

LE MENSUEL DE RÉFÉRENCE DES SCIENCES DE L'UNIVERS

L'ASTRONOMIE

L'ASTRONOMIE

N° 115 / AVRIL 2018

SOCIÉTÉ ASTRONOMIQUE DE FRANCE



**LE TROU NOIR
CENTRAL
FACE AUX
FORMATIONS
STELLAIRES**



**PLANÈTE
EXTRASOLAIRE
DANS UN COUPLE
D'ÉTOILES**



**À DÉCOUVRIR
NGC 4565
L'AUTRE VOIE LACTÉE**

DÉTECTER LA TOILE COSMIQUE

**LES TECHNIQUES
QUI RÉVÈLENT LES PARTIES
CACHÉES DE NOTRE UNIVERS**

BELGIQUE / LUXEMBOURG : 6,80 € - SUISSE : 10,90 CHF

M 02605 - 115 - F: 6,20 € - RD



CNL



DÉTECTION DE LA TOILE COSMIQUE

On peut voir une sorte de « bonhomme » sur la *figure 1* (qui bien sûr n'en est pas un !). Le « corps » et la « tête » correspondent au célèbre amas de galaxies Coma, avec une grande concentration de galaxies dans la même direction, s'éloignant de nous avec des vitesses entre 4 000 et 9 000 km/s environ. Il existe donc une dispersion de vitesses des galaxies dans les amas, d'autant plus grande que l'amas est massif. Les longs « bras du bonhomme » signalent l'existence d'un très long filament de galaxies.

De nombreux grands relevés spectroscopiques ont ensuite été effectués, portant sur l'observation de dizaines de milliers de galaxies. Certains relevés couvraient une zone importante du ciel, mais n'allaient pas très profondément en

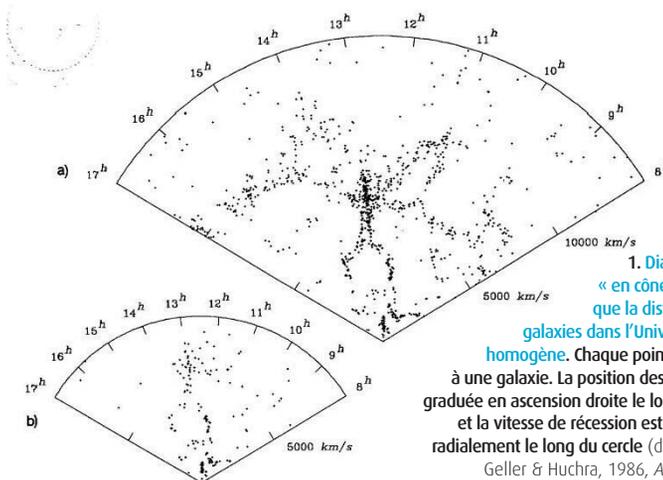
magnitude. D'autres étaient ciblés sur une petite région du ciel, mais atteignaient des galaxies beaucoup plus faibles, et donc souvent plus lointaines. Tous ces grands relevés ont confirmé que les galaxies se distribuaient le long de filaments ou de feuillets.

En prenant en compte l'interaction gravitationnelle et l'expansion de l'Univers, les simulations numériques de formation des grandes structures, ou simulations à N-corps, montrent, elles aussi, que la matière ne se distribue pas de manière homogène. Les amas de galaxies sont situés à l'intersection de deux ou plusieurs filaments. Ils apparaissent comme des zones très brillantes sur la *figure 2*.

L'ESSENTIEL

Les simulations numériques de formation des grandes structures montrent que la matière ne se distribue pas de manière homogène: elle forme ce que l'on appelle une « toile cosmique » à trois dimensions, dans laquelle les amas de galaxies sont situés à l'intersection de deux ou plusieurs filaments. Le problème est de détecter observationnellement cette toile. La spectroscopie permet d'obtenir avec précision les distances des amas de galaxies, mais elle exige de très nombreuses heures de temps de télescope, ce qui ne permet pas de couvrir de grandes zones du ciel et par conséquent de mettre en évidence la structure filamentaire de l'Univers. L'imagerie est beaucoup moins gourmande en temps de télescope, mais il est difficile de détecter directement les filaments de galaxies sur des images, car leur contraste par rapport à l'ensemble des galaxies est faible. En revanche, les distances peuvent être estimées pour des millions de galaxies à la fois, en prenant seulement quelques images du même champ dans divers filtres. Le présent article décrit une méthode économique en temps de télescope pour sélectionner les galaxies d'un amas grâce à la photométrie et en donne un exemple d'application. La méthode est moins précise que la spectroscopie, mais elle permettra d'étudier de nombreux amas jusqu'à de grandes distances dans l'Univers grâce aux relevés en imagerie profonde multi-bandes à grand champ.

