

## **LANIAKEA : Un nouveau continent défini par les courants cosmologiques**

### **Une nouvelle façon de cartographier l'univers**

Georges Paturel et Hélène Courtois  
(Université de Lyon Claude Bernard)

Après l'annonce de la première définition objective du grand continent Laniakea découvert par une équipe internationale regroupée autour de Brent Tully et dont Hélène Courtois était la responsable française, *Astronomie* a tenu à dresser un panorama de ce sujet concernant les grandes structures de l'Univers. Débordée par les sollicitations de la presse, de la radio et de la télévision, Hélène m'a demandé de rédiger la présentation générale et de présenter Laniakea à partir d'un texte qu'elle avait préparé. Nous avons travaillé ensemble sur ce sujet dans les années 1991-1995 en utilisant notre base de données LEDA, dont Hélène est un peu la fille (comme dans l'Iliade). On s'apercevra qu'une découverte est presque toujours le fruit d'un long cheminement. C'est ce cheminement que nous allons suivre.

### **Un univers de galaxies : bref historique de la découverte de notre Univers**

A l'époque de Ptolémée notre univers était vu comme étant constitué de notre Terre, entourée d'astres fixes (les étoiles) et quelques rares astres mobiles autour de notre Terre (les planètes). Cette vision a perduré après la découverte de Copernic mais avec une différence fondamentale. En effet, en reprenant un modèle des penseurs grecs (-200 ans), il comprit que le centre de cet Univers était le Soleil. L'homme perdait le privilège d'être le centre du monde. Galilée fit un premier pas en découvrant que la Voie Lactée était composée d'une multitude de "soleils". Les premières cartographies de la Voie Lactée entreprises par W. Herschel semblaient montrer cependant que notre Soleil occupait une position centrale. Cette erreur est très caractéristique. Elle vient de ce que l'observateur terrestre est au centre de sa sphère observable. Il ne voit pas directement la réalité mais *sa* réalité. Cette erreur anthropocentrique se retrouve tout au long de l'exploration de la découverte de l'Univers moderne.

Il a fallu attendre le vingtième siècle pour que cette erreur soit corrigée. C'est Harlow Shapley qui, analysant la distribution des amas globulaires, découvrit que notre Soleil n'était pas au centre de la Voie Lactée mais plutôt sur un bord. Définitivement, l'homme devait admettre qu'il n'occupait qu'une place tout à fait anodine dans l'Univers (ce qui ne l'empêche pas de se croire encore le summum de l'évolution et de l'intelligence ; C'est une autre forme de l'anthropocentrisme!). Mais la plus grande révolution était à venir. C'est Edwin Hubble qui la provoqua.

Herschel avait découvert dans le ciel une multitude de petits astres flous, des nébuleuses. Certains esprits éclairés avaient imaginé qu'il s'agissait d'autres "voies lactées" très lointaines. Edwin Hubble le confirma magistralement en 1925. Les voies lactées sont appelées les galaxies (mot à la même étymologie). Notre Voie Lactée est appelée la Galaxie, avec un grand G.

Cette révolution est fantastique. Notre système solaire n'est rien dans cet Univers peuplé, on le pense aujourd'hui, de centaines de milliards de galaxies observables, elles-mêmes peuplées de centaines de milliards d'étoiles (imaginez alors le nombre de planètes !). Tout *honnête homme* devrait savoir de quoi est fait notre Univers. Pour les philosophes cette connaissance est indispensable pour donner à l'homme sa véritable place. Quant à nous, elle est une bonne façon de relativiser nos petits soucis quotidiens.

### **Les mouvements des galaxies : L'expansion et l'agitation des galaxies**

Les galaxies ont d'abord été imaginées statiques. Mais cela n'a pas duré très longtemps. En effet Vesto Slipher a rapidement entrepris de mesurer le décalage spectral des nébuleuses. En interprétant ce décalage comme une vitesse, on trouvait que certaines galaxies avaient de très grandes vitesses, plusieurs centaines de kilomètres par seconde. Quand on a découvert que les nébuleuses étaient des

galaxies, on a compris que, sous leur apparente immobilité (on ne peut pas encore mesurer directement leur mouvement propre), se cache un monde agité. Très vite, plusieurs astronomes notèrent que les vitesses augmentaient avec la distance. Mais les distances étaient encore très mal connues. Hubble, qui avait de l'expérience dans ces mesures, traça la relation entre vitesse et distance, comme le prédisaient les théoriciens relativistes. Il découvrit ainsi ce qu'on appelle l'expansion de l'Univers. Les vitesses sont proportionnelles à la distance ; c'est la célèbre loi de Hubble :  $V=H.D$ . Toutes les galaxies semblent animées d'un mouvement de fuite.

Mais, sur ce mouvement radial de fuite, se superpose le mouvement propre des galaxies, mouvement dû à l'attraction gravitationnelle des autres galaxies du voisinage. La difficulté majeure vient de ce que la mesure ne peut donner, une fois retranchée la vitesse générale de fuite, que la composante radiale de cette vitesse propre (c'est-à-dire, la composante le long de la ligne de visée), alors que l'attraction gravitationnelle locale, elle, n'a pas de raison d'être radiale. Pour savoir quelle est la direction réelle de ce mouvement propre, il nous manque la composante tangentielle (c'est-à-dire, la composante perpendiculaire à la ligne de visée). A première vue, il semble ne pas y avoir de solution. Il semble qu'il faille se résigner à ne pas connaître la direction du mouvement réel des galaxies, hors du mouvement de fuite décrit par la loi de Hubble. En réalité, il y a une solution. C'est ce que nous allons expliquer.

Considérons une galaxie particulière (figure 1). L'observation donne sa vitesse de fuite augmentée de la composante radiale de son mouvement propre. Si on connaît la distance de la galaxie, on pourra retrancher sa vitesse de fuite déduite de la loi de Hubble. On aura ainsi la composante radiale de son mouvement propre  $V_R(m.p.)$ . Par ailleurs, on sait que la force provoquant le mouvement propre est dirigée vers le centre de masse du voisinage de cette galaxie. Si on arrive à reconstituer la distribution des masses en chaque point, il sera possible de calculer dans quelle direction se fait le mouvement propre. Avec la direction de la vitesse et sa composante radiale on reconstitue la composante tangentielle du mouvement propre  $V_T(m.p.)$ . On peut savoir ainsi vers où et à quelle vitesse se déplace la galaxie. En faisant cela pour toutes les galaxies, on reconstruira le champ des vitesses. Ce champ à son tour nous précisera la structuration de l'Univers et son évolution.

En conclusion, pour aboutir à ce résultat il faut connaître les distances et les vitesses de chaque galaxie et avoir une première idée de la distribution des galaxies dans l'Univers. Les distances sont très difficiles à calculer. En revanche les vitesses, elles, sont assez faciles à mesurer. Peut-on les utiliser pour estimer les distances à partir de la loi de Hubble moyenne ? Quant à la distribution des galaxies dans l'Univers, ne suffit-il pas de les localiser par leurs coordonnées et leurs distances tirées de la loi de Hubble ? Nous allons voir que ce n'est pas aussi simple.

