



FORMATION INTERDISCIPLINAIRE DE PHYSIQUE  
*Ecole Normale Supérieure*

Stage 2020–2021  
Geoffroy Morlat  
L3 Physique

---

## A la recherche d'une population éteinte de galaxies

---

**Résumé :** *En travaillant sur la simulation cosmologique Illustris TNG-100, nous avons relevé la présence d'une population particulière de galaxies naines au redshift  $z = 3$  (il y a 11,5 Md d'années). Ces galaxies ont la spécificité d'avoir un faible rapport entre la masse du halo de matière noire et la masse stellaire de la galaxie ( $M_{\text{DM}}/M_{\star} = 10\text{-}20$ ), là où il devrait être de l'ordre de la centaine pour ce type d'objet. Un rapport aussi faible est très surprenant et doit être le résultat d'un processus de formation non-standard. L'objectif était alors de comprendre comment ces galaxies ont évolué jusqu'à nos jours. Nous avons donc classé cet échantillon en 4 catégories et avons suivi leur évolution jusqu'à aujourd'hui, en l'expliquant notamment par leur environnement.*

**Abstract :** *While working on the Illustris TNG-100 cosmological simulation, we found a particular population of dwarf galaxies at redshift  $z = 3$  (11.5 Md years ago). These galaxies have the specificity to have a low ratio between the mass of the dark matter halo and the stellar mass of the galaxy ( $M_{\text{DM}}/M_{\star} = 10\text{-}20$ ), where it should be of the order of a hundred for this type of object. Such a low ratio is very surprising and must be the result of a non-standard formation process. The objective was then to understand how these galaxies have evolved up to our days. We have classified this sample in 4 categories and followed their evolution until today, explaining it by their environment.*

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

Stage encadré par :

**Pierre Boldrini (IAP) et David Valls-Gabaud (LERMA)**

[boldrini@iap.fr](mailto:boldrini@iap.fr) et [david.valls-gabaud@observatoiredeparis.psl.eu](mailto:david.valls-gabaud@observatoiredeparis.psl.eu)

Institut d'Astrophysique de Paris

98bis Bd Arago - 75014 Paris

<http://www.iap.fr>

Laboratoire d'Etudes du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique et Atmosphères

61 Av de l'Observatoire - 75014 Paris

<http://www.lerma.obspm.fr>

# Remerciements

Je tiens à remercier Pierre Boldrini et David Valls-Gabaud de m'avoir accueilli lors de ce stage. Leur écoute et leur disponibilité m'a permis de me plonger dans un domaine de la physique qui m'a toujours fait rêver et pour lequel j'ai choisi ces études. Je les remercie de m'avoir donné goût à ce qu'est la vraie recherche en astrophysique grâce à leur passion et leur bienveillance. Ce stage a enfin et surtout, été pour moi l'occasion de clore en beauté et avec passion une année scolaire très compliquée, et pour cela je leur suis très reconnaissant.

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	L'IAP et le LERMA . . . . .	1
1.2	Définitions et termes techniques . . . . .	1
1.3	Motivations . . . . .	2
1.4	Illustris TNG-100 . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Identification d'une population particulière de galaxies</b>	<b>3</b>
2.1	Galaxies recherchées . . . . .	3
2.2	Population trouvée . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Evolution des galaxies</b>	<b>5</b>
3.1	Mise en évidence de 4 catégories . . . . .	5
3.2	Galaxies ayant un ratio constant . . . . .	7
3.3	Galaxies déficientes . . . . .	7
3.4	Galaxies qui fusionnent . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Environnement des galaxies</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>10</b>
<b>6</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>11</b>

# 1 Introduction

## 1.1 L'IAP et le LERMA

J'ai effectué mon stage au Laboratoire d'Etudes du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique et Atmosphères (Observatoire de Paris) et à l'Institut d'Astrophysique de Paris pour une durée d'un mois et demi. J'ai été encadré par David Valls-Gabaud, chercheur au LERMA et Pierre Boldrini, actuellement en post-doc à l'IAP et travaillant régulièrement avec David Valls-Gabaud.

Le LERMA est constitué des équipes Galaxies et Cosmologie, Milieu interstellaire et Plasmas, Molécules dans l'Univers et enfin Instrumentation et Télédétection.

