

## Laniakea, l'Univers en trois dimensions

**Daniel Pomarède**, Institut de Recherche sur les Lois Fondamentales de l'Univers, CEA Université Paris-Saclay  
 et **Hélène Courtois**, professeure à l'université Claude Bernard Lyon 1

*Avec cet article, nous changeons de dimension dans les représentations du ciel. Tout d'abord par les distances ici en jeu puisque nous passons de la proche banlieue de la Galaxie à l'Univers lointain. Mais aussi grâce aux mesures de distances et de vitesses qui nous apportent une autre vision de notre Univers en 3D et de la place que nous y occupons.*

La science de la cartographie du Cosmos, appelée « Cosmographie », est une discipline ancienne, intimement liée à la question de la représentation du ciel, qui cherche à répondre à cette question simple : où sommes-nous dans l'Univers ? Notre système planétaire et son étoile le Soleil se situent dans le bras d'Orion, l'un des bras d'une galaxie spirale géante, la Voie lactée, à trente mille années-lumière de son centre. Mais en regardant plus loin, à quelles structures cosmiques appartenons-nous ? Tout autant qu'à la question de notre position dans l'Univers, c'est aussi à la question de notre mouvement dans l'Univers que cette science s'intéresse.

Pour reprendre le cas de la Terre, celle-ci orbite à une vitesse de 30 km/s autour son étoile, qui elle-même est entraînée à une vitesse de 220 km/s dans le mouvement de rotation orbitale du bras d'Orion. Mais à quels mouvements notre galaxie est-elle elle-même soumise ? Et quelles sont les sources de ces mouvements ? Dans cet article, nous présenterons d'importantes avancées qui ont été réalisées ces dernières années sur ces questions, grâce à un programme d'observations, de reconstruction et de visualisation en 3 dimensions reposant sur l'analyse des mouvements des galaxies.

### La cosmographie extragalactique

Les galaxies ne sont pas distribuées de manière uniforme dans l'espace, elles constituent des ensembles tels que des groupes de galaxies comprenant seulement quelques membres, des amas de galaxies constituées de milliers de galaxies, ces amas de galaxies s'associant eux-mêmes en superamas de galaxies qui constituent les plus grandes structures connues dans l'Univers. Les observations d'une part et la théorie d'autre part ont montré que la matière, à partir de minuscules fluctuations initiales du champ de densité, s'est organisée suivant une structure appelée la toile cosmique, un réseau où les nœuds sont occupés par les objets les plus denses tels

que les amas de galaxies, et sont connectés par des filaments, eux-mêmes séparés par des vides.

