

# Contraindre le modèle $\Lambda$ CDM avec le Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI)

Svyatoslav Trusov, Simon Bouchard, Antoine Gilles-Lordet\*, Mahmoud Osman\*

Sous la supervision de Pauline Zarrouk et Nicolas Regnault\*

LPNHE, CNRS-IN2P3 & Sorbonne Université

email : pauline.zarrouk@lpnhe.in2p3.fr



## DESI

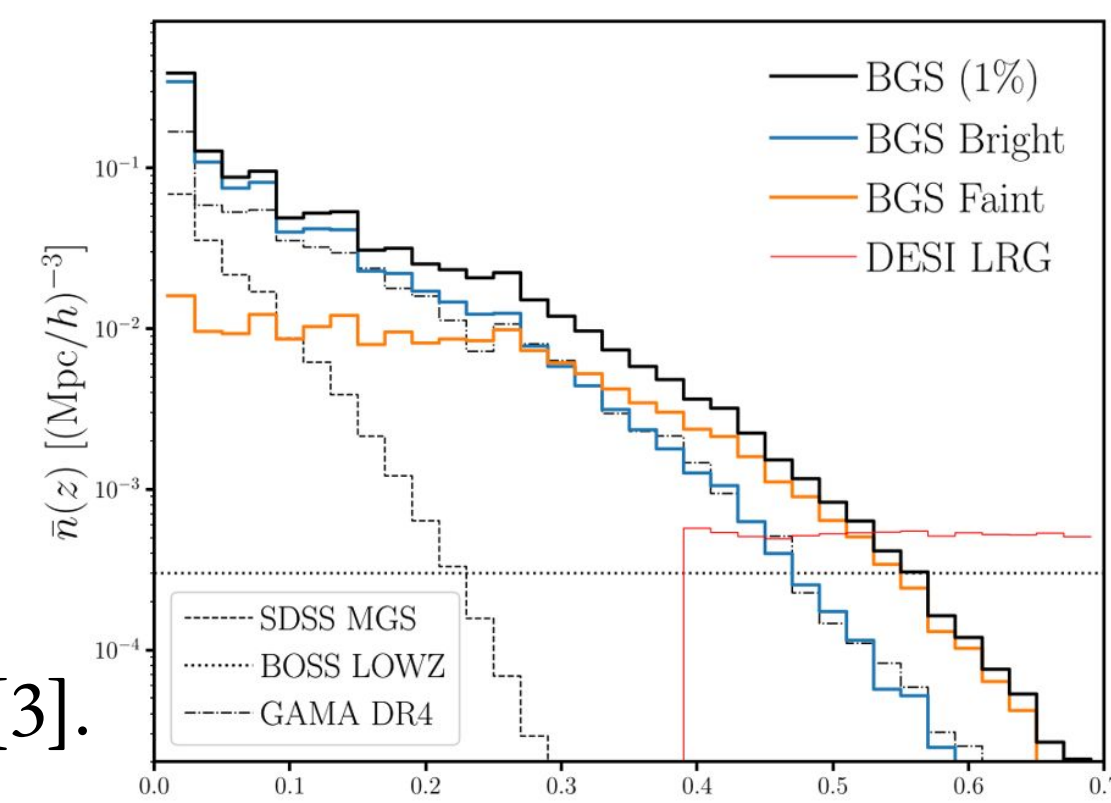
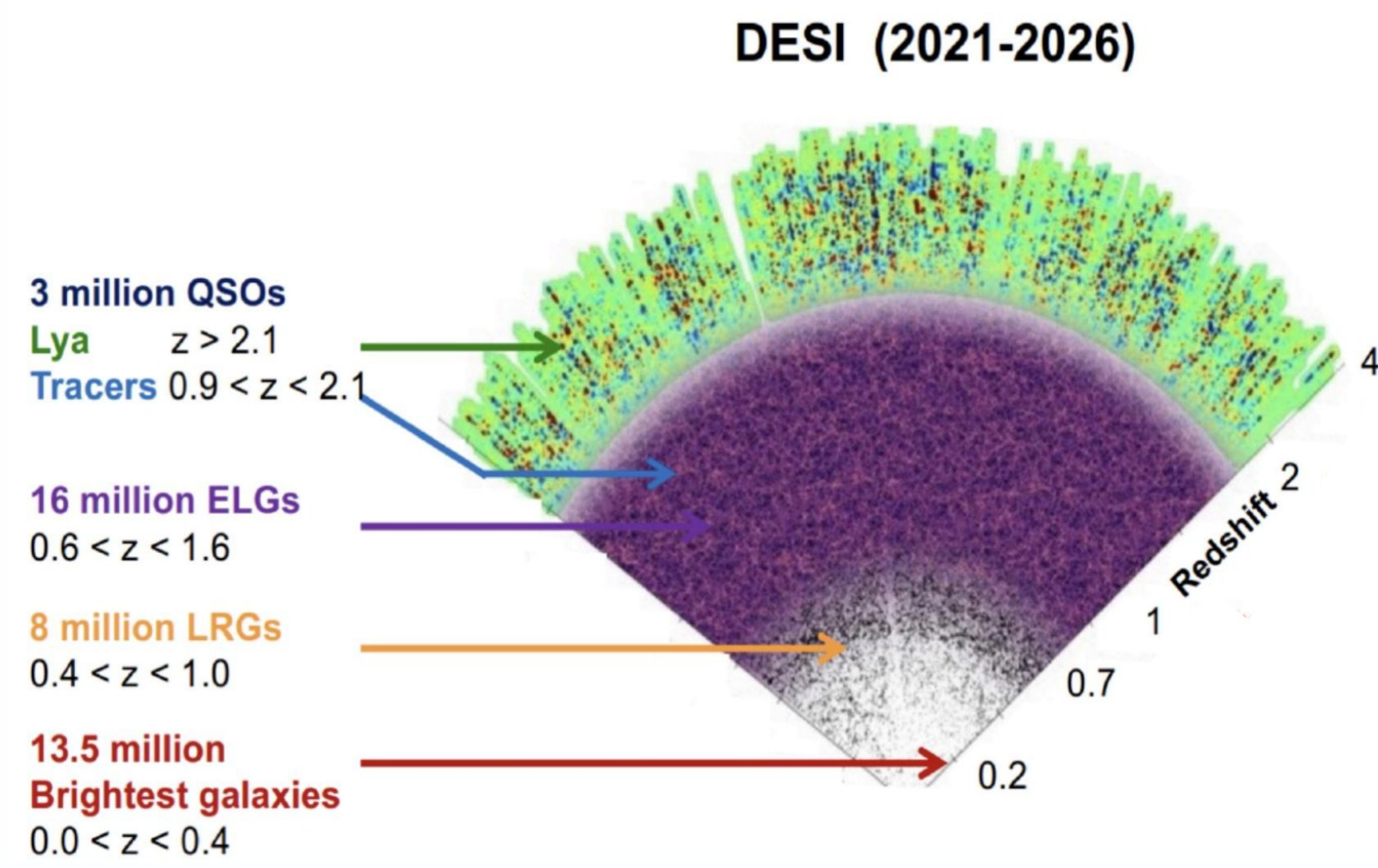
DESI est un relevé spectroscopique de 4ème génération qui prend des données depuis mai 2021. Il va collecter plus de **40 millions de spectres de galaxies**, les plus lointaines ayant émis leur lumière il y a plus de 11 milliards d'années ( $z \sim 3$ ).

