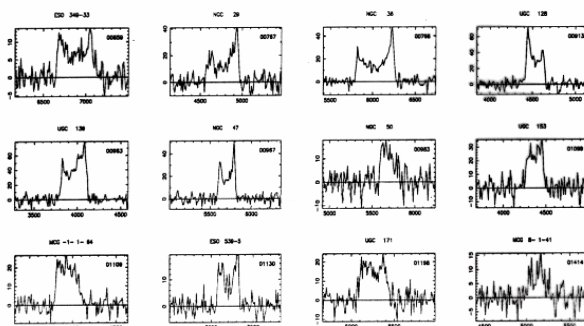
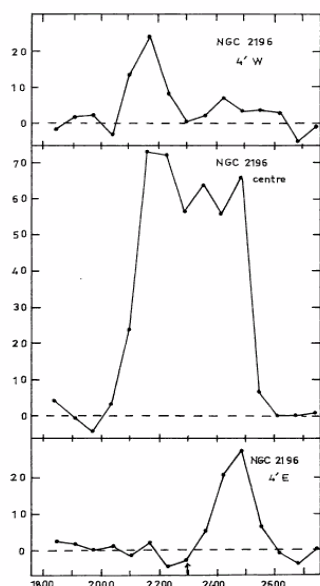
Trente années de recherche

La conduite d'un programme de recherche, a fortiori sur une longue période, voire d'une carrière, dépend autant, si ce n'est plus, d'événement fortuits, de rencontres inattendues, d'effets de mode ou de choix politiques que d'une réelle construction et projection a priori. C'est là toute l'ambiguïté du mot « programme » en recherche fondamentale, où l'on projette sur plusieurs années des séries d'actions dont on ne sait pas où chacune va nous mener, à la fois d'un point de vue scientifique, où l'on peut tomber dans une impasse ou être conduit dans une direction tout à fait inattendue, et d'un point de vue pratique ou infrastructurel, parce que la disponibilité d'un instrument peu manquer, qu'un satellite n'a pu être lancé, qu'un projet n'a finalement pas été financé, ou qu'une équipe s'est désagrégée... Souvent, on ne mesure réellement la cohérence ou l'incohérence du programme qu'a posteriori. C'est ce type de synthèse que j'essaierai de faire ici. On verra ainsi que les travaux de Lucienne, Lucette, puis de Georges (rencontré en 1979), peuvent aisément être regroupés sous l'intitulé : « étude cinématique de l'univers local »

Les observations radio

Le démarrage de ce programme correspond au début des années 70 avec l'avènement de la radioastronomie à antenne unique et l'exploitation du tout nouveau grand radiotélescope de Nançay. Lucienne et Lucette commencent à cette époque les premiers grands relevés extragalactiques à 21-cm en mesurant la raie d'émission de l'hydrogène neutre du milieu interstellaire dans les galaxies extérieures. La largeur de la raie dépend de la vitesse de rotation dans le disque ou de l'amplitude de la turbulence du gaz, son aire ou le flux HI correspond à la masse d'hydrogène qui a émis ce rayonnement, la position en longueur d'onde de la raie donne la vitesse globale de la galaxie

par rapport à l'observateur, projetée sur la ligne de visée. Elles étudient alors la distribution et la quantité de gaz dans les galaxies en fonction de leur morphologie (spiraux/elliptiques/irrégulières) ou de leur environnement (groupe, amas, isolées). Elles s'impliquent aussi dans la recherche de galaxies cachées derrière le plan de la Voie Lactée (le rayonnement radio, à la différence du rayonnement optique, n'est pas absorbé ni diffusé par le gaz ou les poussières du milieu interstellaire, et notre galaxie est donc « transparente » aux ondes radio), ce qui permet réellement une reconstitution des grandes structures sur l'ensemble du ciel.



Les mesures 21-cm au radiotélescope de Nançay

à gauche, l'émission 21-cm dans trois zones d'une galaxie spirale

ci-dessus, un extrait du catalogue KLUN contenant plus de 4000 profils 21-cm de galaxies

Enfin, elles découvrent une relation entre la largeur de la raie 21-cm et la taille des galaxies, une loi empirique pouvant servir d'indicateur de distance. Cette relation deviendra en 1977 la relation de Tully-Fisher, du nom des deux astronomes anglais qui l'ont formalisée comme une relation linéaire entre le logarithme de la vitesse de rotation maximale dans le disque d'une galaxie spirale, mesurée à partir de la largeur de la raie 21-cm, et sa magnitude absolue, mesurée en optique. Cette relation est aujourd'hui un des indicateurs de distance les plus utilisés (voir plus haut, section « Les observations »).