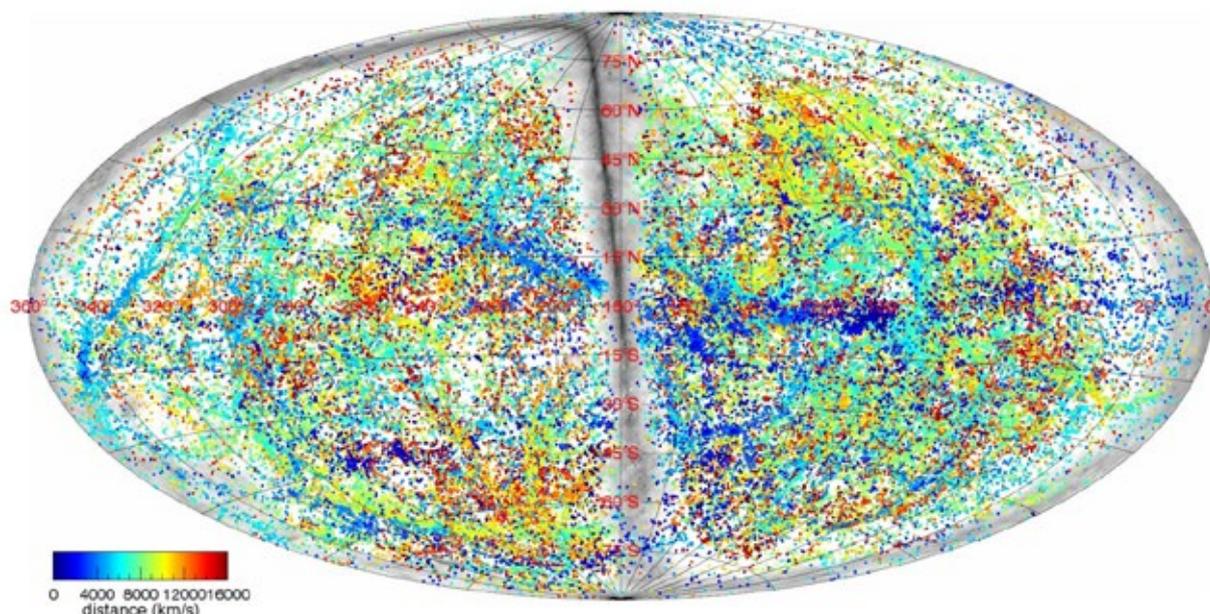
On pourrait penser que le travail de cartographie de cette structure serait simple, en utilisant comme traceur de la masse la lumière des galaxies et le décalage spectral comme indicateur de la vitesse de récession des galaxies, et donc de leur distance, à travers la loi de Hubble. Selon cette loi, les galaxies s'éloignent les unes des autres à une vitesse  $V_{\text{exp}}$  proportionnelle à la distance  $d$  qui les séparent :  $V_{\text{exp}} = H_0 d$  où  $H_0 = 75 \text{ km.s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$  est la constante de Hubble, qui exprime simplement le fait qu'une galaxie distante d'un mégaparsec (3,26 millions d'années-lumière) s'éloigne à la vitesse de 75 kilomètres par seconde. Une cartographie obtenue sur cette base est présentée en figure 1 sous forme d'une projection dans le ciel. On y distingue les éléments fondamentaux de la toile cosmique que sont les amas de galaxies, les filaments et les vides.

Cependant, les difficultés sont nombreuses : la lumière des galaxies ne trace qu'une fraction minoritaire de la matière totale, celle-ci étant constituée pour l'essentiel de la « matière sombre » ou « matière transparente » dont la nature échappe à notre compréhension, tandis que le décalage spectral souffre de distorsions liées par exemple à la dynamique des galaxies au sein des amas dans lesquelles elles orbitent. De plus, une difficulté observationnelle majeure réside dans le fait que nous sommes localisés au sein du plan principal d'une galaxie spirale qui, constituée de centaines de milliards d'étoiles et de vastes et denses nuages de poussière, nous cache une part conséquente du ciel extragalactique. Cette « zone d'obscurité » est particulièrement visible en figure 1 où nous voyons qu'elle coupe la carte en deux, barrant l'Univers en deux régions distinctes, séparées par une région obscurcie, sans données observationnelles.

Comment comprendre alors à quelles structures, groupe, amas, superamas, nœud, filament ou vide de

la toile cosmique nous appartenons ? Une nouvelle branche de la cosmographie, basée sur l'étude des vitesses des galaxies, est venue révolutionner le domaine. Née de la volonté de comprendre la vitesse

de notre propre galaxie, elle s'est développée pour nous apporter un nouveau regard sur notre place dans l'Univers.



*Fig.1. Projection d'Aitoff des positions des galaxies. La région grisée correspond à la zone d'obscurité due au disque de notre galaxie. Les positions des galaxies sont indiquées par des marqueurs colorés en fonction de la distance.*

## Les vitesses particulières des galaxies et les courants cosmiques

En termes de dynamique, les galaxies sont soumises à deux phénomènes opposés. D'une part l'expansion de l'Univers, décrite par la loi de Hubble présentée plus haut. À cette vitesse de récession héritée du *Big Bang*, s'oppose la gravitation, force d'attraction fondamentale, chaque galaxie subissant la force résultante de l'ensemble des objets qui l'entoure. Si on est capable de mesurer à la fois la distance d'une galaxie et sa vitesse totale  $V_{\text{tot}}$ , on peut en déduire sa « vitesse particulière »  $V_{\text{part}} = V_{\text{tot}} - H_0 d$ . Cette vitesse particulière nous informe sur les forces gravitationnelles en action, et donc sur les structures existantes, éventuellement cachées, par exemple dans la zone d'obscurité galactique, ou invisibles. L'analyse d'ensembles de telles mesures de vitesses particulières permet de cartographier les courants cosmiques, c'est-à-dire les flots de matière en mouvement des régions sous-denses vers les régions sur-denses.