L'objectif scientifique est d'étudier le **mécanisme à l'origine de l'accélération de l'expansion de l'univers**, modélisée par la constante  $\Lambda$  dans le modèle  $\Lambda$ CDM.

## Le Bright Galaxy Survey (BGS)

Le BGS est l'échantillon le plus dense de DESI avec des galaxies brillantes et proches ( $z < 0.4$ ). Il y a deux sous-échantillons : 1) BGS Bright [1,2] complet jusqu'à une magnitude  $r < 19.5$  avec 13.5 millions de galaxies et 2) BGS Faint avec des galaxies moins brillantes ( $19.5 < r < 20.2$ ). Les distributions en redshift du BGS sont représentées sur la figure, ainsi que celle des LRG [3].

Par la suite, nous considérons uniquement **BGS Bright** pour les analyses cosmologiques.



## Le clustering des galaxies comme sonde cosmologique

Les galaxies ne sont pas réparties dans le ciel de façon aléatoire, il y a des régions très denses de matière (les amas de galaxies) et d'autres forment de grands vides cosmiques. La matière s'agglomère ("clusterise") et forme une **toile cosmique** avec des filaments, des noeuds, des murs et des vides.

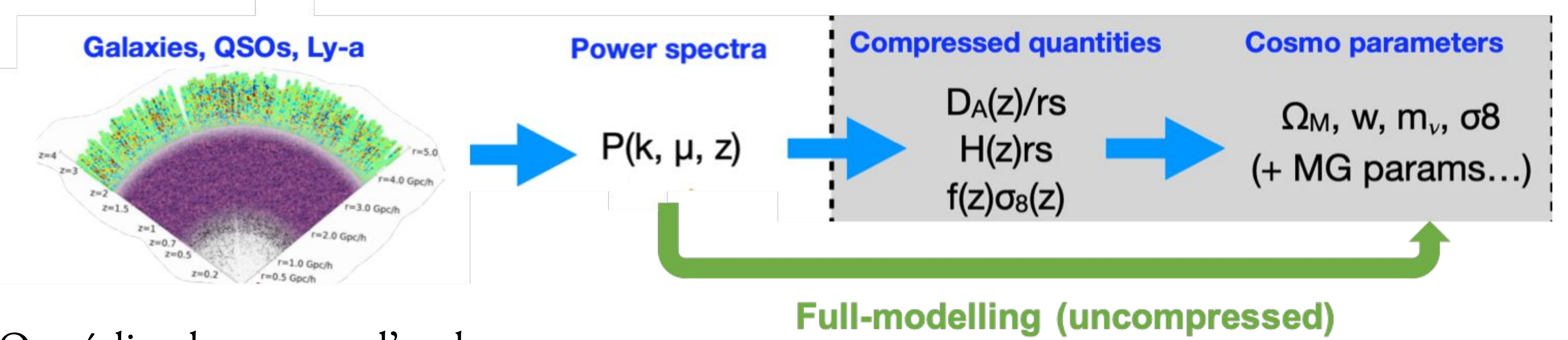
On peut définir un **contraste de densité**  $\delta$  tel que :  $\delta(\mathbf{x}) = \frac{\rho(\mathbf{x}) - \bar{\rho}}{\bar{\rho}}$  où  $\rho(\mathbf{x})$  est la densité en un point  $\mathbf{x}$  et  $\bar{\rho}$  la densité moyenne dans l'univers.

On définit alors un outil statistique qui décrit le degré de structuration de la matière : la **fonction de corrélation à deux points (2PCF)**

$$\xi(r) = \langle \delta(\mathbf{x})\delta(\mathbf{x}') \rangle = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} P(k) e^{i\mathbf{k}\cdot(\mathbf{x}-\mathbf{x}')} \quad \text{où } P(k) \text{ est le spectre de puissance (transformée de Fourier de la 2PCF)}$$

## Analyse standard

Ci-dessous une représentation schématique de l'analyse standard du clustering des galaxies basée sur l'exploitation de la statistique à deux points (2PCF ou  $P(k)$ ).



On réalise deux types d'analyse :

- une **analyse "BAO"** (oscillations acoustiques de baryons) qui cherche uniquement à mesurer la position des BAO utilisée comme une règle standard pour mesurer l'évolution de l'expansion de l'univers au cours du temps. Résultats avec les données 1 an [4].
- une **analyse "Full-Shape"** qui modélise et extrait l'information cosmologique de la forme entière de la statistique à deux points. Cette analyse permet de mesurer à la fois les distances cosmiques et la croissance des structures. Pauline est co-responsable de cette analyse avec les données 1 an de DESI [e.g. 5,6].