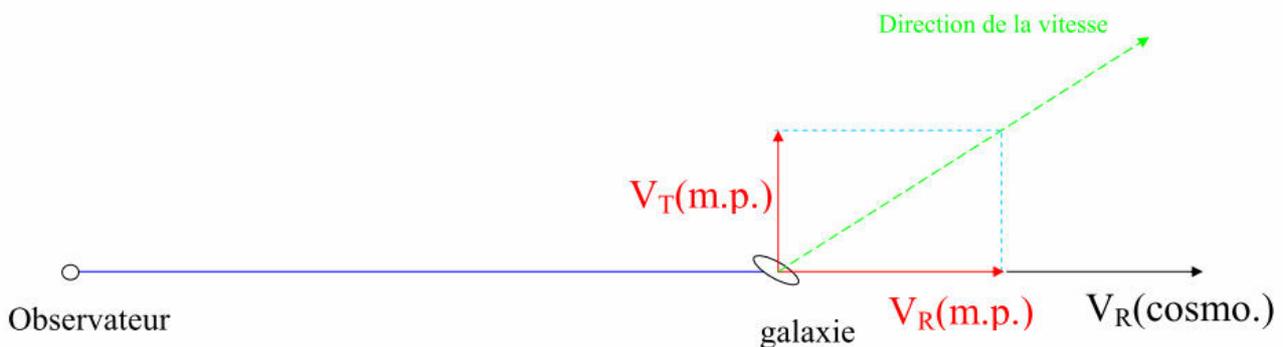
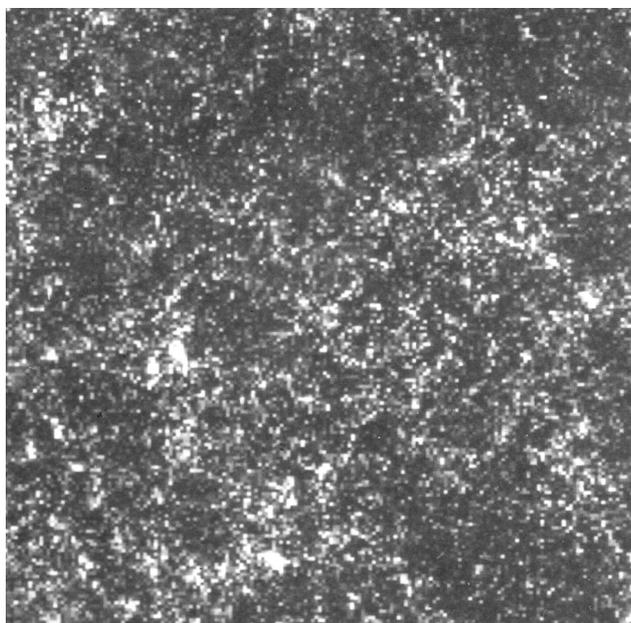


Figure 1: Quand on a retranche la composante radiale cosmologique, on obtient la composante radiale  $V_R$  du mouvement propre (m.p.). Si on connaît la direction du centre de masse qui provoque ce mouvement propre, on peut retrouver sa composante tangentielle  $V_T$ . Le mouvement propre est ainsi complètement défini.

### **La structuration de notre Univers : les premières grandes structures observées**

Après la découverte des premières galaxies, les astronomes ont cartographié les galaxies les plus proches. C'est ainsi que dans le voisinage de notre Galaxie, autour de l'amas Virgo, une grande structure plane a été découverte en 1953 par Gérard de Vaucouleurs. Le titre de la publication dans *l'Astronomical Journal* était : "Evidence for a Local Supergalaxy". Cette structure a été rebaptisée en 1958 sous le nom actuel : Le Super Amas Local (*Local Super Cluster*, en anglais). L'acceptation de cette découverte n'a pas été immédiate, mais finalement elle s'est imposée. Dans les études sur la distribution des galaxies on utilise très souvent les coordonnées super-galactiques définies par le plan du Super Amas Local et une direction origine arbitraire dans ce plan.

Certains astronomes ont poussé la recherche à la limite de l'observation. Ces premiers grands relevés (*survey* en anglais) ont été faits par C.D. Shane et C.A. Wirtanen, en 1967. Les galaxies n'étaient pas identifiées individuellement, mais simplement comptées dans des petits carrés de 10'×10' sur le ciel. Le tracé de la répartition des galaxies a révélé une structure inattendue : une mousse de bulles vides bordées de galaxies (Figure 2). L'astrophysicien Yu.B. Zeldovitch a compris en 1970 comment ces structures se formaient à partir d'une perturbation initiale. Si nous décrivons par une matrice la variation de densité de matière, il existe un système de coordonnées particulier où l'on peut trouver les trois directions principales de compression (vecteurs propres). Alors, selon les valeurs propres correspondant à chaque vecteur, la variation de densité peut se faire selon trois modes : 1) si une des valeurs propres est bien supérieure aux autres, alors la compression se fera principalement dans la direction du vecteur propre correspondant et il se formera une structure plane, 2) de même, si deux valeurs propres dominent il se formera une structure en filament, 3) si les trois valeurs propres sont quasiment identiques, il se formera une structure plus ou moins sphérique (un amas). Cette description s'accommode d'une évolution non-linéaire, seule capable d'expliquer les très fortes concentrations de galaxies observées en certaines régions de l'Univers.



*Figure 2 : La distribution des galaxies d'après les premiers comptages profonds de C.D. Shane et C.A. Wirtanen, en 1967. (1967 Publication of Lick Observatory, vol.22, Part. 1)*

Quand nous avons commencé à nous intéresser à la loi de Hubble, Brent Tully et son collègue Richard Fisher venaient de découvrir la relation qui porte leur nom (relation TF en abrégé – Voir l'encadré A). Cette découverte a révolutionné la détermination des distances extragalactiques. Nous avons collecté les mesures pour déterminer les distances et les vitesses. Notre but était de

déterminer la constante de Hubble. Toutes les données utiles ont été rassemblées dans une base de données nommée LEDA (maintenant HYPERLEDA).

Une des premières utilisations a été de tracer la distribution des galaxies de LEDA. La projection de Flamsteed que nous avons utilisée a la propriété de conserver les aires, donc les densités sur le ciel (voir l'encadré B). Les structures doivent donc apparaître comme dans le ciel réel. La figure 2 montre cette projection faite en 1983 environ. Il s'agit d'une photo de l'écran d'ordinateur, tirée par le photographe de l'Observatoire de Lyon. La qualité n'est pas excellente, mais elle a permis de reconnaître les principales structures.