La collecte de données radio à Nançay (en particulier le programme « KLUN », pour kinematics of the local universe) continue encore aujourd'hui après la dernière rénovation du grand radiotélescope (projet FORT), où près de la moitié du temps de télescope lui est consacrée. Plus de 4000 spectres HI de galaxies y ont été mesurés en 30 ans par cette seule équipe. La compilation de toutes les données mondiales (extraites de 611 publications !) a produit par ailleurs un catalogue 21-cm de 16600 galaxies (Paturel & co 2003, voir plus loin à propos des bases de données).

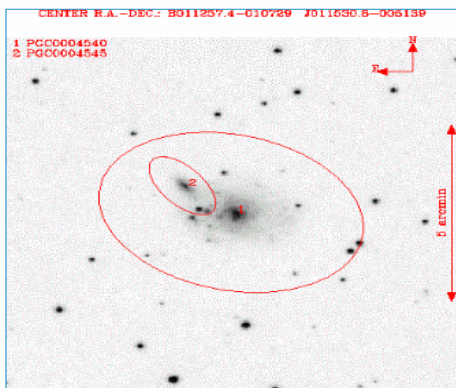
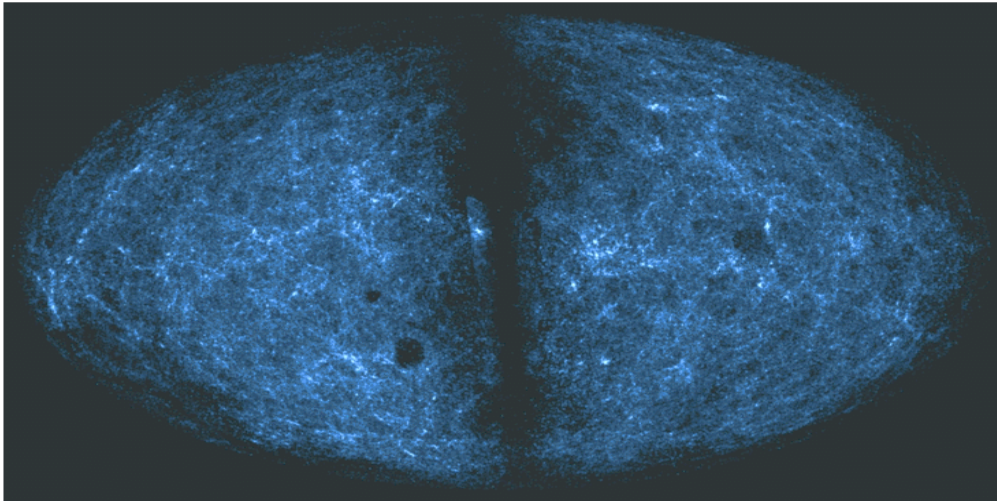
L'estimation des distances

Ces travaux sur la raie 21-cm de l'hydrogène et la rencontre avec le grand astronome franco-américain Gérard de Vaucouleurs ont été à l'origine d'une série d'études des indicateurs de distances extragalactiques et de la mesure de la constante de Hubble : en premier lieu bien sûr l'étude de la fameuse relation de Tully-Fisher, avec la publication d'une première grande

compilation de 1207 galaxies en 1982, mais aussi l'utilisation de la Classe de Luminosité, de la relation Diamètre-Luminosité et du principe des galaxies sosies. Pour ces recherches, est apparue la nécessité de rassembler de grands catalogues homogènes contenant les caractéristiques globales des galaxies en termes de taille apparente, de magnitude, de type morphologique, de redshift ou toute autre mesure permettant une estimation de la distance. De Vaucouleurs était familier de ces grandes compilations et des techniques d'homogénéisation, mais c'est la construction de la base de données LEDA par Georges en 1983 avec l'essor de l'informatique, qui a donné à ces catalogues leur dimension moderne. Le "Third Reference Catalogue" (RC3) de Vaucouleurs, que l'on trouve dans toutes les bonnes bibliothèques d'observatoire, sera lui-même créé à partir de cette base.