## Analyse multi-tracer du BGS (thèse de Svyatoslav Trusov)

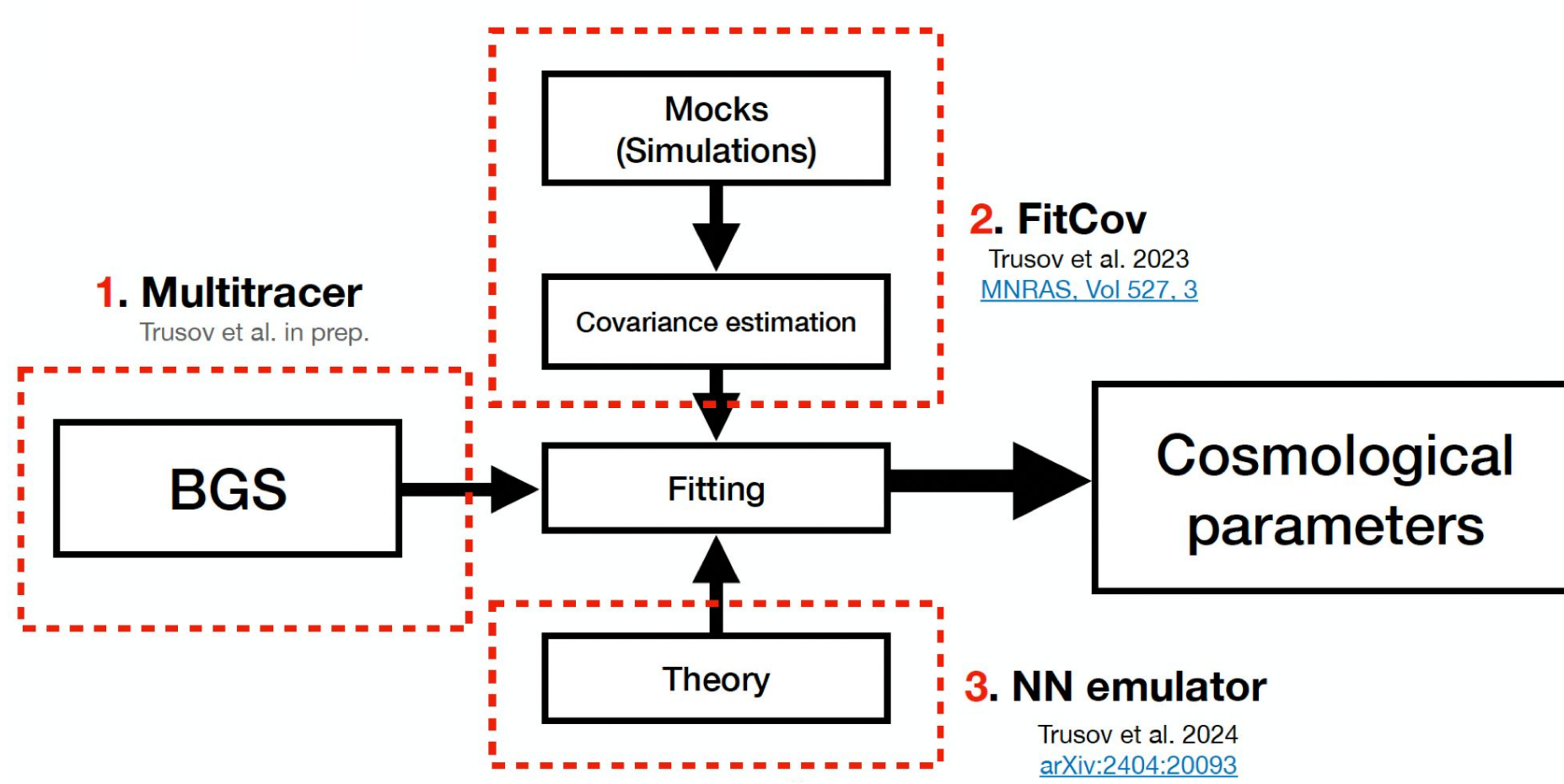
Pour le BGS, la précision avec laquelle les paramètres cosmologiques sont mesurés avec une analyse standard est limitée par la **variance cosmique**. Plus le volume sondé est petit et la densité de galaxies élevée, plus la quantité d'information accessible est faible et donc la variance cosmique élevée.

Pour améliorer la précision sur la croissance des structures avec le BGS, on peut réaliser une **analyse "multi-traceur"**. Pour le BGS, on analyse simultanément le clustering des galaxies bleues et rouges (en divisant le catalogue en fonction de la couleur optique), ainsi que leur corrélation croisée.

