



FORMATION INTERDISCIPLINAIRE DE PHYSIQUE
Ecole Normale Supérieure

Projet de stage supervisé 2021–2022
Geoffroy Morlat
M1 Physique

A la recherche d'une population éteinte de galaxies, Partie 2

Résumé : *Dans la continuité de mon stage de L3, j'ai travaillé sur la simulation cosmologique Illustris TNG dans laquelle nous avons déjà relevé la présence de galaxies naines particulières. En effet elles ont la spécificité d'avoir un faible rapport entre la masse du halo de matière noire et la masse stellaire de la galaxie ($M_{\text{DM}}/M_{\star} = 10-30$), là où il devrait être de l'ordre de la centaine pour ce type de galaxies. L'objectif de ce stage était alors d'étudier l'influence de la présence de ce type de galaxies dans l'évolution de systèmes similaires à la Voie Lactée (MW) ou à Andromède (M31). Notre étude nous a permis de montrer que l'on trouvait des galaxies présentant un rapport M_{DM}/M_{\star} compris entre 10 et 30 dans des systèmes de ce type, et nous avons pu identifier des fusions entre une galaxie type Voie Lactée et ce type de galaxies naines.*

Abstract : *In the continuity of my L3 internship, I worked on the cosmological simulation Illustris TNG in which we had already noted the presence of particular dwarf galaxies. Indeed they have the specificity to have a low halo-to-stellar mass ratio ($M_{\text{DM}}/M_{\star} = 10-30$), where it should be of the order of a hundred for this type of object. The objective of this internship was then to look at the influence of the presence of this type of galaxies in the evolution of systems similar to the Milky Way (MW) or Andromeda (M31). Our study allowed us to show that we could find galaxies with a ratio M_{DM}/M_{\star} between 10 and 30 in systems of this type, and we were able to identify mergers between a Milky Way type galaxy and this type of dwarf galaxies.*

Mots clefs : *Voie Lactée - Galaxies naines - Simulation cosmologique - Matière Noire - Halo-to-stellar mass ratio*

Stage encadré par :

Pierre Boldrini (IAP)

boldrini@iap.fr Institut d'Astrophysique de Paris

98bis Bd Arago - 75014 Paris

<http://www.iap.fr>

April 22, 2022

Remerciements

Je tiens à remercier une nouvelle fois Pierre Boldrini pour son accompagnement au quotidien pendant ce semestre ainsi que pour m'avoir permis de continuer le projet que j'avais commencé cet été et qui me laissait un goût d'inachevé tant j'ai pris plaisir à le réaliser.

Contents

1	Introduction	1
1.1	L'IAP	1
1.2	Définitions et termes techniques	1
1.3	Motivations et liens avec mon stage de L3	2
1.4	Illustris TNG-50	3
2	Résultats du stage de L3	4
2.1	Identification d'une population de galaxies particulière	4
2.2	Evolution en 4 catégories	5
2.3	Les galaxies qui fusionnent	7
2.4	Environnement	9
3	Population de Galaxies Particulières	10
3.1	Population recherchée	10
3.2	Population trouvée	10
4	Les Systèmes MW-M31	12
4.1	Galaxie type MW	12
4.2	Environnement de la Galaxie type MW	13
4.2.1	Environnement à $z = 0$	13
4.2.2	Galaxies liées à $z = 0$	14
4.2.3	Environnement à travers le temps	15
4.2.4	Ratio des galaxies liées	17
4.2.5	Evolution des galaxies ayant un ratio faible	18
4.2.6	Passé des Galaxies liées	19
5	Conclusion	21
6	Bibliographie	22

1 Introduction

1.1 L'IAP

J'ai effectué mon stage à l'Institut d'Astrophysique de Paris, laboratoire dans lequel j'ai eu la chance d'avoir un bureau ce qui m'a permis d'y aller plusieurs fois par semaines lorsque j'en avais l'occasion. J'ai été encadré par Pierre Boldrini, actuellement en post-doc à l'IAP.

L'IAP a plusieurs équipes de recherche : Astrophysique des hautes énergies et Univers précoce ; Exoplanètes et milieu interstellaire; Grandes structures et Univers profond ; Origine et évolution des galaxies; Physique stellaire, planétaire et planètes extra-solaires; Physique théorique : gravitation et cosmologie.

Mon stage, encadré par Pierre Boldrini, membre de l'équipe "Origine et évolution des galaxies" a eu pour objet l'étude d'une population de galaxies naines particulières. L'intérêt dans ce projet était d'explorer une hypothèse de P. Boldrini selon laquelle des fusions avec des galaxies naines ayant un "halo-to-stellar mass ratio" plus faible que la moyenne pourraient expliquer la structure de certaines galaxies massives comme Andromède ou la Voie Lactée. (voir section "Motivations").

1.2 Définitions et termes techniques

Le domaine de mon stage est l'Astrophysique, plus précisément la dynamique et l'évolution des galaxies. J'ai donc appris de nombreux termes techniques et avant de les utiliser, il me semble nécessaire de les définir ici.

L'Univers est constitué en majeure partie de matière noire (DM) et d'énergie noire. En effet, la matière classique (baryonique) représente uniquement 5% de sa masse totale. Ainsi, bien que leurs existences restent à prouver, la **matière noire** représenterait 27% de la masse totale de l'Univers et l'énergie noire 68%. Ces deux composantes de l'Univers sont deux solutions plausibles à des observations et prédictions théoriques que nous ne pouvons expliquer par la simple présence d'étoiles. Ainsi, l'énergie noire induirait l'accélération de l'expansion de l'univers en agissant comme une force répulsive. La matière noire, quant à elle, est une matière hypothétique, composante principale des galaxies et interagissant exclusivement via la gravité, que ce soit avec la matière baryonique ou avec elle même. Elle n'émet donc aucune lumière, d'où son appellation. Il n'y a pas de consensus sur la nature de la matière noire, et il n'est même pas certain qu'elle ne soit pas juste une rectification de nos lois physiques. Néanmoins, l'ajout de la matière noire dans les équations permet une bien meilleure reproduction des phénomènes astrophysiques.

En dynamique des galaxies, la matière noire joue un rôle prépondérant. En effet, les **galaxies** doivent être vues comme la conséquence de zones dans lesquelles la densité de matière noire est plus importante qu'elle l'est en moyenne dans l'Univers, ce qui crée un puits de potentiel dans lequel les particules de gaz sont attirées. Ces particules de gaz vont alors s'effondrer les unes sur les autres jusqu'à former des étoiles qui s'agencent en fonction du potentiel créé par la matière noire. Cette dernière englobe la partie stellaire. La composante de matière noire de la galaxie porte le nom de **halo**. Le halo a une taille finie et s'arrête à l'endroit où la densité en matière noire atteint la valeur moyenne du milieu intergalactique.

Lorsque l'on étudie l'Univers, les échelles de temps sont très compliquées à cerner. Il a donc été créé une grandeur nommée **redshift** (notée z) et qui permet de rendre compte du décalage vers le rouge dû à l'expansion de l'Univers lorsque l'on observe des galaxies lointaines. Plus le redshift est gros, plus l'événement est éloigné du présent. Par exemple $z = 0$ est aujourd'hui tandis que $z = 3$ correspond à il y a 11,5 Milliards d'années.

Les galaxies peuvent être de plusieurs types selon leur masse de matière noire ou leur forme. Dans notre étude nous nous sommes concentrés sur les galaxies dites **naines**. Les galaxies naines ont une M_{DM} comprise entre 10^8 et $10^{11} M_{\odot}$ (masse solaire), là où une galaxie très massive comme la Voie Lactée "pèse" $10^{12} M_{\odot}$. La matière noire domine en masse la composante stellaire sur l'ensemble de la galaxie. Par contre au centre, les étoiles peuvent dominer en masse comme dans la Voie Lactée. De plus, le "halo-to-stellar mass ratio" M_{DM}/M_{\star} , rapport de la masse du halo de matière noire sur la

composante stellaire des galaxies n'est pas le même suivant la catégorie de galaxie. Ainsi, les halos des galaxies naines vont en général avoir un ratio entre 100 et 1000 à $z = 0$ là où la Voie Lactée a un ratio de 10, toujours à $z = 0$. Ces rapports ont été amenés à évoluer depuis $z = 3$, notamment car les galaxies naines sont souvent des objets satellites de galaxies plus massives qui accrètent leur matière noire.

Mon stage s'est focalisé sur les systèmes de galaxies type Voie Lactée (dite Milky Way and anglais et donc agrégée MW) et la galaxie d'Andromède. Andromède est la galaxie massive la plus proche de la Voie Lactée et est donc un sujet d'étude sur lequel nous avons beaucoup de données issues d'observations. La galaxie d'Andromède a été classifiée par l'astronome français Charles Messier dans son catalogue des nébuleuses et des amas d'étoiles, c'est pourquoi nous l'abrégeons M31. La Voie Lactée et Andromède font partie du Groupe Local.

Le Groupe Local contient plus de 60 galaxies, toutes naines hors-mis MW et M31, et donc satellites de l'une des deux. Nous connaissons très bien les galaxies naines qui le constituent, notamment leurs positions, vitesses et halo-to-stellar mass ratio. Il a un diamètre d'environ 3Gpc.

Pour étudier l'univers sur de gros laps de temps, il n'est évidemment pas possible de faire des expériences autres que des observations. A partir de l'importante quantité d'observations, des simulations sont créées pour perfectionner les modèles théoriques de sorte à être les plus proches possibles des résultats expérimentaux, et ainsi découvrir des données sur des objets qui ne nous sont pour l'instant pas accessibles. Ainsi, la recherche en cosmologie se porte en grande partie sur la création et l'exploitation de simulations cosmologiques faites sur des ordinateurs ultra-puissants et permettant de traiter une énorme quantité de données en mettant en application les lois physiques que l'on connaît.

1.3 Motivations et liens avec mon stage de L3

Dans l'étude de Boldrini et al. (2021), ils montrent que la répartition de la masse de la galaxie d'Andromède (M31) peut être expliquée par l'accrétion d'une galaxie naine ayant un "halo-to-stellar mass ratio" de 20:1. Ainsi lors de mon stage de L3, nous avons voulu étudier de plus près si de telles galaxies pouvaient exister.

D'autres études en proposaient l'existence, comme l'article de Shin et al. (2020) qui montre à partir d'une simulation que la collision entre deux galaxies peut induire la création de deux galaxies déficientes en matière noire ($M_{DM}/M_{\star} < 1$).

D'autres vont même plus loin comme Hammer et al. (2020) qui montrent qu'un grand nombre de galaxies satellites de la Voie Lactée ne seraient pas dominées en masse par la matière noire et même, dans une autre publication, qu'il est possible que des galaxies naines satellites ne contiennent pas de matière noire !

Du côté des observations, Guo et al. (2019) ont observé 19 galaxies naines ayant une déficience en matière noire.

Néanmoins, Cowley et al. (2019) montrent grâce à la simulation Illustris que les galaxies naines ont des halos proportionnellement plus gros que les autres galaxies. De plus, les études de Van Dokkum (2019) dans lesquelles il montre l'existence de galaxies sans matière noire sont très controversées, au même titre que les observations de galaxies déficientes.

Ainsi, notre étude s'inscrivait dans un contexte de recherche où le consensus est remis en question par des observations et des exploitations de simulations sans pour autant être rendu complètement obsolète.