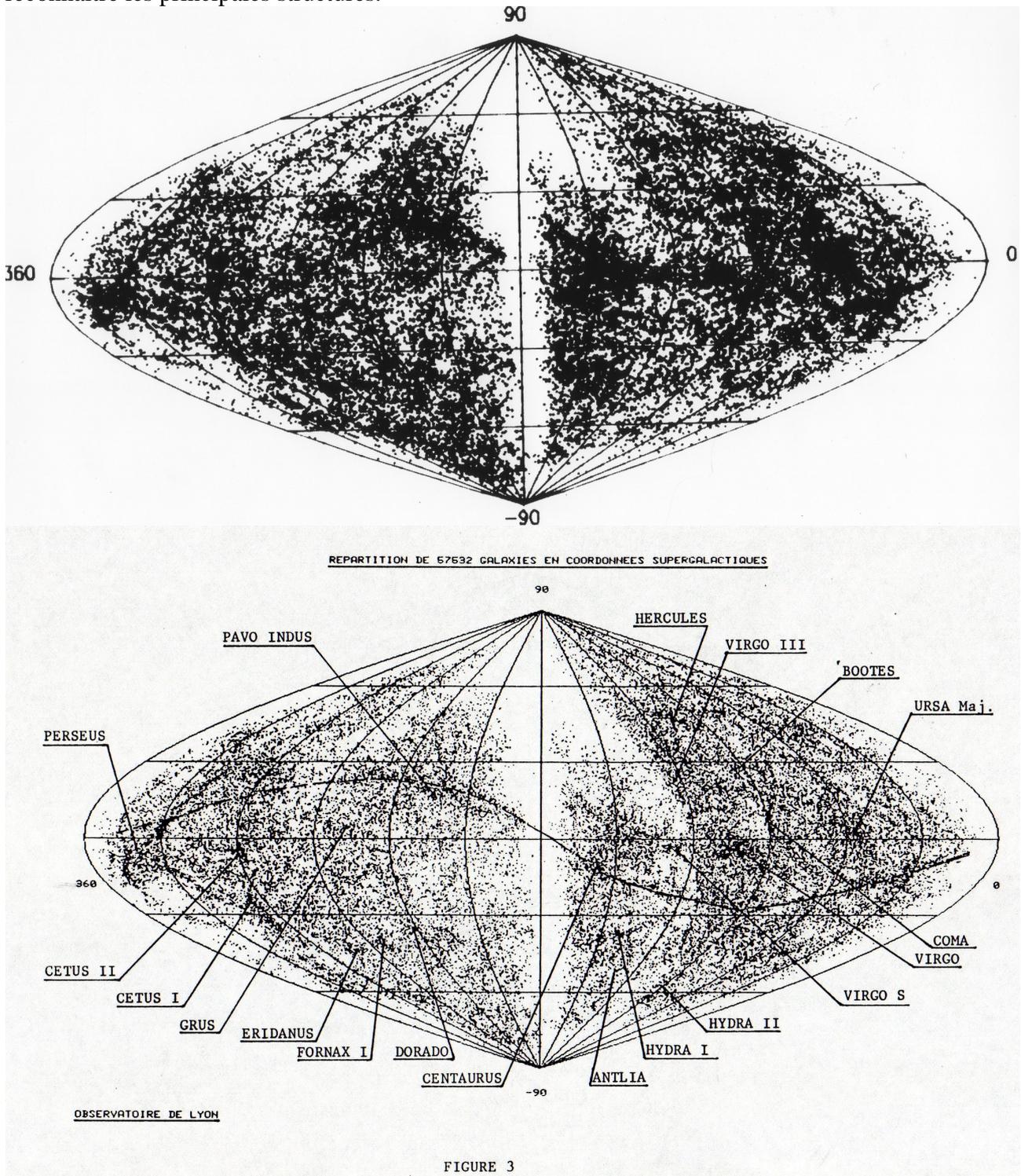
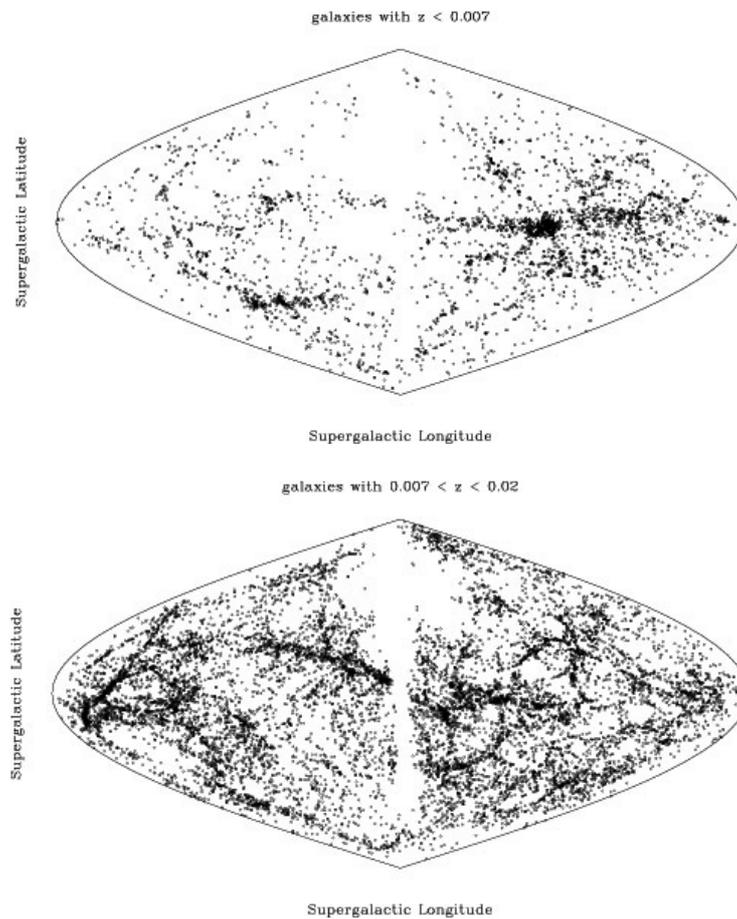


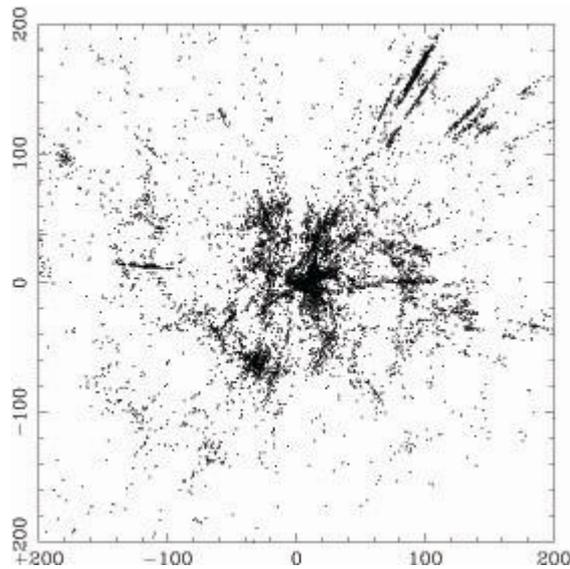
FIGURE 3  
Figure 3: Notre première cartographie de l'univers proche faite avec la base de donnée LEDA en 1983 (en haut) et publiée en 1986 (en bas) avec l'identification des principales structures.

Une bande sombre apparaît, presque parallèle au plan super-galactique horizontal. Elle décrit une sorte de plan. Naturellement, ce plan n'est pas très contrasté car toutes les galaxies à différentes distances se superposent. Si nous séparons l'échantillon en différentes tranches de vitesse, on voit apparaître, d'abord le Super Amas Local et un peu plus loin une sorte de structure formée de différents Super Amas.



*Figure 4 : La figure du haut montre les galaxies ayant une vitesse inférieure à 2000 km/s. On reconnaît horizontalement le plan du Super Amas Local. La figure du bas montre les galaxies dont les vitesses sont comprises entre 2000 et 6000 km/s. On voit plus nettement les structures. Un pont existe-t-il entre ces filaments ?*

L'étape suivante était de décrire ces structures en 3 dimensions. La première visualisation (figure 5) a été montrée à Gérard de Vaucouleurs. Il nous a encouragés en déclarant : "vous avez trouvé quelque chose d'intéressant !". Nous avons l'impression que la structure formait une sorte de cocon autour de l'amas Virgo (amas de la Vierge), l'amas formant le noyau du Super Amas Local.



*Figure 5 : La distribution dans le plan local le plus peuplé en galaxies montre une structure dont le centre est occupé par différentes sous-structures, dont celle de l'Amas Virgo, qui paraît la plus importante. Nous sommes au centre (position 0,0). La région visualisée a un rayon de l'ordre de 200 Mpc (c'est-à-dire 650 millions d'années de lumière).*

### **L'analyse des structures : les artefacts**

Une grande structure plane (le Grand Mur) avait été découverte en 1986 par Valérie de Lapparent et deux collègues américains. Par ailleurs, en 1987, David Burstein et six de ses collègues (les sept samourais) avaient aussi suspecté l'existence d'un grand attracteur partiellement caché par notre Galaxie.