La base de données LEDA

Le catalogue LEDA compte aujourd'hui 2,7 millions de galaxies avec pour chacune jusqu'à 70 paramètres astrophysiques disponibles et un mode d'interrogation « scientifique » à partir d'une sélection sur les valeurs de ces paramètres. Il contient la plupart des données publiées à ce jour sur les galaxies de l'univers local et donne accès à des cartes et des images sur l'ensemble du ciel. Les corrections d'extinction interstellaire et d'opacité interne des galaxies y sont intégrées de manière homogène. En effet, ces corrections dépendent fortement de l'inclinaison et de la morphologie de chaque galaxie, en particulier du contenu en gaz et en poussière.



La base de données LEDA:

2,7 millions de galaxies

70 paramètres par galaxie

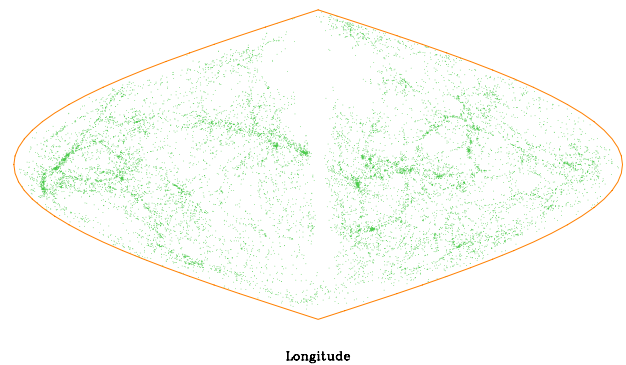
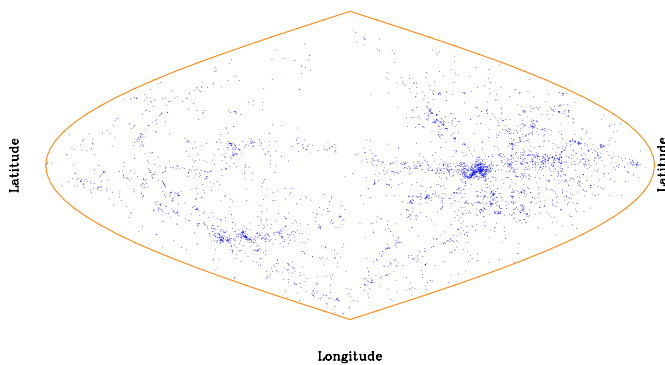
un index général: le N° pgc

des cartes et des images

Encadré : Les projections de Flamsteed

distances < 100 Mal

100 Mal < distances < 300 Mal



Les projections sont utilisées pour représenter toute la surface d'une sphère sur un plan. On les utilise par exemple en cartographie pour représenter tous les continents sur une même figure plane. Une utilisation courante en astronomie est celle qui donne une cartographie du ciel. Il existe plusieurs types de projections. Les plus utilisées sont celles qui conservent les aires. Le nombre d'objets par unité de surface sera donc conservé, et les structures seront identiques à celles du ciel réel.

Nous donnons les équations de la projection de "Flamsteed".

Soient (X,Y) les coordonnées sur la feuille de papier et (L,B) la longitude et la latitude des objets sur la sphère céleste. Notons que L et B sont prises dans un système de coordonnées quelconque : équatoriales, galactiques, super-galactiques...

L varie de 0 à 360° et B de -90° à +90°. La transformation est la suivante : $X=(L-L_0)\cos B$ et $Y=B$, où L_0 est une constante qui fixe la position de l'origine des longitudes sur le graphique.

Nous présentons deux projections de Flamsteed donnant la distribution des galaxies proches (distances inférieures à 100 millions d'années-lumière) et plus lointaines (entre 100 et 300 millions d'années-lumière). Dans la première figure (en bleu) on voit une structure horizontale découverte par G. de Vaucouleurs dans les années 1950 : le Super Amas Local, centré sur l'amas de galaxies Virgo. Sur la figure de droite (en vert) une autre structure apparaît sous la forme d'un arc gigantesque reliant plusieurs Superamas de galaxies.

La projection générale montrant toutes les galaxies de LEDA est une projection de Hammer.