On s'est alors rendu compte qu'une population de galaxies présentant un rapport entre leur masse de matière noire et leur masse d'étoiles compris entre 10 et 20 avait existé à $z = 3$ mais aussi que certaines d'entre elles avaient perduré jusqu'à $z = 0$. Nous avons aussi vu que des mécanismes pouvaient faire baisser ce ratio, ainsi de nouvelles galaxies naines pouvaient avoir un ratio entre 10 et 20 à $z = 0$ alors que ce n'était pas le cas à $z = 3$.

Nous avons alors voulu étudier les systèmes de type Voie Lactée ou Andromède pour explorer l'incidence que pourrait avoir de telles galaxies sur la nôtre ou notre plus proche voisine. Toujours dans le but de tester la possibilité de l'hypothèse de Boldrini et al. (2021).

La publication de Engler et al. (2021) mettant en avant une liste de systèmes type MW et M31, elle a été le point de départ de ce projet.

1.4 Illustris TNG-50

Illustris TNG est une simulation de l'univers créée par des chercheurs de l'université d'Harvard et de l'institut Max Planck. Cette simulation cosmologique contient toutes les lois physiques nécessaires à la modélisation de la formation et de l'évolution de l'univers, de la formation des étoiles aux amas galactiques. Ainsi, la simulation renvoie une vision très proche de la réalité observable quant au comportement des galaxies, tout en nous donnant accès à la structure selon laquelle s'agence la matière noire.

De plus, la simulation Illustris nous permet, au delà de visualiser un échantillon réaliste de l'univers actuel, d'observer son évolution dans le temps depuis 179 Millions d'années après le Big Bang jusqu'à nos jours.

Il existe trois simulations: Illustris TNG-50, TNG-100 et TNG-300. En effet, chaque simulation est une "boîte d'univers" mesurant respectivement 50 Mpc, 100 Mpc et 300 Mpc de côté. La Voie Lactée, qui est une grosse galaxie, mesure environ 200 kpc de rayon (un parsec vaut 3×10^{13} km). Cette diversité de taille permet d'étudier l'univers à différentes échelles car la résolution diminue quand la taille de la boîte augmente. Ainsi, TNG-50 permet une vision claire du comportement des étoiles au sein des galaxies ainsi que des galaxies entre elles à courte distance, là où TNG-300 donne des informations sur les amas de galaxies et les très grosses structures.

L'an passé, nous avons choisi de travailler sur Illustris TNG-100 de sorte à avoir un bon compromis entre précision sur les galaxies et nombre de galaxies. Cette année, nous avons travaillé sur TNG-50 car nous voulions avoir un maximum de précision sur les galaxies naines que nous étudions et surtout car nous nous sommes basés sur l'article de Engler et al. (2021) (cf. Motivations) qui donne les identifiants des systèmes semblables au Groupe Local.

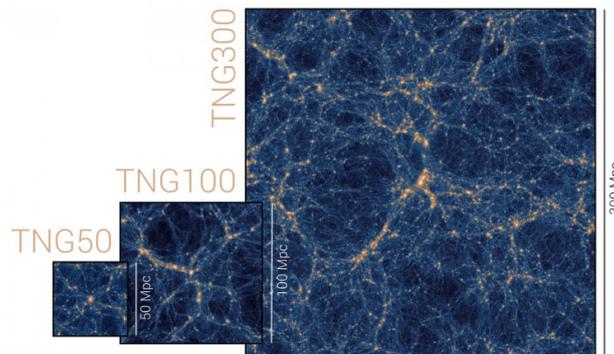


Figure 1: *La simulation Illustris TNG*: Représentation visuelle des "boîtes d'univers" obtenues grâce aux simulations Illustris TNG. On voit les filaments de matière noire (en bleu) à partir desquels les galaxies s'agencent (en jaune). source : <https://www.tng-project.org>

Concrètement, les simulations sont extrêmement lourdes et ont tourné pendant plusieurs mois. Les données ont donc été stockées sur des serveurs et sont accessibles sur le site www.tng-project.org. Les résultats de la simulation sont découpés en 99 *snapshots* : des enregistrements de l'ensemble des données relatives à un redshift. Néanmoins, nous n'étions pas dans la capacité de télécharger tous les résultats car l'ensemble pèse 77 To. C'est pourquoi nous avons utilisé des codes python allant questionner le serveur pour des données précises. Cette méthode, bien que plus optimale du point de vue du stockage, nécessite plus de temps de calcul et nous a rendu dépendants d'une connexion internet en plus de parfois poser des problèmes de déconnexion du serveur lorsque le code tournait dans la nuit, ceci étant dû au fait que le serveur était souvent saturé car beaucoup de chercheurs exploitent les résultats de cette simulation.

2 Résultats du stage de L3

Le stage présent s'inscrivant dans la continuité de mon stage de L3, il me semble important de contextualiser en présentant brièvement les résultats que j'avais obtenus l'année passée. Les résultats présentés ici sont obtenus à partir de la simulation Illustris TNG-100, mais sont intéressants pour une étude dans TNG-50 étant donné que seule la taille de la boîte d'univers varie (et la résolution sur les galaxies).

2.1 Identification d'une population de galaxies particulière

Nous avons donc cherché à trouver une population de galaxies naines présentant un faible ratio M_{DM}/M_{\star} à $z = 3$. Nous avons alors choisi les paramètres suivants :

- $M_{\text{DM}} = 10^9 M_{\odot} - 10^{11} M_{\odot}$.
- $M_{\text{DM}}/M_{\star} = 10-20$

Notre étude démarrait à $z = 3$ car le but était de partir du temps le plus éloigné possible. Ainsi, $z = 3$ est idéal car c'est à peu près le moment où les galaxies se sont formées, et cela nous offre une étude de l'évolution de celles-ci sur plus de 11 milliards d'années.

Cette année nous partirons de $z = 0$ comme je le présenterai dans le paragraphe 3.

A la fin de mon stage nous n'avons pas encore eu le temps de passer en revue les 3 millions de galaxies constituant la gamme de masse qui nous intéresse. Nous avons tout de même obtenu des résultats sur presque 100 000 objets.

Ainsi à $z = 3$, sur 96 637 galaxies naines, **1247** présentent un ratio compris entre 10 et 20 soit 1,3%. Nous n'avons par contre pas étudié les galaxies qui présentaient un rapport plus faible que 10.

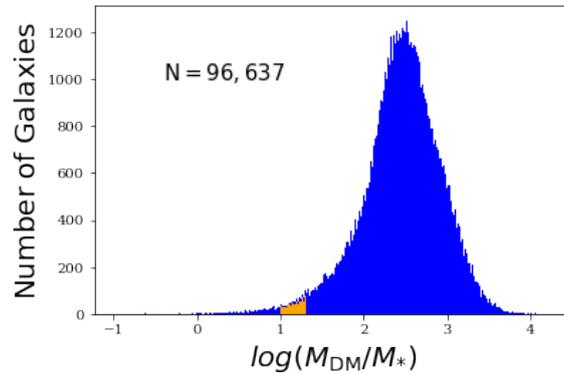


Figure 2: M_{DM}/M_{\star} des galaxies étudiées: Rapport de masse de matière noire par rapport à la composante stellaire des galaxies naines de masse allant de 10^9 à $10^{11} M_{\odot}$ dans la simulation Illustris TNG-100 à $z = 3$. En orange sont représentées, les galaxies ayant un ratio entre 10 et 20, au nombre de 1247.

Nous avons alors voulu savoir de quelle manière étaient réparties les galaxies avec ce ratio en termes de masse. La figure 2 ci-dessous montre que la plupart des halos ont une masse de matière noire d'environ $10^9 M_\odot$. Ces galaxies ont alors une masse de l'ordre de celle qui orbitent autour de la Voie Lactée. Nous pouvons alors dire que cette population est constituée de galaxies ayant le gabarit de galaxies naines satellites de galaxies massives.

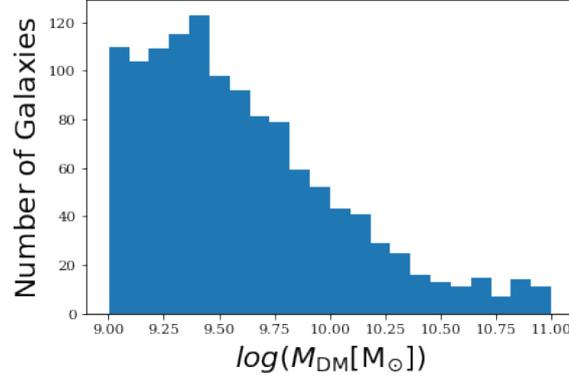


Figure 3: *Distribution des galaxies*: Distribution de l'échantillon de galaxies naines avec M_{DM}/M_\star compris entre 10 et 20 à $z = 3$ dans la simulation Illustris TNG-100. On voit que la majorité des galaxies se trouvent dans la tranche de masse entre 10^9 et $10^{10} M_\odot$.

Le fait de trouver une population de galaxies naines présentant un ratio M_{DM}/M_\star entre 10 et 20 à $z = 3$ là où on s'attend à ce qu'il soit de l'ordre d'une centaine à $z = 0$ était intéressant. En effet, cela laissait penser que l'hypothèse selon laquelle une galaxie type M31 ait pu fusionner avec une galaxie naine ayant un halo-to-stellar ratio plus faible que prévu est plausible.

Il nous fallait alors étudier l'évolution de ces galaxies de sorte à voir ce qu'il advenait de leurs ratios. Et aussi de sorte à comprendre pourquoi nous n'observons pas de galaxie naine de ce type à $z = 0$.

2.2 Evolution en 4 catégories

Nous avons alors étudié la façon dont évoluaient les galaxies dans le temps entre $z = 3$ et $z = 0$. Ainsi, nous avons mis en évidence l'existence de 4 catégories. Nous les avons d'abord rangé dans 3 groupes :

- les galaxies qui ont toujours un ratio $M_{\text{DM}}/M_\star=10-20$ à $z = 0$, dites constantes.
- les galaxies dont M_{DM}/M_\star descend en dessous de 1 à $z = 0$.
- les galaxies qui fusionnent avant $z = 0$ et donc qui disparaissent.

Nous avons donc reconnu les galaxies dites **déficientes** -dont il est fait mention dans les articles de Hammer et al. notamment- en obtenant celles dont le rapport M_{DM}/M_\star est inférieur à 1 à $z = 0$. Lorsque les galaxies fusionnent, elles sont absorbées par des galaxies plus massives et nous arrêtons alors de les étudier. Elles peuvent avoir deux types de comportement avant la fusion : soit la galaxie perd énormément de matière noire, jusqu'à devenir déficiente avant de fusionner, soit elle maintient un ratio relativement élevé (entre 10 et 70) jusqu'à être entièrement absorbée.

Nous avons donc créé quatre catégories :

- Constant
- Deficient
- Fused with loss of mass (FL)
- Fused and deficient (FD)

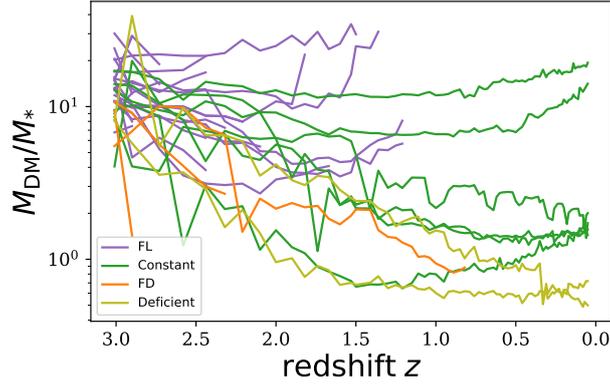


Figure 4: *Evolution d'une partie de l'échantillon*: Evolution de notre échantillon de galaxies naines présentant un ratio M_{DM}/M_* entre 10 et 20 à $z = 3$ dans la simulation Illustris TNG-100. On observe clairement la présence de 4 catégories. Une partie fusionne en devenant déficiente en matière noire, une partie fusionne avec une plus faible perte de masse, une autre partie reste avec un ratio plus ou moins égal, et le reste devient déficiente en matière noire à $z = 0$.