L'IAP a lui aussi 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" et David Valls-Gabaud, membre de l'équipe "Galaxies et Cosmologie", a eu pour objet l'étude d'une population de galaxies naines particulières aujourd'hui disparue. 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. (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 leurs masses de matière noire ou leurs formes. Dans notre étude nous nous sommes concentrés sur les galaxies dites **naines**. Les galaxies naines ont

une  $M_{\text{DM}}$  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"  $M_{\text{DM}}/M_{\star}$ , 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.

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 la grosse 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 physique que l'on connaît.

### 1.3 Motivations

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, nous avons voulu étudier de plus près si de telles galaxies pouvaient exister.

D'autres études en proposent 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 ( $M_{\text{DM}}/M_{\star} < 1$ ).

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'inscrit 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.

Le fait de trouver des galaxies déficientes en matière noire dans la simulation Illustris TNG-100 peut alors faire avancer ce débat. Au même titre que de trouver une population de galaxies ayant un ratio  $M_{\text{DM}}/M_{\star}$  de 10-20 qui aurait aujourd'hui disparu.

### 1.4 Illustris TNG-100

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  $3 \times 10^{13}$  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'étude de l'évolution des galaxies que nous avons menée nécessite une résolution moyenne. Nous avons en effet besoin d'avoir un nombre conséquent de galaxies dans des environnements variés, tout en conservant une forte résolution sur les galaxies puisque nous étudions des galaxies naines. Ainsi, nous avons travaillé sur la simulation TNG-100. Dans les galaxies que l'on étudie, il y a entre 1000 et 100 000 particules de matière noire de masse  $5 \times 10^6 M_{\odot}$  chacune.

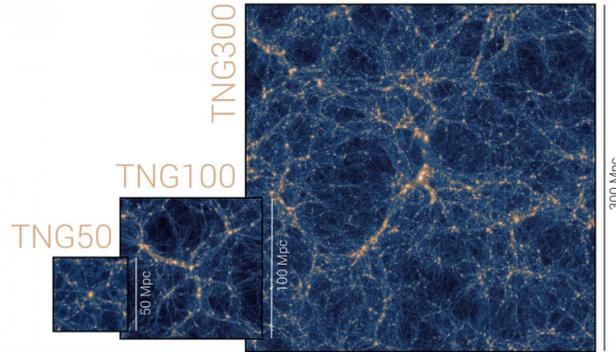


Figure 1: *La simulation Illustris TNG*: Représentation visuelle des "boîtes d'univers" obtenues grâce aux simulations Illustris TNG. On voit les filaments de matière noire (en bleu) à partir des quels les galaxies s'agencent (en jaune). source : <https://www.tng-project.org>

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](http://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 Identification d'une population particulière de galaxies

### 2.1 Galaxies recherchées

Nous avons donc cherché à trouver une population de galaxies naines présentant un faible ratio  $M_{\text{DM}}/M_{\star}$  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 démarre 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.

Nous avons choisi cette gamme de masse car la simulation n'offrait pas assez de précision pour les galaxies de masse de matière noire inférieures à  $10^9 M_\odot$  car quelques centaines de particules n'offraient pas assez de précision.

De plus, nous avons décidé de sélectionner des galaxies ayant un "halo-to-stellar mass ratio" compris entre 10 et 20 car pour cette gamme de masse, le ratio à  $z = 0$  est censé être compris entre 100 et 1000, donc cette catégorie est très différente de ce que l'on s'attend à trouver. De plus, dans le travail de Boldrini et al. (2021), l'accrétion par la galaxie M31 d'une galaxie naine ayant un ratio de cet ordre est proposée comme explication de la structure de son halo.

Par ailleurs, au fur et à mesure que l'on se rapproche de  $z = 0$ , souvent, la masse en étoile augmente car les galaxies sont actives (il y a des créations d'étoiles), donc  $M_{\text{DM}}/M_\star$  diminue. Ceci est un effet au premier ordre car les étoiles et la matière noire peuvent être éjectées des galaxies à cause des forces de marées exercées par des galaxies voisines.

A la fin de mon stage nous n'avions 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.