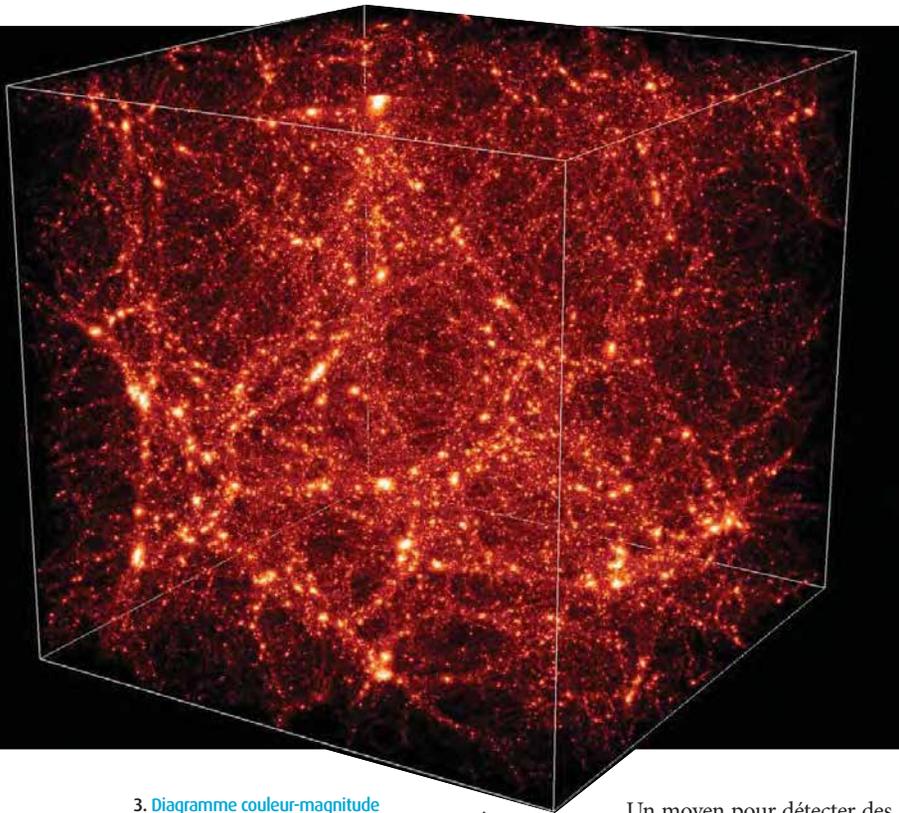
À partir du milieu des années 1980, une équipe d'astronomes aux États-Unis a commencé à mesurer les décalages spectraux de nombreuses galaxies. Ils ont alors pu montrer que les galaxies se distribuaient non pas de manière homogène, mais selon des filaments (allongés dans une dimension de l'espace) ou des feuillettes (à deux dimensions).



1. Diagramme dit « en cône » montrant que la distribution des galaxies dans l'Univers n'est pas homogène. Chaque point correspond à une galaxie. La position des galaxies est graduée en ascension droite le long du cercle, et la vitesse de récession est représentée radialement le long du cercle (de Lapparent, Geller & Huchra, 1986, *AJ/L* 302, L1).

LA DÉTECTION DE LA TOILE COSMIQUE EN IMAGERIE AUTOUR DES AMAS DE GALAXIES

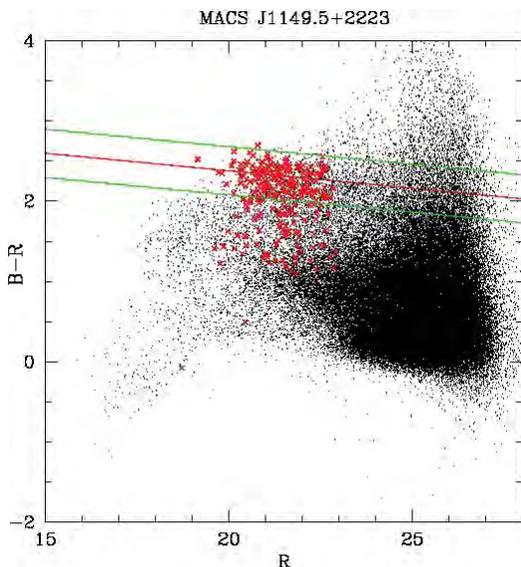
La spectroscopie, qui a permis de découvrir la structure filamentaire de l'Univers, exige de très nombreuses heures de temps de télescope, ce qui est évidemment très coûteux et ne permet pas de couvrir de grandes zones du ciel avec une profondeur suffisante pour atteindre des objets lointains. L'imagerie est beaucoup moins gourmande en temps de télescope, mais en raison des effets de projection sur le plan du ciel, il est difficile de détecter directement les filaments de galaxies sur des images, car leur contraste par rapport à l'ensemble des galaxies est faible.



