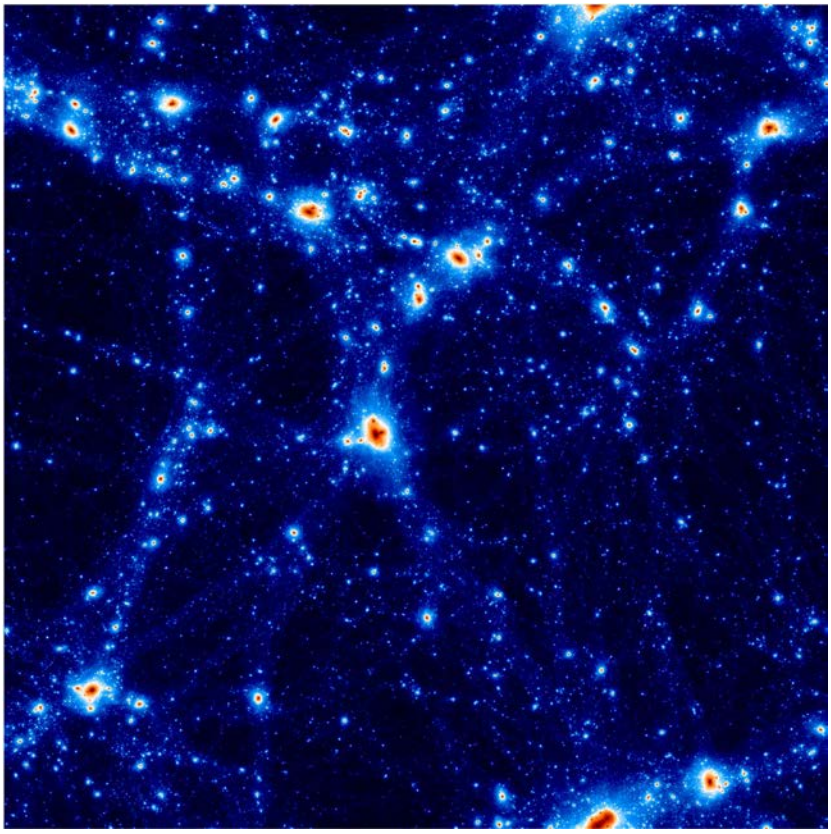
DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

LES CLÉS DE L'ÉVOLUTION DES GALAXIES

Vendredi 7 juin 2013



DOSSIER DE PRESSE

Contact Presse : CEA / Service Information-Media

Coline Verneau | T. +33 (0)1 64 50 14 88 | P. +33 (0)6 75 92 06 52
coline.verneau@cea.fr

Nicolas Tilly | T. +33 (0)1 64 50 17 16 | P. +33 (0)6 82 47 39 85
nicolas.tilly@cea.fr

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Direction de la Communication | Service Information-Média
91191 Gif-sur-Yvette Cedex | T. +33 (0)1 64 50 20 11 | F. +33 (0)1 64 50 28 92
Établissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019

SOMMAIRE

INTRODUCTION **3**

STRUCTURE DES GALAXIES **4**

Bestiaire des galaxies : le classement de Hubble ***4***

Nouvelles observations : (re-)découvrir l'Univers proche ***5***

L'archéologie galactique ***6***

Changements dans notre comprehension : la fusion ***7***

VIE DES GALAXIES : LA FORMATION D'ÉTOILES **9**

Mesurer la formation d'étoiles dans les galaxies lointaines ***9***

Similitudes entre galaxies proches et lointaines ***9***

L'impact des fusions galactiques remis en cause ***10***

EVOLUTION DES GALAXIES **12**

Un modèle théorique unique au monde ***12***

Une vision future des galaxies ***14***

Simulations numériques ***15***

Formation stellaire dans la Voie Lactée 15

Croissance des trous noirs 16

Collision : le choc des galaxies des Antennes 17

ANNEXES **20**

Les grands programmes et les outils majeurs de recherche en astrophysique ***21***

Présentation GENCI ***24***

INTRODUCTION

Âgé d'environ 13,8 milliards d'années, l'Univers serait composé à 4,8% de matière ordinaire (planète, étoile, gaz, etc.) et à 25,8% de matière non visible (le reste constitue l'« énergie noire »). Cette matière non visible, appelée « matière noire », constituerait la toile cosmique sur laquelle les galaxies sont dispersées, formant comme des gouttes d'eau sur une toile d'araignée. Il existerait plus de 200 milliards de galaxies dans l'Univers observable. Ces structures super-massives composées d'étoiles, de poussières et de gaz interstellaire sont en perpétuel mouvement. Isolées, en groupe ou en amas, les galaxies peuvent avoir des interactions avec le milieu cosmique et les objets qui les entourent. Selon les régions dans lesquelles elles se trouvent, elles peuvent se rapprocher les unes des autres au sein d'un groupe et peuvent même, pour certaines, jouer le rôle de satellite en orbite autour de consœurs plus massives. Les galaxies se distinguent par leur forme, leur masse, leur âge mais également leur taux de formation d'étoiles. En cosmologie, les chercheurs étudient les galaxies réparties en deux grandes populations, correspondant à deux grandes périodes d'évolution de l'Univers :

- les galaxies lointaines, localisées dans l'Univers lointain (ou jeune), période proche du Big Bang et de la naissance de l'Univers ;
- les galaxies proches, localisées dans l'Univers local (ou actuel), période actuelle dans laquelle notre galaxie, la Voie Lactée, évolue.

Jusqu'à présent, de nombreux phénomènes et principes physiques restaient inexpliqués en cosmologie. Plusieurs hypothèses étaient avancées pour décrire notamment les modes de formation stellaire au sein des galaxies, et pour expliquer l'évolution de ces dernières au cours du temps.

Au sein du Service d'Astrophysique (SAp) du CEA/Irfu, également Unité Mixte « Laboratoire d'Astrophysique AIM Paris-Saclay » (CEA/CNRS/Université Paris Diderot), les équipes du Laboratoire Cosmologie et Evolution des Galaxies (LCEG) ont développé un modèle théorique de l'évolution des galaxies unique au monde. Ce travail est le fruit de nombreuses années de recherche et d'analyse à partir de toutes les données obtenues sur l'Univers proche et l'Univers lointain par les grands instruments et télescopes du monde entier. En parallèle, et de manière à corréler certaines observations et données théoriques, les chercheurs ont également réalisé des simulations numériques « haute définition » (2D et 3D) inédites apportant des éléments déterminants dans la compréhension des galaxies. Ces résultats donnent désormais la possibilité de retracer l'histoire des galaxies, et de décrire leur évolution dans le passé et le présent.

STRUCTURE DES GALAXIES

L'observation des galaxies proches a permis aux astrophysiciens de dresser un classement des galaxies en fonction de leurs critères morphologiques (taille, forme) à partir de 1925. Cette classification est désormais remise en cause, avec l'obtention de nouvelles images, plus précises (ou « profondes »), de ces galaxies proches. Ces nouveaux résultats ont été obtenus grâce aux outils et méthodologies développés par les astrophysiciens, ayant mobilisé le savoir-faire des ingénieurs-chercheurs du CEA, dans le cadre de grands programmes internationaux.

BESTIAIRE DES GALAXIES : LE CLASSEMENT DE HUBBLE

Jusqu'à présent, une galaxie se classait selon les critères suivants : sa taille, sa masse, sa forme, et sa population stellaire. Ces critères intéressent particulièrement les astrophysiciens, car ils reflètent l'activité qui règne au sein d'une galaxie.

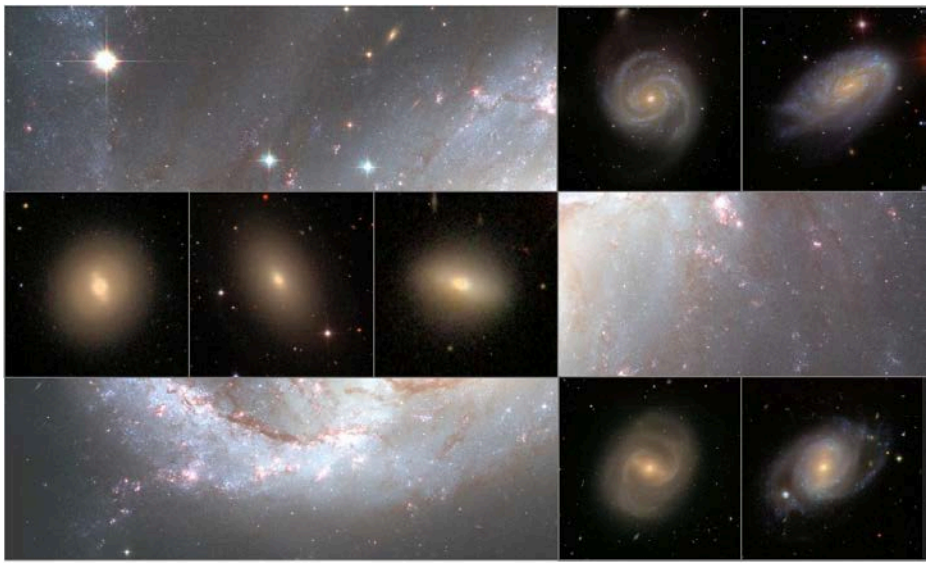


Figure 1 : séquence de Hubble, telle que vue à la profondeur d'images classiques (sondage SDSS) © SDSS/HST

- Galaxies elliptiques : Les galaxies elliptiques sont massives, sans « bras », contenant une population stellaire plutôt âgée. Ces galaxies sont dites « mortes », car elles ne forment que très peu d'étoiles, du fait notamment d'un milieu assez pauvre en gaz.
- Galaxies spirales : Les galaxies spirales sont de tailles intermédiaires, munies de « bras », riches en gaz et qui forment des étoiles à un rythme régulier.