Pour mieux reconnaître les structures, Hélène a réalisé une animation qui montrait l'Univers local sous différents angles. Elle a même réalisé des mesures en Australie pour rechercher les chaînons manquants qui feraient de ce cocon une structure plus lisse, en particulier entre les régions de Perseus-Pisces et de Pavo-Indus (voir la figure 7). Il s'est avéré que le cocon n'était pas une structure continue autour de Virgo. Aucune surdensité de galaxies entre ces deux régions. Les limites étaient mal définies. L'aspect quasi annulaire était renforcé par l'incomplétude de nos échantillons. En effet, au-delà d'une certaine distance le nombre de galaxies peut décroître, non parce qu'il y a le bord d'une structure, mais simplement parce que nos observations sont incomplètes, seuls sont vus les plus brillants objets.

Etions nous prêts à tomber dans le piège de ce que nous pourrions appeler le galacto-centrisme ? Une chose aurait pu nous y pousser. En effet, regardez sur la figure 5, les structures allongées qui pointent vers notre position (au centre 0,0). Ce sont les "doigts de Dieu", un effet qui apparaît quand on estime les distances avec la loi de Hubble, à partir des mesures de vitesses. Les vitesses mesurées dans la direction du centre d'un amas sont très dispersées à cause des mouvements propres des galaxies : certaines galaxies ont une vitesse observée trop grande, d'autres une vitesse observée trop petite (voir la figure 6). L'erreur en distance le long de la ligne de visée est grande, alors que l'erreur angulaire, perpendiculairement à la ligne de visée est faible (on ne fait pas d'erreur importante sur les coordonnées des galaxies). Il s'ensuit que les amas de galaxies apparaissent comme des filaments allongés le long de la ligne de visée. C'est un artefact dû à l'estimation des distances à partir de la vitesse cosmologique.

Un effet similaire dû au mouvement propre des galaxies a été décrit par Stéphane Rauzy et Marc Lachièze-Rey. Les seules galaxies qui n'ont pas de perturbation sont celles dont le mouvement propre est perpendiculaire à la ligne de visée. Ces galaxies se trouvent sur une sphère (désigné par sphère de Rauzy dans la figure 6). La distance des galaxies proches du cercle est bien estimée par la vitesse radiale pour peu qu'on connaisse la constante de Hubble. Les structures tangentielles sont donc à une distance correcte et sont sans doute bien réelles.

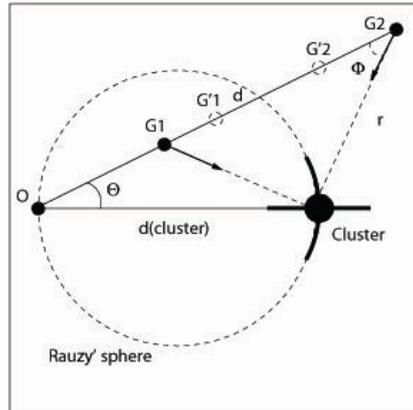


Figure 6 : Une cartographie utilisant les vitesses pour estimer les distances, fait apparaître des artefacts : Les "doigts de Dieu" (allongement des amas dans notre direction) et la sphère de Rauzy (aspect incurvé dans notre direction des bords des amas). L'observateur se trouve au point O. Le mouvement propre dû à l'attraction par un amas (Cluster) modifie la vitesse cosmologique radiale en la rendant soit trop grande (cas de la galaxie  $G_1$ ), soit trop petite (cas  $G_2$ ). L'effet est maximal quand la ligne de visée est en direction du centre de l'amas. L'effet est nul quand l'objet observé est sur la sphère de Rauzy.

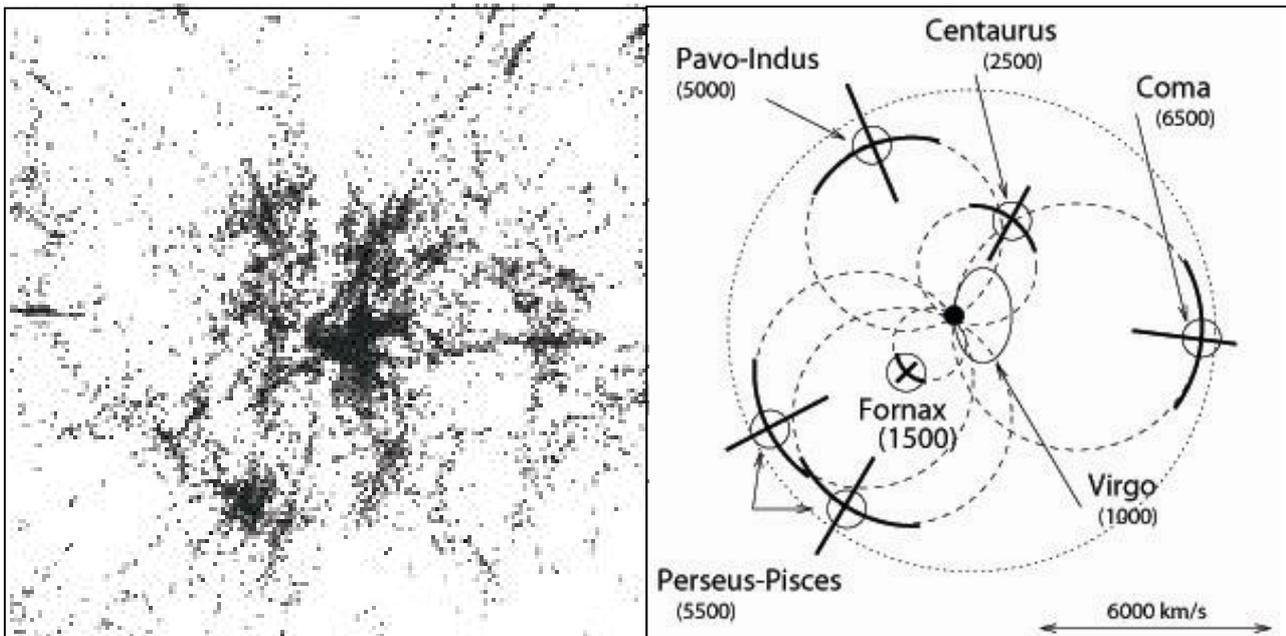


Figure 7 : Les artefacts de la figure 5 et l'identification de quelques régions importantes dans un plan proche du plan supergalactique. On voit que Virgo, Centaurus et Fornax forment la partie centrale, mais les contours sont mal définis.

### Les premiers succès des méthodes statistiques

Malgré ces difficultés liées à l'utilisation des distances déduites des vitesses par la loi de Hubble, certaines méthodes mathématiques donnent des résultats intéressants. L'enjeu est de retrouver la distribution réelle des galaxies avec le champ de vitesse décrivant les mouvements propres, une fois gommée l'expansion générale.

Une des premières méthodes proposées (*POTENT*) par E. Bertschinger et A. Dekel en 1989, consistait à faire une moyenne des vitesses sur un domaine très étendu et de décrire ensuite la densité moyenne comme résultant d'un potentiel perturbateur, comme dans la méthode de Zeldovich décrite plus haut. *POTENT* a été appliquée aux mesures de vitesses faites pour le grand relevé en infrarouge IRAS. C'était un premier pas.