← 2. Simulation numérique de la formation de structures dans un Univers de matière noire CDM (Cold Dark Matter ou matière noire froide). Le cube fait 500 millions d'années-lumière, et inclut 16 millions de particules (d'après le groupe INC de l'IAP).

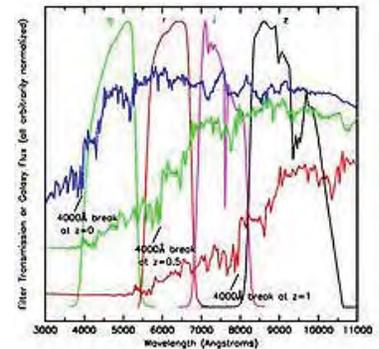
↓ 4. Principe du décalage spectral photométrique: les spectres de trois galaxies elliptiques de décalage spectral croissant sont tracés en bleu, vert et rouge. Les courbes de réponse de quatre filtres (notés g, r, i et z) sont superposées. Suivant le flux lumineux mesuré dans chacune des bandes, on peut avoir une estimation approximative du décalage spectral (réf: www.darkenergysurvey.org/terms/redshift.shtml).

3. Diagramme couleur-magnitude pour l'amas de galaxies MACS1149. Les points noirs indiquent toutes les galaxies, les points rouges correspondent aux galaxies ayant un décalage spectral correspondant à celui de l'amas. Les galaxies elliptiques sont distribuées selon une séquence tracée en rouge, et on considère que toutes les galaxies situées entre les deux droites en vert appartiennent à l'amas.



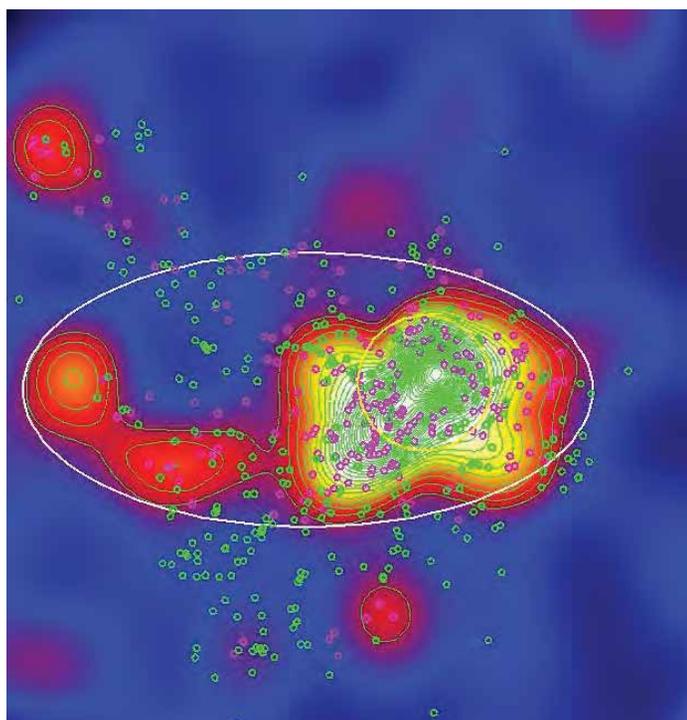
Un moyen pour détecter des filaments est de se concentrer sur les amas de galaxies et leur environnement immédiat. Nous allons illustrer cette méthode sur un amas particulier, MACS J1149.5+2223, étudié par Halim El Achkar durant son stage de Master 1 (ci-après MACS1149), dont le décalage spectral est

0,544 (voir l'encadré 1). Si l'on dispose d'images de cet amas dans deux bandes, par exemple les bandes B (dans le bleu-vert) et R (dans le rouge), il est possible de tracer un diagramme couleur-magnitude représentant la couleur (ou différence des magnitudes) (B-R) en fonction de la magnitude R. Dans les amas, les galaxies sont principalement de type précoce (galaxies elliptiques ou lenticulaires), et ont été formées à peu près à la même époque. On s'attend donc à ce qu'elles aient à peu près la même couleur (B-R) (voir encadré 2). On observe effectivement que, comme on peut le voir sur la figure 3, un grand nombre de galaxies appartenant à l'amas (d'après leur décalage spectral spectroscopique) se distribuent selon une droite (croix rouges). On va donc sélectionner les galaxies le long de cette bande et considérer qu'elles ont toutes une forte probabilité d'appartenir à l'amas. C'est un moyen de sélectionner les galaxies de l'amas assez économique en temps de télescope. Bien sûr, on « perd » alors les galaxies bleues de l'amas (galaxies à disque), c'est-à-dire les galaxies représentées par les croix rouges de la figure 3 qui sont en dessous de la séquence définie par les deux droites vertes. Mais on ob-