Les estimations des distances des galaxies et de la composante radiale de leurs vitesses particulières sont obtenues avec six méthodologies différentes qui emploient : les caractéristiques des pulsations d'étoiles de type Céphéides, la luminosité des étoiles à l'extrémité de la branche des géantes rouges sur le diagramme de Hertzsprung-Russel, les

fluctuations de la brillance de surface d'ensembles d'étoiles dans les galaxies elliptiques, les chandelles standards que constituent les supernovas de type Ia, l'adhérence des galaxies elliptiques à une loi dite du « plan fondamental » qui relie leur luminosité, leur rayon et leur dispersion des vitesses de rotation, et enfin la corrélation entre la luminosité des galaxies spirales et leur vitesse de rotation, appelée « relation de Tully-Fisher ». Le premier catalogue issu de notre programme observationnel est le catalogue *Cosmicflows-1* publié en 2008, avec 1 791 galaxies situées jusqu'à des distances de l'ordre de 40 Mpc. Le catalogue *Cosmicflows-2* est constitué de 8 161 galaxies couvrant tout le ciel avec une densité substantielle jusqu'à 100 Mpc, et des distances atteignant ponctuellement 400 Mpc.

La reconstruction du champ de vitesse et de densité à partir des mesures des vitesses particulières est obtenue par la méthodologie bayésienne du filtre de Wiener<sup>1</sup>, en supposant en outre que la taille des structures est contrainte par le spectre de puissance obtenu dans le cadre du modèle standard de la cosmologie. Cette reconstruction est fortement contrainte par les données proches, dont la couverture est dense et précise, et se dégrade tout en respectant la contrainte du spectre de puissance vers les grandes distances, où les données se raréfient et présentent de grandes erreurs.

<sup>1</sup> Technique de traitement du signal.

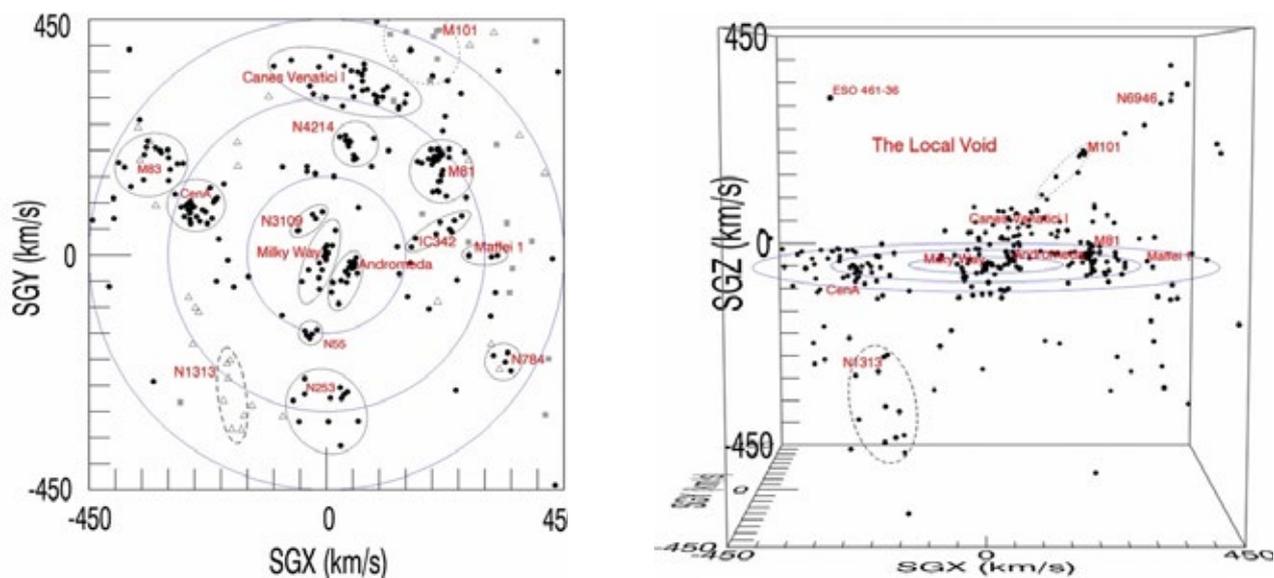
## Visualisation et cartographie à trois dimensions