D'autres types de galaxies particulières ne sont pas répertoriés dans ce classement. Les galaxies naines, par exemple, sont de taille et de masse beaucoup plus modestes que les autres galaxies (différence d'un facteur 100 environ), et sont de loin les plus nombreuses présentes dans l'Univers (au moins dix fois plus). D'autres galaxies présentent une morphologie perturbée (formes irrégulières), et montrent généralement un taux de formation d'étoiles disproportionnés (galaxies à flambées d'étoiles ou *starbursts*).

NOUVELLES OBSERVATIONS : (RE-)DÉCOUVRIR L'UNIVERS PROCHE

Avec l'apport de caméras géantes comme l'instrument MegaCam, conçue et réalisée au CEA et installé sur l'observatoire CFHT[1] à Hawaii, une analyse ultra-profonde de ces galaxies proches a pu être menée. Elle montre que ces méthodes de classification des galaxies ne semblent pas correspondre à la réalité.

260 galaxies massives proches (150 millions d'années-lumière environ) ont ainsi été observées plus attentivement dans le cadre du programme Atlas3D[2], pour comprendre comment elles s'étaient formées, pourquoi elles étaient différentes, et comment elles évoluaient. Ont ainsi été découvertes des structures auparavant invisibles, dites « structures à faible brillance ».

Ces structures, de par leur forme ou leur teneur en matière, remettent en cause les critères de distinction jusque-là employés pour classer les galaxies. Grâce au gain en sensibilité de l'observation ultra-profonde, les astrophysiciens ont découvert que certaines galaxies « elliptiques » présentent des structures spiralées, ou des régions riches en étoiles jeunes ; d'autres présentent des structures exotiques…des nuages de matière qui n'avaient pu être détectés jusque-là, car très faiblement brillants.

L'existence de ces structures remet en cause les critères jusque-là utilisés pour classer les galaxies les unes par rapport aux autres, car cette morphologie est beaucoup plus complexe qu'imaginé auparavant. De plus, elle semble pouvoir évoluer dans le temps, dépendant des événements rencontrés par une galaxie au cours de son existence.

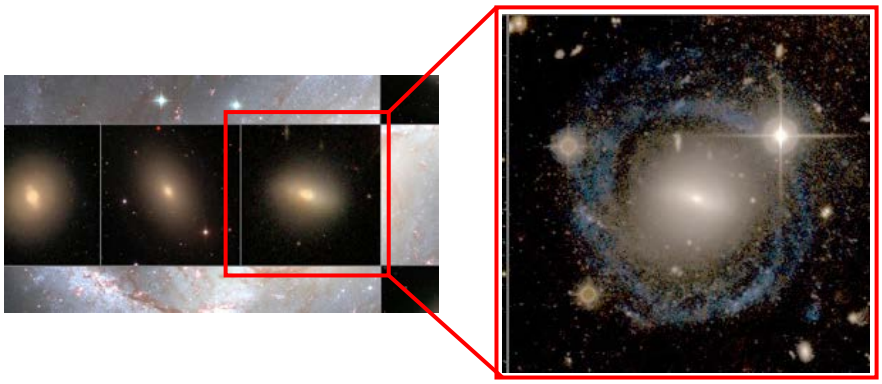


Figure 2 : Nouvelle observation ultra-profonde d'une galaxie proche, classée jusqu'à présent comme elliptique par les astrophysiciens. Cette observation a permis de préciser la zone « floue » observée auparavant autour de cette galaxie, et de mettre à jour des structures invisibles jusque-là : présence de structures spiralées autour d'elle et de zones de formation d'étoiles (en bleu)… Ces caractéristiques sont habituellement absentes du profil des galaxies elliptiques. © Duc/Cuillandre/CFHT/HST

[1] Référence Annexes p.21
[2] Référence Annexes p.21

L'ARCHÉOLOGIE GALACTIQUE : POUR REMONTER L'HISTOIRE RÉCENTE DE L'UNIVERS PROCHE

Bien qu'elle ne soit donc plus un facteur-clé du typage des galaxies, la morphologie d'une galaxie devient un paramètre révélateur de son vécu, de sa formation et de son évolution. En repérant ces « structures à faible brillance », vestiges des événements passés, les astrophysiciens sont capables de retracer l'histoire récente (jusqu'à cinq milliards d'années dans le passé) des galaxies proches de la Voie Lactée : c'est « l'archéologie galactique ».

Selon les propriétés des « structures à faible brillance » observées (formes, compositions), ils peuvent retracer les événements survenus dans le passé proche d'une galaxie, grâce notamment à deux types de structures :

- des « queues de marée » : sortes de « traînées » de matière (étoiles et gaz), qui se forment du fait des forces de marée (gravité) s'exerçant entre deux galaxies proches de fusionner ;
- des « coquilles » : gerbes de matière provoquées par des collisions frontales et violentes de galaxies.

Peu lumineuses car peu denses, et donc détruites relativement rapidement (jusqu'à trois milliards d'années), ces « structures fines » sont ainsi de véritables témoins des événements de fusions galactiques passés. Elles permettent de deviner les protagonistes et le déroulé de l'événement de fusion donnant naissance aux galaxies qu'on observe aujourd'hui, et ainsi savoir quelles galaxies ont fusionné et comment.

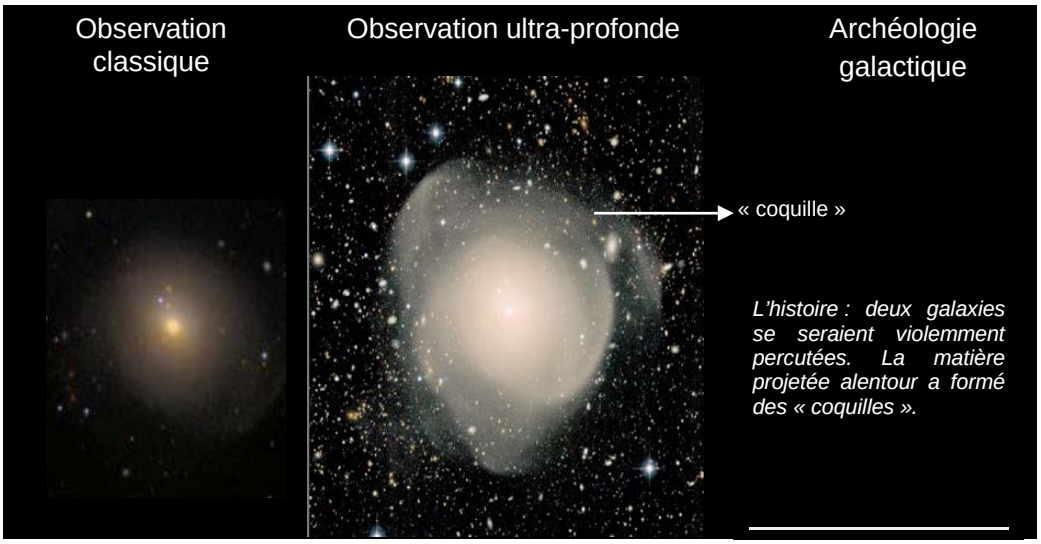


Figure 3 : Découverte de structures fines, vestiges d'une collision galactique. L'analyse de ces structures permet aux astrophysiciens de retracer l'événement à l'origine de cette galaxie. (crédits : image de gauche © SDSS/HST / *image au centre* © Duc/Cuillandre/Coleum/CFHT*)*

CHANGEMENTS DANS NOTRE COMPREHENSION DE LA FORMATION GALACTIQUE : LA FUSION

La fusion de galaxies serait donc un phénomène important pour expliquer leur croissance. Ce phénomène entraine la production de toutes sortes de structures fines, telles celles évoquées plus haut, mais aussi s'accompagnent d'autres phénomènes, tels que des flambées de formation stellaire ou le réveil de l'activité de trous noirs.

