

# SYNTHÈSE SPECTRALE + DES GALAXIES ET MODÈLES D'ÉVOLUTION

## LES MODÈLES DE SYNTHÈSE SPECTRALE

## BIBLIOTHÈQUES DE DISTRIBUTION SPECTRALE D'ÉNERGIE DE GALAXIES

## INTERPRÉTATION DES OBSERVATIONS

## FUTURS DÉVELOPPEMENTS

Les modèles développés à l'IAP depuis plusieurs décennies sont utilisés dans le monde entier pour interpréter les observations multi-longueurs d'onde de galaxies aussi bien proches que lointaines.

Initialement, ces modèles furent développés pour extraire des contraintes sur l'âge et la composition chimique des étoiles de galaxies proches à partir de spectres observés dans le domaine visible, du type de celui montré sur la Figure 1a. Depuis plusieurs années, des efforts importants ont été déployés pour étendre ces modèles à l'interprétation d'observations de galaxies dans l'ultraviolet et l'infrarouge (Figure 1b) et pour développer des méthodes d'interprétation adaptées à l'exploration de l'Univers lointain, à la limite de la détectabilité des télescopes modernes. À des décalages spectraux vers le rouge (redshift en anglais) de l'ordre de  $z=1$ , où les observations sont souvent incomplètes, la distribution spectrale de l'énergie émise par une galaxie peut être assemblée en combinant des observations spectroscopiques et photométriques partielles (Figure 1c). Dans les cas extrêmes, on peut ne recueillir qu'un élément de spectre de galaxie à très grand décalage spectral, qui pourtant peut contenir de précieuses informations sur le contenu en étoiles et en gaz interstellaire de cette galaxie (Figure 1d).

Pour interpréter les différents types d'observations de galaxies illustrés par la Figure 1 en termes de paramètres physiques qui décrivent le contenu en étoiles et en gaz interstellaire, les chercheurs de l'IAP ont simulé des bibliothèques de distributions spectrales d'énergie de galaxies, en combinant des modèles de synthèse spectrale avec des modèles de formation des galaxies. Ceux-ci sont construits dans le cadre du modèle dit d'univers hiérarchique où les petites fluctuations de densité observées sur le fond diffus cosmologique sont amplifiées par la gravité pour donner des halos de matière noire au sein desquels se forment des disques stellaires : les galaxies. La Figure 2 montre les histoires de formation d'étoiles d'une galaxie, prédites par un modèle standard de formation et d'évolution des galaxies dans un tel univers. Ces prédictions peuvent être combinées avec un modèle d'évolution spectrale permettant de décrire l'émission de populations stellaires d'âges et de métallicités données. On peut ainsi simuler la distribution spectrale d'énergie de la galaxie à n'importe quel moment de son évolution passée jusqu'à aujourd'hui. La Figure 3 montre la distribution spectrale d'énergie de la galaxie de la Figure 2 il y a 4.4 milliards d'années (âge marqué par la ligne pointillée sur la Figure 2), selon différents types d'observations : spectroscopie à moyenne et basse résolution et photométrie en 5 bandes.

Une bibliothèque de modèles du type de ceux montrés sur les Figures 2 et 3 est très utile, car elle peut servir à interpréter n'importe quelle distribution spectrale d'énergie observée – spectroscopique ou photométrique – d'une galaxie (Figure 1), en fonction des paramètres physiques décrivant les propriétés des étoiles et du gaz interstellaire. Pour illustrer la validité d'une telle approche, on peut générer des « pseudo-observations » de galaxies en ajoutant un « bruit photonique observationnel » à des spectres modélisés. La Figure 4 montre un exemple de spectre construit de cette manière à partir du spectre à basse résolution de la galaxie de la Figure 3 (centre). En comparant ce spectre « pseudo-observé » à une bibliothèque complète de plusieurs millions de spectres modélisés de galaxies avec des histoires de formation d'étoiles et d'enrichissement chimique variés, on peut calculer la probabilité de chaque modèle et ainsi contraindre de façon statistique les paramètres physiques clés de la galaxie pseudo-observée. Les diagrammes au bas de la Figure 4 montrent que les contraintes recueillies ainsi sur 6 paramètres clés des étoiles et du gaz interstellaire sont très proches des paramètres physiques réels du modèle ayant servi à créer le spectre pseudo-observé.