Par ailleurs, nous avons étudié le comportement des masses de matière noire et d'étoiles des galaxies ce qui nous a permis de confirmer la catégorisation que nous avons faite. En effet, les galaxies déficientes perdent bien une grande quantité de leur matière noire au fil du temps. Cette perte est due à une accrétion progressive due à l'attraction gravitationnelle exercée par des galaxies plus massives. Par ailleurs, les galaxies qui fusionnent sont accrétées par des galaxies plus massives. Ainsi, on observe pour toutes les fusions une perte de matière noire et d'étoiles due à l'accrétion par la galaxie "hôte".

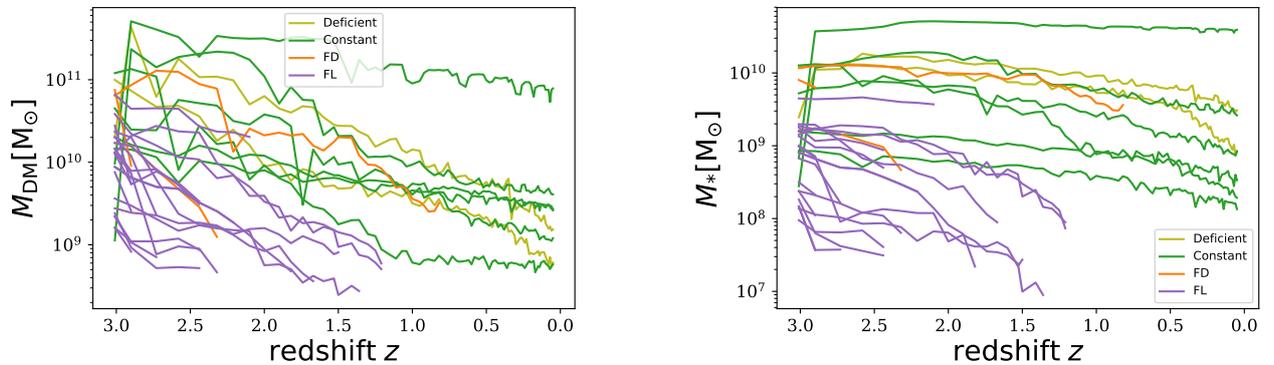


Figure 5: *Evolution de la masse en matière noire et masse stellaire*: Evolution des masses de matière noire et stellaires d'un échantillon de galaxies naines présentant un ratio M_{DM}/M_* entre 10 et 20 à $z = 3$ dans la simulation Illustris TNG-100. L'évolution des masses en matière noire et en étoiles confirment le fait que certaines fusionnent en perdant plus de masse de matière noire que d'étoiles (FD), d'autres non (FL). On comprend aussi mieux la façon dont certaines conservent un ratio constant, et comment d'autres perdent leur matière noire mais pas leurs étoiles et finissent déficientes.

Nous avons alors calculé la proportion de chaque catégorie au sein de l'échantillon de 1247 galaxies étudiées. Il apparaît que 922 (74%) fusionnent durant leur évolution, et donc ont disparu à $z = 0$. De plus, au sein de ces 74%, 798 sont des galaxies qui ne passent pas par un stade de déficience ($M_{\text{DM}}/M_{\star} \leq 1$), nous approfondiront ce point dans le paragraphe qui leur est dédié. Enfin, les galaxies constantes, au nombre de 249, sont plus nombreuses que les déficientes à $z = 0$ (76) .

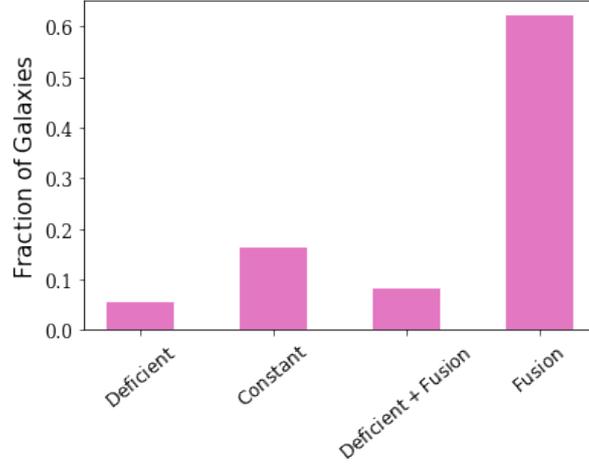


Figure 6: *Proportion de chaque catégorie dans l'échantillon*: Répartition de la proportion de galaxies ayant un halo-to-stellar mass ratio compris entre 10 et 20 à $z = 3$ dans la simulation Illustris TNG-100 en 4 catégories en fonction de leur évolution jusqu'à $z = 0$.

On voit donc que la majorité des galaxies dont les propriétés correspondent à nos critères fusionnent avec une plus grosse galaxie entre $z = 3$ et $z = 0$. Dans le cas de mon stage de cette année, ce sont celles-ci qui vont nous intéresser.

2.3 Les galaxies qui fusionnent

Dans ce paragraphe nous allons traiter les deux catégories de galaxies qui fusionnent dans la simulation Illustris TNG-100. En effet, bien que certaines galaxies passent par un stade de déficience avant d'entièrement fusionner, ce qui est intéressant dans le cadre de notre étude est le fait que les galaxies fusionnent et donc disparaissent, ainsi elles ne sont plus présentes à $z = 0$. Nous pouvons alors dire que nous étudions une population de galaxies disparues.

La différence entre les deux est due à leur manière de fusionner. Ainsi, les halos dans un premier temps déficients perdent une grande partie de leur matière noire avant d'entièrement fusionner avec l'hôte. L'interprétation est sensiblement la même que pour les galaxies déficientes.

Les galaxies déficientes sont peu actives mais subissent une perte de matière noire qui ne peut s'expliquer que par la présence d'une galaxie plus massive à proximité, accrétant leur halo de matière noire mais n'allant pas jusqu'à les détruire totalement.

Néanmoins, ces galaxies ne perdent pas d'étoiles. Ceci est dû au fait que les étoiles sont concentrées au centre des galaxies et donc englobées par les halos de matière noire. Un halo plus massif qui n'exercerait pas une force de gravité suffisamment forte pour absorber entièrement la galaxie naine ne pourra alors qu'accréter une partie de son halo de matière noire sans atteindre les étoiles. Ainsi, la masse de matière noire de la galaxie naine baisse, sans modifier sa masse stellaire, ce qui fait baisser le rapport M_{DM}/M_{\star} de la galaxie naine.

Les autres (représentant la grande majorité de cette catégorie avec une proportion de 798/922) incarnent un type de fusion plus classique dans lequel la galaxie satellite est accrétée sans perte de matière noire préalable. Dans le premier cas, la galaxie naine tourne autour de l'hôte avant de fusionner, tandis que dans le second, elle est détruite après un ou deux passages dans la galaxie hôte : elle n'orbite pas autour.



Figure 7: *Illustration d'une galaxie et de son halo: Illustration représentant une galaxie et son halo de matière noire (représenté en bleu), ayant un rayon beaucoup plus grand que celui de son disque d'étoiles. source :astropage.eu*

La fusion avec des galaxies naines ayant une faible quantité de matière noire pourrait expliquer la structure du halo de matière noire de certaines galaxies massives comme celle d'Andromède (voir Boldrini et al. (2021)). Notre étude montre que ces galaxies sont prévues par Illustris TNG-100 ce qui apporte un poids à cette théorie.

Nous avons observé le rayon orbital de l'une d'elles passant par un stade de déficience. Celle que nous avons choisie est particulière car elle orbite autour d'un système de deux galaxies massives qui fusionnent l'une avec l'autre peu avant d'accréter la galaxie satellite.

Nous avons donc étudié le mouvement de la galaxie naine par rapport au centre de masse des deux pré-hôtes. On observe une perte de masse progressive ainsi qu'un rapprochement caractérisé par une orbite excentrique. La galaxie naine tourne donc autour du centre de masse du système des deux galaxies plus massives en se rapprochant peu à peu, avant de fusionner totalement à $z = 2$.

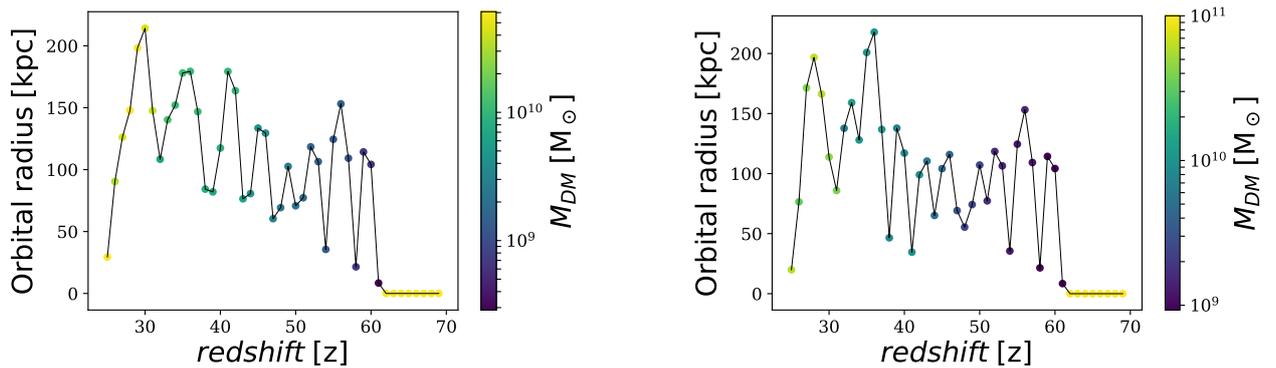


Figure 8: *Fusion d'une galaxie naine avec un système de deux galaxies plus massives: Fusion d'une galaxie naine ayant un ratio M_{DM}/M_* compris entre 10 et 20 à $z = 3$ avec un système de deux galaxies massives fusionnant peu de temps avant dans la simulation Illustris TNG-100.*

2.4 Environnement

L'an passé je n'avais pas eu le temps d'étudier en détail l'environnement dans lequel évoluent ces galaxies naines particulières à $z = 3$.

Néanmoins, j'ai réussi à créer un code permettant de connaître la distance du cinquième voisin le plus proche de chaque galaxie (code mettant beaucoup de temps à s'exécuter). J'ai ainsi obtenu cette valeur pour 52 galaxies de la population ayant un "halo-to-stellar mass ratio" entre 10 et 20.

Cette méthode permet de rendre compte de l'environnement des galaxies et de savoir à quel point elles sont isolées ou non. Un 5^e voisin assez proche est alors synonyme d'un milieu très dense.

Deux galaxies brillantes (donc massives) sont en moyenne séparées par une distance d'environ 1Mpc.