Plusieurs types de fusions ont été analysés, selon la masse, le type, l'angle et la vitesse de croisement des galaxies impliquées :

- Fusion suivie de flambée de formation stellaire (*starburst*) : au moins une des galaxies était riche en gaz ;
- Fusion sans flambée de formation stellaire : les galaxies étaient pauvres en gaz ;
- Fusion mineure : rapport d'un facteur 100 entre les masses des deux galaxies (l'une était beaucoup plus grosse que l'autre) ;
- Fusion majeure : les galaxies étaient toutes deux massives, d'un facteur assez proche (1/3 environ).

Pour celles ne présentant pas de « traces » de fusion (on ne détecte toujours pas de « structures à faible brillance »), deux possibilités demeurent : soit la fusion est trop ancienne, et les structures fines ont été détruites au cours du temps, ne laissant aucun témoignage de l'événement ; soit elle ne provient pas d'un événement de fusion. Dans ce dernier cas l'étude de la dynamique de formation stellaire au sein de la galaxie pourra apporter d'autres enseignements.

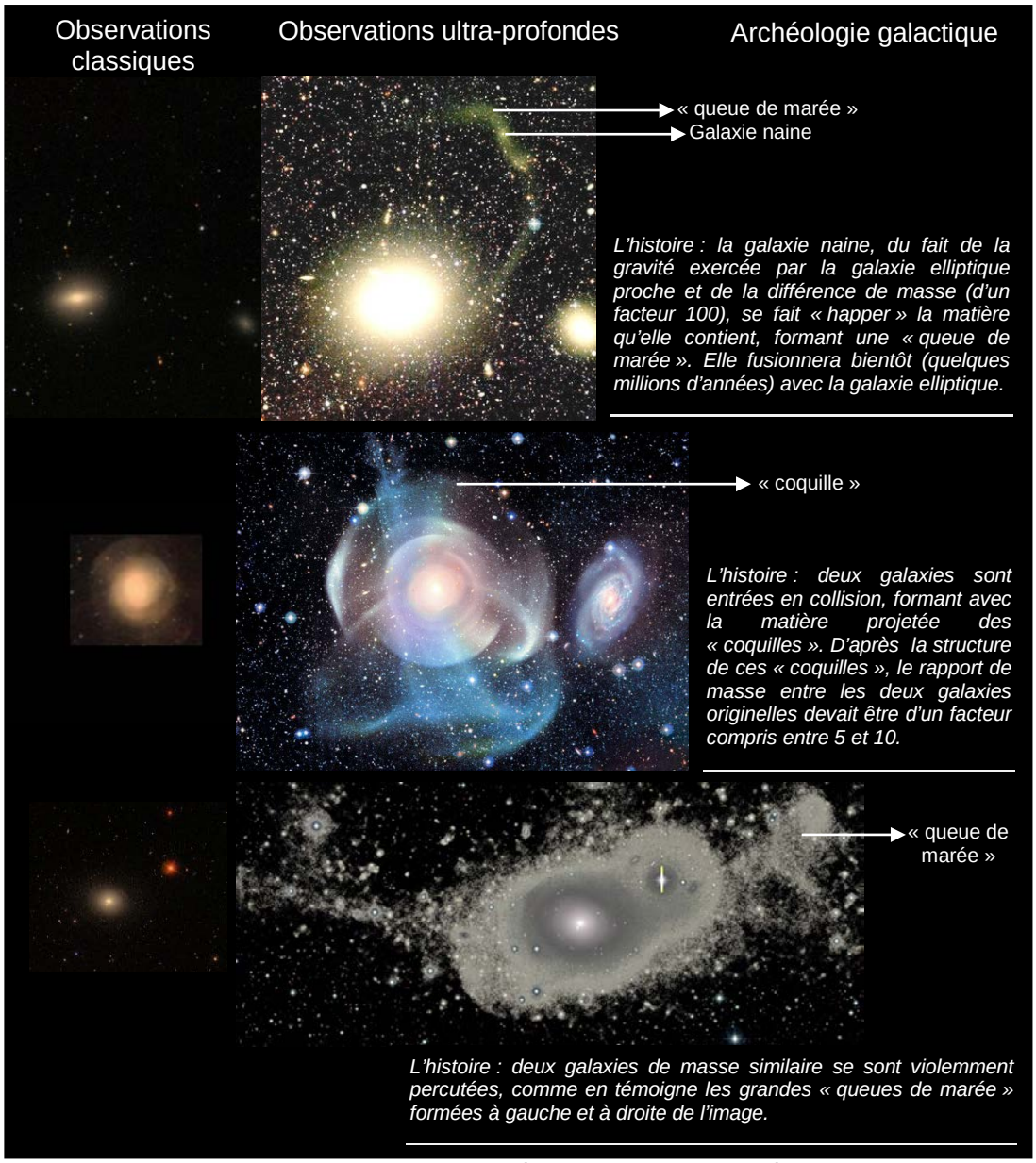


Figure 4 : L'imagerie ultra-profonde et l'archéologie galactique. (crédits : images de gauche © SDSS/HST / *images au centre* © Duc/Cuillandre/Coleum/CFHT*)*

Même si le classement morphologique des galaxies perd donc de son intérêt au vu de ces nouveaux résultats, l'étude de leur forme permet de comprendre et retracer leur histoire récente. Elles complètent ainsi les études sur leur taux de formation stellaire.

VIE DES GALAXIES : LA FORMATION D'ÉTOILES

Ne pouvant « disséquer » les galaxies lointaines, et donc les étudier avec la même résolution que les galaxies proches, les astrophysiciens se basent sur un processus physique important dans la vie d'une galaxie : la formation d'étoiles. Ce phénomène permet aux chercheurs d'étudier comment une galaxie acquiert sa masse, sa luminosité, et comment celles-ci évoluent au cours du temps.

MESURER LA FORMATION D'ÉTOILES DANS LES GALAXIES LOINTAINES

Munis de nouveaux outils, leur permettant de réaliser les sondages les plus profonds du ciel à ce jour, les scientifiques ont pu remonter 12 milliards d'années dans l'histoire de l'Univers, et comparer la vie des galaxies alors que l'Univers n'avait « que » 1,8 milliard d'années d'existence (programme GOODS[3], figure 5).

Les galaxies lointaines sont beaucoup plus lumineuses (forment plus d'étoiles) que les galaxies proches. Pour expliquer ce phénomène, les astrophysiciens suggéraient que l'histoire de la formation des étoiles au sein des galaxies était chaotique : les galaxies lointaines, vivant dans un Univers jeune plus dense qu'aujourd'hui, devaient être amenées à entrer en collision plus souvent, à fusionner, donnant naissance à beaucoup d'étoiles à un rythme effréné.

PREMIÈRE SURPRISE : SIMILITUDES ENTRE GALAXIES PROCHES ET LOINTAINES

Les récentes observations montrent au contraire que la formation d'étoiles est un phénomène plutôt continu et universel. Dans l'Univers jeune comme dans l'Univers actuel, les étoiles naissent de la même façon, continuellement, et ce depuis dix milliards d'années.

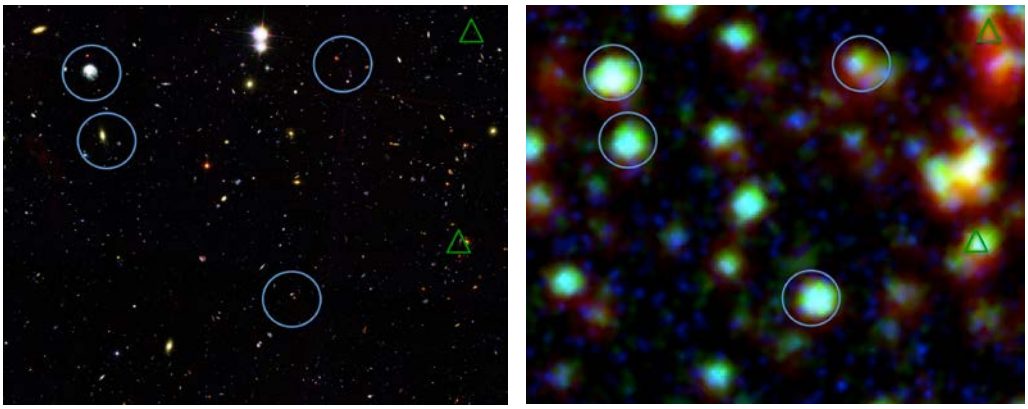


Figure 5 : Sondage profond du ciel selon Hubble (à gauche) et Herschel (à droite). L'intensité lumineuse des galaxies détectées par Herschel dépend de leur rythme de formation d'étoiles. Ce rythme semble être similaire dans la majorité des galaxies (ronds bleus), même si certains cas particuliers (triangles verts) ressortent. (crédits : image de gauche © NASA/ESA / *image de droite © CEA)*

[3] *Great observatories origins deep survey*, cf annexes

Une corrélation a ainsi émergé de ces résultats, reliant la masse des galaxies à leur luminosité – et donc à la formation stellaire : c'est la « séquence principale des galaxies » (figure 6). Environ 85% des galaxies suivent cette séquence. Les 15% restant font figures d'exceptions : ces galaxies – les *starbursts* ou galaxies à flambées d'étoiles – forment beaucoup d'étoiles à un rythme effréné, sans que le mécanisme universel de formation d'étoiles puisse l'expliquer.