1. LIEN ENTRE DÉCALAGE SPECTRAL VERS LE ROUGE ET DISTANCE

Du fait de l'expansion de l'Univers, l'espace que traverse la lumière provenant d'une galaxie lointaine est étiré au cours du voyage. L'onde lumineuse est donc étirée. Or, une longueur d'onde plus grande correspond à une lumière plus rouge. La lumière des galaxies lointaines nous arrive donc plus rouge que lorsqu'elle a été émise par la galaxie. C'est le décalage spectral vers le rouge. Il s'avère que ce décalage est lié à la distance de la galaxie dont nous recevons la lumière. En effet, plus une galaxie est lointaine, plus les photons ont voyagé longtemps et donc plus ils ont subi cet étirement de leur longueur d'onde due à l'expansion de l'Univers. Ce lien entre décalage spectral vers le rouge et distance de la galaxie a été mesuré pour la première fois par Edwin Hubble en 1929 sur des galaxies proches.



5. Carte de densité des galaxies autour de l'amas de galaxies MACS J1149. Les niveaux de densité tracés en vert commencent à 3σ au-dessus du fond et augmentent avec un pas de 1σ . Les petits cercles verts indiquent les positions des galaxies ayant un décalage spectral mesuré, et ceux en rose correspondent aux galaxies situées au même décalage spectral que l'amas. La grande ellipse blanche indique l'extension maximale de l'amas et de son filament. On a sans doute ici un superamas constitué de plusieurs amas de masses différentes.

tométriques et de calculer des décalages spectraux photométriques. Le principe est montré sur la figure 4. De manière générale, plus on a de mesures dans des filtres différents couvrant un grand domaine de longueur d'onde, meilleure sera l'estimation du décalage spectral photométrique.

Lorsqu'on a sélectionné par l'une ou l'autre de ces deux méthodes les galaxies ayant une forte probabilité d'être au même décalage spectral que l'amas considéré, il est possible de calculer une carte de densité de ces galaxies et de voir comment les galaxies se répartissent dans les régions extérieures de l'amas. La carte de densité obtenue pour MACS J1149 est montrée sur la figure 5. Attention, si la méthode utilisée pour sélectionner les galaxies d'amas est celle correspondant à la séquence rouge, on va alors obtenir la distribution des galaxies elliptiques. Il est possible, et même probable, que les spirales dans et autour de l'amas soient distribuées différemment, mais il est beaucoup plus difficile de sélectionner les spirales par leur couleur, parce qu'elles ont des couleurs beaucoup plus variées que les elliptiques.

serve que les galaxies à disque sont toujours beaucoup moins nombreuses que les elliptiques dans les amas, donc on peut se permettre de négliger les galaxies bleues de l'amas. D'autre part, il y a une certaine contamination par des galaxies d'arrière-plan, mais celle-ci reste assez faible pour les galaxies plus brillantes que $R = 23$. On coupe donc les catalogues de galaxies à $R < 23$ avant de calculer la carte de densité comme décrit ci-dessous.

Un autre moyen pour sélectionner les galaxies ayant de grandes chances d'appartenir à l'amas est d'observer l'amas dans quatre ou cinq bandes pho-

2. TYPES ET COULEURS DES GALAXIES

Selon leur forme, les galaxies peuvent être classées en différents types : les galaxies elliptiques ont une forme sphérique ou ellipsoïdale, les spirales ont un bulbe sphéroïdal relativement petit et un disque aplati où se trouvent les bras spiraux, et les lenticulaires (ou S0) qui sont intermédiaires entre ces deux classes. Les galaxies elliptiques sont riches en étoiles rouges et vieilles, elles apparaissent donc plutôt rouges. Tout le gaz (essentiellement de l'hydrogène) qu'elles contenaient a été utilisé pour former des étoiles, il n'en reste donc quasiment plus, et il ne s'y forme plus d'étoiles.

Les bulbes des galaxies spirales ont des propriétés très semblables à celles des elliptiques, tandis que dans les disques des spirales il reste du gaz et la formation d'étoiles est importante. Les bras spiraux des galaxies spirales sont donc riches en étoiles jeunes et bleues, ce qui donne aux galaxies spirales une couleur intrinsèquement bleue.