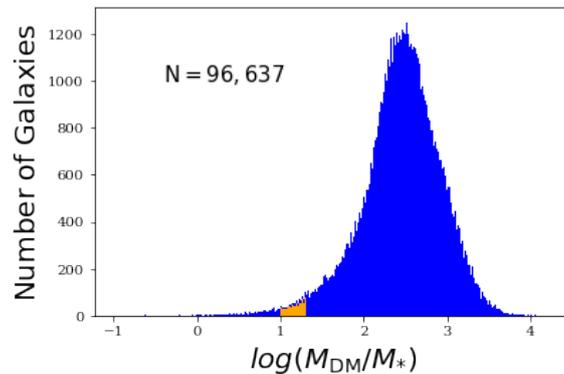


Figure 2:  $M_{\text{DM}}/M_\star$  des galaxies étudiées: Rapport de masse de matière noire par rapport à la composante stellaire des galaxies naines de masse allant de  $10^9$  à  $10^{11} M_\odot$  dans la simulation Illustris TNG-100 à  $z = 3$ . En orange sont représentées, les galaxies ayant un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

## 2.2 Population trouvée

A ce stade il était très encourageant de trouver cette population de galaxies car rien ne nous garantissait qu'elle existe. En effet, nous étions à la recherche d'une population de galaxies éteintes à  $z = 0$ , donc rien ne nous certifiait qu'elle ait pu exister dans des temps plus reculés. Cette découverte nous a donc motivés à retracer leur histoire jusqu'à nos jours.

Nous avons alors voulu savoir de quelle manière étaient réparties les galaxies avec ce ratio en terme 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.

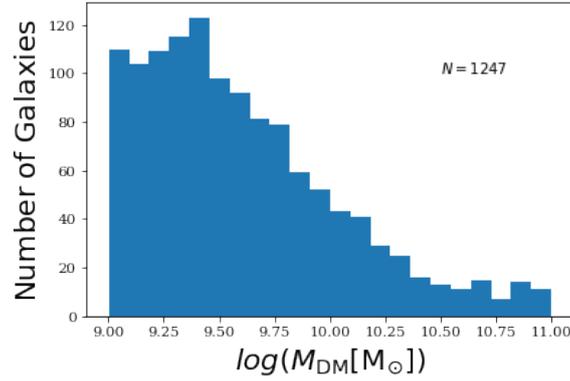


Figure 3: *Distribution des galaxies*: Distribution de l'échantillon de galaxies naines avec  $M_{\text{DM}}/M_{\star}$  compris entre 10 et 20 à  $z = 3$  dans la simulation Illustris TNG-100. On voit que la majorité des galaxies se trouvent dans la tranche de masse entre  $10^9$  et  $10^{10} M_{\odot}$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

### 3 Evolution des galaxies

#### 3.1 Mise en évidence de 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  $M_{\text{DM}}/M_{\star}$  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  $M_{\text{DM}}/M_{\star}$  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)

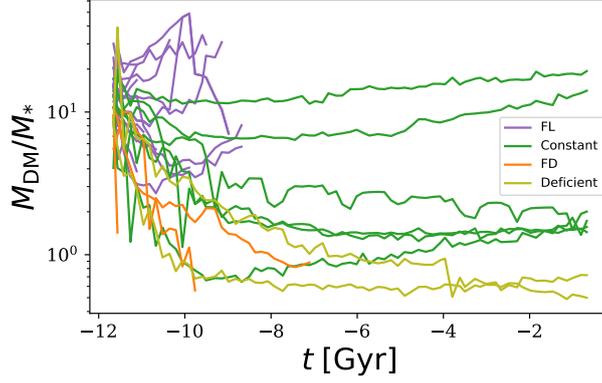


Figure 4: *Evolution d'une partie de l'échantillon*: Evolution de notre échantillon de galaxies naines présentant un ratio  $M_{\text{DM}}/M_*$  entre 10 et 20 à  $z = 3$  dans la simulation Illustris TNG-100. On observe clairement la présence de 4 catégories. Une partie fusionnent en devenant déficientes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