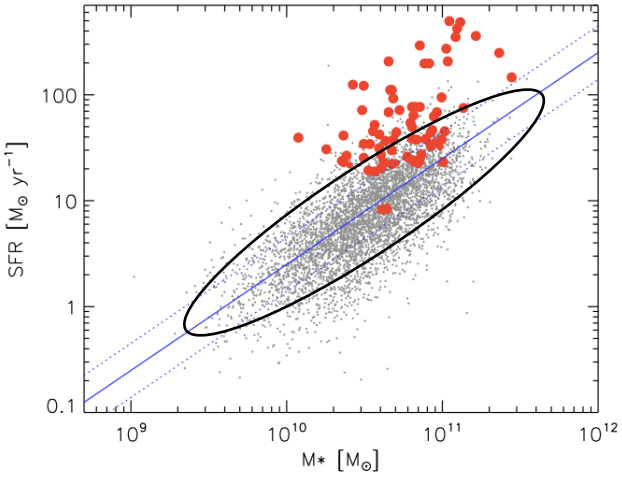


Figure 6 : la séquence principale des galaxies (zone entourée en noir où chaque point représente une galaxie). Les starbursts *(en rouge) forment plus d'étoiles qu'attendu pour leur masse (SFR = taux de formation d'étoiles).*

L'IMPACT DES FUSIONS GALACTIQUES REMIS EN CAUSE

Cette universalité du phénomène de formation stellaire remet donc en cause la vision initiale des astrophysiciens : des fusions entre galaxies avaient bien lieu dans l'Univers jeune, mais elles ne sont pas à l'origine du rythme élevé de formation d'étoiles observé. Ces événements ponctuels s'ajoutent de façon secondaire à un phénomène continu et universel de formation d'étoiles, homogène au cours du temps.

ZOOM : Détecter si la lumière provient d'une fusion de galaxie

Lorsque deux galaxies fusionnent, elles entraînent la destruction des molécules complexes formées au cours du temps dans leurs nuages moléculaires. En résulte une « signature spectrale » différente selon que les étoiles formées ont pour origine une collision de galaxie ou un phénomène continu. Les relevés de Herschel, qui détecte cette signature spectrale de la lumière, ont ainsi démontré que les fusions de galaxies n'étaient pas le principal mécanisme de formation d'étoiles (figure 6).

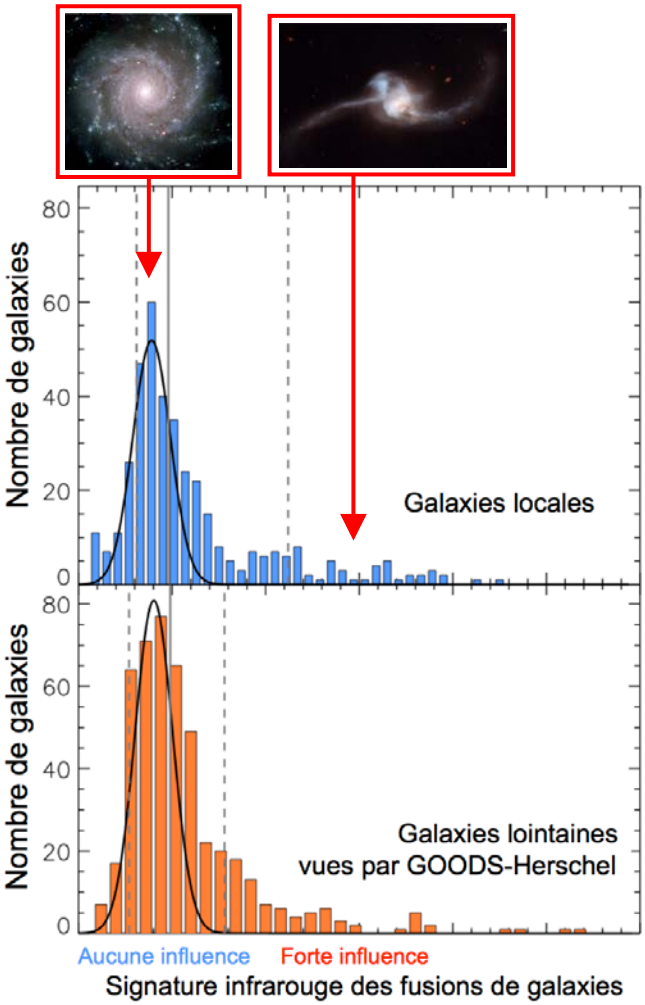


Figure 7 : Répartition de l'influence des événements de fusions galactiques sur les galaxies proches (graphique bleu) et lointaines (graphique orange). Dans la lumière émise par les populations de galaxies à la gauche du graphique, il n'y a pas de signature d'événements de fusions, contrairement aux populations à la droite du graphique. Cette répartition est la même, que ce soit dans l'Univers actuel ou l'Univers jeune : les phénomènes de fusions galactiques n'étaient pas plus fréquents dans la jeunesse de l'Univers qu'actuellement.

Désormais les chercheurs seraient donc capables de reconstituer l'évolution des galaxies, reste à savoir s'il serait possible d'anticiper certaines observations ou certains événements marquants de la vie d'une galaxie.

ÉVOLUTION DES GALAXIES

Selon les observations recueillies grâce aux divers instruments et télescopes du monde et aux travaux menés en « archéologie galactique », les galaxies dans l'Univers local, ainsi que notre Voie Lactée, forment de moins en moins d'étoiles. Dans l'Univers jeune, ou Univers lointain, par contre, les galaxies formaient beaucoup plus d'étoiles. En effet, dans les galaxies lointaines qu'on observe à une époque reculée (moins dix milliards d'années) quand l'activité de formation stellaire dans l'Univers était à son maximum, le gaz moléculaire indispensable à la formation d'étoiles représenterait 50 à 80% de la masse de la galaxie. Dans les galaxies proches comme la Voie Lactée actuellement, le gaz moléculaire ne représenterait que 5% de la masse de la galaxie.

Mais pourquoi les galaxies lointaines présentes dans l'Univers jeune produisent-elles plus d'étoiles ?

Est-il possible de décrire l'évolution des galaxies actives dans l'ensemble de l'Univers ?

ZOOM : Comment mesurer l'éloignement des galaxies

Pour estimer la distance qui sépare les astrophysiciens d'une galaxie étudiée, ceux-ci mesurent le « décalage vers le rouge », (ou *redshift*). Par définition, il s'agit de l'augmentation de la longueur d'onde de la lumière causée par le mouvement de la source lumineuse qui s'éloigne de l'observateur.

De manière simplifiée, plus le décalage vers le rouge est élevé, plus la galaxie est lointaine, c'est-à-dire située dans l'Univers jeune (loin de notre galaxie). La Voie Lactée est située dans l'Univers proche ou local, son décalage vers le rouge équivaut à 0.

Remarque : les galaxies les plus lointaines connues se trouvent à un décalage vers le rouge d'environ 10, donc dans l'Univers beaucoup plus jeune. Un décalage vers le rouge de 2 correspond à l'époque il y a environ dix milliards d'années où l'activité de formation stellaire dans les galaxies présentait un «pic» important. Plus précisément, dans un volume cosmique donné, le nombre d'étoiles formées était plus important qu'avant ou après dans l'histoire de l'Univers.