LA DÉTECTION DE LA TOILE COSMIQUE À GRANDE ÉCHELLE

Pour détecter les filaments cosmiques à grande échelle (et non plus seulement dans l'environnement d'un amas de galaxies), on peut également utiliser dans un premier temps la technique des décalages spectraux photométriques. Dans ce cas, on observe une région du ciel plus ou moins grande, à l'aide de quatre ou cinq filtres. Il est alors possible de déterminer pour chaque galaxie (il peut y en avoir des dizaines, voire des centaines de milliers) son décalage spectral photométrique. On sélectionne alors les galaxies dans des tranches de décalage spectral, et on calcule dans chaque tranche une carte de densité.

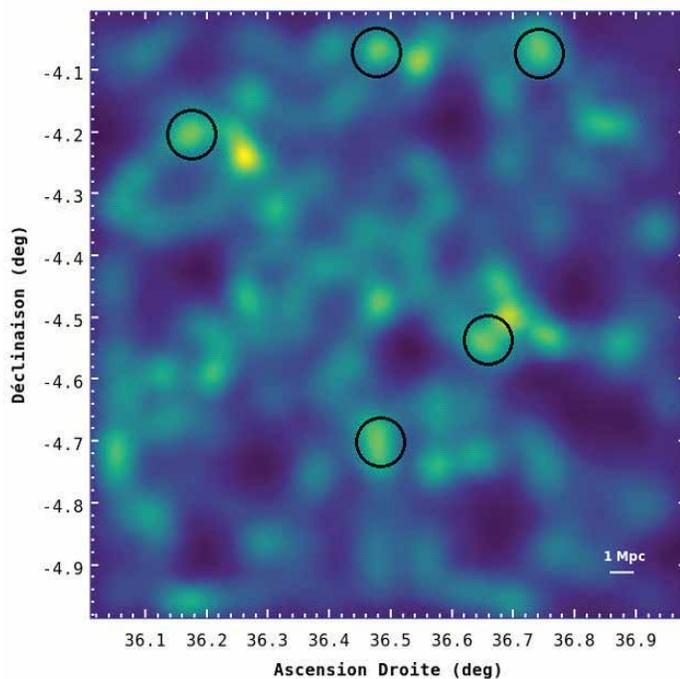
Dans tous les cas, les décalages spectraux photométriques sont évidemment beaucoup moins précis que les décalages spectraux spectroscopiques. En revanche, ils peuvent être estimés pour des millions de galaxies à la fois, en prenant seulement quelques images du même champ dans divers filtres.

Il y a une dizaine d'années. Alain Mazure et Christophe Adami, au Laboratoire d'astrophysique de Marseille, ont développé une méthode pour la recherche systématique d'amas dans de grands relevés (AMACFI, Adami & Mazure Cluster Finder). Notre équipe l'a appliquée au grand relevé CFHTLS (Canada France Hawaii Telescope Legacy Survey), obtenu avec la caméra MegaCam, dont le champ couvre $1^\circ \times 1^\circ$. Ce relevé comporte quatre zones « profondes » (Deep 1 à 4, en an-