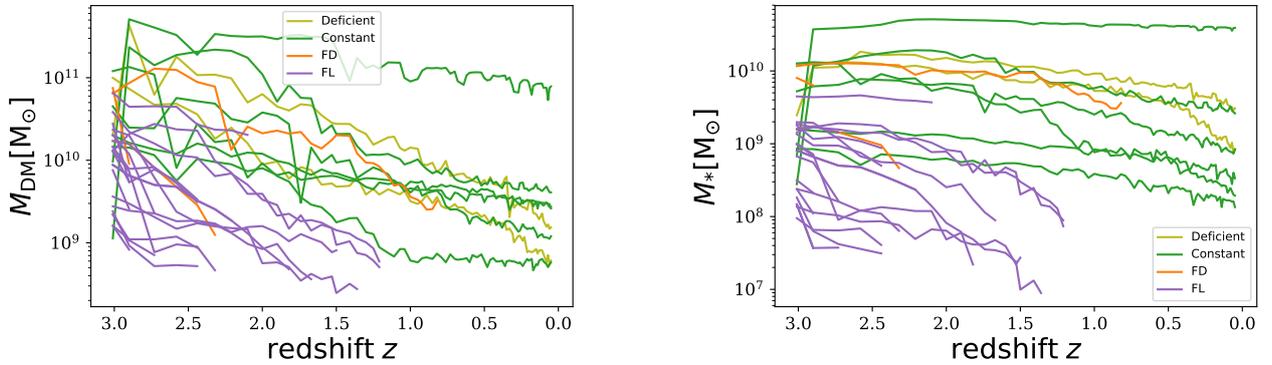


Figure 5: *Evolution de la masse en matière noire et masse stellaire*: Evolution des masses de matière noire et stellaires d'un échantillon de galaxies naines présentant un ratio  $M_{\text{DM}}/M_*$  entre 10 et 20 à  $z = 3$  dans la simulation Illustris TNG-100. L'évolution des masses en matière noire et en étoile confirment le fait que certaines fusionnent en perdant plus de masse de matière noire que d'étoile (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) .

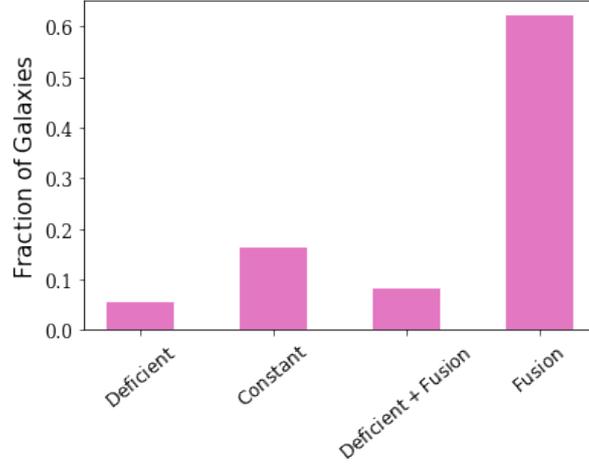


Figure 6: *Proportion de chaque catégorie dans l'échantillon*: Répartition de la proportion de galaxies ayant un halo-to-stellar mass ratio compris entre 10 et 20 à  $z = 3$  dans la simulation Illustris TNG-100 en 4 catégories en fonction de leur évolution jusqu'à  $z = 0$ .

### 3.2 Galaxies ayant un ratio constant

Les galaxies ayant un ratio constant ne sont pas celles sur lesquelles notre étude s'est portée. En effet, bien que leur présence soit intéressante nous avons choisi de nous concentrer sur les trois autres catégories.

### 3.3 Galaxies déficientes

Le fait d'avoir trouvé des galaxies déficientes dans notre échantillon est très intéressant car cela va dans le sens des publications controversées de Van Dokkum ayant montré leur existence à partir d'observations, bien que dans le cas de ces études les galaxies sont isolées ce qui n'est pas notre cas car elles perdent leur matière noire par accréation. Par ailleurs, nous pouvons ajouter que notre étude se concentre uniquement sur les halos dont le ratio est compris entre 10 et 20 à  $z = 3$  tandis que si nous avons pris un spectre plus large, nous aurions peut-être pu obtenir des résultats plus conséquents.

Nous pouvons donc affirmer qu'Illustris TNG-100 prévoit l'existence de galaxies déficientes en matière noire à  $z = 0$ .

Comme la figure 5 le montre, les galaxies déficientes conservent une masse d'étoiles sensiblement identique à celle qu'elles avaient à  $z = 3$ . Ainsi, ces galaxies 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  $M_{\text{DM}}/M_{\star}$  de la galaxie naine.