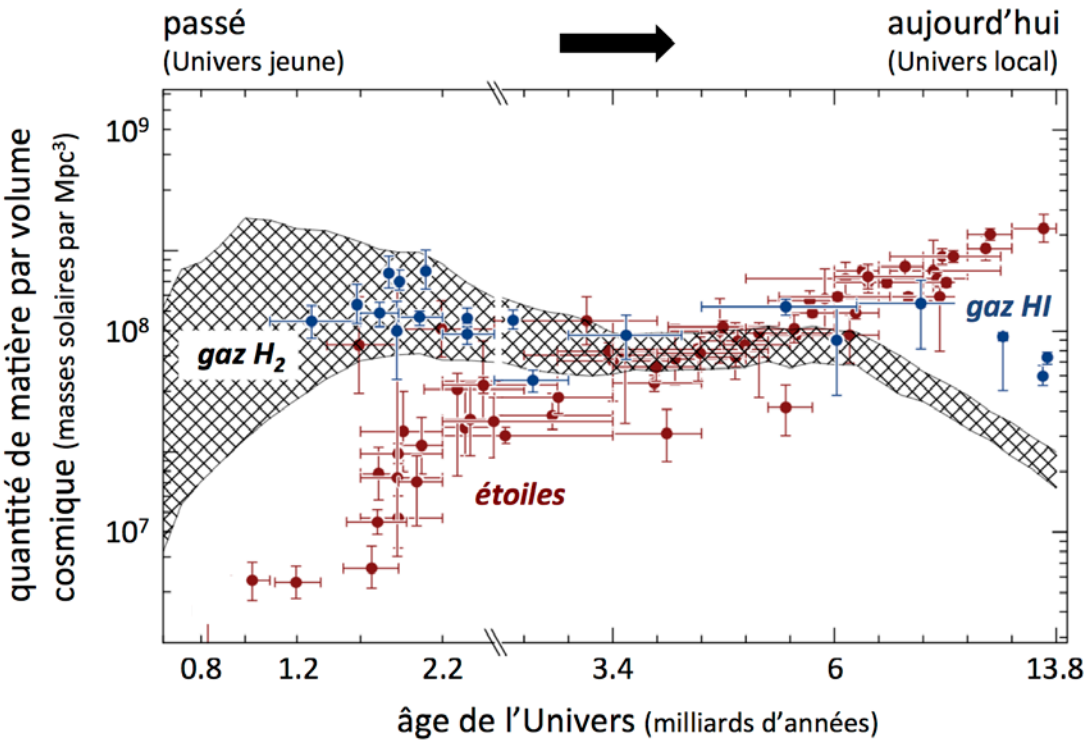
UN MODÈLE THÉORIQUE UNIQUE AU MONDE

Les astrophysiciens ont voulu comprendre et décrire de façon globale l'évolution des galaxies actives. Pour mener à bien ce travail, ils se sont basés sur le fait que les galaxies forment des étoiles suivant des lois d'échelle bien définies – c'est à dire par exemple qu'il existe un lien entre la masse d'une galaxie et son taux de formation stellaire – ce qui qui suggère une « régularité » sous-jacente à l'évolution de cette population. De récentes études menées notamment par des chercheurs du SAp ont établi ce lien direct entre la masse d'une galaxie et le taux de formation stellaire en son sein (SFR)[4].

Afin d'appréhender au mieux ces lois d'échelle, ils ont dans un premier temps rassemblé toutes les observations collectées sur l'Univers proche et l'Univers lointain par les différents instruments et télescopes à disposition dans le monde tels que Herschel (programme GOODS), Planck ou encore Alma.

[4] http://adsabs.harvard.edu/abs/2013arXiv1304.3936B

Puis ils ont unifié ces données afin d'obtenir une description mathématique unique de l'évolution des galaxies de l'Univers lointain à l'Univers proche, capable de décrire leur propriétés fondamentales – par exemple leur masse, leur taux de formation stellaire, et leur contenu en gaz[5]. Ce modèle théorique, qui constitue une première mondiale, permet alors de déduire l'évolution typique des galaxies actives, quels que soient leur



masse, taille et âge.

Figure 8 : Évolution du contenu en gaz moléculaire (H_2 ; région "quadrillée"), à travers les derniers 13 milliards d'années de l'Univers, déduite de façon indirecte avec le modèle théorique des chercheurs du SAp. La croissance des galaxies (illustrée par l'augmentation continue de la quantité des étoiles, de l'Univers jeune jusqu'à aujourd'hui ; points en rouge) est alimentée par le gaz moléculaire qui est le carburant pour la formation des étoiles. Par conséquent, le gaz moléculaire devient de plus en plus rare, à mesure que l'Univers vieillit. Le contenu en gaz atomique (HI ; points en bleu) serait en revanche relativement constant.

Deux populations : galaxies normales et galaxies à flambées d'étoiles

Pour réaliser un modèle aussi précis et valable sur l'ensemble des galaxies actives de l'Univers, les chercheurs ont donc dû travailler à partir des deux modes de formation stellaire existants. Comme cela a été mentionné précédemment, les chercheurs distinguent deux modes de formation d'étoiles : celui des galaxies « normales » et celui des galaxies à flambées d'étoiles (ou *starbursts)*.

Ce qui différencie ces galaxies c'est leur mode de formation d'étoiles. Les galaxies normales produisent leurs étoiles de manière continue tandis que les galaxies à

[5] *An estimate of the molecular gas history of the Universe through CO luminosity functions and H^2 mass function evolution*, M.T. Sargent, E. Daddi, à paraître.

flambées d'étoiles forment leurs étoiles de façon violente, souvent dans un laps de temps très court et en grande quantité.

De ce fait, le modèle théorique de description de l'évolution des galaxies développées par les astrophysiciens du SAp est unique car il est basé sur notre compréhension de ces deux populations conjointes.

UNE VISION FUTURE DES GALAXIES

Grâce à l'universalité des propriétés des galaxies actives à travers toutes les ères cosmiques et grâce au modèle théorique développé au SAp pour décrire leur évolution, les chercheurs seront capables d'anticiper certaines observations qui seront bientôt recueillies par les nouveaux grands télescopes (ALMA, NOEMA, JVLA, etc.) et qui permettront d'étudier plusieurs propriétés des galaxies qui sont à présent peu connues, par exemple la quantité de gaz moléculaire présente.

Il serait également possible d'établir un lien direct entre la composante lumineuse des galaxies et le réseau de matière noire qui constitue la toile cosmique de l'Univers. Cette relation aidera aussi les chercheurs à mieux comprendre, et parfois anticiper la répartition des galaxies dans l'Univers.

Pour les galaxies lointaines dont le contenu en gaz a déjà été étudié, on sait désormais qu'elles sont plus actives à cause de la présence d'une quantité de gaz moléculaire beaucoup plus élevée que dans les galaxies proches.

Un deuxième facteur, moins important que la quantité de gaz mesurée dans les galaxies mais intéressant à mentionner, contribuerait aussi à l'activité plus élevée des galaxies lointaines, par rapport aux galaxies proches comme la Voie Lactée : il s'agit de l'efficacité de conversion du gaz en étoile. Ces galaxies produisent un peu plus d'étoiles par "amas" de gaz car les mécanismes de formation d'étoiles seraient légèrement plus efficaces dans leur milieu interstellaire, plus turbulent.

Mais alors quel phénomène pourrait expliquer cette efficacité légèrement plus importante chez les galaxies lointaines ?

Et quel mécanisme serait à l'origine de la diminution du taux de formation d'étoiles dans les galaxies proches comme la nôtre ?

Aujourd'hui les simulations numériques constituent l'outil le plus adapté pour comprendre pourquoi certaines galaxies de l'Univers, comme notre Voie Lactée, forment de moins en moins d'étoiles et pourquoi d'autres comme les galaxies lointaines en forment plus. Ces nouvelles méthodes permettent également de mieux appréhender le rôle de certains phénomènes majeurs tels que les mouvements de turbulence au sein des galaxies et leur impact sur l'évolution de ces dernières.

SIMULATIONS NUMÉRIQUES

Les simulations numériques « haute définition » constituent une méthode déterminante afin de comprendre pourquoi la majorité des galaxies, dont notre Voie Lactée, forment leurs étoiles avec une certaine homogénéité, tandis qu'une autre population de galaxies, les galaxies à flambées d'étoiles, forment leurs étoiles avec une plus grande efficacité. Grâce aux dernières avancées scientifiques et technologiques dans le domaine, une « nouvelle génération » de simulations permet de décrire, avec précision et sur des galaxies entières, les mécanismes de formation de chaque nuage de gaz moléculaire, de chaque amas d'étoiles, et même de chaque étoile, notamment les étoiles massives connues pour exploser en supernovae.

ZOOM : les simulations numériques

En astrophysique, les simulations numériques permettent d'étudier l'imbrication complexe de processus physiques. Si elles peuvent être réalisées en 3D depuis plus d'une décennie, elles bénéficient depuis quelques années de techniques de visualisation 3D, et de l'augmentation des moyens de calculs grâce aux supercalculateurs "parallèles" (utilisant simultanément de grands nombres de processeurs), à condition toutefois de disposer de codes numériques adaptés à ce calcul parallèle. La dernière génération de supercalculateurs permet de réaliser fréquemment des calculs à l'aide de plusieurs milliers de processeurs simultanément, parfois même quelques dizaines de milliers.

Ces simulations sont les premières à combiner le code RAMSES, code développé au CEA de Saclay, et la puissance des nouveaux supercalculateurs mis à disposition des chercheurs dans le cadre du programme PRACE[6], grâce à la participation de GENCI. La majeure partie des simulations réalisées sont basées sur les analyses des supercalculateurs CURIE et SuperMuc. La résolution peut atteindre une année-lumière voire mieux sur une modélisation de galaxie de type Voie Lactée d'un diamètre de 100.000 années-lumière. Les simulations présentées ici, grâce au calcul parallèle, ont demandé quelques semaines ou mois de calcul "seulement".

Formation stellaire dans la Voie Lactée

Contrairement aux galaxies lointaines, notre galaxie produit peu d'étoiles. Suivant les modèles théoriques existant, une galaxie de l'âge de la Voie Lactée devrait produire environ 50 à 100 étoiles par an. Or, les observations réalisées dans notre galaxie ont montré un taux de formation stellaire équivalent à 1 ou 2 étoiles par an.