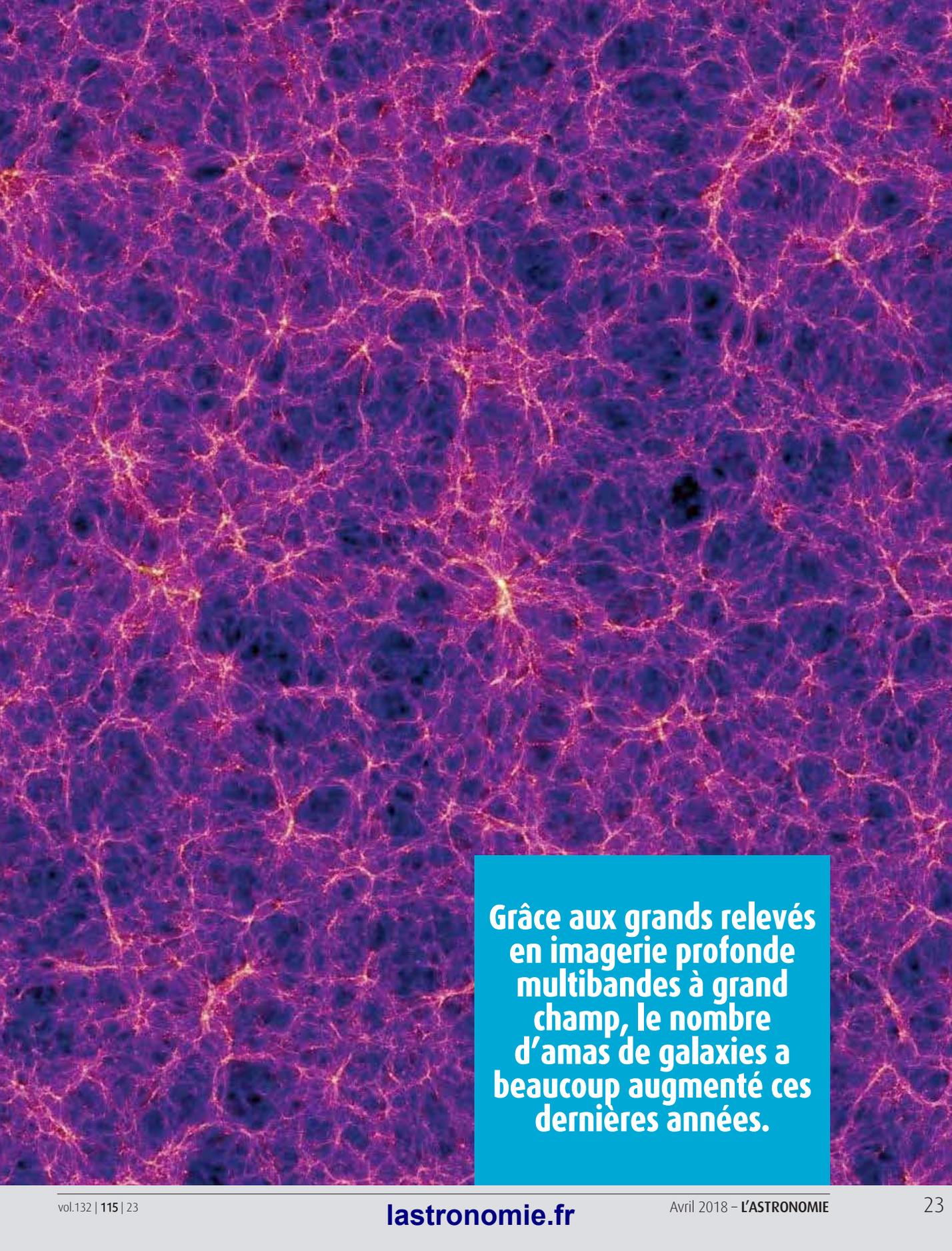
glais) couvrant chacune 1 degré carré et observées avec des temps de pose très longs, et quatre zones « larges » (Wide 1 à 4, en anglais) couvrant des régions du ciel nettement plus grandes, de plusieurs dizaines de degrés carrés, mais avec des temps de pose plus courts. Toutes ces régions ont été observées dans cinq filtres, allant du bleu à l'extrême rouge.

Le logiciel AMACFI a ensuite été considérablement amélioré par F. Saron dans le cadre de sa thèse (2015-2018), et a donc été rebaptisé AMASCFI (Adami, MAzure and Saron Cluster Finder). Les améliorations portent en particulier sur la position, le décalage spectral et la richesse (nombre de galaxies) de chaque amas, qui sont maintenant connus avec une bien meilleure précision. De plus, le code, maintenant parallélisé sur plusieurs ordinateurs, permet de traiter une région du ciel beaucoup plus grande, en un temps bien moindre.

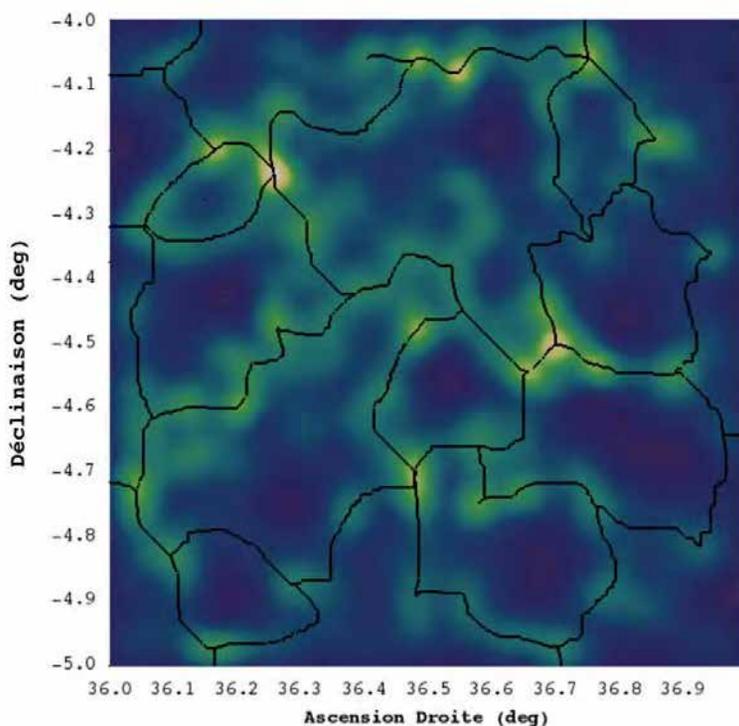
Dans le cadre de la préparation de la mission *Euclid* (voir *l'Astronomie* mars 2018, p. 16), six logiciels différents de détection d'amas ont été appliqués aux catalogues produits par diverses simulations numériques, et leurs performances ont ainsi pu être comparées. Si AMASCFI n'a finalement pas été sélectionné comme le meilleur, il a montré qu'il était d'un niveau comparable à celui des autres logiciels.