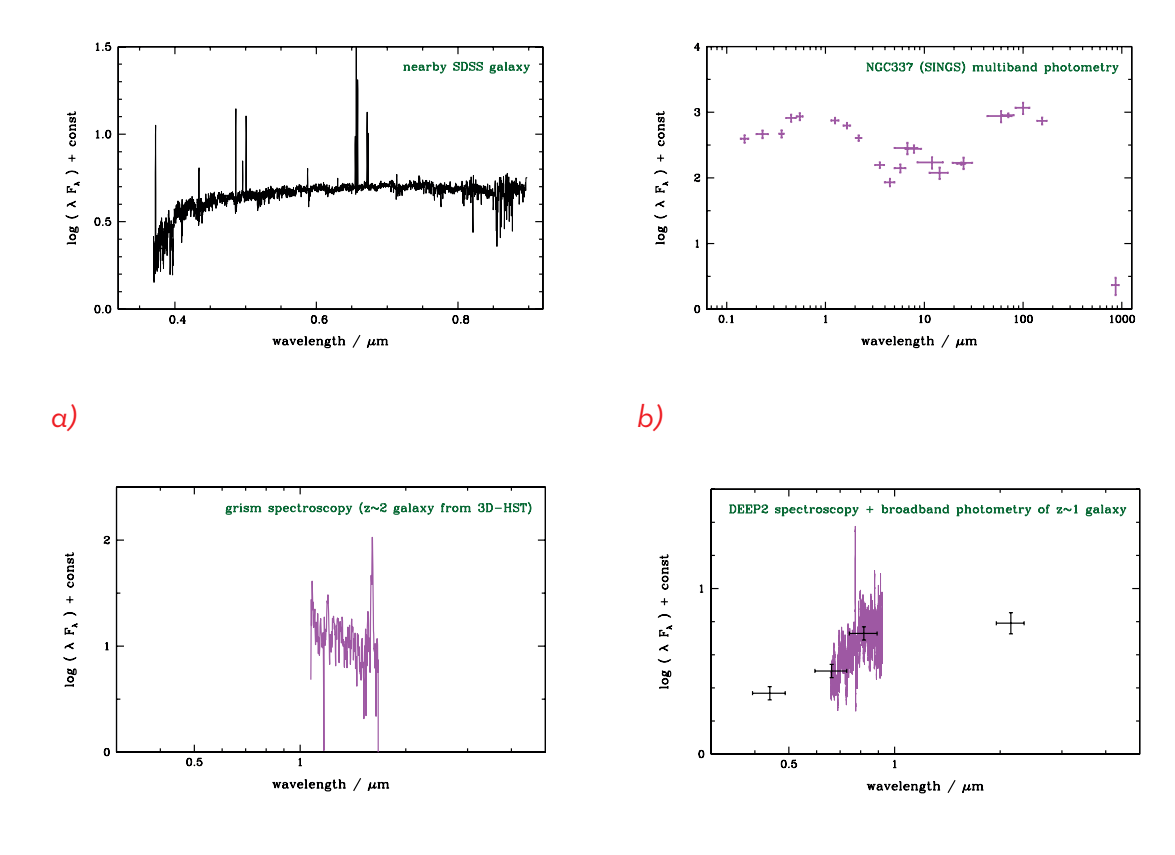


Figure 1: Exemples de distributions spectrales observées de galaxies : a) spectre optique d'une galaxie proche; b) distribution spectrale d'une galaxie proche construite à partir d'observations photométriques de l'UV à l'infrarouge lointain; c) distribution spectrale d'une galaxie à un décalage spectral  $z=1$  construite en combinant des données photométriques et spectroscopiques; d) échantillon de spectre d'une galaxie à un décalage spectral  $z=2$ .