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](http://astropage.eu)*

Afin de confirmer notre hypothèse selon laquelle les galaxies déficientes perdaient leurs masses de matière noire par accréation, nous avons étudié le rayon orbital de l'une d'elle par rapport au gros halo voisin. Ainsi, on voit sur la figure 8 que le rayon orbital de la galaxie naine décroît de 85kpc à 5kpc entre  $z = 3$  et  $z = 0$  ce qui s'accompagne d'une perte de masse. On en déduit donc que la galaxie est attirée par une galaxie plus massive et que cela s'accompagne d'une accréation de sa matière noire.

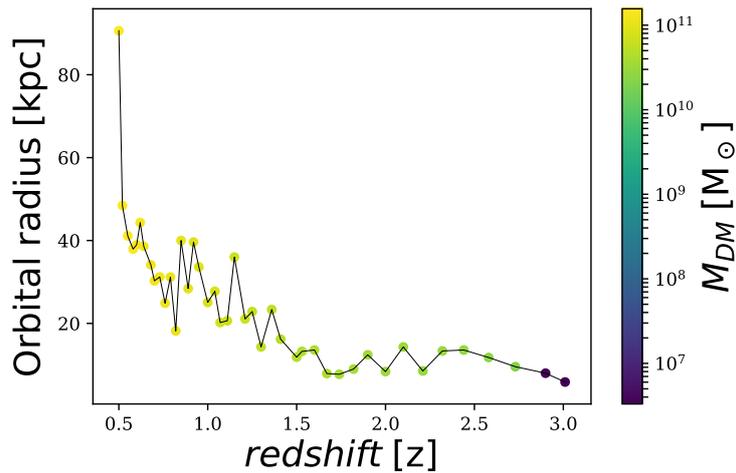


Figure 8: *Rayon orbital pour une galaxie déficiente avec le ratio  $M_{\text{DM}}/M_{\star} < 1$  à  $z = 0$ : Rayon orbital d'une galaxie déficiente en matière noire une fois à  $z = 0$  dans la simulation Illustris TNG-100. On observe une perte de masse au fur et à mesure que le halo se rapproche de la galaxie voisine. La déficience en matière noire est donc due à l'accréation de son halo par une galaxie plus massive.*

Les publications proposant l'existence de ces objets la justifient par leur dépendance à une galaxie voisine plus massives. Ces galaxies sont alors appelées satellites et leur halo alimente celui de la galaxie principale. Le fait d'avoir pu attribuer aux galaxies déficientes de notre échantillon, des halos plus massifs leur accrétant de la matière noire va dans le sens de cette hypothèse car cela confirme que les galaxies déficientes ont une évolution fortement influencées par des galaxies plus massives, comme ce serait le cas avec des galaxies satellites.

### 3.4 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 (voir ci-dessus). 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.

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 d'une d'elle passant par un stade de déficience. Celle que nous avons choisi est particulière car elle orbite autour d'un système de deux galaxies massives qui fusionnent l'une avec l'autre peu avant d'accrêter 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  $z = 2$ .