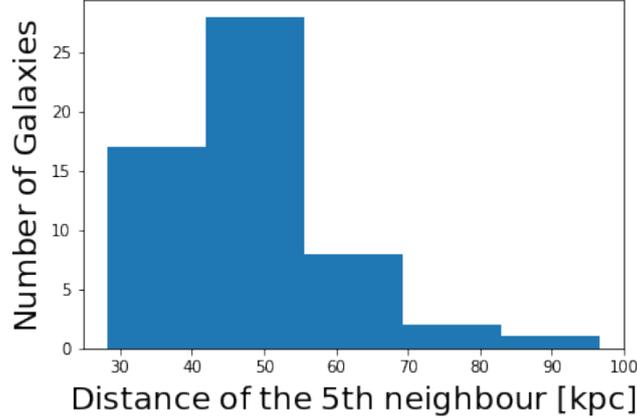


Figure 9: *Distance du 5^e voisin*: Distance du 5^e voisin pour un échantillon de 52 galaxies naines ayant un rapport M_{DM}/M_{\star} compris entre 10 et 20 à $z = 3$ dans la simulation Illustris TNG-100.

On voit donc sur ce graphique que les galaxies de la population que nous avons étudiée évoluent à $z = 3$ dans un milieu relativement dense, la majorité ayant un 5^e voisin à environ 50kpc, contre 1Mpc de distance entre deux galaxies massives.

Ce résultat, bien qu'incomplet car basé sur un petit échantillon de galaxies, ne va pas à l'encontre de la possibilité que les galaxies naines ayant un faible ratio M_{DM}/M_{\star} soient des galaxies satellites de galaxies massives type MW ou M31. Nous allons alors pouvoir étudier ceci dans Illustris TNG-50.

3 Population de Galaxies Particulières

3.1 Population recherchée

Nous avons donc dans un premier temps cherché dans Illustris TNG-50 si des galaxies naines présentaient des ratios M_{DM}/M_{\star} particuliers.

Nous avons alors choisi les paramètres suivants :

- $M_{\text{DM}} = 10^8 M_{\odot} - 10^{11} M_{\odot}$.
- $M_{\star} \geq 10^6 M_{\odot}$
- $M_{\text{DM}}/M_{\star} = 10-30$

Cette fois ci nous avons pu étudier les galaxies ayant une masse de $10^8 M_{\odot}$ car la simulation Illustris TNG-50 permettait d'avoir assez de précision pour traiter de petits objets de la sorte.

On a ajouté une contrainte sur la masse stellaire de sorte à ne pas avoir de sous-halos composés uniquement de matière noire mais bien que des galaxies naines.

Nous avons par ailleurs décidé d'élargir légèrement l'intervalle dans lequel nous voulions trouver le ratio de sorte à augmenter un petit peu la taille des échantillons que nous allons obtenir.

3.2 Population trouvée

J'ai alors obtenu pour $z = 3$ l'histogramme suivant.

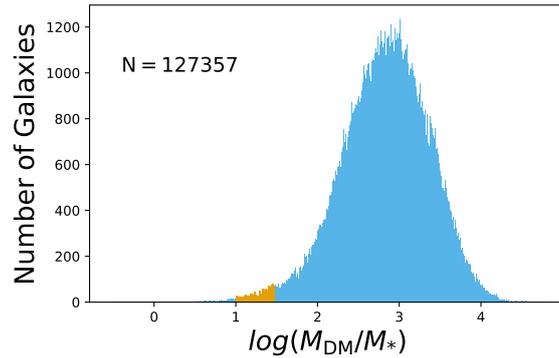


Figure 10: M_{DM}/M_{\star} des galaxies étudiées: Rapport de masse de matière noire par rapport à la composante stellaire des galaxies naines de masse allant de 10^8 à $10^{11} M_{\odot}$ dans la simulation Illustris TNG-50 à $z = 3$. En jaune sont représentées, les galaxies ayant un ratio entre 10 et 30, au nombre de 1242 sur 127 357 soit 0.98%.

On voit donc que les résultats obtenus sur TNG-50 sont semblables à ceux obtenus l'an passé sur TNG-100 (0.98% contre 1.3%).

Cette fois ci, nous avons alors décidé d'étudier les ratios à différents âges de l'univers. On voit ici qu'à tous les âges de l'univers, une proportion plus ou moins identique de galaxies naines ont un ratio M_{DM}/M_{\star} compris entre 10 et 30 :

- $z = 3$: 1242/127357 soit 0.98%
- $z = 1.74$: 1445/45597 soit 3.2%
- $z = 1$: 1475/133358 soit 1.1%
- $z = 0$: 2603/74874 soit 3.5%

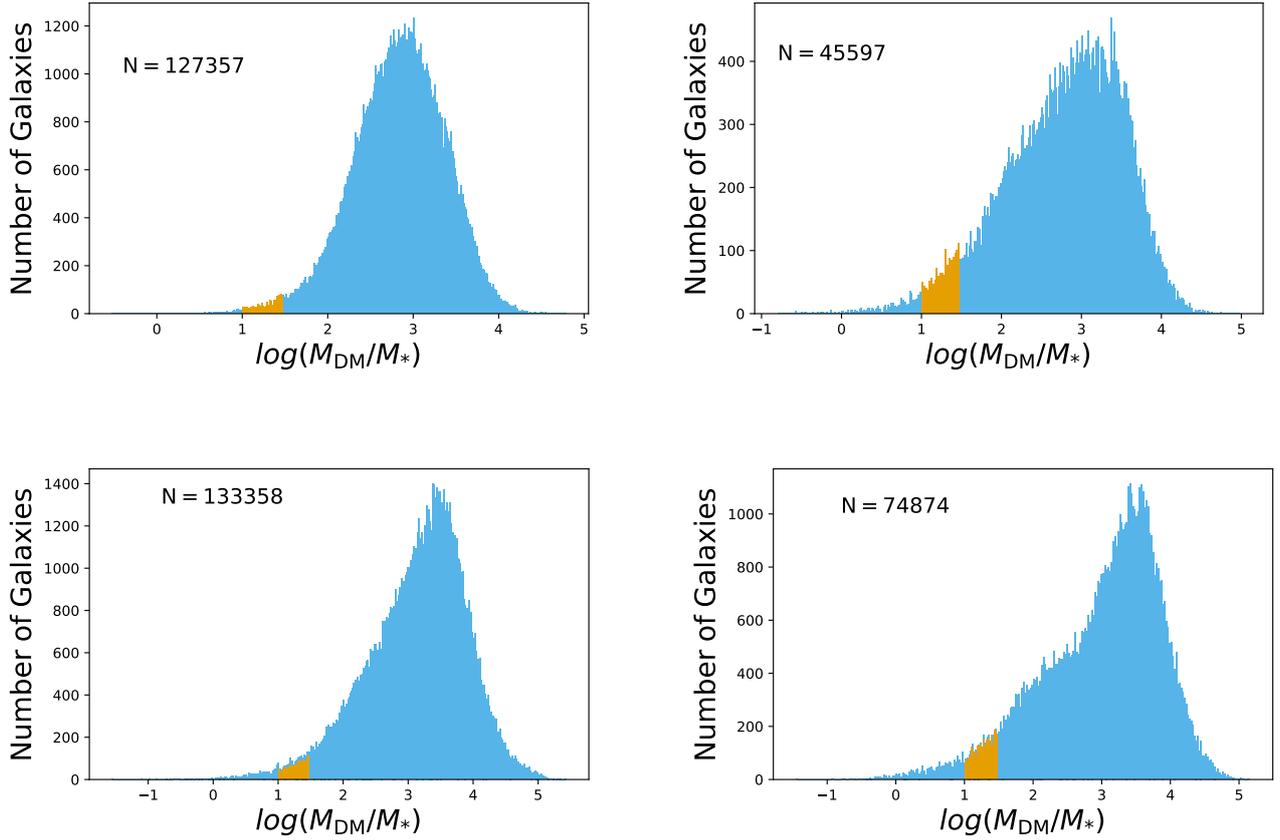


Figure 11: *Rapport M_{DM}/M_{\star} à travers le temps* : Rapport M_{DM}/M_{\star} des galaxies naines de la simulation Illustris TNG-50 à différents redshifts. De gauche à droite et de haut en bas : $z = 3$, $z = 2$, $z = 1$, $z = 0$. On s'intéresse aux rapport compris entre 10 et 30. On en compte alors pour $z = 3$: 1242/127357 soit 0.98%; $z = 1.74$: 1445/45597 soit 3.2%; $z = 1$: 1475/133358 soit 1.1%; $z = 0$: 2603/74874 soit 3.5%

J'ai ensuite compilés ces histogrammes sur un seul et même graphique de sorte à comprendre comment le ratio M_{DM}/M_{\star} des galaxies naines évoluait dans le temps.

A priori, on s'attendrait à ce qu'il diminue car les galaxies étant actives, leur masse d'étoiles augmente alors que celle de matière noire reste constante.

J'ai obtenu la figure suivante :

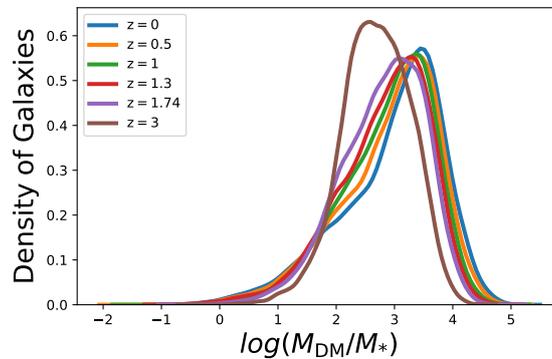


Figure 12: *M_{DM}/M_{\star} des galaxies naines étudiées à travers le temps*: Rapport de masse de matière noire par rapport à la composante stellaire des galaxies naines de masse allant de 10^8 à $10^{11} M_{\odot}$ dans la simulation Illustris TNG-50 entre $z = 3$ (en mauve) et $z = 0$ (en bleu).

On voit ici que le rapport M_{DM}/M_{\star} des galaxies naines varie de façon considérable à travers le temps. On passe en effet d'une moyenne de 100 à $z = 3$ à une moyenne de 10 000 à $z = 0$.

Ce résultat est assez étonnant considérant ce que l'on connaît des galaxies naines et de leur halo-to-stellar mass ratio. En effet, on s'attendrait à ce qu'en moyenne ce rapport soit d'environ 100.

On voit tout de même que malgré le décalage vers la droite des histogrammes, la proportion de galaxies ayant un ratio compris entre 10 et 30 reste à peu près la même. Comme si le décalage apparaissait au niveau de $M_{\text{DM}}/M_{\star}=100$.

On peut tout de même ajouter que des difficultés dues à l'exploitation d'une si grosse quantité de données se sont présentées à nous. En effet, les personnes en charge de la maintenance du serveur Illustris nous ont demandé de faire en sorte de ne pas faire trop de requêtes, or le fait d'obtenir les ratios de toutes les galaxies de la simulation à un instant t l'impose. Ainsi, nous n'avons pas pu avoir toutes les données nécessaires pour réaliser des statistiques complètes, ce qui peut expliquer les chiffres que l'on a obtenu, notamment le fait d'avoir des pourcentages de galaxies avec leur ratios entre 10 et 30 plus importants pour les redshifts où l'on a le moins de données.

4 Les Systèmes MW-M31

4.1 Galaxie type MW

J'ai choisi d'étudier un système semblable à celui de la Voie Lactée identifié dans l'article de Engler et al. (2021).