C'est en combinant les données fournies par le supercalculateur CURIE, localisé au TGCC à Bruyères-Le-Châtel, et le code RAMSES, que les équipes du SAp ont démontré que le phénomène de turbulence présent au sein des galaxies proches était à l'origine de ce taux de formation relativement bas. La turbulence se matérialise par la présence de gaz qui s'agite dans tous les sens. Cette cascade turbulente exerce une certaine pression qui s'oppose à l'effondrement du gaz moléculaire au sein de la galaxie. Ce dernier n'a alors plus le temps de s'accumuler pour donner naissance à de nouvelles étoiles.

[6] http://www.prace-ri.eu/

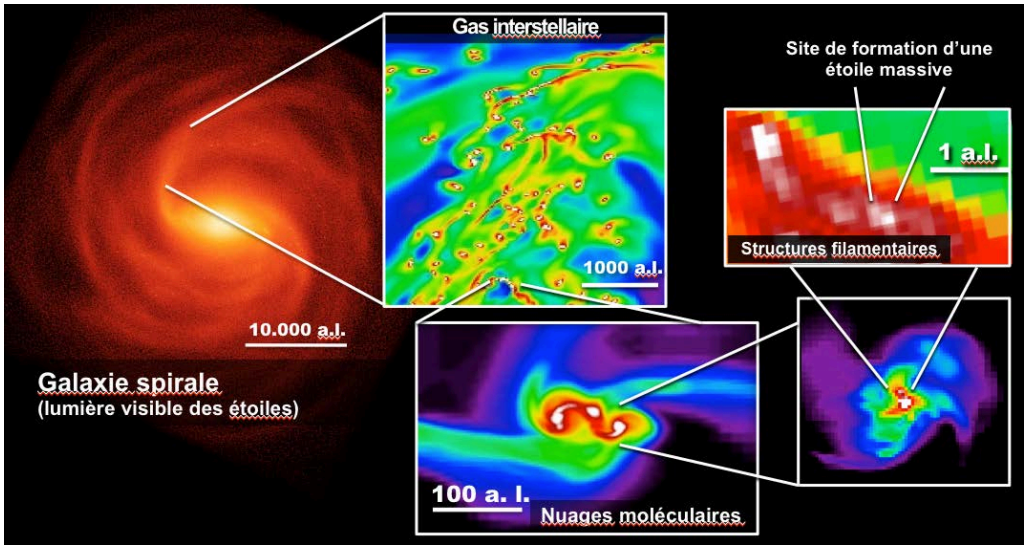


Figure 9 : Structure du gaz interstellaire dans une simulation de la Voie Lactée entière. Chaque région dense (en clair sur l'image) est un nuage moléculaire dans lequel se forment de nouvelles étoiles. © CEA

Il s'agit ici de simulations numériques haute résolution inédites[7] qui ont également permis de développer un outil accessible sur le web et qui permet de progresser en temps réel au cœur même de la Voie Lactée :

http://irfu.cea.fr/Pisp/florent.renaud/mw_large.php

Croissance des trous noirs

Les chercheurs du SAp sont les premiers à avoir utilisé cette « nouvelle génération » de simulations haute définition pour modéliser, de l'échelle galactique à l'échelle filamentaire (formation stellaire), les mécanismes physiques présents au cœur des galaxies.

Ils ont tout d'abord voulu décrire les mécanismes physiques à l'origine de la croissance des trous noirs présents au sein de toute galaxie. Grâce à de récentes simulations numériques, les chercheurs ont découvert que les instabilités gravitationnelles constituaient le mécanisme d'alimentation des trous noirs[8]. En effet, les trous noirs sont généralement localisés au centre d'une galaxie. Pour qu'un trou noir puisse être alimenté en matière et grandisse, le gaz présent dans la galaxie doit converger vers le centre de celle-ci. Dans les galaxies lointaines, on observe une fragmentation qui est due à des instabilités gravitationnelles. Une partie de la matière se met alors à tourner très vite mais parallèlement une autre partie, notamment du gaz moléculaire, tourne moins vite et tombe alors au centre de la galaxie, ce qui permet d'alimenter le trou noir présent en son centre.

---

[7] *A sub-parsec resolution simulation of the Milky Way: Global structure of the ISM and properties of molecular clouds*, Renaud et al, à paraître.
[8] *Black Hole growth and AGN obscuration by instability- driven inflows in high-redshift disk galaxies fed by cold streams*, F. Bournaud, A. Dekel, R. Teyssier, M. Cacciato, E. Daddi, S. Juneau, F. Shankar (2011) Astrophysical Journal Letters, vol. 741, L33, 10 novembre 2011.

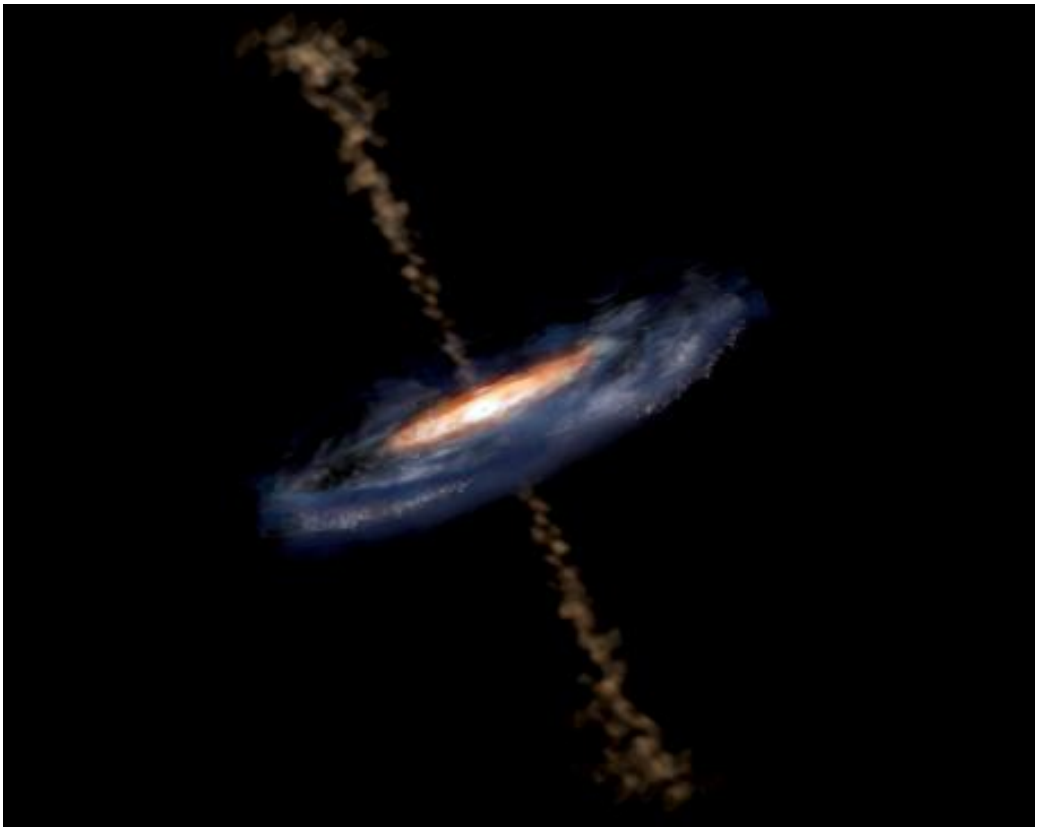


Figure 10 : Vue d'artiste d'un "noyau actif" de galaxies. La région centrale est occupée par un trou noir massif. Crédit A. Simonnet, Sonoma State University © CEA

Collision : le choc des galaxies des antennes

C'est en utilisant la simulation numérique haute définition que les chercheurs du SAp ont pour la première fois réussi à modéliser une des plus impressionnantes collisions entre galaxies dans l'Univers local[9]. Baptisée « collision des Antennes », cette rencontre entre deux galaxies spirales proches localisées dans la constellation du Corbeau montre la formation violente d'étoiles. Plus précisément, les deux galaxies, situées à une distance de 62 millions d'années-lumière de la Terre, sont rentrées en contact en développant deux « queues de marées » (grands bras de gaz) semblables à deux antennes d'insectes.

La simulation haute résolution utilisée par les chercheurs permet de prendre en compte de très petites régions jusqu'à des dimensions de quelques années-lumière seulement. Ils ont alors constaté que des instabilités thermiques et gravitationnelles se produisent dans les disques de gaz lors de la collision. Partout, le gaz s'effondre en une myriade de nuages de gaz froid et dense, chacun développant une formation d'étoiles soutenue, ce qui mène à la formation de super-amas d'étoiles. Cette simulation montre que la flambée de formation d'étoiles n'est pas concentrée mais répandue en de nombreux centres différents. Avec ces simulations haute résolution,

[9] *The Driving Mechanism of Starbursts in Galaxy Mergers, Teyssier, Romain (1,2); Chapon, Damien (1); Bournaud, Frédéric (1), The Astrophysical Journal Letters, Volume 720, Issue 2, pp. L149-L154 (2010)*

on distingue désormais que la formation d'étoiles n'est pas limitée à un centre mais est répartie en une structure étendue et hétérogène. Ces données sont en corrélation avec les images des Antennes obtenues récemment par exemple par Herschel et ALMA.