La figure ci-dessous illustre la chaîne d'analyse générique du clustering des galaxies et le travail de thèse de Svyatoslav. L'objectif a été de développer toute la chaîne pour **1. l'analyse multi-traceur des données 1 an du DESI BGS** [7] qui présente plusieurs défis :

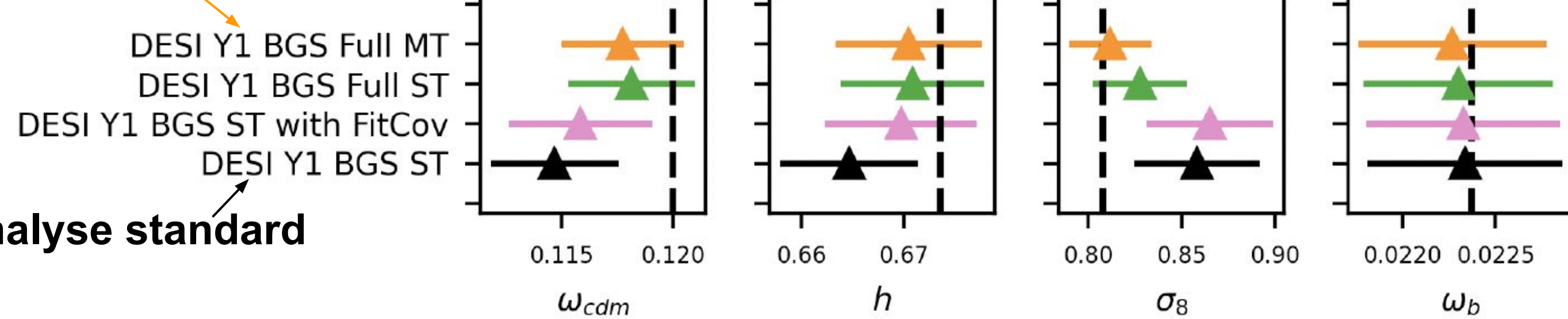
- développer une méthode d'estimation de la matrice de covariance qui requiert très peu de simulations et suffisamment précise pour l'inférence cosmologique (**2. FitCov** [8])
- accélérer la prédiction théorique du  $P(k)$  au moyen d'un émulateur basé sur un réseau de neurones, ce qui rend l'inférence cosmologique par full-modelling possible (**3. NN emulator** [9])

Svyatoslav a testé et validé la chaîne d'analyse standard et multi-traceur sur les simulations N-body Abacus qui reproduisent le BGS avec une très grande fidélité [10]. Ces "mocks" contiennent la forme du relevé Y1 et des effets instrumentaux comme l'assignation des fibres.