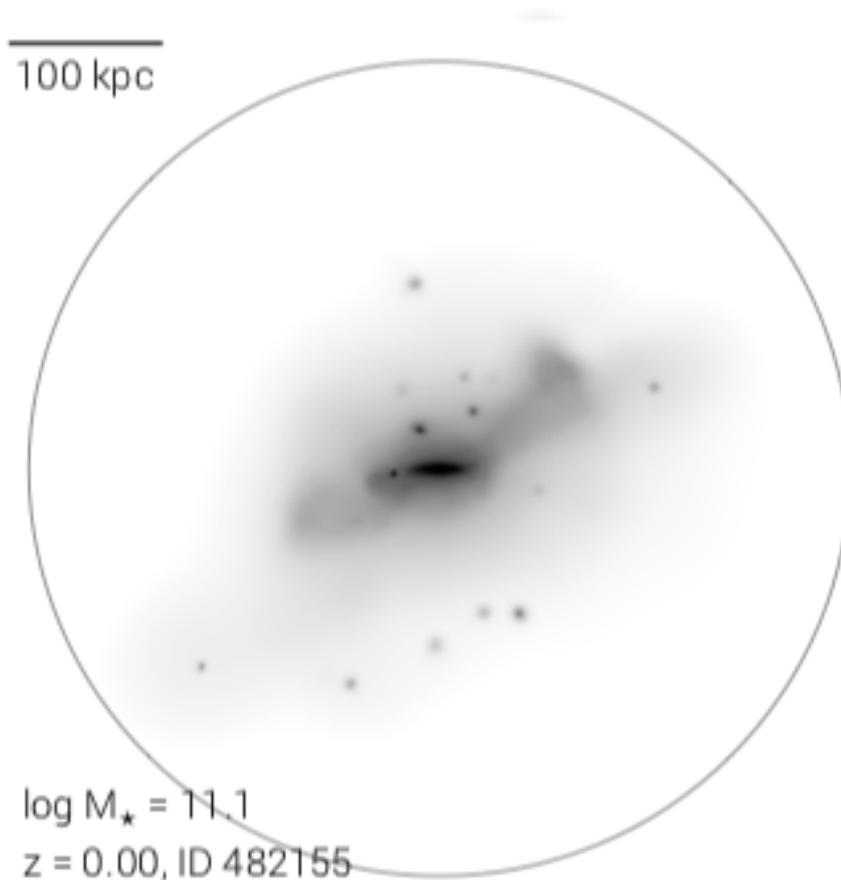


Figure 13: *Galaxie étudiée* Représentation de la galaxie étudiée et de son environnement par Engler et al. (2021) obtenue avec Illustris TNG-50.

Dans un premier temps, j'ai réalisé une représentation de la formation d'une galaxie type Voie Lactée avec ses composantes de matière noire et stellaire.

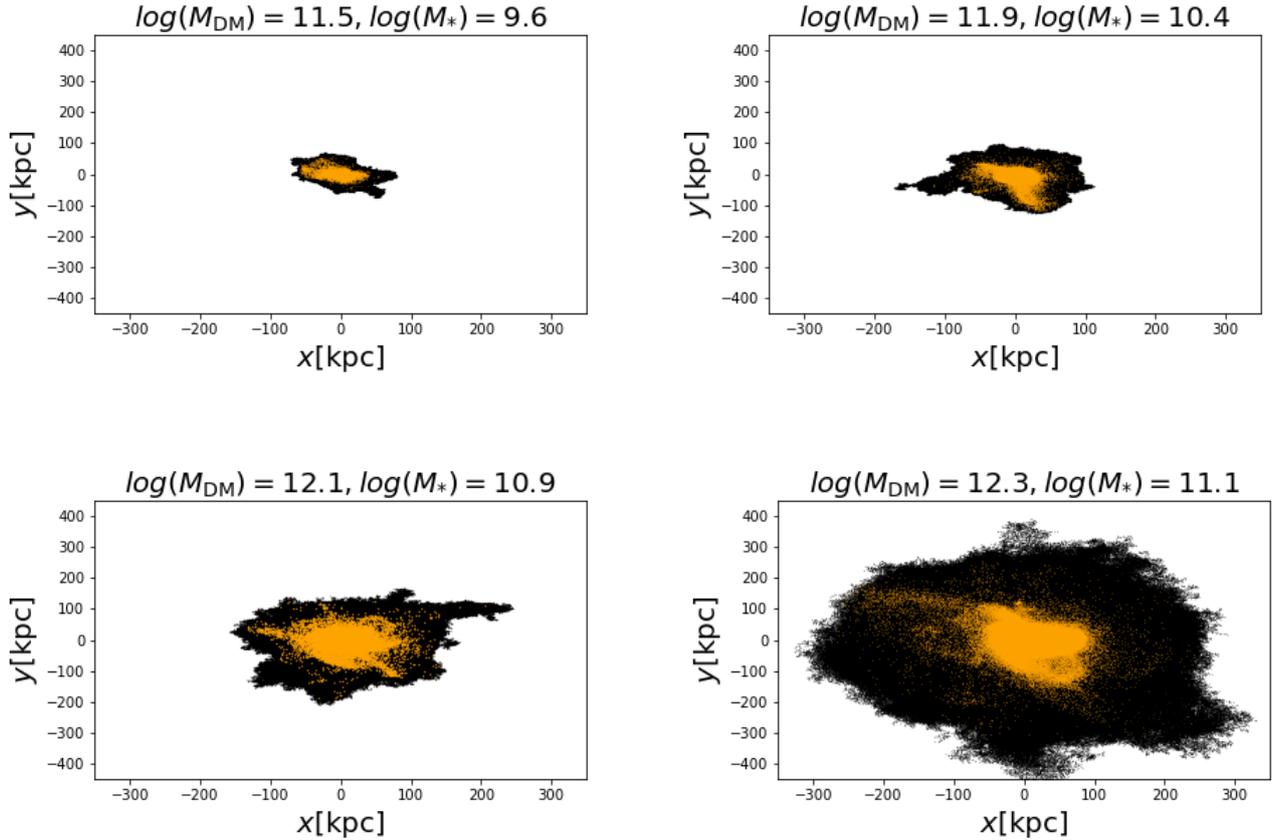


Figure 14: *Formation d'une galaxie type Voie Lactée*: Formation d'une galaxie type Voie Lactée avec ses composantes de matière noire (en noir) et stellaire (en orange). De gauche à droite et de haut en bas : $z = 3$, $z = 2$, $z = 1$, $z = 0$.

On voit clairement que la galaxie a beaucoup grossi entre $z = 3$ et $z = 0$, multipliant notamment presque par 10 sa masse de matière noire. Le mécanisme à l'origine de ce gain de masse est principalement la fusion avec d'autres galaxies, ici des galaxies naines.

On voit que ce type d'évolution engendre une absence de symétrie sphérique. Il faudra donc prendre en compte cette caractéristique par la suite, notamment lorsqu'on considérera la masse ressentie à une certaine distance du centre de la galaxie.

Sur les différentes figures on peut clairement voir des courants d'étoiles s'échappant du centre de la galaxie. Ceux-ci sont les témoins d'une fusion avec d'autres galaxies.

4.2 Environnement de la Galaxie type MW

4.2.1 Environnement à $z = 0$

J'ai alors étudié l'environnement de cette galaxie, le but étant de comprendre pourquoi les galaxies satellites que l'on observe aujourd'hui ont ce "halo-to-stellar mass ratio" (cf. figure 12) et si des ratios ont disparu à travers le temps.

En sélectionnant les galaxies naines dans un rayon de 1000kpc, j'ai trouvé que la galaxie que nous étions en train d'étudier possédait 34 satellites.

Ce nombre est en adéquation avec ce que l'on sait de la Voie Lactée et du Groupe Local en termes d'ordre de grandeur.

De plus, j'ai recensé les ratios M_{DM}/M_{\star} de chacune d'entre elles et on obtient une distribution assez prévisible en première observation. Nous reviendrons par la suite sur ces ratios.

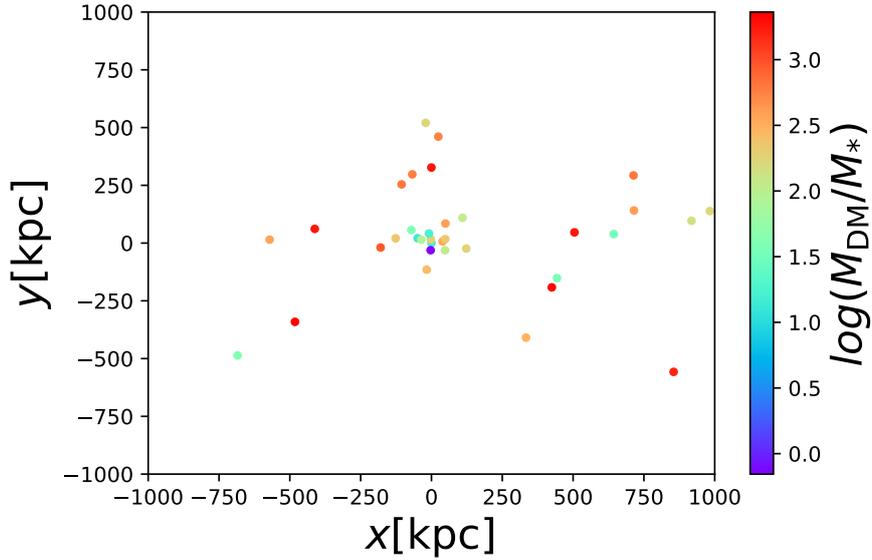


Figure 15: *Environnement de la galaxie type Voie Lactée étudiée*: Galaxies naines situées dans un rayon de 1000kpc par rapport à une galaxie type Voie Lactée à $z = 0$ dans la simulation Illustris TNG-50. On en compte 35. La colorbar représente la valeur du rapport M_{DM}/M_{\star} pour chaque galaxie naine. La figure est centrée sur la galaxie type Voie Lactée (pas représentée ici).

Nous nous sommes alors demandé si ces galaxies étaient vraiment des galaxies satellites. C'est à dire si elles étaient vraiment liées à la galaxie centrale par l'attraction gravitationnelle ou non.

Pour ce faire, la simulation Illustris nous renseigne sur les vitesses des objets par rapport au centre de la boîte. Nous pouvons alors connaître la vitesse des objets les uns par rapport aux autres. En se plaçant dans le référentiel de la galaxie type Voie Lactée, nous pouvons calculer la vitesse de libération de l'attraction de celle-ci grâce à la formule : $\sqrt{2\frac{GM_{\text{int}}}{r}}$, avec G la constante gravitationnelle et M_{int} la masse intérieure de la galaxie à la distance r .

En effet, nous ne pouvons pas prendre l'entiereté de la masse de la galaxie car, comme on peut le voir sur la figure 14, les galaxies de type MW sont très étendues, ainsi un objet peut être dans le halo de matière noire de la galaxie centrale sans pour autant avoir fusionné avec.

J'ai donc du créer un code qui permet de calculer la masse de la galaxie en fonction de la distance à son centre en prenant en compte les particules de matière noire et d'étoiles et non l'objet "galaxie" que la simulation Illustris propose par défaut.

4.2.2 Galaxies liées à $z = 0$

Nous avons donc obtenu le nombre de galaxies liées à la galaxie centrale, à savoir 29 sur 34.

Entre la figure 15 et la figure 16, une rotation a été effectuée, mais l'environnement étudié est bien le même.

Nous avons alors voulu étudier de deux manières différentes les galaxies liées: Dans un premier temps, en regardant l'évolution de leur nombre à travers le temps, puis en regardant le passé de ces galaxies liées.