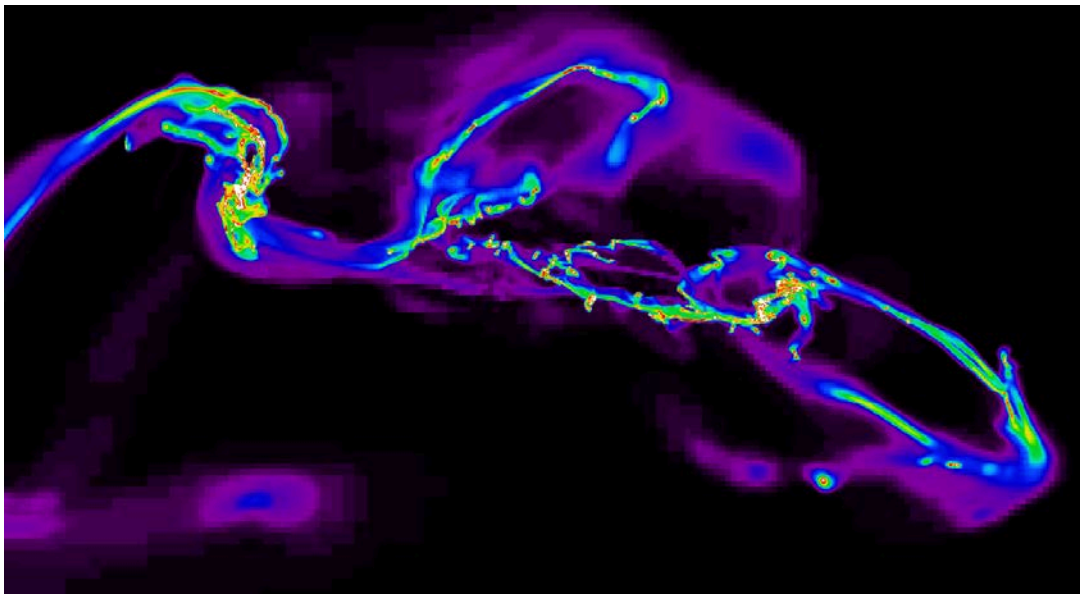


Figure 11 : Simulations de la collision des Antennes : l'image montre la distribution de densité du gaz, devenu très hétérogène et fragmenté à la suite de son agitation turbulente par la collision de galaxies. Cette fragmentation exacerbée du gaz en nuages très denses déclenche une flambée de formation stellaire pendant laquelle le système forme ses étoiles à un rythme jusqu'à 100 fois plus élevé qu'avant l'interaction des galaxies. © CEA

Grâce aux données observationnelles issues des grands télescopes internationaux et grâce à la réalisation de simulations numériques haute définition, les chercheurs du CEA ont réussi à répondre à certaines questions qui restaient jusqu'à alors sans réponse. Leurs méthodes d'analyse telles que « l'archéologie galactique » ont notamment permis de revisiter le classement des galaxies selon Hubble et de retracer l'histoire récente des galaxies proches de la Voie Lactée. Leurs analyses ont ainsi permis de mettre en évidence de nouvelles formes de galaxies et des structures morphologiques auparavant invisibles, vestiges des événements passés.

Les chercheurs ont également montré que dans l'Univers jeune comme dans l'Univers actuel, les étoiles naissent de la même façon, continuellement, et ce depuis dix milliards d'années. Une certaine universalité domine donc la formation d'étoiles au sein des galaxies qui est à présent associée à un phénomène homogène et continu au cours du temps.

De même, la combinaison et l'analyse de l'ensemble des données recueillies par les grands télescopes ont été déterminantes pour le développement d'un modèle théorique unique sur l'évolution des galaxies. Ce modèle mathématique est en corrélation parfaite avec les données observationnelles collectées depuis des dizaines d'années et permet une description précise de l'évolution des galaxies depuis l'Univers lointain jusqu'à nous, l'Univers proche.

En mettant en évidence cette universalité des propriétés des galaxies actives à travers toutes les ères cosmiques, et en élaborant ce modèle théorique et descriptif de l'évolution des galaxies, les astrophysiciens ont désormais la possibilité d'anticiper certaines observations qui seront bientôt collectées par les nouveaux grands télescopes (ALMA, NOEMA, JVLA, etc.) et permettront d'étudier plusieurs propriétés des galaxies qui restent encore inconnues. Les chercheurs seraient également en mesure d'établir un lien direct entre la composante lumineuse des galaxies et le réseau de matière noire qui constitue la toile cosmique de l'Univers. Montrer une telle relation serait essentiel pour la compréhension et l'anticipation de la répartition des galaxies dans l'Univers.

De nouveaux programmes internationaux dans le domaine prennent forme telles que le grand observatoire NOEMA ou le projet Euclid. Les chercheurs du CEA participeront à ces grandes missions de recherche dans le but de percer les tout derniers mystères que cache notre Univers.

Dossier et images accessibles sur le site du Service d'Astrophysique :

http://irfu.cea.fr/Sap/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=actu&id_ast=3306

ANNEXES

LES GRANDS PROGRAMMES ET OUTILS DE RECHERCHE MAJEURS EN ASTROPHYSIQUE **p. 21**

PRÉSENTATION GENCI **p. 24**

LES GRANDS PROGRAMMES ET OUTILS DE RECHERCHE MAJEURS EN ASTROPHYSIQUE

Hubble : En orbite autour de la Terre, le télescope Hubble a été lancé le 24 avril 1990 dans le cadre de la mission scientifique Hubble pilotée par la NASA, en collaboration avec l'Agence spatiale européenne (ESA). Les images et données recueillies grâce à ce télescope ont notamment permis de déterminer l'âge de l'Univers et d'explorer les profondeurs de l'espace, révélant ainsi la présence de phénomènes physiques majeurs. Long de 13,3 m pour un diamètre de 4,3 m, le télescope pèse plus de 11 tonnes. Son optique, de type Cassegrain, a un diamètre de 2,40 m et est équipée de deux caméras photographiques, de deux spectrographes et d'un photomètre.

Plus d'infos sur : http://hubblesite.org/

Planck : Le satellite Planck a été lancé le 14 mai 2009. Ce satellite est constitué d'un télescope, de deux instruments scientifiques (HFI et LFI : *High et Low Frequency Instrument*), et d'un module de service. L'objectif de Planck est de mesurer avec une précision inégalée le rayonnement cosmique fossile ou fond diffus cosmologique, la plus ancienne lumière émise dans l'Univers. En l'observant, Planck a fourni une image de l'Univers tel qu'il était 380 000 ans environ après le Big Bang, il y a 13,7 milliards d'années. Son domaine d'observation premier est les ondes radio (domaine sub-millimétrique).

Plus d'infos sur : www.planck.fr

Herschel : L'observatoire spatial Herschel a été lancé par l'Agence spatiale européenne (ESA), depuis la base de Kourou en Guyane française, le 14 mai 2009. Les observations aux longueurs d'onde de 100µm ont nécessité de refroidir les instruments pratiquement au zéro absolu, soit – 270°C pour empêcher leurs propres émissions de parasiter les relevés. Il a dû également être équipé du plus grand miroir jamais placé en orbite, de deux spectrophotomètres et un spectromètre haute résolution pour réaliser ses relevés. Avec Herschel, l'invisible est devenu une source de lumière.

Plus d'infos sur : http://www.herschel.fr/

GOODS : Le projet GOODS (*Great Observatories Origins Deep Survey* - Sondage Profond des Grands Observatoires sur les Origines) est un programme international d'observation dans toutes les longueurs d'onde de deux portions du ciel baptisées HDF-N (*Hubble deep field - North*) et du CDF-S (*Chandra deep field - South*). Il combine ainsi, dans une même région du ciel, les images les plus profondes du télescope Hubble (forme des galaxies), les observations en lumière infrarouge du satellite Spitzer (formation stellaire) et les observations en lumière visible fournies par les grands télescopes terrestres (mesure des distances des galaxies). L'objectif de ce programme est de retracer l'histoire de la formation et de l'évolution des galaxies.