6. Carte de densité du champ Deep 1 du CFHTLS montrant la détection de cinq amas (cercles noirs) dans la tranche de décalage spectral [0,60-0,70].



Grâce aux grands relevés en imagerie profonde multibandes à grand champ, le nombre d'amas de galaxies a beaucoup augmenté ces dernières années.



7. Détection de filaments dans le CFHTLS: en plus des cinq amas détectés figure 6, on peut aussi voir la structure filamentaire tracée par le logiciel DisPerSE (Sousbie, 2011, *MNRAS* 414, 350).

Plus de mille amas de galaxies ont ainsi été détectés dans le relevé CFHTLS avec un bon rapport signal sur bruit. Pour valider cette recherche d'amas et la tester de manière quantitative, la même méthode a été appliquée à une grande simulation cosmologique baptisée « Millennium ». Il a ainsi été possible, par exemple, de corrélérer la richesse des amas (c'est-à-dire le nombre de galaxies) avec leur masse.

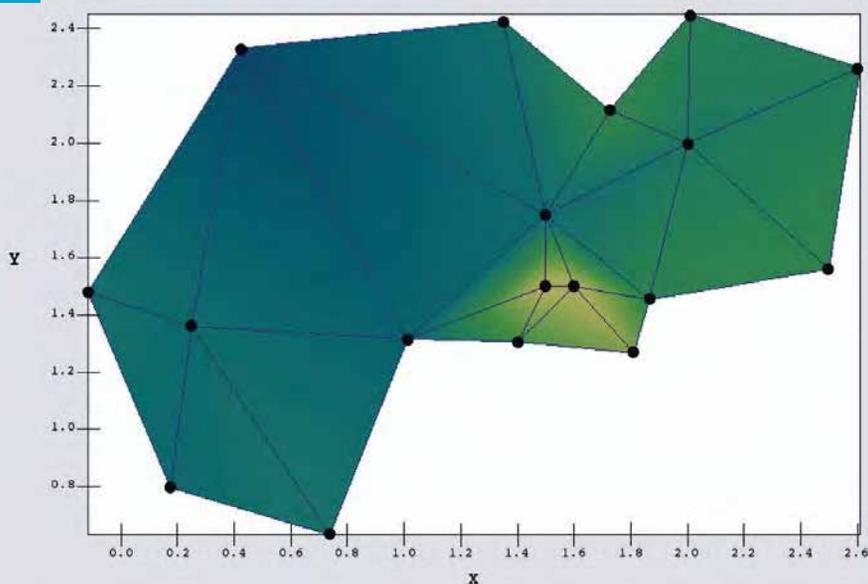
Grâce au nombre élevé d'amas détectés, il a été possible d'analyser les fonctions de luminosité des galaxies (nombre de galaxies en fonction de la magnitude) pour trois intervalles de décalage spectral et trois intervalles de masse des amas, ce qui a permis d'obtenir des contraintes intéressantes sur l'évolution des galaxies rouges et bleues dans les amas (Sarron *et al.* 2018, *Astronomy & Astrophysics*, sous presse).

La seconde étape de ce travail est maintenant la détection systématique de filaments cosmiques dans le CFHTLS. Ce travail est en cours, mais un certain nombre de filaments ont d'ores et déjà été détectés, comme on peut le voir sur la figure 7.