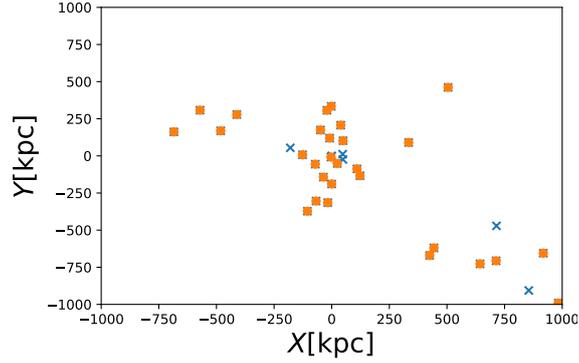


Figure 16: *Galaxies liées à la galaxie type Voie Lactée étudiée*: Galaxies naines liées (en orange) à une galaxie type Voie Lactée à $z = 0$ dans la simulation Illustris TNG-50. On en compte 29 sur les 35 comprises dans un rayon de 1000kpc. La figure est centrée sur la galaxie type Voie Lactée (pas représentée ici).

4.2.3 Environnement à travers le temps

Par le passé, la galaxie type Voie Lactée était entourée de beaucoup plus de galaxies naines.

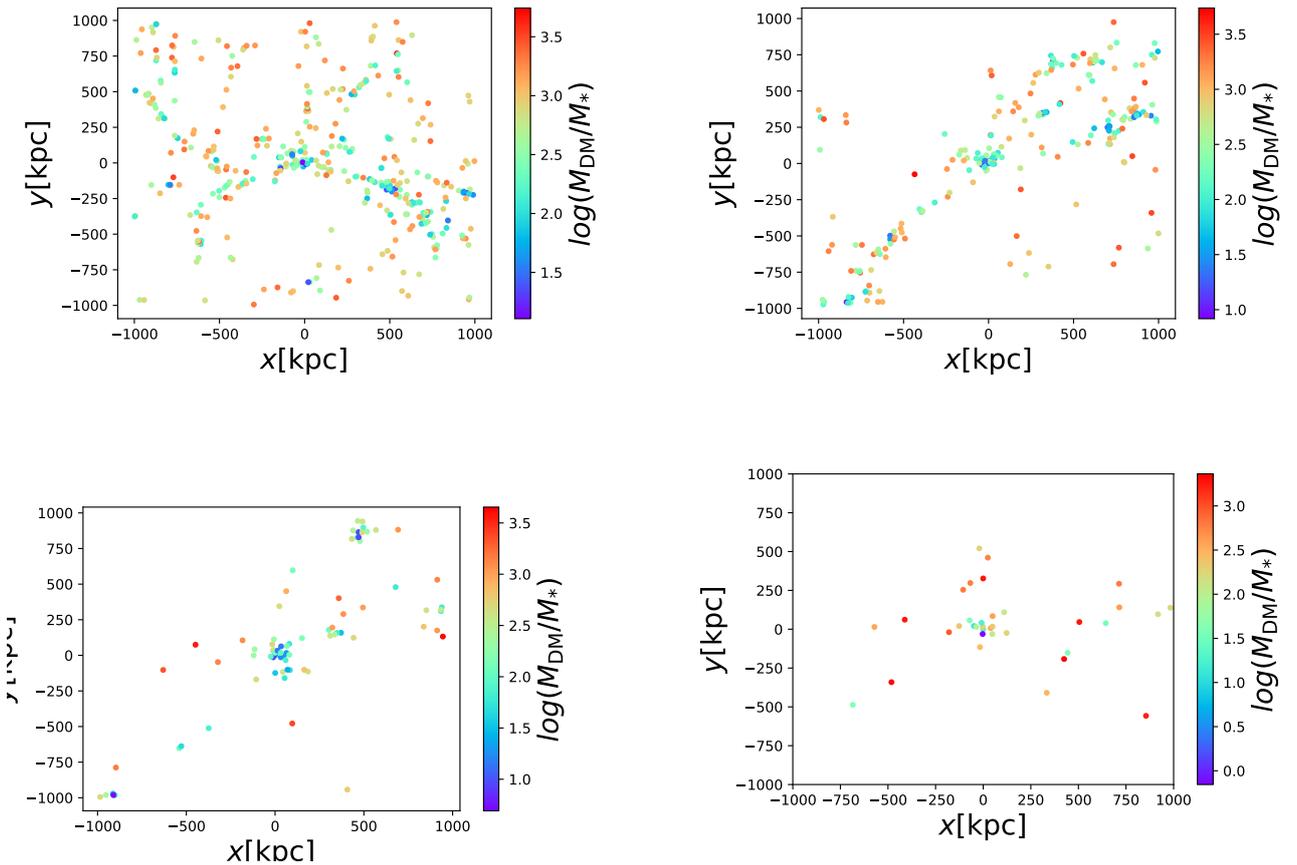


Figure 17: *Evolution de l'environnement de la galaxie type Voie Lactée étudiée* : Evolution de l'environnement d'une galaxie type MW dans la simulation Illustris TNG-50. On voit que le nombre de galaxies naines entourant la galaxie centrale a beaucoup diminué à travers le temps. De gauche à droite et de haut en bas : $z = 3$, $z = 2$, $z = 1$, $z = 0$. On compte alors pour $z = 3$ 406 galaxies, $z = 2$: 226, $z = 1$: 79, $z = 0$: 35. Les figures sont centrées sur la galaxie type Voie Lactée (pas représentée ici).

On pense alors que la plupart de ces galaxies naines ont fusionné avec la galaxie centrale. Ceci explique notamment la façon dont elle a grandi comme nous l'avons vu auparavant.

Pour fusionner avec la galaxie centrale, une galaxie naine passe par un stade où elle y est liée. On a alors cherché à savoir la proportion de galaxies liées à chaque temps, et nous avons vu qu'en effet, la grande majorité des galaxies naines que nous observons dans un environnement proche de la galaxie type Voie Lactée y étaient liées.

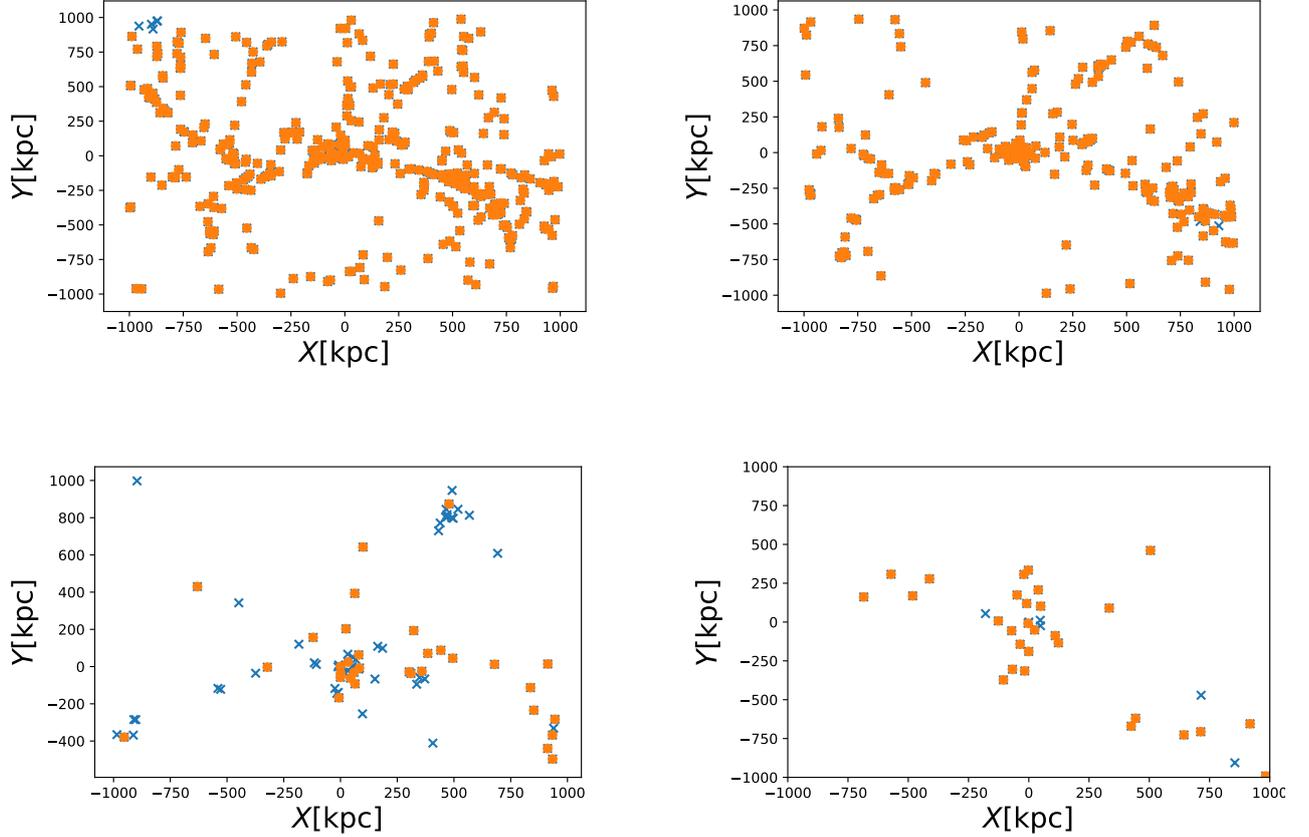


Figure 18: *Galaxies naines liées à la galaxie étudiée à travers le temps*: Galaxies naines liées (en orange) à une galaxie type MW dans la simulation Illustris TNG-50 à différents redshifts. De gauche à droite et de haut en bas : $z = 3$, $z = 2$, $z = 1$, $z = 0$. On compte alors pour $z = 3$ 402 galaxies liées sur 406, $z = 2$: 224/226, $z = 1$: 32/79, $z = 0$: 29/35. Les figures sont centrées sur la galaxie type Voie Lactée (pas représentée ici).

On voit donc que la galaxie que nous étudions s'est formée dans un milieu dense en galaxies, puis les a peu à peu accrétées.

On va donc étudier les propriétés de ces galaxies naines, notamment leur ratio M_{DM}/M_{\star} .

4.2.4 Ratio des galaxies liées

A travers le temps, on retrouve dans l'environnement proche de la galaxie type MW des galaxies naines ayant un ratio compris entre 10 et 30.

On a alors réalisé des histogrammes afin de se rendre compte de leur proportion.