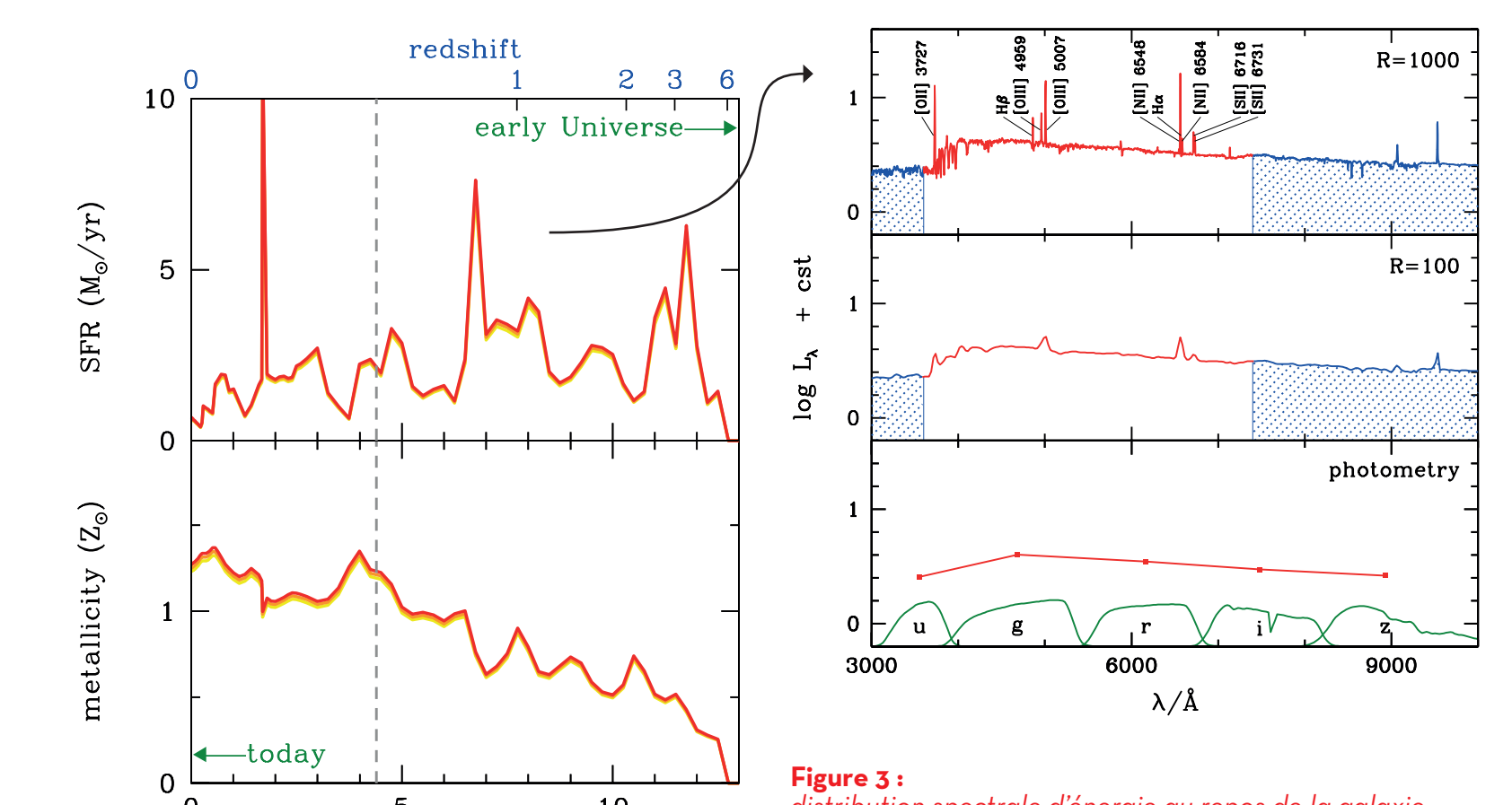


Figure 2: simulation des histoires de formation d'étoiles (en haut) et d'enrichissement chimique (en bas) d'une galaxie dans un univers hiérarchique. L'évolution en dents de scie du taux de formation stellaire (SFR en anglais) et de l'abondance en métaux du gaz formant les étoiles (metallicity) reflète les différents épisodes d'interactions et de fusions qui ont façonné l'évolution de la galaxie. En abscisse sont indiqués aussi bien l'intervalle de temps séparant aujourd'hui d'une époque passée, en milliards d'années (en bas), que le décalage spectral vers le rouge auquel cet intervalle correspond (en haut). Pour référence, l'Univers est aujourd'hui âgé d'environ 13.8 milliards d'années (correspondant à  $z=0$ ).