La cartographie des courants cosmiques est étudiée à l'aide de méthodes de représentation en trois dimensions qui permettent de visualiser le champ de vitesse produit par le filtre de Wiener, et ses produits dérivés tel que le champ de densité. Le champ de vitesse est représenté le plus souvent par un ensemble de lignes de courants qui, soit atteignent un point de convergence, un attracteur, soit quittent la boîte à l'intérieur de laquelle le champ de vitesse est défini. Le champ de densité est visualisé par

différentes techniques telles que le rendu volumique par tracé de rayons ou la visualisation de tranches ; la méthode préférée est celle de la reconstruction d'isosurfaces qui, pour une valeur donnée de la quantité physique considérée, donne les lieux où le champ prend cette valeur en les connectant par un polygone de forme potentiellement complexe. Ces champs reconstruits peuvent être comparés entre eux et à des sources d'informations externes comme des grands catalogues de galaxies qui fournissent des estimations de distance basées sur le décalage spectral des galaxies.

## L'univers local

Notre galaxie, la Voie lactée, est une galaxie spirale autour de laquelle gravitent en suivant des orbites quasi circulaires un cortège de galaxies satellites naines telles que le Grand Nuage et le Petit Nuage de Magellan à des distances typiques de 50 kpc. Ensuite l'actrice principale de notre cosmographie proche est la galaxie d'Andromède aux caractéristiques similaires à celle de la Voie lactée. Séparées de 800 kpc, elles constituent un ensemble lié à l'intérieur duquel la gravitation l'emporte sur l'expansion de l'Univers. Avec leurs cortèges de galaxies naines, elles constituent le « Groupe local », dont les galaxies sont destinées à fusionner pour devenir dans quelques milliards d'années une galaxie elliptique géante. Notre groupe de galaxies ainsi que d'autres groupes voisins, tels que le groupe de la galaxie M81 ou celui de la galaxie Centaurus A situés à 4 Mpc, constituent une structure à la forme aplatie appelée « Plaque locale », représentée en figure 2.



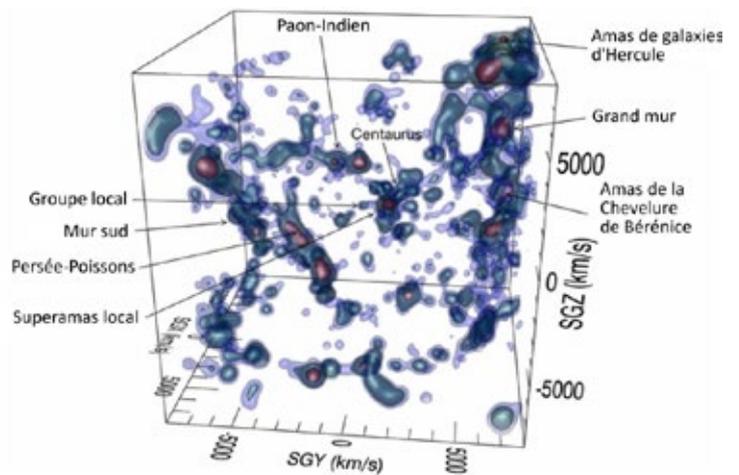
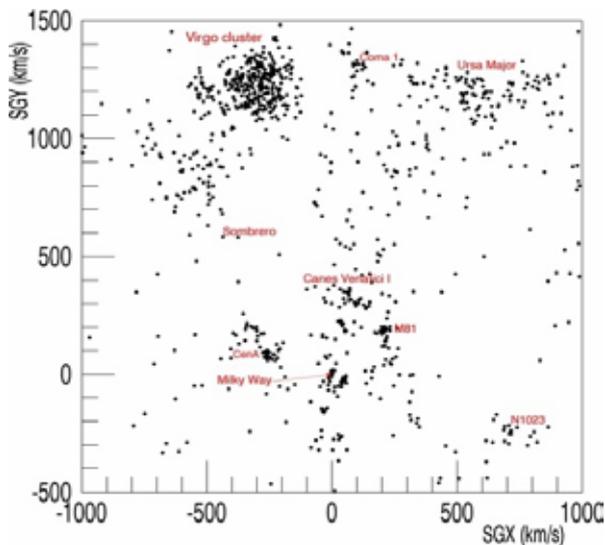
**Fig.2.** Cartographie de la Plaque locale vue sous deux perspectives différentes : à gauche le plan est vu de face. Chaque point noir marque la position d'une galaxie ; la Voie lactée se trouve à l'origine du système de coordonnées  $(SGX, SGY, SGZ) = (0, 0, 0)$ . Les cercles concentriques en bleu sont séparés de 2 Mpc. Des groupes de galaxies répertoriés sont entourés par des ellipses, en trait plein, pointillé, et avec des tirets, pour les groupes situés sur le plan  $SGZ=0$ , au-dessus, et en dessous, respectivement. À droite, la Plaque locale est vue par la tranche. Cette vue en trois dimensions révèle la présence du « Vide local » qui occupe la partie supérieure du domaine représenté. Ces cartes utilisent le système de coordonnées supergalactiques avec les positions  $SGX, SGY, SGZ$  exprimées dans l'espace des vitesses de récession – un retour aux positions en Mpc s'effectuant simplement en divisant pas la constante de Hubble. Le cube a pour dimensions 9 Mpc.