Grâce auxquels on obtient le nombre de galaxies ayant un ratio entre 10 et 30 à chaque redshift étudié :

- $z = 3$: 7 soit 1,72%
- $z = 2$: 10 soit 4,42%
- $z = 1$: 7 soit 8,86%
- $z = 0$: 3 soit 8,57%

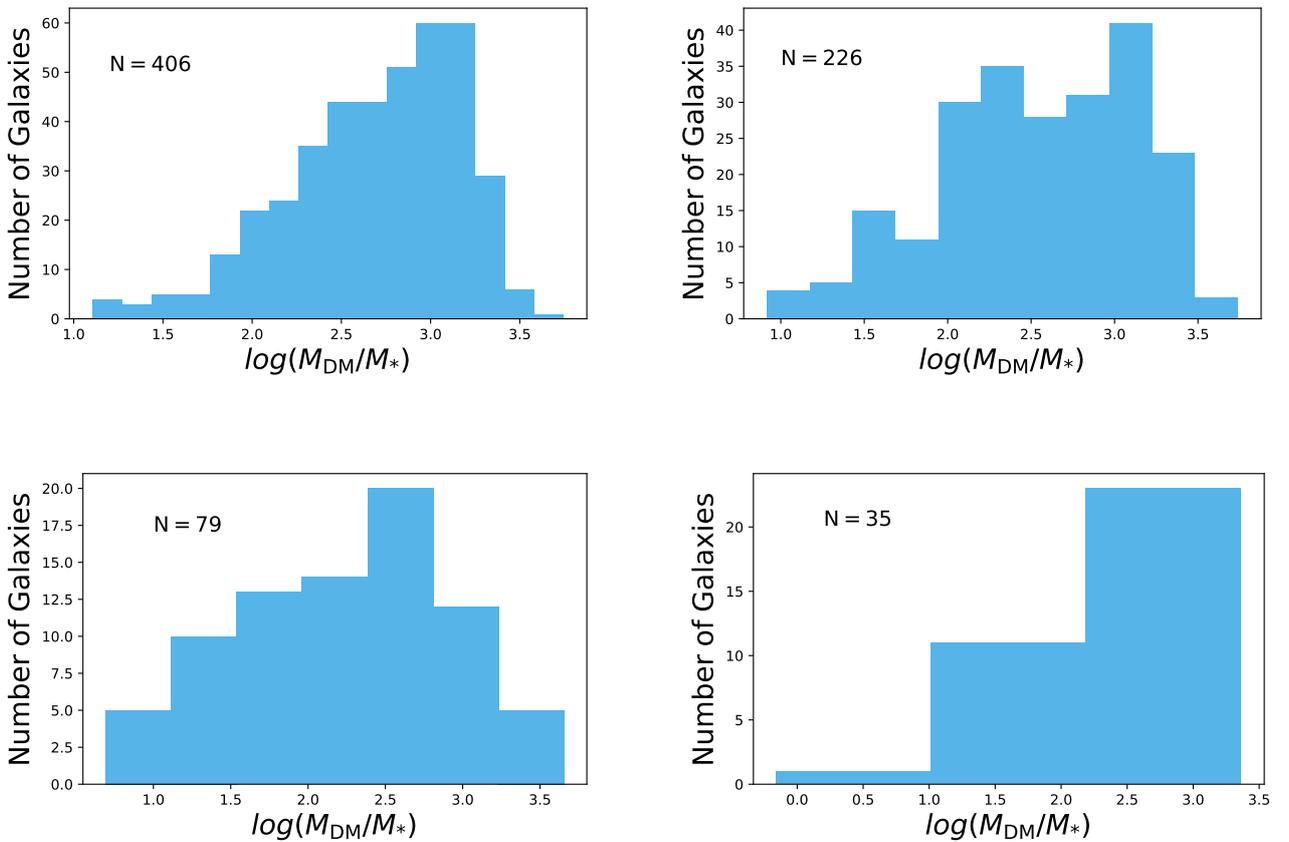


Figure 19: *Ratio M_{DM}/M_* des galaxies naines dans l'environnement de la galaxie étudiée à travers le temps:* Ratio M_{DM}/M_* des galaxies naines dans l'environnement d'une galaxie type Voie Lactée à travers le temps dans la simulation Illustris TNG-50. De gauche à droite et de haut en bas : $z = 3$, $z = 2$, $z = 1$, $z = 0$.

On voit donc qu'il y a une faible proportion de galaxies ayant le ratio que l'on recherche. Par ailleurs, les histogrammes ont des formes en adéquation avec ce que l'on obtient en prenant des données sur l'entiereté de la simulation comme nous l'avons vu dans la section 3.2.

Premièrement nous pouvons constater que la proportion que l'on trouve à $z = 3$ est en adéquation avec la proportion que nous avons trouvé à $z = 3$ sur Illustris TNG-100 l'an passé. Ainsi, cela répond en partie au questionnement sur lequel nous étions restés, à savoir "est-ce que ces galaxies particulières sont situées dans des milieux particulièrement peu denses, ou dans des systèmes semblables au système de la Voie Lactée ?".

Ensuite, nous pouvons clairement voir que cette proportion augmente mais que le nombre de galaxies particulières est lui, plutôt stable.

Deux hypothèses s'offrent donc à nous : les halos à $z = 1$ ou $z = 0$ sont les mêmes que ceux à $z = 3$ ou alors, ce sont des galaxies naines différentes, et ainsi, ces galaxies ont subi une accrétion de leur matière noire par la galaxie type Voie Lactée et ont donc vu leur ratio baisser.

4.2.5 Evolution des galaxies ayant un ratio faible

Dans Illustris, lorsqu'une galaxie fusionne avec une galaxie plus massive, la simulation associe à la galaxie naine l'identifiant de la galaxie hôte pour la suite de la simulation. Ainsi, en traçant l'évolution de la masse d'une galaxie, on peut identifier une accrétion par une galaxie massive en observant une marche sur le graphique.

On va donc tracer l'évolution de la masse de matière noire des galaxies naines ayant un ratio compris entre 10 et 30 afin de voir si elles ont survécu dans le temps ou non.

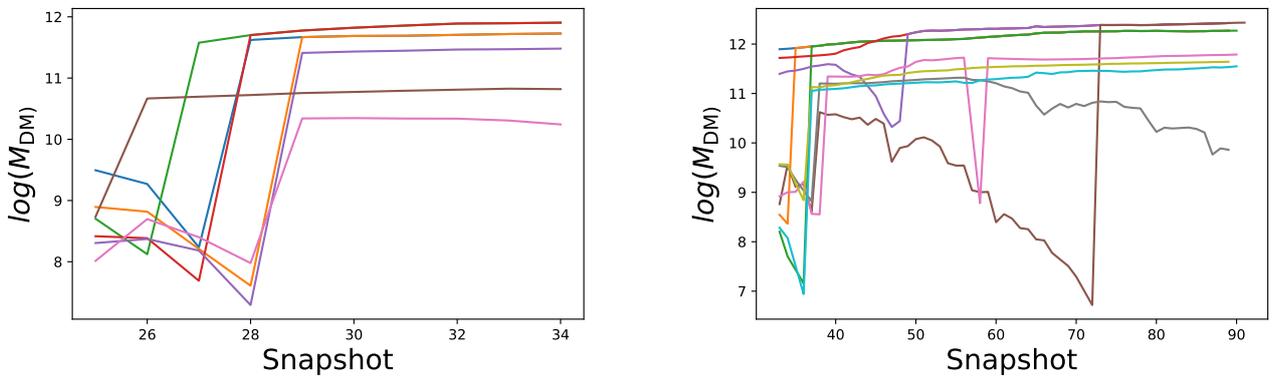


Figure 20: *Evolution de la masse de matière noire des galaxies naines étudiées à $z = 3$ et $z = 2$: Evolution de la masse de matière noire des galaxies naines ayant M_{DM}/M_{\star} entre 10 et 30 à $z = 3$ (à gauche) et $z = 2$ (à droite) liées à la galaxie type Voie Lactée que l'on étudie dans la simulation Illustris TNG-50. Les pics qu'effectuent les courbes montrent une fusion avec une galaxie plus massive, notamment la galaxie type Voie Lactée.*

On observe donc que les galaxies naines ayant un ratio compris entre 10 et 30 à $z = 3$ et $z = 2$ ont toutes été accrétées. On observe aussi que ces accrétions se sont faites très rapidement et donc que ce ne sont pas les mêmes entre $z = 3$ et $z = 2$ ni entre $z = 2$ et $z = 1$ (snapshot 25 correspond à $z = 3$, 33 à $z = 2$, 50 à $z = 1$ et 99 à $z = 0$). Néanmoins, pour que l'on puisse dire que la galaxie naine a été accrétée par la galaxie type Voie Lactée, il faut que sa masse en matière noire "fasse un bond" jusqu'à une valeur d'environ 10^{12} - $10^{12} M_{\odot}$. Dans notre cas, on voit que par exemple la galaxie représentée en rose à $z = 3$ ne fusionne pas avec la galaxie type Voie Lactée mais avec une plus petite; idem pour la galaxie représentée en gris à $z = 2$

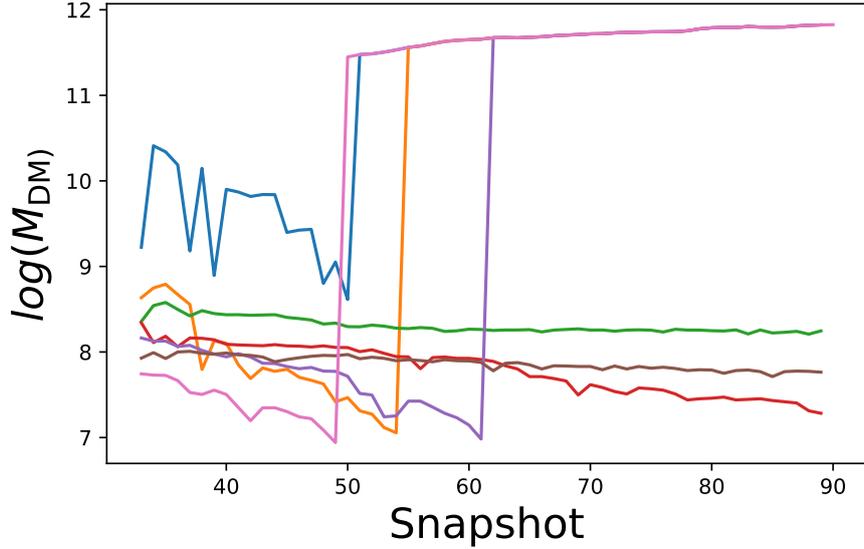


Figure 21: *Evolution de la masse de matière noire des galaxies naines étudiées à $z = 1$: Evolution de la masse de matière noire des galaxies naines ayant M_{DM}/M_{\star} entre 10 et 30 à $z = 1$ liées à la galaxie type Voie Lactée que l'on étudie dans la simulation Illustris TNG-50. Les pics qu'effectuent les courbes montrent une fusion avec la galaxie type Voie Lactée.*

Ainsi, l'hypothèse de Boldrini et al. (2021) selon laquelle l'état actuel de la galaxie d'Andromède peut s'expliquer par une fusion avec une galaxie ayant un rapport entre la masse de son halo de matière noire et la masse de ses étoiles de 20, est plausible car comme on le voit, entre $z = 3$ et $z = 0$, la galaxie que nous observons a fusionné avec **au moins** 18 galaxies de ce type. En effet, en regardant à partir de $z = 2,5$ par exemple, nous pourrions trouver d'autres fusions de ce type. Ce résultat est très encourageant car il permet de confirmer le caractère plausible de l'hypothèse de base du projet !

Il est assez compliqué de connaître avec exactitude le nombre de fusion qu'a subi la galaxie type MW à travers le temps. Nous pouvons tout de même dire que celui-ci est de l'ordre du nombre de galaxie naines qui lui sont liées à $z = 3$. Ainsi, pour environ 400 fusions, la galaxie en a subi au moins 18 avec des galaxies naines ayant M_{DM}/M_{\star} entre 10 et 30.

Pour ce qui est de $z = 1$, sur 7 galaxies, 3 ne se font pas accréter par la galaxie centrale. On s'attend alors à ce que ces 3 galaxies restantes soient celles que nous observons à $z = 0$. En effet, on observe trois galaxies ne présentant pas d'augmentation de masse de matière noire ce qui montre qu'elles ne fusionnent pas.

Par la suite, nous avons étudié le passé des galaxies naines orbitant autour de la galaxie type Voie Lactée à $z = 0$.

4.2.6 Passé des Galaxies liées

On retrace l'évolution de la masse de matière noire des galaxies en orbite autour de la galaxie que l'on étudie à $z = 0$.

On voit alors que toutes ces galaxies, malgré des variations de masse de matière noire, n'ont jamais subi de grosse fusion, et sont donc des objets ayant accréter des galaxies naines encore plus petites avant de devenir des satellites de la galaxie type Voie Lactée.

On voit aussi qu'aucune galaxie ne présente une grosse baisse de masse de matière noire qui pourrait être le témoin d'une accréation de son halo de matière noire comme présenté dans la partie sur les fusions de galaxies (2.3).