Les résultats de l'inférence cosmologique sont montrés ci-dessous pour différentes configurations. Au final, l'analyse multi-traceur sur l'échantillon complet BGS Bright permet notamment d'**améliorer la précision sur  $\sigma_8$  d'environ 45%** par rapport à l'analyse standard.

## analyse multi-traceur



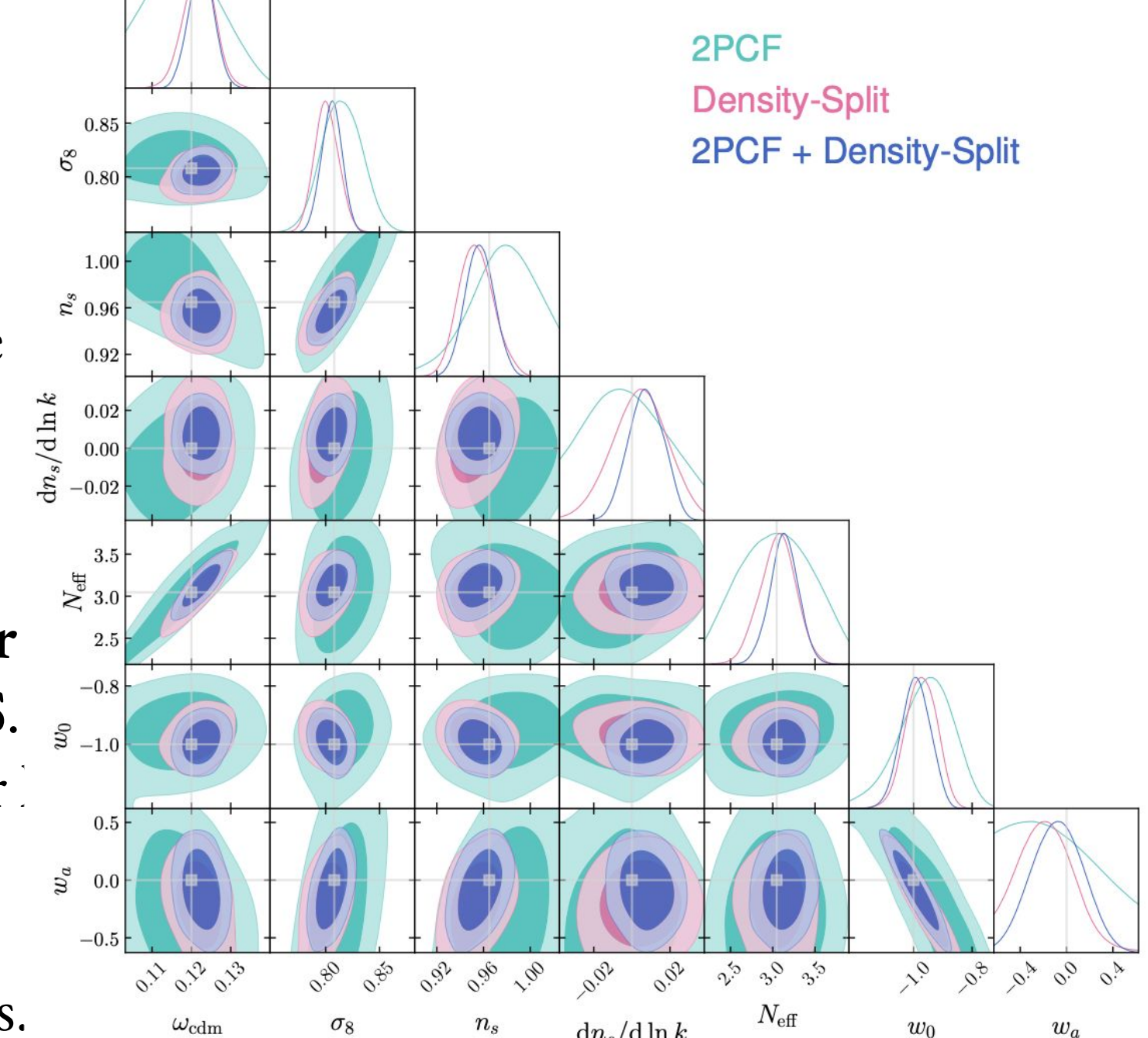
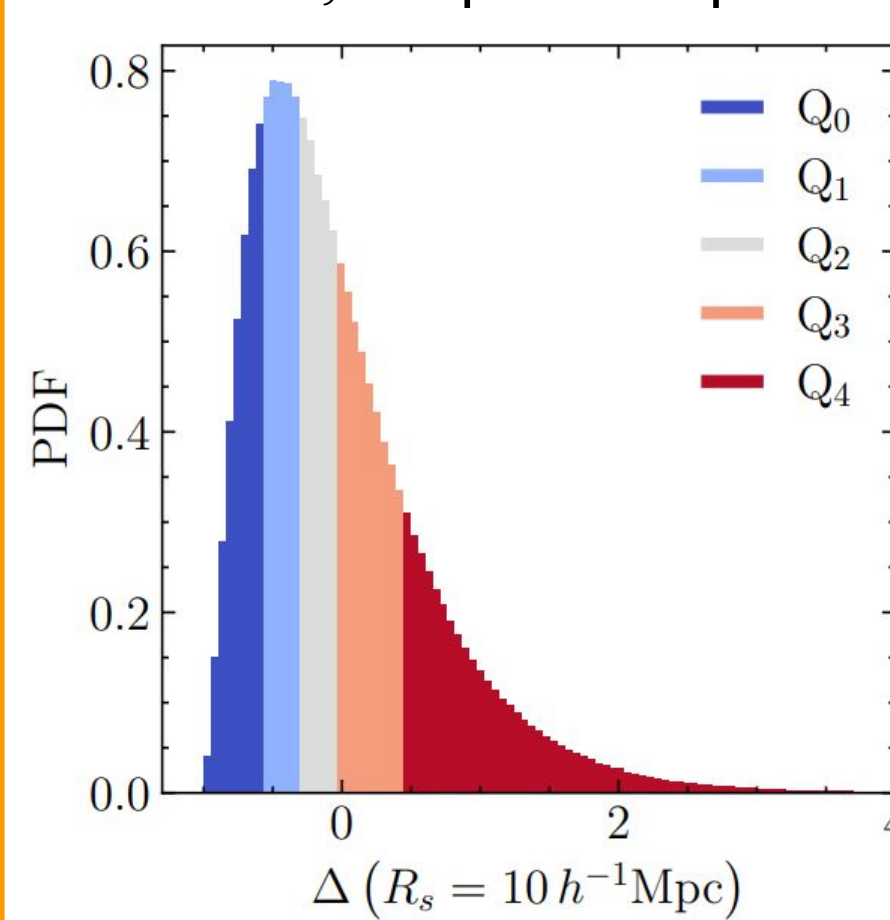
## Le density-split avec le BGS (sujet de thèse de Simon Bouchard)