Cette région restreinte de l'Univers est soumise à deux influences locales importantes : l'expulsion du « Vide local », et l'attraction par l'amas de galaxies de la Vierge. Le Vide local, partiellement cartographié

en figure 2, est un vide cosmique, c'est-à-dire une région dont la densité est inférieure à la densité moyenne de l'Univers. Les courants cosmiques s'orientant des régions sous-denses vers les régions

sur-denses, la matière se trouve expulsée du vide. La Plaque locale est située en périphérie de ce vide et le délimite, et subit ce phénomène d'expulsion en acquérant une vitesse de  $259 \text{ km.s}^{-1}$ . L'amas de galaxies dans la constellation de la Vierge est représenté en figure 3. L'attraction gravitationnelle de cet amas est à l'origine d'une composante de

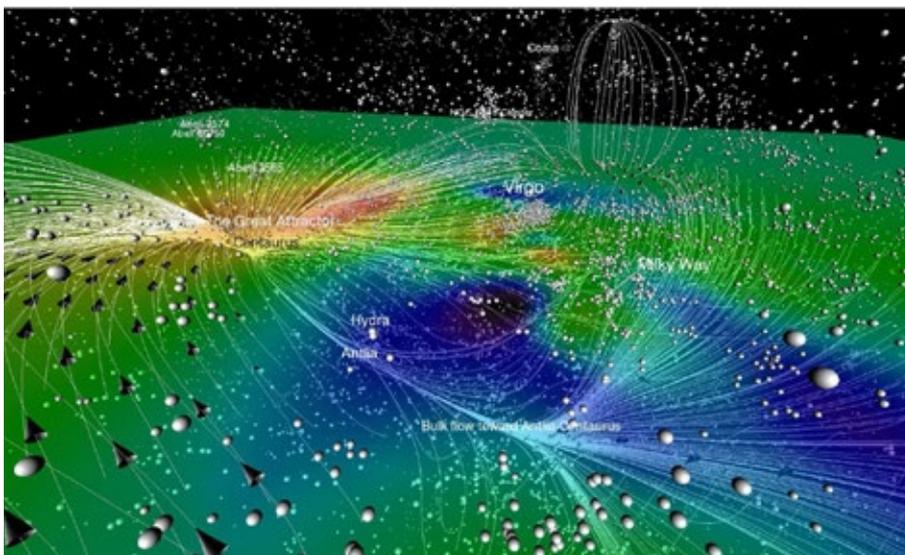
$185 \text{ km.s}^{-1}$  du mouvement du Groupe local, bien inférieure aux  $1\,200 \text{ km.s}^{-1}$  de sa vitesse de récession. S'il a longtemps été proposé que l'amas de la Vierge soit le cœur d'un « superamas local » ou « superamas de la Vierge » auquel la Voie lactée appartiendrait, il faut noter que La Voie lactée ne tombe donc pas sur l'amas : l'expansion l'emporte à ces échelles.