On peut donc affirmer que les 3 galaxies ayant un ratio compris entre 10 et 30 à $z = 0$ sont les mêmes qu'à $z = 1$ et qu'elles ont conservé un ratio stable.

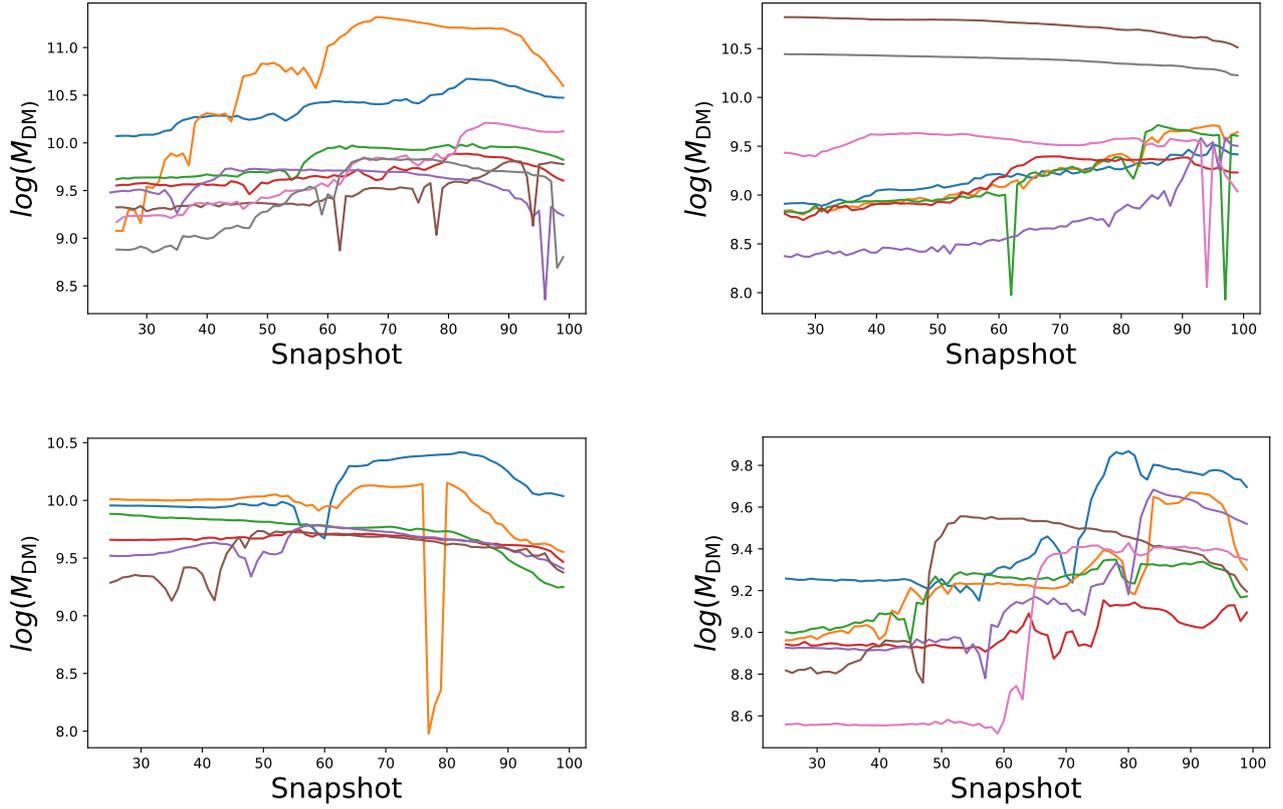


Figure 22: *Passé des galaxies en orbite à $z = 0$: Evolution passée de la masse de matière noire des galaxies en orbite à $z = 0$ autour d'une galaxie type Voie Lactée dans la simulation Illustris TNG-50. La figure est découpée en 4 pour plus de clarté.*

Pour rendre le projet plus visuel, on observera l'orbite de quatre d'entre elles selon un tracé en 3 dimensions.

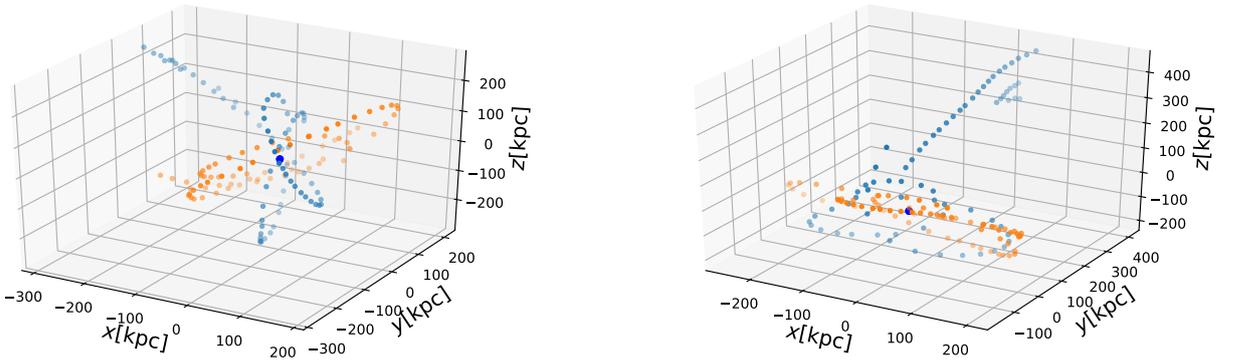


Figure 23: *Orbite des galaxies liées à $z = 0$: Quatre exemples de trajectoires de galaxies naines en orbite autour d'une galaxie type MW dans la simulation Illustris TNG-50. Les figures sont centrées sur la galaxie type MW (point bleu foncé).*

5 Conclusion

Pour conclure, l'an passé nous avons montré que la simulation Illustris TNG-100 prévoyait l'existence de galaxies naines ayant un ratio M_{DM}/M_{\star} de 10-20 à $z = 3$ et que celles-ci étaient en majorité accrétées par des galaxies plus massives.

Nous ne savions en revanche pas si ces cas étaient exceptionnels, ou encore si ces galaxies se trouvaient dans des milieux denses ou au contraire très isolés.

Dans un premier temps, les histogrammes que nous avons tracés montrent que la proportion de matière noire par rapport à celle d'étoiles pour les galaxies naines, est plutôt de l'ordre de 1000 voire 10 000 dans Illustris TNG-50, ce qui n'est pas le consensus tiré des observations. Nous avons aussi pu mettre en évidence que ces histogrammes présentaient une "bosse" aux alentours de 10^2 lorsque l'on se rapproche de $z = 0$. Nous n'avons pas eu le temps de l'étudier mais la proportion de galaxie ayant des ratios compris entre 10 et 30 est alors préservée.

Puis, en étudiant une galaxie du type de la Voie Lactée (et d'Andromède) dans la simulation Illustris TNG-50, nous avons pu montrer qu'effectivement, des fusions avec des galaxies de ce type étaient prévues par la simulation, et ce en proportion assez grande. En effet, nous avons pu montrer que la galaxie étudiée comptait au moins 18 fusions avec des galaxies présentant un "hallo to stellar mass ratio" compris entre 10 et 30 au moment de la fusion.

Une suite intéressante à ce projet serait d'explorer les processus qui ont amené ces galaxies à avoir moins de matière noire que prévu. Notamment il serait pertinent de comprendre si ces fusions se sont déroulées avec une phase d'accrétion du halo de matière noire ou si les galaxies naine étaient déjà pauvre en matière noire.

Aussi, le point de départ de ce projet était la publication de Engler et al. (2021) dans laquelle une liste de 198 systèmes type MW-M31 sont annoncés listés dans la simulation Illustris TNG-50. Maintenant que j'ai créé les codes Python permettant de faire l'étude d'un cas, il serait intéressant de le généraliser à tous les systèmes de ce type de sorte à pouvoir réaliser des statistiques.

6 Bibliographie

- *The abundance of satellites around Milky Way- and M31-like galaxies with the TNG50 simulation: a matter of diversity*, Christoph Engler, Annalisa Pillepich, Anna Pasquali, Dylan Nelson, Vicente Rodriguez-Gomez, Kun Ting Eddie Chua, Eva K. Grebel, Volker Springel, Federico Marinacci, Rainer Weinberger, Mark Vogelsberger, Lars Hernquist, 2021, [MNRAS 000, 1–29](#)
- *Flattening of dark matter cusps during mergers: model of M31*, Pierre Boldrini, Roya Mohayaee and Joe Silk, 2021, [arXiv:2002.12192v2 \[astro-ph.GA\]](#)
- *Orbital Evidences for Dark-matter-free Milky Way Dwarf Spheroidal Galaxies*, Francois Hammer, Yanbin Yang, Frederic Arenou, Jianling Wang, Hefan Li, Piercarlo Bonifacio and Carine Babusiaux, 2020, [arXiv:2002.09493v3 \[astro-ph.GA\]](#)
- *A second galaxy missing dark matter in the NGC 1052 group*, Pieter Van Dokkum, Shany Danieli, Roberto Abraham, Charlie Conroy, Aaron J. Romanowsky, 2019, [arXiv:1901.05973v3 \[astro-ph.GA\]](#)
- *The stellar-to-halo mass ratios of passive and star-forming galaxies at $z \approx 3$ from SMUVS survey*, William I. Cowley, Karina I. Caputi, Smaran Deshmukh, Matthew L. N. Ashby, Giovanni G. Fazio, Olivier Le Fevre, Johan P. U. Fynbo, Oliver Ilbert and Bo Milvang-Jensen, 2019, [arXiv:1901.10455v2 \[astro-ph.GA\]](#)
- *Dark-Matter deficient galaxies produced via high-velocity galaxy collisions in high-resolution numerical simulations*, Eun-Jin Shin, Minyong Jung, Goojin Kwon, Ji-Hoon Kim, Joohyun Lee, Yongseok Jo, Boon Kiat Oh, 2021, [arXiv:2007.09889v3 \[astro-ph.GA\]](#)
- *Most dwarf spheroidal galaxies surrounding the Milky Way cannot be dark-matter dominated satellites*, Francois Hammer, Yanbin Yang, Frederic Arenou, Hefan Li, Jianling Wang, Piercarlo Bonifacio, Carine Babusiaux, Yongjun Jiao, 2021, [arXiv:2009.11935v3 \[astro-ph.GA\]](#)
- *Further evidence for a population of dark-matter-deficient dwarf galaxies* Qi Guo, Huijie Hu, Zheng Zheng, Shihong Liao, Wei Du, Shude Mao, Linhua Jiang, Jing Wang, Yingjie Peng, Liang Gao, Jie Wang, Hong Wu, 2019, [arXiv:1908.00046v2 \[astro-ph.GA\]](#)
- *A spectroscopic study of MATLAS-2019 with MUSE: an ultra-diffuse galaxy with an excess of old globular clusters*, Oliver Müller, Francine R. Marleau, Pierre-Alain Duc, Rebecca Habas, Jérémy Fensch, Eric Emsellem, Mélina Poulain, Sungsoon Lim, Adriano Agnello, Patrick Durrell, Sanjaya Paudel, Rubén Sánchez-Janssen, Remco F. J. van der Burg, 2020, [arXiv:2006.04606v1 \[astro-ph.GA\]](#)
- <https://www.tng-project.org>;
- How to Simulate the Universe in a Computer, <https://astronomy.swin.edu.au/>
- Galaxy Formation and Evolution, H. Mo, F. Van Den Bosch, S. White