Mais une difficulté vient des données observées. Elles sont bruitées, clairsemées et incomplètes. Dans ces conditions, que signifie une moyenne, si des données manquent. Il faut utiliser des méthodes qui ne sont pas simplement basées sur ce qu'on voit, mais également sur ce qu'on sait. Cela signifie que si on observe une quantité A liée à une quantité B, la mesure de A doit être contrainte par la valeur de B. C'est ce qu'on appelle une statistique Bayésienne. En effet, il y a des régions où on ne voit pas de galaxies parce que notre Voie Lactée les masque. Mais si on découvre que des galaxies visibles se dirigent vers une région apparemment vide, cela signifie qu'il y a des galaxies cachées, qui doivent être prises en compte. Une application de ces méthodes a été faite par S. Hess, F.S. Kitaura et S. Gottlöber en 2013. Ils ont utilisé un grand relevé (2MASS survey) en infrarouge complété par la mesure d'environ 200000 vitesses radiales. D'autres auteurs ont aussi avancés dans ce sens comme G. Theureau et G. Lavaux. Mais il fallait aller encore plus loin.

Nous allons voir que l'équipe<sup>1</sup> rassemblée autour de Brent Tully et Hélène a procédé autrement en utilisant les vraies distances et non pas seulement les distances déduites de la vitesse cosmologique via la loi de Hubble. Une cartographie réaliste du champ des vitesses a pu être construite ainsi.

Nous avons connu Brent Tully attaché à décrire l'Univers local en trois dimensions. En 1973, peu de temps avant la découverte de sa célèbre relation de Tully-Fisher, que nous avons évoquée plus haut, Brent avait déjà commencé une cartographie qui s'est concrétisée avec son atlas publié en 1987, et complété depuis par le travail d'Hélène.

L'étude dont nous allons parler maintenant a commencé quand Hélène Courtois a rejoint Brent Tully en 2006, avec un premier projet *Cosmic-flows-1*. Cette pré-étude était basée sur un catalogue qui contenait toutes les galaxies jusqu'à une vitesse de 3000 km/s (c'est-à-dire une distance de l'ordre de 43 Mégaparsecs, soit 140 Millions d'années de lumière). Il fallait compléter les mesures radio pour avoir de très bonnes distances par la relation TF. Ce n'est pas une tâche facile. Hélène a joué un rôle capital dans cette étape. Il y avait une autre difficulté. Les distances mesurées sont sujettes à des biais statistiques. Une méthode (ce qu'on appelle la relation TF inverse), permet de corriger du biais de manière globale, sans réduire la taille de l'échantillon. Finalement, l'échantillon de 1800 galaxies était disponible, avec de vraies distances (par opposition aux distances déduites de la loi de Hubble). Les premiers résultats furent publiés en 2008.

Le nouveau projet *Cosmic-flows-2*, qui vient de se terminer a presque multiplié par 5 le nombre de galaxies de distance connue. C'est ce que nous allons découvrir.

## ICI SEPARATION POSSIBLE EN UN DEUXIEME ARTICLE

### **Les nouveaux résultats : les limites de notre Super Amas Local**

Le nouveau *Cosmic-flows-2* vient d'être connu du grand public et les résultats sont remarquables car le champ des vitesses permet une définition objective des limites d'un super-amas. C'est ce que nous allons présenter maintenant. Un colloque organisé à Marseille en juin 2013 pour célébrer le 70ème anniversaire de Brent Tully relatait déjà ces résultats pour les spécialistes. Un article publié le 4 septembre 2014 a fait la Une de la prestigieuse revue *Nature*. Nous allons expliquer ces résultats qui ont permis de passer d'une vision statique en trois dimensions (3D) à une vision dynamique (ce qu'on appelle la vision 4D).

C'est au départ un projet essentiellement observationnel, mais à partir de 2009 il va inclure des phases de simulations. Le but était de rassembler les meilleures données (faire un état de l'art dans ce domaine), puis de lancer des observations dans les directions du ciel où ils manquaient des données. Il fallait d'abord rassembler les mesures de distances les plus précises possibles. Les

---

<sup>1</sup> **Brent Tully**, Université d'Hawaï, **Hélène Courtois**, IPNL Université de Lyon, **Daniel Pomarède** CEA de Saclay et **Yehuda Hoffman**, Racah Institute of Physics.

données radio qui servent dans la relation Tully-Fisher ont été sélectionnées pour ne garder que les plus précises. Mais il faut rappeler que ces données ne concernent que les galaxies spirales, les seules émettant sur la raie de l'hydrogène neutre. Les données issues d'autres méthodes applicables aussi aux galaxies elliptiques ont été collectées : méthode du Plan Fondamental, méthode de la fluctuation de brillance superficielle (SBF), méthode de la limite de la branche des super-géantes rouges (RTGB), etc. Au total 8315 distances ont été rassemblées en 2013 pour une première cartographie. Ce projet a nécessité une grande collaboration au niveau international regroupant une vingtaine de chercheurs de différentes nationalités. Les données recueillies sont ouvertes à tous. Galaxies, amas de galaxies, superamas, ... aux plus grandes échelles, l'Univers donne l'image d'un réseau bien structuré où la matière se concentre dans certaines régions entourées de grands espaces vides. Cependant, les superamas sont très mal définis. Quelles sont leurs frontières, où commence l'un et où s'arrête l'autre ? C'est la grande nouveauté, l'équipe de chercheurs propose de définir les limites des superamas à partir des champs des vitesses. C'est comme de l'eau de pluie sur une colline. Selon qu'elle tombe d'un côté ou de l'autre de la limite de partage des eaux, alors elle coulera vers un bassin versant ou vers un autre.

### La modélisation de notre Super continent le Laniakea<sup>2</sup>.

Comment cette carte du cosmos a été faite ? Quelle est sa particularité ?

Pour réaliser cette carte, il y a eu un énorme travail analytique fait par Y. Hoffman. À partir du catalogue de vitesse des galaxies, il a été possible de faire des interpolations sur les vitesses des autres galaxies ainsi que sur leurs déplacements.

La première étape est de filtrer les données pour enlever le "bruit". En effet, les vitesses propres des galaxies apparaissent comme un bruit pour la mesure de la vitesse cosmologique. Mais *in fine*, ce sont les vitesses propres qui nous intéressent pour décrire les grands courants de matière. L'équipe a utilisé un filtre dit de Wiener, du nom de l'ingénieur qui a développé cet outil en 1949 pour réduire le bruit d'un signal.

Nous allons essayer d'expliquer le principe. Le filtre de Wiener permet de calculer le champ moyen des vitesses propres des galaxies en prenant en compte les vitesses observées, les incertitudes et un modèle cosmologique *a priori* (par exemple une valeur de la constante de Hubble). Les incertitudes permettent de pondérer les données selon la confiance qu'on y accorde. Le modèle cosmologique donne une estimation de départ. Ce qui nous intéresse c'est le champ des vitesses propres, pas le champ décrivant l'expansion cosmologique. L'application concrète consiste donc à partir des distances mesurées  $r$  avec leurs incertitudes et des vitesses radiales observées  $V$  avec leurs incertitudes. Ensuite, il faut essayer des valeurs pour la constante de Hubble. Le filtrage de Wiener reproduit alors le champ des mouvements propres. Ils ne doivent plus montrer de résidus de l'expansion. Il est facile de comprendre que le champ des mouvements propres doit être corrélé avec la distribution des masses observées. Si, dans une région donnée, toutes les vitesses propres  $v$  convergent vers un point, il est possible d'interpoler entre toutes pour obtenir un champ plus lisse, voire même d'extrapoler aux régions où les données manquent.