**Fig.3.** À gauche, carte du plan de l'équateur supergalactique s'étendant jusqu'à l'amas de la Vierge (Virgo cluster). L'utilisation de coordonnées exprimées dans le système des vitesses de récession permet de connaître la vitesse de récession de chaque galaxie ou ensemble de galaxies ; on voit par exemple que l'amas de la Vierge s'éloigne à environ  $1\,200 \text{ km.s}^{-1}$  en raison de l'expansion de l'Univers. À droite, carte en trois-dimensions de la densité des galaxies dans un cube de dimensions  $210 \text{ Mpc}$  environ. Le Groupe local se trouve au centre ; les grandes structures sont identifiées, parmi lesquelles le Grand Mur et la Chaîne de Persée-Poisson.

Continuant à gravir l'échelle de distance, de nouvelles structures apparaissent. En figure 3 (droite) est représentée une carte 3D des grandes structures observées en termes de densité de galaxies par unité de volume. À  $45 \text{ Mpc}$ , se trouve l'amas du Centaure et plusieurs autres amas de galaxies, qui ensemble constituent une entité appelée le « Grand Attracteur »

car responsable d'une part majoritaire de la vitesse de notre galaxie. En figure 4 est représentée une cartographie des courants cosmiques obtenue avec le catalogue de vitesses particulières *Cosmicflows-1* qui montre la convergence des lignes de courant sur le Grand Attracteur.



**Fig.4.** Carte des courants cosmiques obtenue avec le catalogue *Cosmicflows-1*. Les sphères blanches marquent les positions des galaxies ; la Voie lactée est indiquée (Milky Way) et l'amas de la Vierge est particulièrement visible. Le plan de l'équateur supergalactique est matérialisé par une image colorée représentant le champ de densité, les couleurs allant du sombre (noir puis bleu) pour les régions sous-denses, passent par le vert pour des densités proches de la valeur moyenne puis atteignent le rouge pour les régions sur-denses. Les lignes de courant permettent de visualiser le champ de vitesse.

## Laniakea, notre superamas de galaxies

La notion de superamas de galaxies a été évoquée pour la première fois en 1958 par Gérard de Vaucouleurs. Un superamas est constitué typiquement de plusieurs amas de galaxies voisins. Des cas représentatifs de superamas qui ont été historiquement discutés sont :

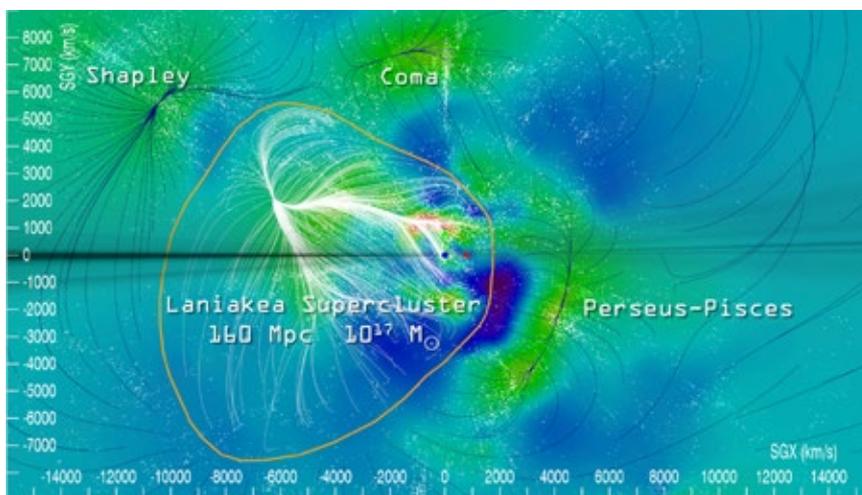
- le Superamas local ou superamas de la Vierge qui englobe l'amas de la Vierge et son entourage ;
- le superamas Hydre-Centaure associé au Grand Attracteur ;
- le superamas d'Hercule, en grande partie visible sur la figure 2 ; situé à 150 Mpc, il comprend 12 amas de galaxies ;
- la concentration de Shapley avec 28 amas de galaxies est un mastodonte situé à 180 Mpc ;
- les structures en filament du Paon-Indien et de Persée-Poisson, visibles en figure 3, sont également considérées comme des superamas, ainsi que la région entourant les amas de la Chevelure de Bérénice et du Lion ;
- le Grand Mur serait un superamas qui engloberait les superamas d'Hercule et de la Chevelure de Bérénice (figure 3).