L'analyse standard basée sur la statistique à 2 points suppose que le champ de densité est Gaussien, ce qui n'est plus le cas suite à son évolution par instabilité gravitationnelle.

Pour extraire de l'**information non-Gaussienne** et améliorer la précision sur les paramètres cosmologiques, une méthode prometteuse sur laquelle le groupe DESI du LPNHE se positionne est le **density-split** [11,12]. La méthode consiste à diviser le catalogue de galaxies en bins de densité locale (comme illustré sur la figure à gauche) et de calculer l'auto-corrélation de chaque bin de densité et la corrélation croisée entre un bin de densité et le catalogue total.

Nous avons développé et testé un modèle basé sur des simulations (un émulateur) pour le density-split dans le cadre des galaxies LRGs de DESI [13]. La figure à droite illustre le pouvoir contraignant du density-split par rapport à l'analyse standard.

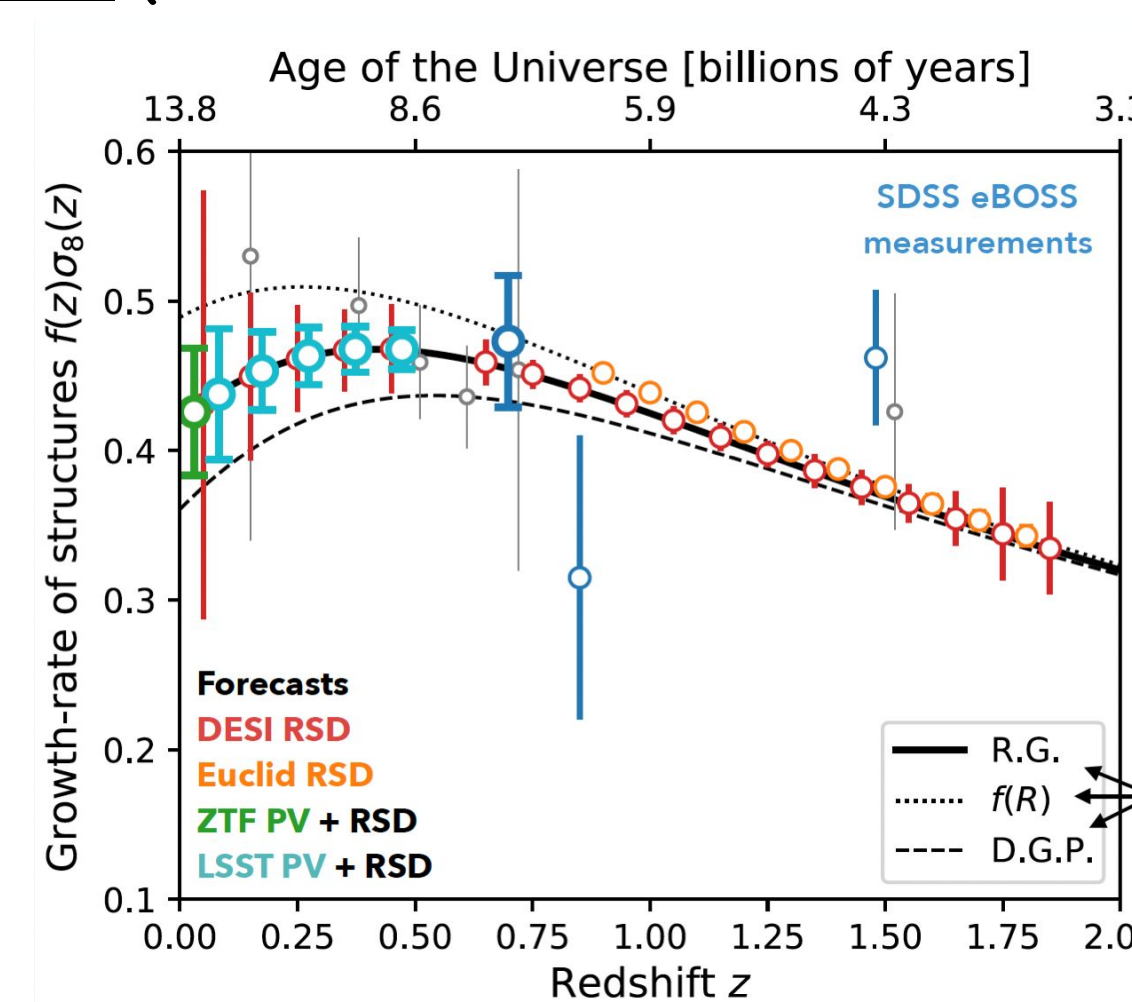
La thèse de Simon Bouchard consiste à **mener l'analyse density-split sur les données BGS**. Cela implique de 1) créer les simulations pour entraîner l'émulateur, 2) optimiser et tester l'analyse sur des simulations réalistes, et enfin 3) appliquer la méthode sur les données réelles.