GP

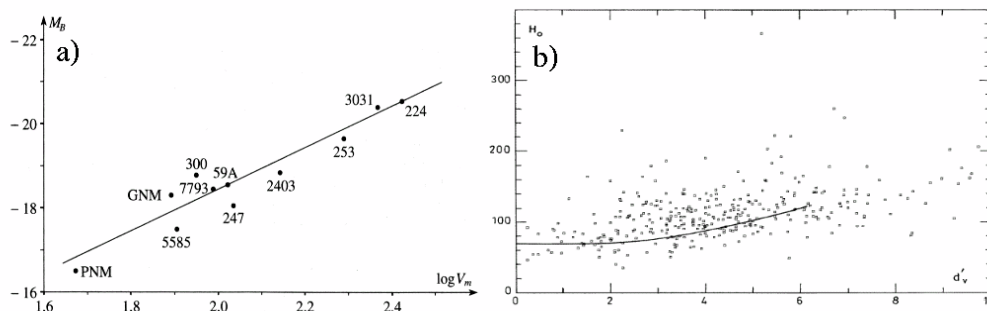
Ce lourd travail de compilation et de regroupement des données a entraîné une réflexion à la fois sur les corrections à apporter aux observations collectées et sur la statistique des galaxies de l'univers local.

Le biais de Malmquist et la constante de Hubble H_0

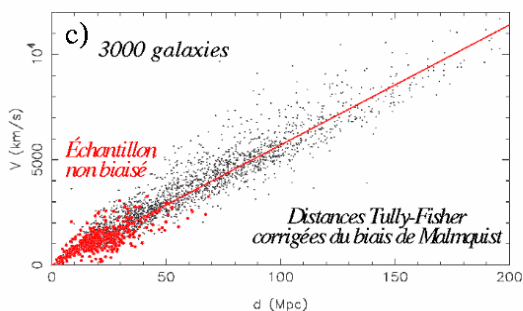
La rencontre au début des années 80 avec Pekka Teerikorpi, astronome finlandais de l'Observatoire de Turku, marquera un réel tournant et sera le début d'une longue collaboration et d'une grande amitié. Pekka alerte l'équipe de l'influence des effets de sélection d'un échantillon sur la mesure de la constante de Hubble par la relation de Tully-Fisher : cet effet statistique, plus connu chez les astronomes stellaires sous le nom de biais de Malmquist, du nom de son découvreur en 1920, conduit à une sous-estimation des distances et à une surévaluation de la constante de Hubble. Leur première grande publication commune en 1986 montrera que si l'on prend correctement en compte l'effet du biais, on trouve des valeurs de H_0 entre 56 et 72 km/s/Mpc et non proche de 100 km/s/Mpc comme le soutenait De Vaucouleurs dans le long débat qui l'opposait depuis une quinzaine d'années à un autre

grand astronome, l'américain Alan Sandage. Rejoignant Sandage, cette nouvelle valeur de H_0 donne en particulier un âge de l'Univers plus grand et compatible avec l'âge des plus vieilles étoiles de la Voie Lactée.

Les études et observations qui suivirent ont mené en 1997 à une valeur finale de la constante de Hubble de 55 ± 5 km/s/Mpc, grâce à un catalogue dix fois plus important, à une analyse statistique plus robuste, et aux données complémentaires apportées par le Hubble Space Telescope et le satellite européen Hipparcos (distances de 40 galaxies proches par la méthode des étoiles céphéides, calibration géométrique de l'échelle des distances extragalactiques grâce à de nouvelles mesures de parallaxes). Parmi cette série de travaux, étalée sur plus de dix ans, on trouve en particulier une étude approfondie du champ des vitesses des galaxies au voisinage et au sein de l'amas de la Vierge, connu comme le centre de notre propre superamas et étant une importante source de perturbation pour la mesure de H_0 . Cela aboutira en outre à une mesure de notre propre chute en direction de l'amas, évaluée à environ 200 km/s.



L'estimation de la constante de Hubble



- a) La relation Tully-Fisher à partir de 11 galaxies de distances connues
- b) L'effet du biais de Malmquist sur la valeur de la constante de Hubble
- c) Diagramme vitesse-distance et matérialisation de la loi de Hubble

Les développements récents

A partir de ce moment, considérant comme réglée la question du biais de Malmquist et de la constante de Hubble, le groupe se tourne vers divers aspects en amont et en aval de cette question: en amont, on trouvera la calibration primaire de l'échelle des