On le voit, la notion de superamas est vague, à la fois en termes du nombre d'amas contenus (on passe d'un seul amas de galaxies pour le Superamas local, à 28 amas pour Shapley), de dimensions (typiquement 20 Mpc pour le Superamas local et jusqu'à 200 Mpc pour le Grand Mur), de hiérarchies des structures (on a des superamas qui contiennent d'autres superamas), et de topologie (on a des cœurs denses, des filaments, des murs...).

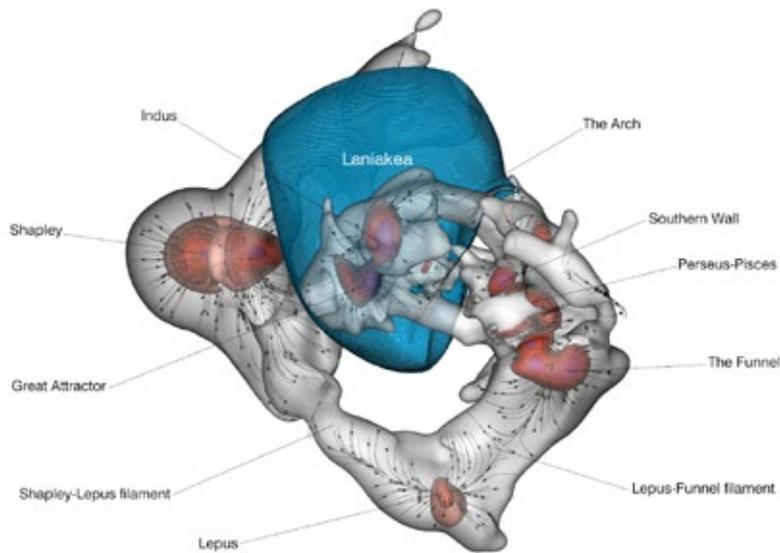
En 2013 est publiée la nouvelle génération de mesures de vitesses particulière *Cosmicflows-2*. La cartographie des courants cosmiques reconstruits à

partir de ce catalogue est présentée en figure 5. Dans cette reconstruction, les mesures extérieures à une sphère de 130 Mpc centrée sur le Grand Attracteur ont été filtrées, afin de comprendre la structure locale en éliminant les influences par trop lointaines. Cette cartographie révèle l'existence d'un volume de forme complexe à l'intérieur duquel les courants cosmiques convergent sur un attracteur unique. La figure 5 représente une tranche de ce volume correspondant au plan de l'équateur supergalactique (SGZ=0). Une frontière naturelle se dessine à l'intérieur de laquelle les lignes de courant convergent sur une région proche du Grand Attracteur, et à l'extérieur de laquelle les lignes de courant convergent sur d'autres attracteurs, associés aux structures connues de la Chevelure de Bérénice, de Persée-Poisson et de Shapley. Le volume en trois dimensions à l'intérieur duquel les courants convergent est appelé un « bassin d'attraction ». Cette découverte invite à utiliser cette notion de bassin d'attraction comme définissant un superamas de galaxies. Notre galaxie appartient à ce superamas.

Pour rendre hommage à la tradition des navigateurs et astronomes polynésiens qui utilisaient les étoiles et les courants océaniques pour se guider, notre superamas est appelé *Laniakea*, association des termes hawaïens *Lani*, ciel, et *Akea*, immense. On voit sur la carte de la figure 5 comment la frontière court à travers les vides qui encerclent Laniakea et nous séparent des autres continents extragalactiques voisins tels que Shapley et Persée-Poisson. Une analogie s'offre à nous avec, en géographie, la notion de bassins versants, séparés par des lignes de partage des eaux. La structure en 3D de l'enveloppe de Laniakea est présentée en figure 6 en conjonction avec une reconstruction de la toile cosmique déterminée par les propriétés du champ de vitesse.