Plus d'infos sur : http://www.herschel.fr/cea/goods/en/index.php

CFHT : L'observatoire du CFHT abrite le télescope optique et infrarouge de classe mondiale Canada-France-Hawaii de 3,6 mètres de diamètre. L'observatoire est situé à 4200 mètres d'altitude au sommet du Mauna Kea, un volcan endormi situé sur l'île d'Hawaii. Le télescope est entré en opération en 1979. Il est équipé de la caméra géante MegaCam, conçue et réalisée au CEA, permettant un relevé de grandes régions du ciel. La mission du CFHT est d'offrir à la communauté scientifique un télescope polyvalent disposant d'une instrumentation de premier ordre répondant aux besoins scientifiques de ses utilisateurs. Son domaine d'observation se situe dans l'Univers lointain, il y a 9-10 milliards d'années.

Plus d'infos sur : http://www.cfht.hawaii.edu/fr/

MATLAS : Le programme MATLAS (*Mass Assembly of early-Type GaLAxies with their fine Structures*) étudie, à l'aide d'images profondes du ciel (sensibilité importante), les galaxies proches et leur mode de formation. MATLAS utilise notamment les observations issues de l'instrument MegaCam qui équipe le grand télescope Canada-France-Hawaii de l'observatoire du CFHT. Dans le cadre de MATLAS, les chercheurs utilisent une partie des données extraites du relevé Atlas3D (informations sur la dynamique, le gaz et le contenu stellaire) dans le but de comprendre comment les galaxies ont acquis leur forme.

Plus d'infos sur : http://irfu.cea.fr/Projets/matlas/MATLAS/MATLAS.html

PRACE : PRACE (*Partnership for Advanced Computing in Europe*) est un partenariat européen qui vise à installer et promouvoir en Europe une infrastructure de calcul intensif de classe mondiale, de façon à permettre des avancées scientifiques majeures dans les domaines pour lesquels la simulation joue un rôle important. Le but est notamment de permettre l'accès à des heures de calcul sur des super-ordinateurs de très grande puissance, indépendamment du lieu où ils sont situés. PRACE regroupe aujourd'hui six grands calculateurs d'une puissance globale de 15 petaflops, localisés dans quatre pays (Allemagne, Espagne, France et Italie). La machine française, le supercalculateur Curie, est installée et exploitée à Bruyères-le-Châtel (France) au Très Grand Centre de Calcul (TGCC)[10]. Actuellement, 24 pays européens sont membres de l'infrastructure PRACE[11].

Plus d'infos sur : http://www.prace-ri.eu/

ALMA : L'observatoire ALMA (*Atacama Large Millimeter Array*), localisé au Chili, permet d'avoir une observation plus fine de la formation des étoiles, que ce soit dans l'Univers proche ou l'Univers lointain. ALMA a déjà permis de récupérer une vue des galaxies des antennes impossible à obtenir avec les télescopes optique ou à infrarouge. Sa construction complète devrait être achevée dans le courant de l'année 2013. Cet observatoire sera équipé de 66 antennes et la distance entre les antennes sollicitées pourra osciller entre 150 mètres et 16 kilomètres, conférant à ALMA une capacité de zoom inégalée. Les données recueillies par chaque antenne seront assemblées par un superordinateur, spécialement créé pour ce projet, capable d'effectuer 17 millions de milliards d'opérations par seconde. Pour information, l'IRAM

[10] Le supercalculateur Curie de GENCI est hébergé à Bruyères-Le Châtel : http://www.genci.fr/spip.php?article152&lang=en
[11] Statut d'une association à but non-lucratif de droit belge.

(Institut de Radioastronomie Millimétrique) fournit également un des quatre récepteurs qui équipent chaque antenne d'ALMA.

Plus d'infos sur : http://www.almaobservatory.org/

NOEMA : Successeur de l'observatoire du Plateau de Bure, NOEAM sera l'un des plus grands observatoires d'Europe et fonctionnera en synergie avec les plus grands équipements astronomiques au sol et dans l'espace tels que ALMA, le radiotélescope le plus puissant de l'hémisphère Sud, et le James Webb Space Telescope le successeur du Hubble Space Telescope. Ce sera le radiotélescope millimétrique le plus puissant de l'hémisphère Nord. Il sera composé de 12 antennes de 15 mètres de diamètre sur un plateau à 2550 mètres dans les Hautes-Alpes

L'objectif de NOEMA sera de décrire la formation des premières galaxies dans l'Univers, de comprendre le rôle des trous noirs super massifs au centre des galaxies, de sonder la dynamique et l'évolution chimique des galaxies proches, et de détecter des molécules organiques complexes à la recherche des éléments clés de la vie.

Plus d'infos sur : http://www.iram-institute.org/

Euclid : Euclid est une mission internationale pilotée par l'ESA qui aura pour objectif de réaliser une cartographie complète de l'ensemble du ciel extragalactique. Pour réaliser ces mesures, Euclid effectuera un relevé d'une grande partie du ciel avec deux instruments très précis, placés au foyer d'un télescope de 1,2 m de diamètre. Une caméra de 576 millions de pixels observant dans le domaine visible fournira les images d'environ deux milliards de galaxies avec une très haute résolution, équivalente à celle du télescope spatial Hubble. Un spectro-imageur opérant dans l'infrarouge produira une cartographie des grandes structures de l'Univers et mesurera la distance aux galaxies imagées par la caméra. Enfin, un ensemble de supercalculateurs et de logiciels spécifiques sera nécessaire pour traiter les données reçues du satellite (soit plusieurs millions de gigaoctets).

Plus d'infos sur : http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=102

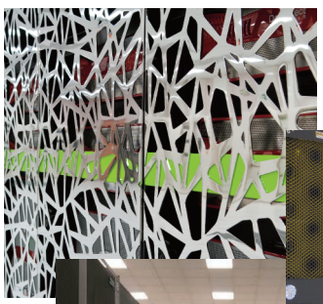
GENCI

Placer la France au meilleur niveau européen et international dans le domaine du calcul intensif

- Animer la stratégie nationale de calcul intensif au bénéfice de la recherche scientifique française en lien avec les 3 centres nationaux de calcul
- Soutenir la réalisation d'un écosystème intégré du calcul intensif à l'échelle européenne
- Promouvoir la simulation numérique et le calcul intensif auprès de la recherche académique, des industriels et, avec Inria et Oséo, dans une initiative spécifique vers les PME

Investissements majeurs en France

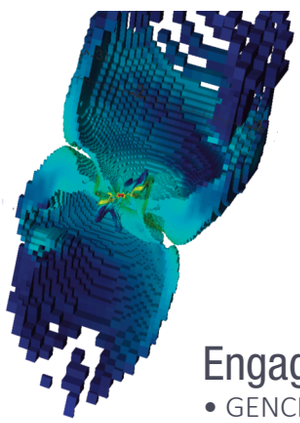
- Équipement des 3 centres nationaux de calcul : TGCC, Idris, Cines
- Un peu plus de 1.6 petaflop/s disponible en 2013 (x80 en 5 ans)
- Moyens compétitifs aux architectures complémentaires
- Prise en compte des besoins scientifiques dans tous les domaines
- Plus de 600 projets par an, avec des premières mondiales



Ci-contre, le calculateur Curie © CNRS Photothèque/Cyril Frésillon

Le calculateur Ada © CNRS

Ci-dessus : le calculateur Jade © CINES



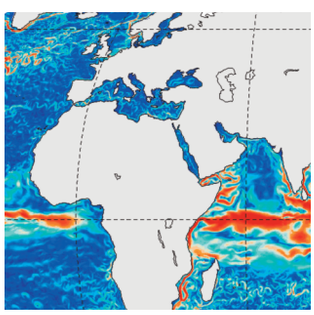
Formation d'une étoile © CEA

Amplification en région

- Equip@meso, projet coordonné par GENCI en lien avec dix partenaires universitaires
- Parmi les lauréats du 1er appel à projets « Équipements d'excellence » des Investissements d'avenir
- 800 teraflop/s en 2013
- Puissance de calcul doublée en 2 ans

INVESTISSEMENTS D'AVENIR

Simulation de la circulation océanique © CNRS



Engagement européen

- GENCI représentant français dans l'infrastructure de calcul PRACE
- Parmi les membres fondateurs et un des principaux financeurs
- Mise à disposition de ressources pétaflopiques de niveau mondial, dont le supercalculateur Curie, concrétisation de l'engagement français
- Résultats dans des domaines impactants (climatologie, énergie, santé...)

Relais vers les PME

- Initiative HPC-PME avec Inria et Oséo et en partenariat avec 5 pôles de compétitivité ; support du CNRS, de l'IFPEN et de l'Onera
- Plus d'une trentaine de PME accompagnées pour intégrer la simulation numérique dans leur modèle de développement.
- Gains de productivité et de compétitivité, création d'emplois

***GENCI est une société civile**, créée en 2007 et détenue à 49 % par l'Etat, représenté par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche, 20 % par le CEA, 20 % par le CNRS, 10 % par les Universités représentées par la Conférence des présidents d'université et 1 % par Inria.*
GENCI dispose d'un budget de 30 millions d'euros en 2013.

Contact presse : Laetitia BAUDIN (+33) 6 16 27 68 73

© GENCI
Mai 2013