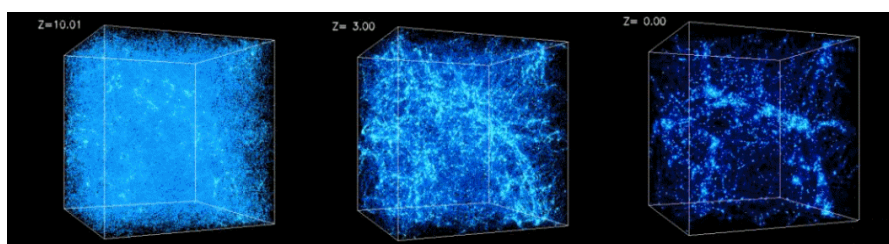
distances, permettant à la fois des mesures absolues de distances, reliées aux parallaxes, et la réduction de l'incertitude résiduelle sur la constante de Hubble, on trouvera aussi la construction de nouveaux catalogues photométriques à partir des grands relevés photographiques et CCD, le problème de l'homogénéité des mesures de magnitude et la question de la classification morphologique des galaxies à partir des

images digitalisées ; en aval il y aura l'étude des grandes structures de l'Univers Local, de la distribution de la matière noire et du champ des vitesses, à partir de distances corrigées du biais de Malmquist. La recherche d'une calibration absolue de l'échelle des distances en comparant directement les céphéides galactiques aux céphéides extragalactiques mesurées par le Télescope Spatial Hubble a permis de mieux comprendre la relation période-luminosité-couleur des céphéides et ses liens avec la métallicité et la morphologie des galaxies, de relier enfin l'échelle des distances extragalactiques à des « vraies » distances géométriques et d'évaluer précisément l'incertitude sur la mesure de la constante de Hubble.

L'exploitation automatique des grands relevés tels que les plaques digitalisées du Mont Palomar (DSS-MIGAL) et le sondage CCD en proche infrarouge DENIS a permis d'extraire et d'intégrer dans LEDA des catalogues de plusieurs centaines de milliers à quelques millions de galaxies de notre univers proche, pour lesquels on a pu mesurer de manière homogène les

coordonnées, magnitudes, diamètres, inclinaisons et angles de position. Nous avons pu ainsi disposer d'un catalogue de référence et d'un index général de galaxies suffisamment profond et complet pour pouvoir y rapporter la plupart des mesures publiées dans la littérature, notamment les autres grands sondages tels que 2-MASS ou le SLOAN. La disponibilité des pixels des images elles-mêmes permet d'autre part des études de type morphologique, soit au sens classique (à l'oeil: développement des bras spiraux, bulbe, disque, ellipticité...), soit physique (ajustement de modèles de galaxies et profils de brillance), soit mathématique (degré de symétrie, décomposition de l'image sur une base orthogonale à n dimensions ...). Ces travaux sont en cours et sont l'occasion d'un atelier de prospective mené par Georges au sein du PNG (Programme National Galaxies du CNRS).

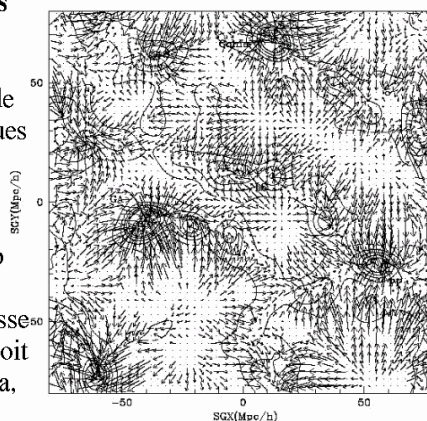
Enfin, le dernier chapitre encore ouvert sur la problématique de l'Univers Local concerne l'étude du champ des vitesses particulières des galaxies et de la distribution de densité de la masse totale.



La formation des grandes structures de l'univers.

Ci-dessus une simulation numérique de la distribution de matière à trois époques de l'univers primordial jusqu'à aujourd'hui

Ci-contre, une vue en coupe du champ des vitesses particulières des galaxies (flèches) et de la distribution de la masse dans l'univers local (contours). On y voit les principales structures: Virgo, Coma, la zone de Persée-Poissons (P-P) ...



Il s'agit là d'évaluer le contenu en masse noire de l'univers aux différentes échelles, des galaxies jusqu'aux plus grandes structures connues que sont les superamas, filaments et bulles qui s'étendent sur plusieurs dizaines de mégaparsecs, et de mesurer le paramètre de densité de matière de l'univers, Ω_m , qui entre au même titre que H_0 dans la définition des modèles cosmologiques. Après plusieurs études

« locales » du champ des vitesses au voisinage du Groupe Local (2002), du superamas Virgo (1992, 1999, 2000), du superamas de Persée-Poissons (1998, 2001) ou dans la zone du supposé Grand Attracteur (1994, 1998), qui ont permis notamment d'évaluer le rapport masse-lumineuse/masse-noire à l'échelle de ces structures, nous avons travaillé au cours de l'année 2003 sur la reconstruction globale du champ des vitesses des galaxies et sa cartographie en trois

dimensions. Ce travail a été possible en intégrant dans une même étude l'ensemble des données disponibles à ce jour : des mesures de magnitudes dans cinq bandes photométriques B, I, J, H et K et des mesures cinématiques de vitesses de rotation et de dispersion centrale de vitesses pour près de 20 000 galaxies, permettant une représentation détaillée jusqu'à une résolution d'un Mpc.