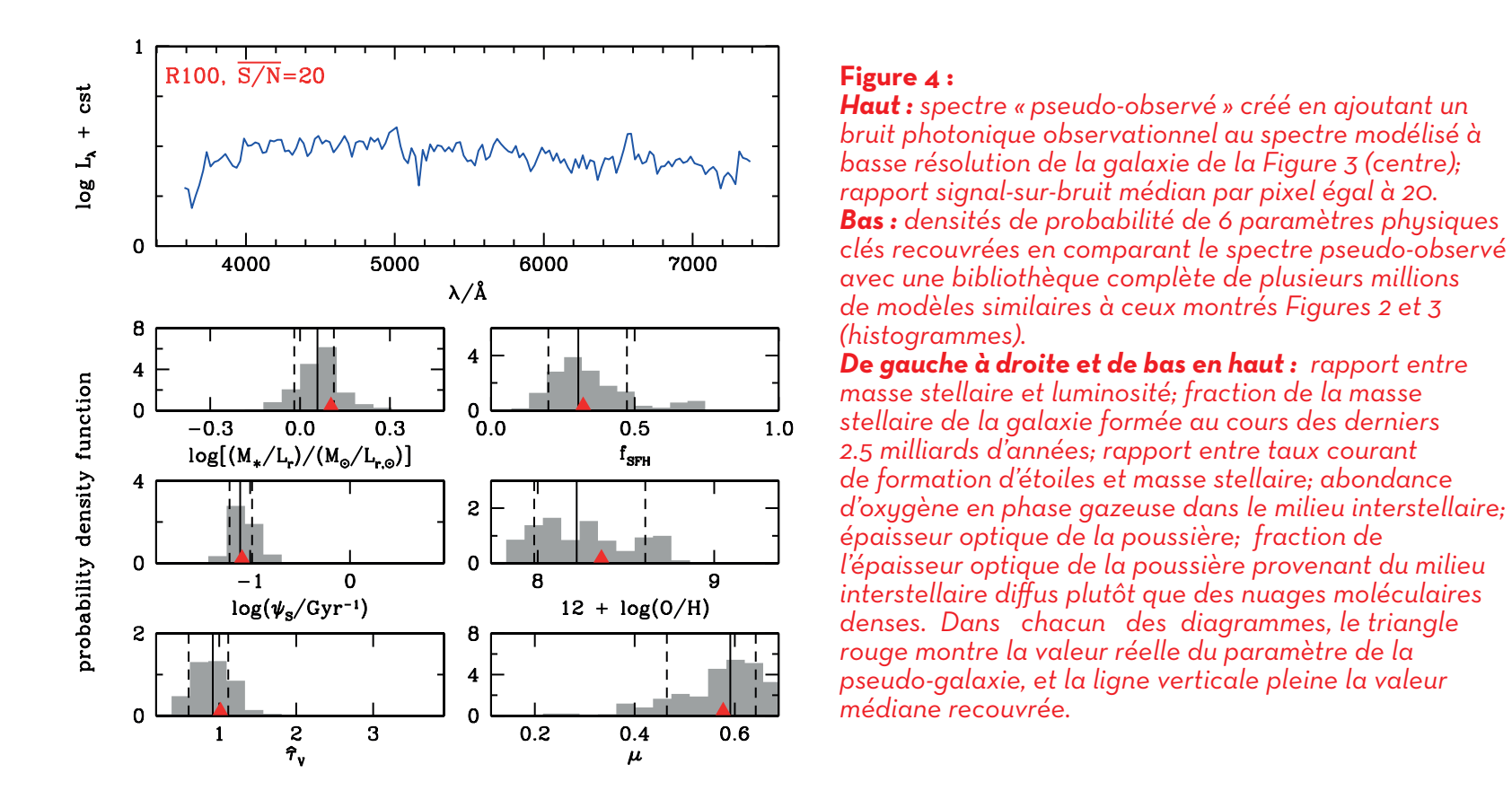


Figure 4: Haut: spectre « pseudo-observé » créé en ajoutant un bruit photonique observationnel au spectre modélisé à basse résolution de la galaxie de la Figure 3 (centre); rapport signal-sur-bruit médian par pixel égal à 20. Bas: densités de probabilité de 6 paramètres physiques clés recueillies en comparant le spectre pseudo-observé avec une bibliothèque complète de plusieurs millions de modèles similaires à ceux montrés Figures 2 et 3 (histogrammes). De gauche à droite et de bas en haut: rapport entre masse stellaire et luminosité; fraction de la masse stellaire de la galaxie formée au cours des derniers 2.5 milliards d'années; rapport entre taux courant de formation d'étoiles et masse stellaire; abondance d'oxygène en phase gazeuse dans le milieu interstellaire; épaisseur optique de la poussière; fraction de l'épaisseur optique de la poussière provenant du milieu interstellaire diffus plutôt que des nuages moléculaires denses. Dans chacun des diagrammes, le triangle rouge montre la valeur réelle du paramètre de la pseudo-galaxie, et la ligne verticale pleine la valeur médiane recueillie.