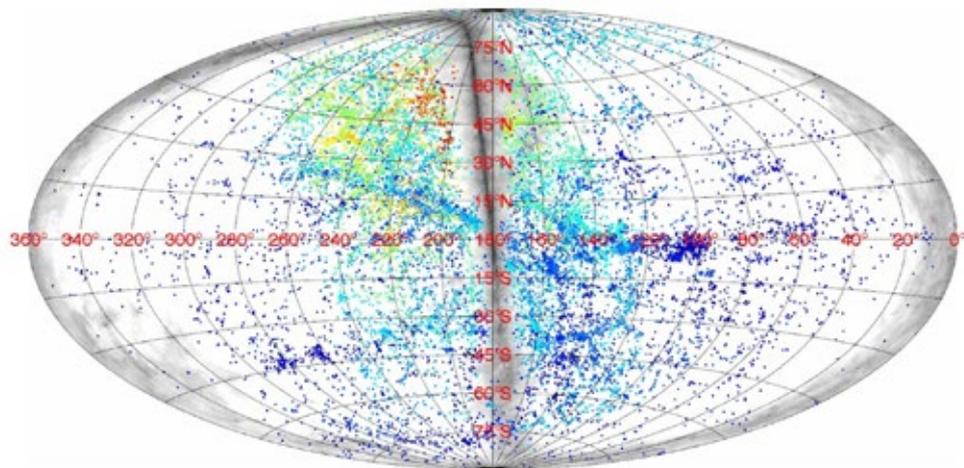
**Fig.5.** Cartographie des courants cosmiques obtenue avec le catalogue *Cosmicflows-2*. La ligne orangée est la frontière du bassin d'attraction correspondant à notre superamas, Laniakea. À l'intérieur de cette frontière, les lignes de courant représentées en blanc convergent sur un attracteur unique, le Grand Attracteur. À l'extérieur de cette frontière les lignes de courant convergent sur des attracteurs associés aux superamas voisins. Le champ de densité est visualisé sur le plan de l'équateur supergalactique (SGZ=0), du noir au bleu pour les régions sous-denses, au vert et rouge pour les régions sur-denses. La zone d'obscurcissement est représentée en gris.



**Fig.6.** L'enveloppe du bassin d'attraction de Laniakea, notre superamas de galaxies, est représenté en bleu. Les surfaces grises et rouges représentent les filaments et les nœuds de la toile cosmique. Les lignes de courant du champ de vitesse local sont également visualisées. Les éléments principaux de la cosmographie sont indiqués.

Pour conclure, revenons maintenant à la représentation du ciel classique obtenue par projection sur la voûte céleste. Sur la figure 1, nous représentons l'ensemble des galaxies : un ensemble complexe face auquel nous étions en peine de dire à quelle structure la Voie lactée appartient. En figure 7, nous représentons uniquement les galaxies qui appartiennent à Laniakea. Nous y reconnaissons une structure caractéristique de la toile cosmique avec plusieurs filaments qui convergent sur un nœud dans la région de l'amas du Centaure, c'est-à-dire du Grand Attracteur. Parmi ces filaments, nous comptons le filament du Paon-Indien qui historiquement était considéré comme un superamas à part entière, mais qui ici n'est plus considéré que

comme une structure périphérique le long de laquelle les courants cosmiques courent vers le Grand Attracteur. La cartographie des courants cosmiques de la figure 5 montre également que le problème de la zone d'obscurité est résolu : nous reconstruisons la cosmographie dans cette zone inobservable, en particulier nous cartographions l'entièreté du filament du Paon-Indien qui traverse cette zone pour aboutir au Grand Attracteur. La dimension caractéristique de Laniakea est de 160 Mpc et sa masse est estimée à  $10^{17}$  masses solaires. Notre galaxie, la Voie lactée, se situe dans sa lointaine périphérie, près de la frontière qui sépare Laniakea de son voisin le superamas de Persée-Poisson.



**Fig.7.** Projection d'Aitoff des positions des galaxies appartenant au superamas Laniakea.

## Conclusion

L'étude des courants cosmiques, avec la découverte des frontières de notre superamas de galaxies, bouleverse notre vision de la place que nous occupons dans l'Univers. D'autres résultats importants, concernant en particulier la question de notre

vitesse dans l'Univers, ont été obtenus. Les efforts des cosmographes se concentrent maintenant sur l'analyse du catalogue *Cosmicflows-3* et la préparation de la prochaine génération : *Cosmicflows-4*. Avec ce catalogue, c'est la cosmographie de l'Univers jusqu'à 400 Mpc qui se révélera à nous. ■