La description technique du filtre de Wiener est plus délicate à faire en évitant les équations. L'idée simplifiée est la suivante : la vitesse observée est donnée par l'équation vectorielle :  $V = H * r + v$ . La constante de Hubble est décrite comme une fonction  $H$ . Le produit noté par une étoile n'est pas un produit de deux nombres mais un produit de deux fonctions, ce qu'on appelle un produit de convolution. Une approche naïve consisterait à inverser la fonction  $H$  pour calculer les bonnes distances  $r'$ . C'est-à-dire :  $r' = H^{-1} * V$ . Cette méthode ne marche pas bien car le bruit  $v$  est trop fort et surtout le nombre de positions  $r$  connues est très inférieur au nombre nécessaire pour décrire le champ complet. L'inversion serait impossible. On cherche alors une fonction  $W$  telle que la représentation de la distribution des positions soit donnée par  $r' = W * V$  avec un écart moyen  $(r - r')^2$  minimal compte tenu des contraintes (la qualité de chaque donnée et les limites du modèle).

<sup>2</sup>

Le nom de ce super continent est *Laniakea*, ce qui en polynésien signifie **ciel** (Lani) **immense** (akea).

La seconde étape est d'analyser le champ des vitesses propres. Les interactions entre les points se décrivent comme les tensions dans un solide. Il y a pour cela un outil adapté, c'est le calcul tensoriel. Or un tenseur quelconque peut toujours se décomposer en un tenseur symétrique (tenseur de cisaillement) et un tenseur antisymétrique (tenseur de vortex). Les mouvements tourbillonnaires associés au tenseur de vortex sont négligés en première approximation. Les régions tourbillonnaires étant remplacées par un objet unique. Mais c'est le tenseur de cisaillement qui est utile pour décrire la ligne de "partage des eaux". C'est ce qui va permettre de définir les limites objectives des structures. La technique est analogue à celle utilisée par Zeldovich comme nous l'avons décrite plus haut.

Un logiciel de reconstruction et de visualisation des lignes de courants cosmiques écrit par Daniel Pomarède a permis d'obtenir une cartographie en trois dimensions des superamas de galaxies de l'Univers Local, et en particulier, du Super Amas Local qui inclut notre Galaxie. Un avantage de cette méthode, est qu'elle reconstruit les mouvements des galaxies que l'on voit, mais aussi de celles qui restent invisibles car situées dans la partie que l'on ne peut pas voir, les régions du ciel cachées par le disque de notre propre galaxie. Ici, la méthode Bayésienne (comme vue plus haut) est capable, en fonction des vitesses et des déplacements de galaxies, de reconstruire les champs gravitationnels ainsi que les zones de vides.

Les cartes représentent alors notre Super Continent de galaxies : le Laniakea, y compris avec ses zones d'ombres. C'est comme les navigateurs polynésiens qui, à partir de l'étude des courants marins et des débris, étaient capables de localiser des îles invisibles de là où ils étaient.

Au final, les cartes intègrent à la fois les zones riches en matière (dont la matière sombre) et les zones de vides mais aussi les mouvements des galaxies le long de filaments de matière et ceux des superamas. On peut voir ces filaments comme des fleuves sur lesquels les galaxies se déplacent.

Cette cartographie dynamique, permet aussi de valider le modèle cosmologique actuel. Les grandes structures de l'univers sont organisées en toile, en réseaux. Les amas de galaxies sont reliés par des filaments. On peut visualiser le champ des vitesses, et cela met en évidence des bassins d'attractions au sein desquels les filaments se rejoignent dans un centre.

### **Qu'elles sont les nouvelles connaissances obtenues grâce à cette cosmographie ?**

La figure 8 montre le volume définissant Laniakea, ce *ciel immense* bordé de grandes structures. Toutes les galaxies qui sont dans ce volume "coulent" en direction de l'attracteur principal formé par l'amas du Centaure. C'est sur lui que se concentrent les courants de galaxies au sein de Laniakea. Cet amas, qui paraissait insignifiant près de Virgo (voir la figure 7) est un élément clef qui constitue une frêle jonction dynamique avec la région de Perseus-Pisces.

La cartographie de Laniakea et des régions environnantes révèle que l'amas du Centaure se situerait à la confluence de cinq gros filaments, formant le point de convergence de cinq courants cosmiques distincts. Ce serait lui le grand attracteur, vu aujourd'hui davantage comme une sorte de vallon plat qui attire les galaxies grâce à la gravité.

Le diamètre approximatif de Laniakea est de 500 millions d'années de lumière. Notre Galaxie, pourtant si grandiose semble bien ridicule avec son diamètre de cent mille années de lumière seulement. La masse de Laniakea est tout aussi prodigieuse : cent millions de milliards de fois la masse du Soleil ! On est bien loin de l'univers de Copernic dont le Soleil était l'astre central. Mais ce n'est pas tout. Que sait-on des autres superamas ?

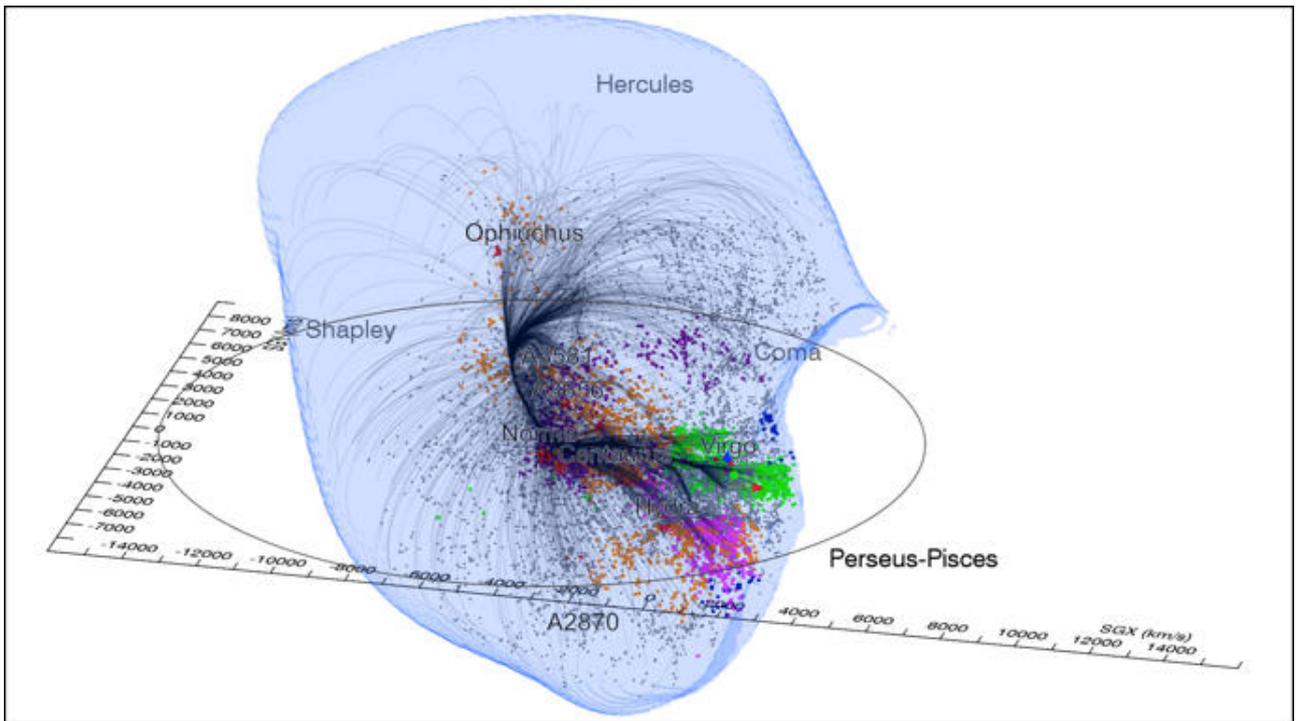


Figure 8 : le superamas Laniakea est représenté isolé du reste de l'univers. En vert nous voyons les galaxies qui appartiennent au super amas Local, tel que défini depuis plus de 50 ans par G. de Vaucouleurs. La définition physique d'un superamas est le volume englobant les mouvements gravitationnels de galaxies qui convergent vers un puits de potentiel localement dominant.