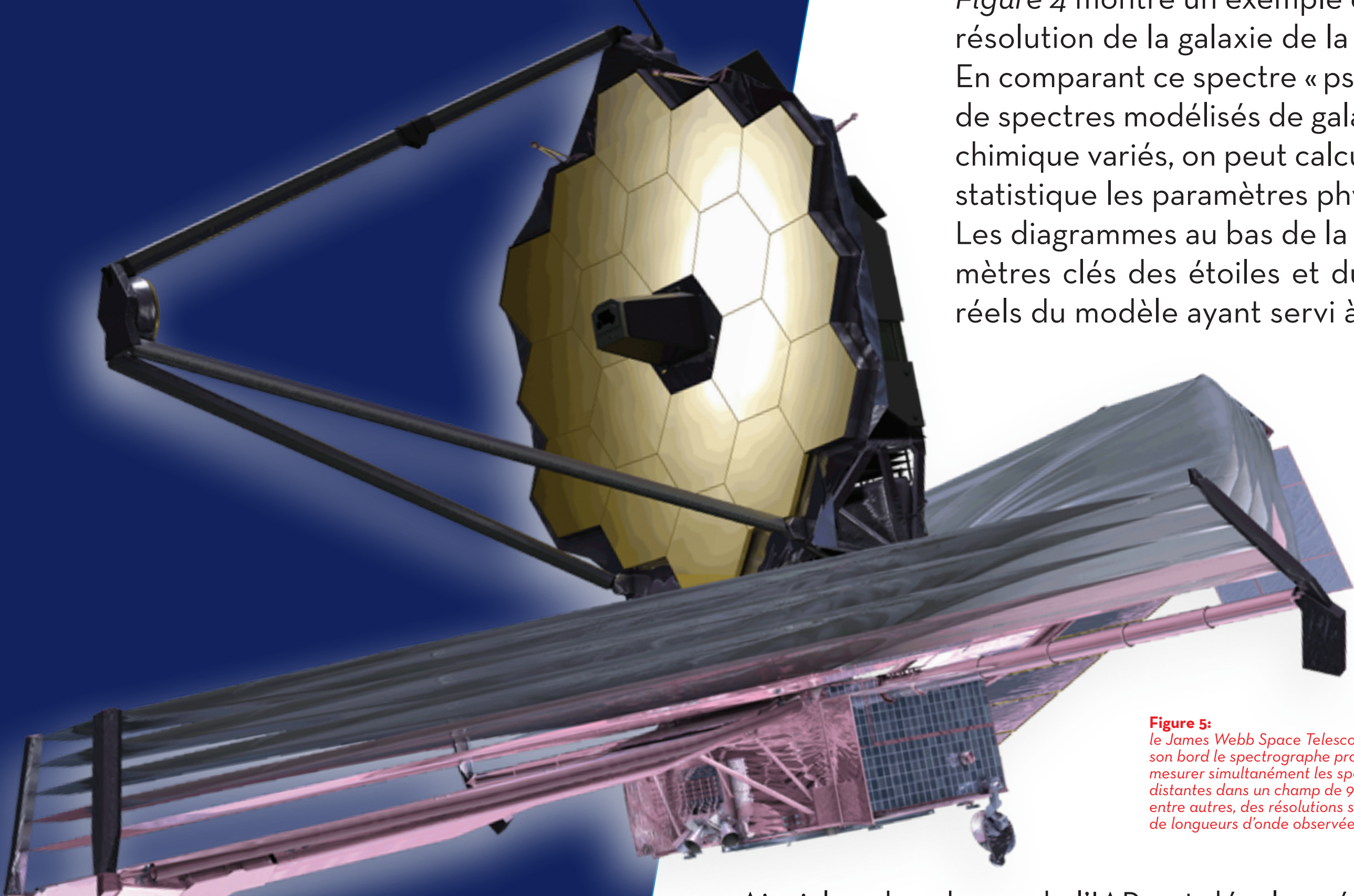


Figure 6: Illustration de spectres de galaxies extrêmement distantes que pourra recueillir l'instrument NIRSpec à bord du JWST dans un champ ultra-profond du ciel (Champ Ultra-profond de Hubble, au centre). Le décalage spectral augmente dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Les paramètres physiques de telles galaxies permettront de caractériser en détail les premiers épisodes de formation stellaire et d'enrichissement chimique de l'Univers.

Figure 5: le James Webb Space Telescope (JWST) qui sera lancé en 2018 embarquera à son bord le spectrographe proche-infrarouge européen NIRSpec, capable de mesurer simultanément les spectres d'une centaine de galaxies extrêmement distantes dans un champ de 9 arcmin<sup>2</sup>. Plusieurs modes opérationnels offriront, entre autres, des résolutions spectrales entre R=100 et R=2700 sur un domaine de longueurs d'onde observées entre 0.6 et 5  $\mu$ m.

Ainsi, les chercheurs de l'IAP ont développé des outils performants pour interpréter les observations de galaxies à toutes les époques cosmiques en terme de paramètres physiques, décrivant les propriétés des étoiles et du gaz interstellaire et apportant des contraintes inédites sur les processus physiques qui ont dominé la formation et l'évolution des galaxies que nous observons aujourd'hui. Pour les futurs développements, des chercheurs de l'IAP sont impliqués dans l'équipe scientifique associée au spectrographe infrarouge NIRSpec qui sera embarqué à bord du futur télescope spatial James Webb (JWST). (Figure 5 et 6). Ces observations apporteront de nouvelles contraintes sur l'évolution précoce des galaxies.