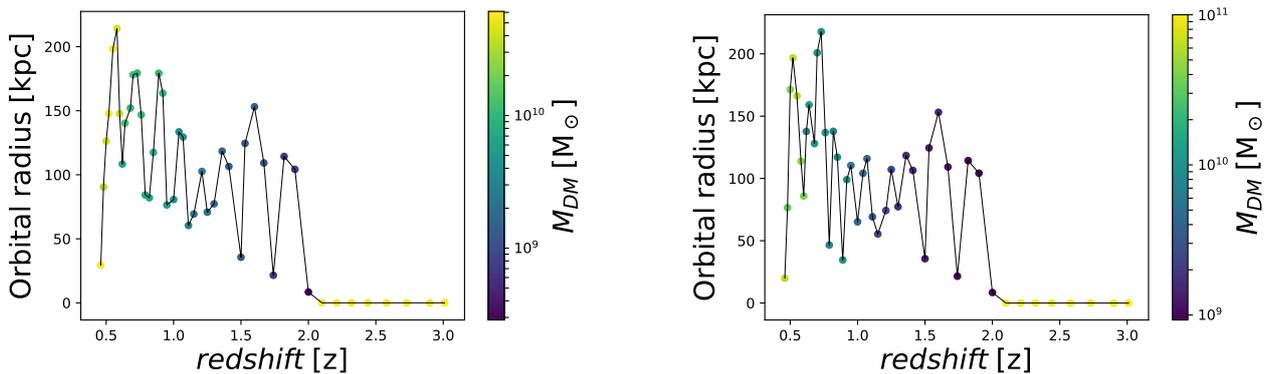


Figure 9: *Fusion d'une galaxie naine avec un système de deux galaxies plus massives*: Fusion d'une galaxie naine ayant un ratio  $M_{DM}/M_*$  compris entre 10 et 20 à  $z = 3$  avec un système de deux galaxies massives fusionnant peu de temps avant dans la simulation Illustris TNG-100.

## 4 Environnement des galaxies

Malheureusement, je n'ai pas eu le temps d'étudier entièrement l'environnement des galaxies afin de comprendre entièrement ce pourquoi elles évoluaient ainsi.

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<sup>e</sup> 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.

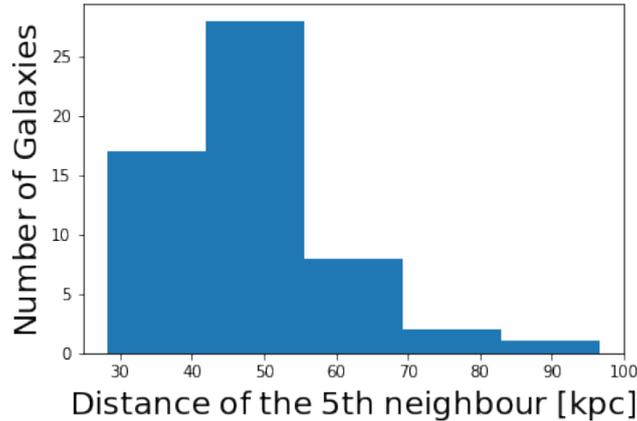


Figure 10: *Distance du 5<sup>e</sup> voisin*: Distance du 5<sup>e</sup> voisin pour un échantillon de 52 galaxies naines ayant un rapport  $M_{\text{DM}}/M_{\star}$  compris entre 10 et 20 à  $z = 3$  dans la simulation Illustris TNG-100.

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

## 5 Conclusion

En conclusion, lors de mon stage j'ai pu me familiariser avec la lecture et l'analyse d'articles scientifiques ainsi qu'avec les bases de données et le code python qui permet de les exploiter. Grâce à cela j'aurais réussi à mettre en évidence l'existence d'une petite population de galaxies ayant un ratio  $M_{\text{DM}}/M_{\star}$  compris entre 10 et 20 qui a aujourd'hui disparu. L'objectif premier a donc été rempli.

J'ai par la suite étudié l'évolution de cette population en la divisant en 4 catégories. Ainsi, nous voyons qu'Illustris TNG-100 prévoit la présence à  $z = 0$  de galaxies naines déficientes en matière noire, ainsi que de galaxies ayant un ratio plus faible qu'attendu.

Par ailleurs, une étude plus approfondie des processus de fusion et des environnements des galaxies pourrait amener à des découvertes intéressantes et à l'écriture d'un article scientifique.

Il est donc probable qu'après ma soutenance je continue de travailler sur ce sujet afin d'exploiter mes codes jusqu'au bout.

## 6 Bibliographie

- Boldrini P. et al., 2021, Flattening of dark matter cusps during mergers: model of M31
- Hammer F. et al., 2020, Orbital Evidences for Dark-matter-free Milky Way Dwarf Spheroidal Galaxies
- Van Dokkum P., 2019, A second galaxy missing dark matter in the NGC 1052 group
- Cowley W. et al., 2019, The stellar-to-halo mass ratio of passive and star forming galaxies at  $z < 2.3$  from the SMURVS survey
- Shin E.-J. et al., 2020, Dark-Matter deficient galaxies produced via high-velocity galaxy collisions in high-resolution numerical simulations
- Hammer F., 2021, Most dwarf spheroidal galaxies surrounding the Milky Way cannot be dark-matter dominated satellites
- Guo Q. et al., 2019, Further evidence for a population of dark-matter-deficient dwarf galaxies
- Müller O. et al., 2020, A spectroscopic study of MATLAS-2019 with MUSE: an ultra-diffuse galaxy with an excess of old globular clusters
- <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