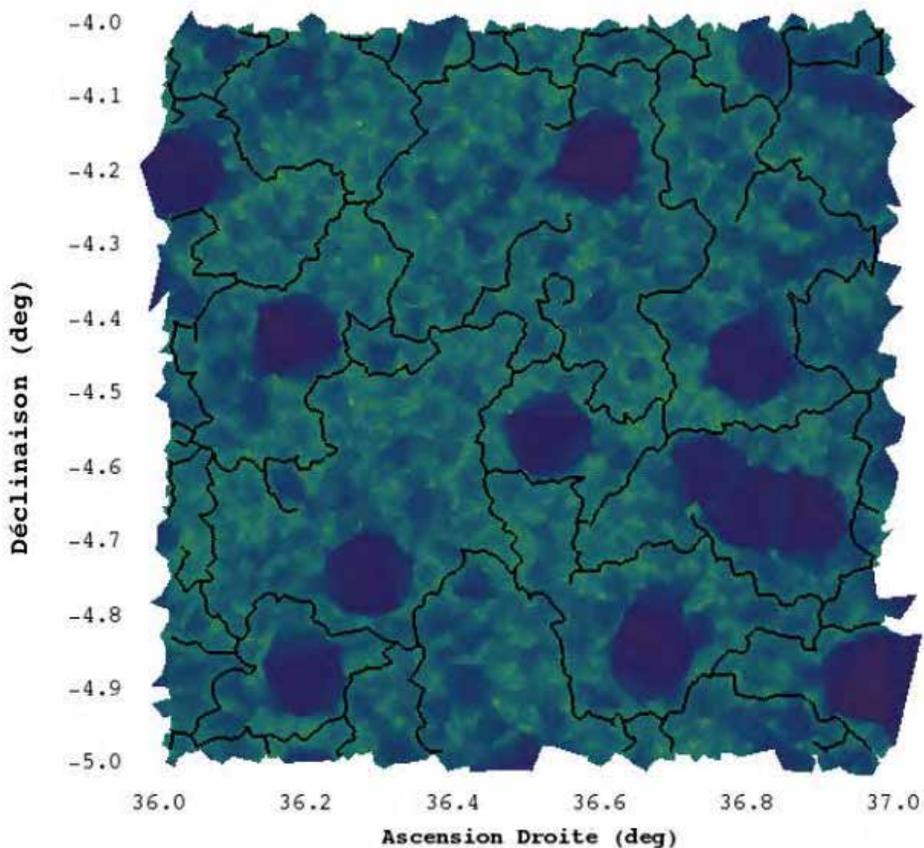
3. TESSELLATION

Une tessellation (ou pavage) est une partition de l'espace par un ensemble fini d'éléments (les tuiles). Ce pavage peut être régulier ou non. Un exemple simple en deux dimensions serait le carrelage que vous avez dans votre cuisine. Il s'agit d'une tessellation de votre cuisine avec un motif donné, chaque carreau étant une tuile.

La tessellation de Delaunay s'obtient à partir d'une distribution discrète de points. En deux dimensions, ces points sont reliés entre eux en formant des triangles de taille variable. Chaque triangle représente une tuile du pavage (voir figure).



8. Carte de densité du champ Deep 1 du CFHTLS obtenue par tessellation de Delaunay. On voit par rapport à la figure 7 que la résolution spatiale est améliorée, ce qui permet une reconstruction plus précise de la structure filamentaire.



Pour une distribution de galaxies, certaines zones sont plus denses que d'autres. C'est-à-dire que les galaxies sont plus proches les unes des autres dans ces régions denses. Les triangles seront alors plus petits comparativement aux zones avec peu de galaxies. Cette propriété de la tessellation de Delaunay en fait un bon estimateur de la densité de galaxies.

← Tessellation de Delaunay pour une distribution de points. Le code couleur représente la densité locale que l'on peut associer à ce pavage.

La prochaine étape va être d'utiliser un estimateur de la densité plus robuste, la tessellation de Delaunay (voir encadré 3). Cela permettra de tracer plus précisément la structure filamentaire dans les tranches de décalage spectral et d'étudier les propriétés des galaxies ayant une forte probabilité d'appartenir aux filaments cosmiques.

CONCLUSIONS

Grâce aux grands relevés en imagerie profonde multi-bandes à grand champ, le nombre d'amas de galaxies connu a beaucoup augmenté ces dernières années, permettant toutes sortes d'études statistiques, en particulier sur les propriétés des fonctions de luminosité des galaxies dans les amas. Le satellite *Euclid*, dont le lancement est prévu en 2021, devrait détecter environ 100 000 amas, ce qui ouvrira de nouvelles perspectives dans l'étude de ces objets, en particulier à des décalages spectraux plus grands que ceux actuellement atteints. On pourra alors également utiliser les méthodes de détection de filaments de galaxies présentées ici, pour étudier statistiquement comment les amas sont connectés à la toile cosmique. ■