## Combiner le DESI BGS avec les SN Ia de ZTF (thèse de Mahmoud Osman et stage d'Antoine Gilles-Lordet)

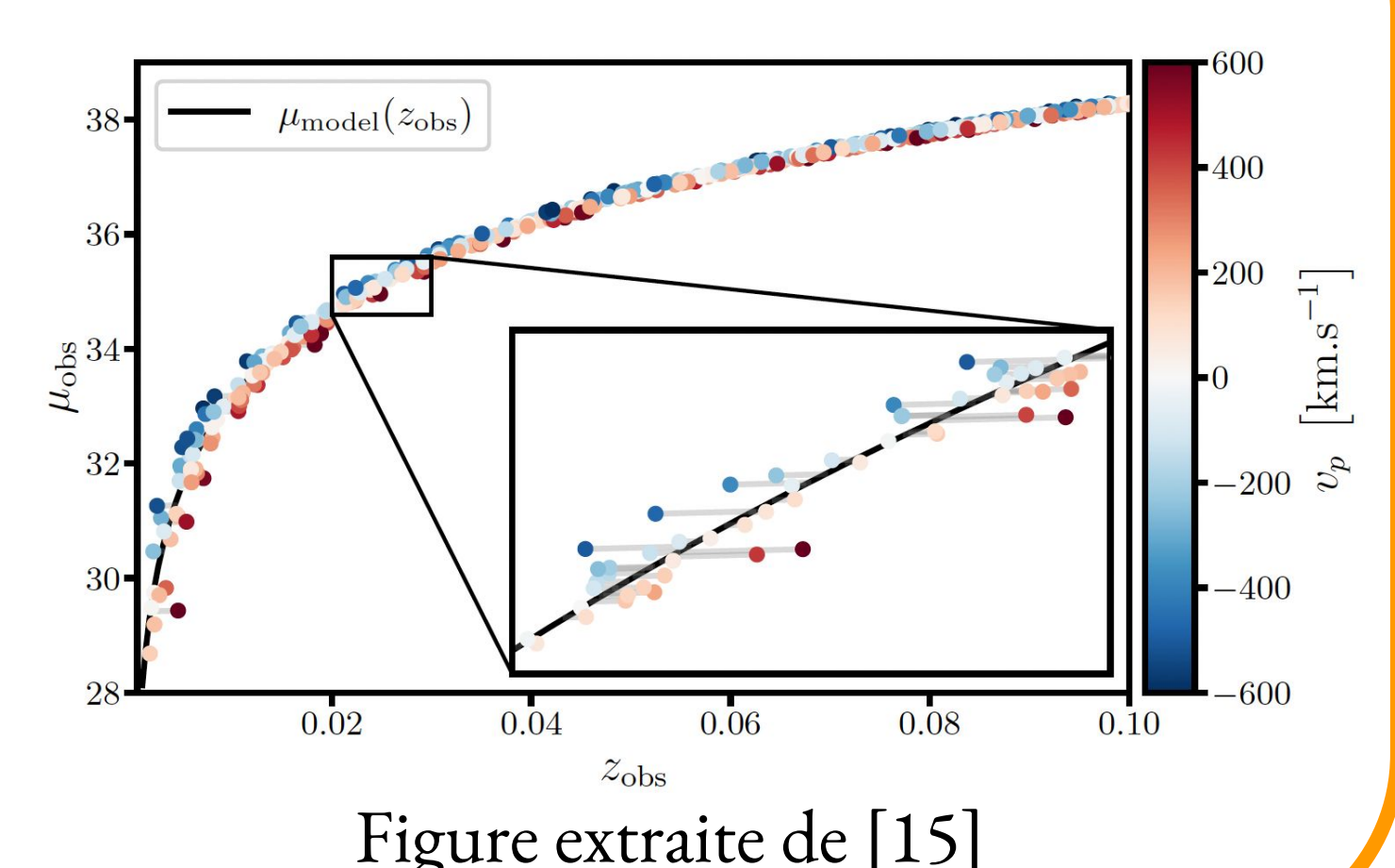
Il est possible d'améliorer encore davantage la précision sur la croissance des structures dans l'univers local ( $z < 0.1$ ) en combinant le clustering des galaxies DESI BGS et les vitesses particulières mesurées à partir des SN Ia de ZTF.

On attend une **amélioration d'un facteur 3-4 sur la croissance des structures à  $z < 0.1$** , comme illustré sur la figure de droite. **Cette analyse est aussi précurseure pour LSST** [15].



En mesurant la luminosité des SN Ia en fonction du redshift, on construit un **diagramme de Hubble** dont les **résidus** encodent l'information sur les vitesses particulières des galaxies hôtes des SN Ia (figure à droite) et qui, pour une grande majorité, correspondent aux galaxies du DESI BGS.

Le but du stage d'Antoine est de générer des échantillons simulés des SN Ia aux positions des galaxies BGS de DESI et la thèse de Mahmoud porte sur le développement de la chaîne d'analyse combinée DESI et ZTF.



[1] Ruiz-Macias, Zarrouk et al. 2020 arXiv:2007.14950  
 [2] Zarrouk, Ruiz-Macias et al. 2021 arXiv:2106.13120  
 [3] Hahn et al. 2023 arXiv:2208.08512  
 [4] DESI collaboration VI 2024 arXiv:2404.03002  
 [5] Maus et al. 2024a arXiv:2404.07312

[6] Maus et al. 2024b arXiv:2404.07312  
 [7] Trusov, Zarrouk et al. *in prep*  
 [8] Trusov, Zarrouk et al. 2023 arXiv:2306.16332  
 [9] Trusov, Zarrouk & Cole 2024 arxiv:2403.20093  
 [10] Smith, Grove, Cole, Norberg, Zarrouk et al. 2023 arXiv:2312.08792

[11] Paillas et al. 2021 arXiv:2101.09854  
 [12] Paillas, Cuesta-Lazaro, Zarrouk et al. 2023 arXiv:2209.04310  
 [13] Cuesta-Lazaro et al. 2024 arXiv:2309.16539  
 [14] Howlett et al. 2017 arXiv:1708.08236  
 [15] Carreres et al. 2023 arXiv:2303.01198