La figure 9 montre ce voisinage. Des structures gigantesques entourent Laniakea.: Perseus-Pisces, Coma, Pavo-Indus (non visible sur cette carte) et la région mal explorée de Shapley mais qui promet de révéler une autre structure gigantesque. La bande sombre qui barre horizontalement la carte est la région cachée par notre Galaxie. On voit très bien que les courants des galaxies ont pu être reconnectés de part et d'autre de cette région cachée.

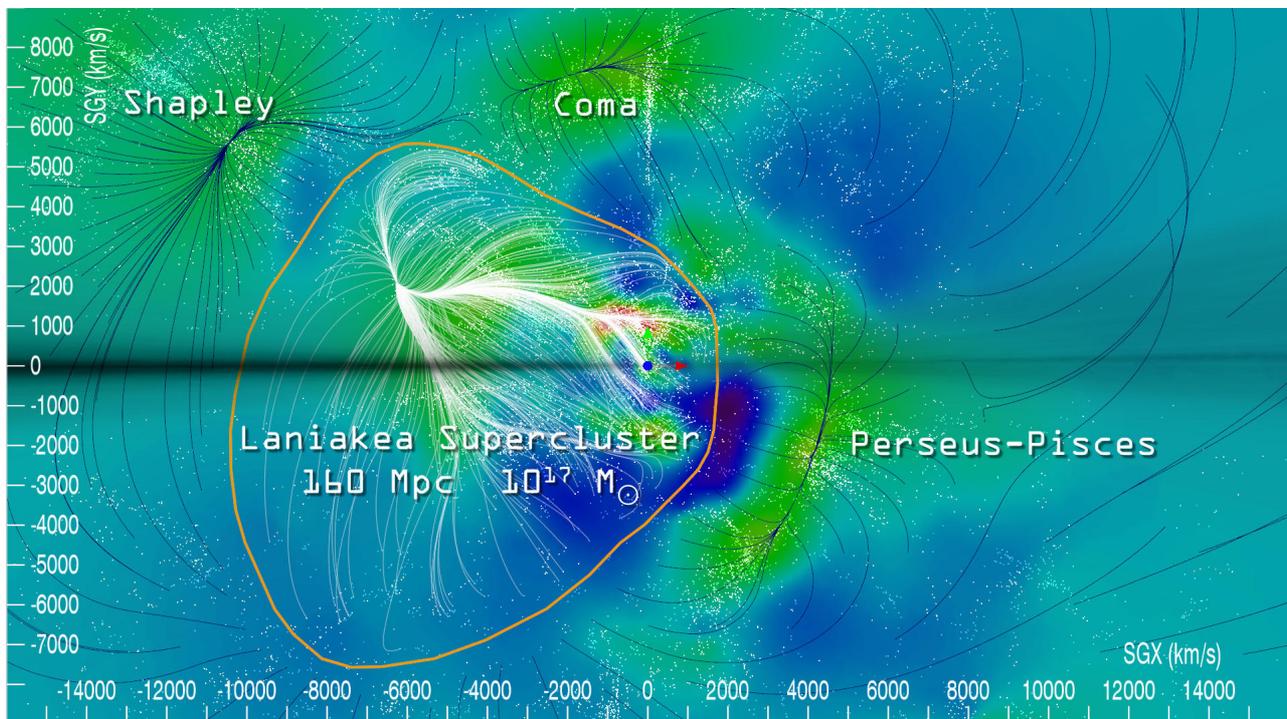


Figure 9 : Une tranche selon le plan supergalactique XY montre que notre propre galaxie nous masque une partie de l'Univers observable (zone grisée). Les nouvelles méthodes d'analyses utilisant des matrices de corrélations des mouvements et positions des galaxies permettent de combler ces zones d'ombre. Le continent Laniakea est la région quasi-sphérique entourée d'une ligne orange.

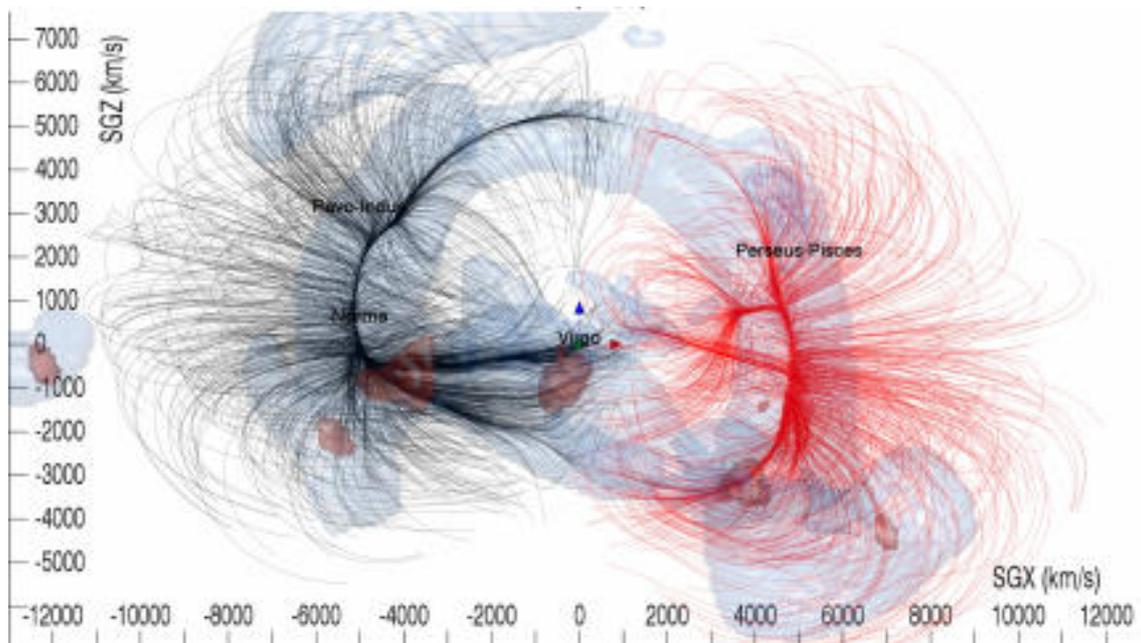
Terminons par la carte des vitesses, la véritable nouveauté de cette étude (Figure 10). On y retrouve évidemment la description faite avec la distribution des masses. Laniakea est le centre de cette structure. Ce qui est intéressant, c'est que le lien que nous suspicions en 1995 entre Pavo-Indus et Perseus-Pisces est présent sous forme d'une ligne de champ de vitesse. Mais ce lien est sans doute en train de se casser. Les galaxies coulent d'un côté où de l'autre en désertant cette région. C'est pour cela que nous n'avions pas trouvé la concentration attendue de galaxies. Mais le lien était là, semble-t-il. Cette carte montre aussi des régions vides, par exemple le "vide local" situé derrière le centre de notre galaxie. Il est donc très mal connu et très peu étudié.