Ces données sont uniques et l'exploitation complète des cartes reste encore à faire.

Plusieurs thèses de doctorat ont accompagné cette longue période, portant sur les mesures radio elles-mêmes (P.Fouqué, 1982, J.-M.Martin, 1989), sur les grandes structures de l'univers local (H. Di Nella, 1995), sur la relation Tully-Fisher et la mesure de H_0 (G. Theureau, 1997), sur le critère de distance des céphéides (P. Lanoix, 1999, I. Musella, 2000), et sur la cinématique de Virgo et du Groupe local (J.N. Terry, 2002). Cinq de ces ex-étudiants ont aujourd'hui un poste de chercheur dans un observatoire, à Paris, Lyon, Santiago (ESO, Chili) ou Naples (Italie)... Plus d'une centaine de publications dans des revues scientifiques et des comptes rendus de colloques s'y réfèrent.

Le futur

Que reste-t-il à faire aujourd'hui dans ce domaine et quels sont les nouveaux développements à apporter ? On a vu que l'étude du champ de vitesses particulières des galaxies et de la distribution de la masse noire est encore un chantier ouvert, de même que la question de la morphologie des galaxies. Nous bénéficions en particulier de nouveaux flots de données dans l'Univers Local avec les images de DENIS et 2MASS et les redshifts du SDSS, 2dF ou 6dF...

Ces deux aspects sont reliés à deux fortes thématiques actuelles qui sont celle de la formation des grandes structures à partir des fluctuations de densité dans l'univers primordial et celle de la formation et de l'évolution des galaxies. Ces thématiques émergent grâce aux nouveaux moyens de calculs offerts par les superordinateurs et autres calculateurs parallèles et grâce aux grands télescopes optiques de la génération du VLT (Very Large Telescope : 4 télescopes de 8 m de diamètre, installés sur un site de l'observatoire européen austral, l'ESO) qui ont permis de sonder

l'univers lointain, d'y obtenir le même type de mesures que dans l'univers proche, et d'étudier les populations stellaires et leur histoire jusqu'à $z \approx 1$, quand l'univers n'avait qu'un tiers de son âge. Grâce aux progrès de l'informatique, nous avons aujourd'hui les moyens de construire des simulations lourdes à partir de modèles cosmologiques et d'une distribution des fluctuations de densité de l'univers primordial, et de comparer les résultats aux observations de $z \approx 1$ jusqu'à $z \approx 0$, c'est à dire notre univers contemporain. Il est ainsi devenu nécessaire de rassembler les observations à différents z et différents âges au sein d'un même système de base de données pour pouvoir les comparer et les manipuler avec les mêmes outils. C'est ainsi que la base de données LEDA évolue vers un concept d'observatoire virtuel, permettant non seulement de manipuler des catalogues de manière homogène et d'extraire des échantillons de galaxies suivant des critères physiques, mais aussi d'accéder aux observations elles-mêmes directement sous forme de spectres et d'images. Ce nouveau concept s'appuie sur le réseau Internet qui permet la gestion à distance des flots de données et l'accès à des archives sur différents sites de manière simultanée. Ainsi l'attention pourrait plutôt se reporter sur la nature physique et l'évolution des relations d'échelle dans les galaxies, comme les relations de Tully-Fisher (spirales) et du Plan Fondamental (elliptiques), ou sur les échanges entre les galaxies et leur environnement au cours de leur évolution.

Pour un nouveau bond en avant, il faudra ensuite sans doute attendre la nouvelle génération d'instruments au delà de 2010 avec les projets GAIA, ALMA, SKA et OWL. GAIA apportera une connaissance globale de notre Galaxie et de sa dynamique, ALMA nous permettra entre autres de sonder les zones de formation stellaire au plus profond des galaxies, SKA nous permettra d'accéder à la distribution de l'hydrogène neutre, principal constituant baryonique de notre univers jusqu'à $z \approx 1$, et OWL, avec son miroir de 100 mètres de diamètre, nous donnera des images des objets les plus lointains et les moins lumineux de notre univers.

■