On sait qu'il existe au moins cinq grands continents, Laniakea inclus, mais on ne peut pas encore les décrire, car il n'y a pas assez de données. Pour le futur, la continuation du projet *Cosmic Flows* se fera en commun avec le projet CLUES (*Constrained Local UniversE Simulations*). Avec les nouveaux télescopes multi antennes qui sont construits actuellement en Australie, en Afrique du Sud et en Hollande. Les cosmologistes vont pouvoir étendre leur méthode de cosmographie de l'Univers en mouvement jusqu'au double de la distance actuelle d'ici 5 à 10 ans. Cependant les chercheurs se sont aussi lancés en parallèle dans un autre projet, dont le but est de faire des simulations (et non plus des reconstructions) pour visualiser l'évolution du mouvement des galaxies sur de grandes échelles de temps. Mais aussi pour essayer de visualiser le passé et la formation des superamas, afin de remonter aux structures originelles. Par analogie, comme l'étude de la tectonique des plaques permet de remonter aux propriétés des profondeurs de la Terre, les mouvements

d'ensemble des galaxies permettent d'étudier et de cartographier les formes d'énergie mystérieuse qui semblent dominer notre Univers : l'énergie noire et la matière noire.

Au terme de ce long cheminement on mesure les progrès considérables faits à tous les niveaux, de l'observation à la modélisation. Que d'heures de réflexion et de travail ! Et pourtant que de chemin à parcourir encore !

Si vous voulez voir la version dynamique de Laniakea vous pouvez regarder la vidéo qui est sur le site : <http://vimeo.com/105000565> (remarque : oui c'est bien "vimeo" et non pas "video") ■

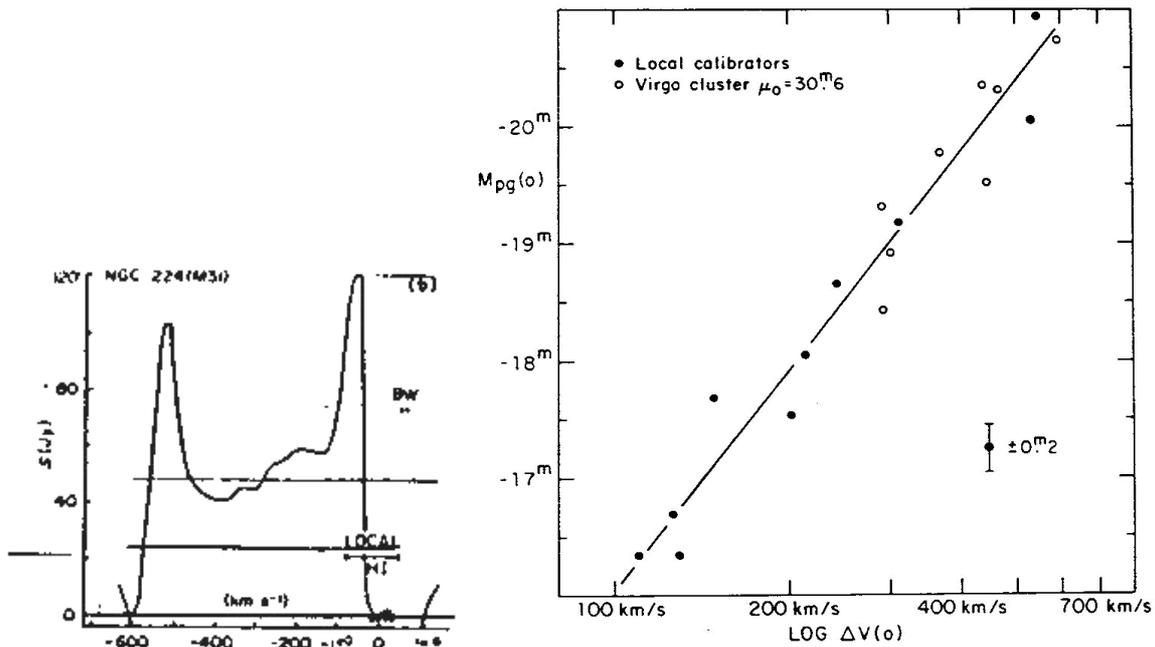


*Figure 10 : Le champ des vitesses propres des galaxies qui entourent Laniakea. On voit que les grands courants existent, formant une sorte de connexion entre les grandes structures. En particulier le lien dynamique entre Pavo-Indus et Perseus-Pisces n'est-il pas le chaînon manquant que nous cherchions ?*

## Encadré A : La relation Tully-Fisher (TF en abrégé)



Rick Fisher & Brent Tully @TF35, Green Bank (Photo Marc Verheijen)



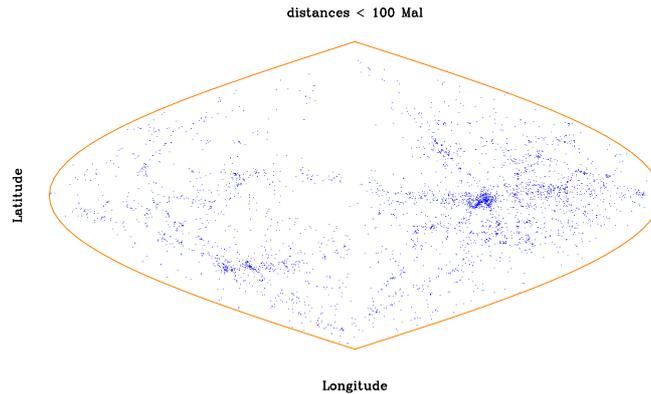
Deux extraits de l'article Tully et Fisher publiés dans "Astronomy & Astrophysics" en 1977.

**A gauche :** L'émission de l'hydrogène neutre par la galaxie d'Andromède. Les lignes horizontales ont été tracées par GP pour la mesure de la largeur, directement sur la publication. Les fréquences en abscisses sont converties en vitesses (km/s) via la loi de Doppler-Fizeau.

**A droite :** La relation TF entre la magnitude absolue et le logarithme de la largeur de l'émission à 21cm de longueur d'onde.

L'hydrogène atomique neutre émet spontanément sur une longueur d'onde de 21 cm. Cette longueur d'onde correspond à une fréquence au repos de 1,427 GHz, accessible à l'électronique moderne. En balayant les fréquences, il est possible de mesurer le décalage de l'émission, donc de mesurer la vitesse radiale. Mais ce n'est pas tout. L'émission d'une galaxie, vue par la tranche et qui tourne sur elle-même, est élargie. En effet, le côté de la galaxie, qui nous fuit plus vite à cause de la rotation, produit un décalage supplémentaire vers les grandes longueurs d'onde, tandis que le côté qui vient vers nous produit un décalage en sens inverse. La largeur de l'émission mesure donc la vitesse de rotation, c'est-à-dire la masse dynamique. Par ailleurs, la masse gravitationnelle dépend de la luminosité (plus une galaxie contient d'étoiles, plus elle est lumineuse). En supposant l'égalité de ces deux masses (ou leur proportionnalité) on trouve que la largeur de l'émission est corrélée à la luminosité. Tel est le sens de la relation TF trouvée en 1976 (et publiée en 1977).

## Encadré B : la projection de Flamsteed



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 quelconques : équatoriales, galactiques, super-galactiques...

$L$  varie de  $0$  à  $360^\circ$  et  $B$  de  $-90^\circ$  à  $+90^\circ$ . 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.

Texte tiré des Cahiers-Clairaut 106, p20 (2004)