

Énergie noire et intelligence artificielle



Florent Leclercq

www.florent-leclercq.eu

Institut d'Astrophysique de Paris
CNRS & Sorbonne Université

anr[®]

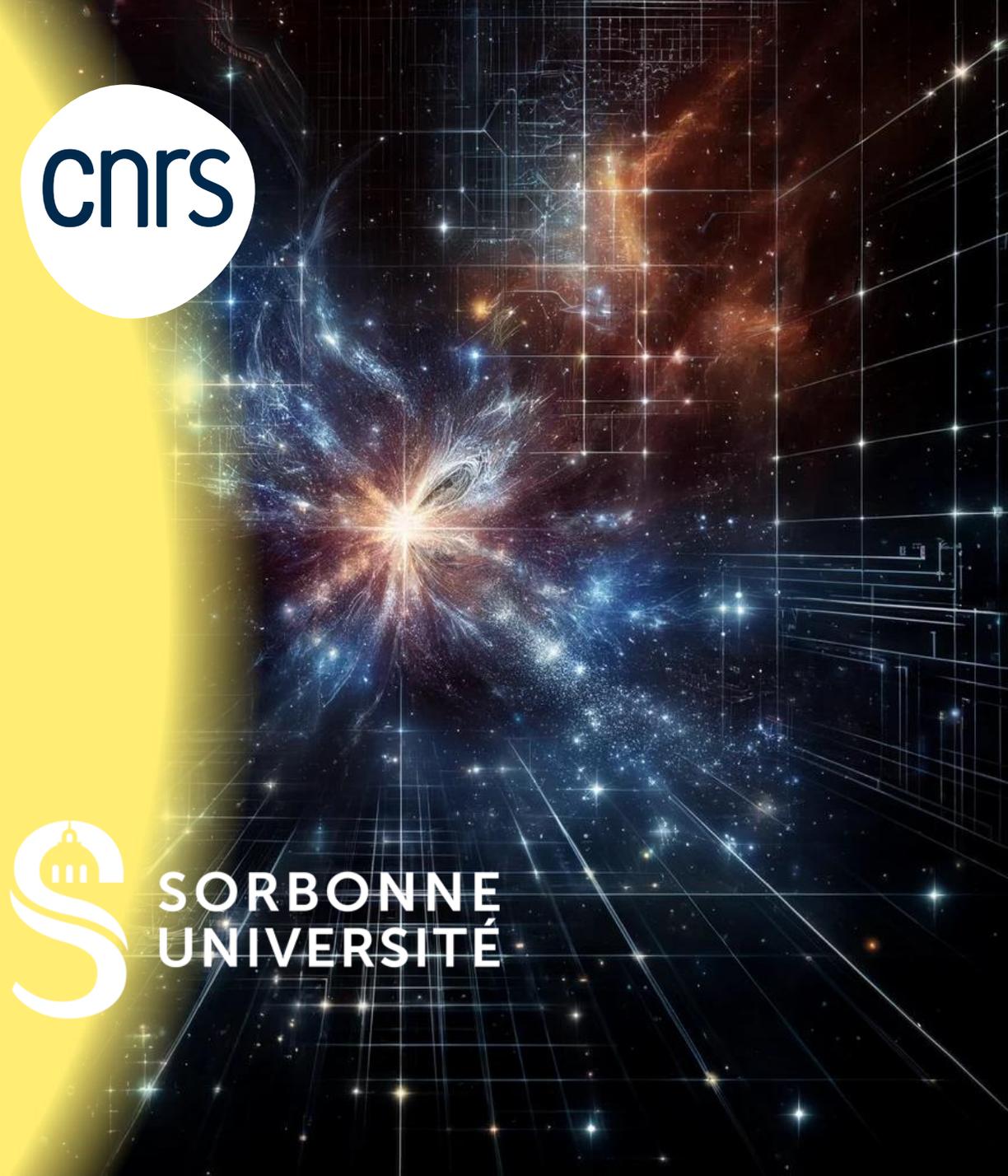
ANR-23-CE46-0006: INFOCW



2 AVRIL 2024



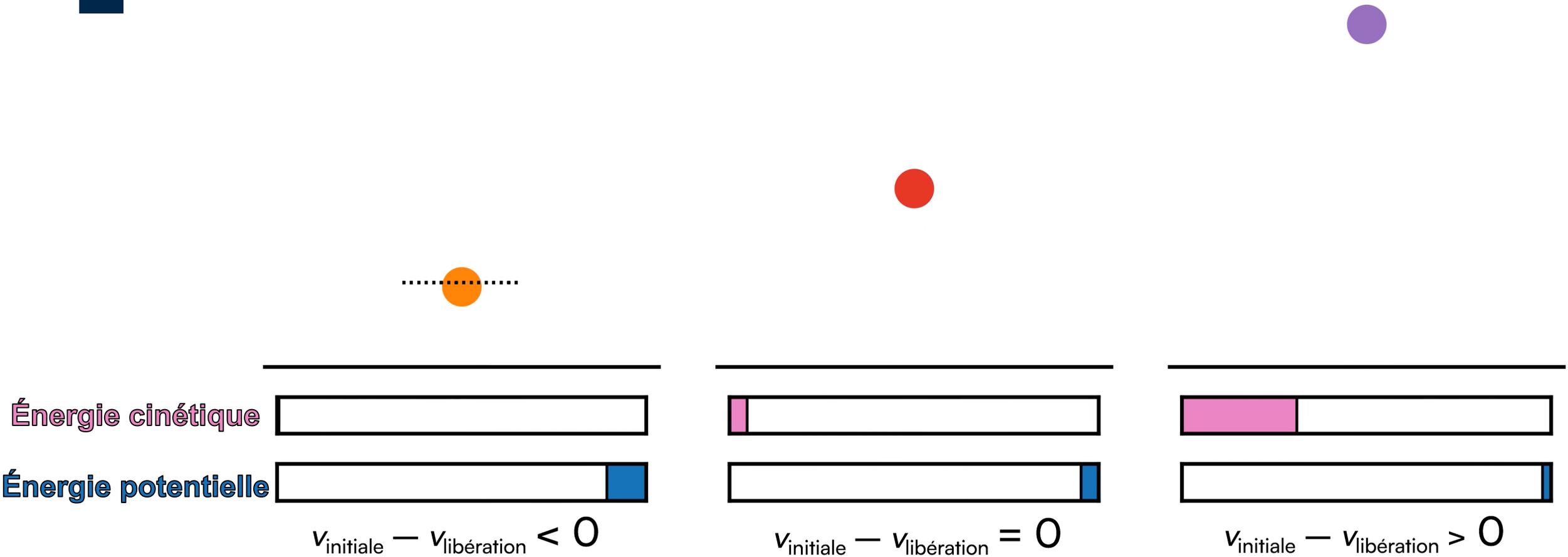
SORBONNE
UNIVERSITÉ



The background of the slide is a deep blue color with a complex, interconnected network of thin, light blue lines and small yellow-orange dots, resembling a cosmic web or a neural network. A solid white vertical bar is located in the top-left corner.

QUEL SERA LE DESTIN DE NOTRE UNIVERS ?

Une analogie : la chute libre d'un corps avec une vitesse initiale



Énergie cinétique + Énergie potentielle = Constante

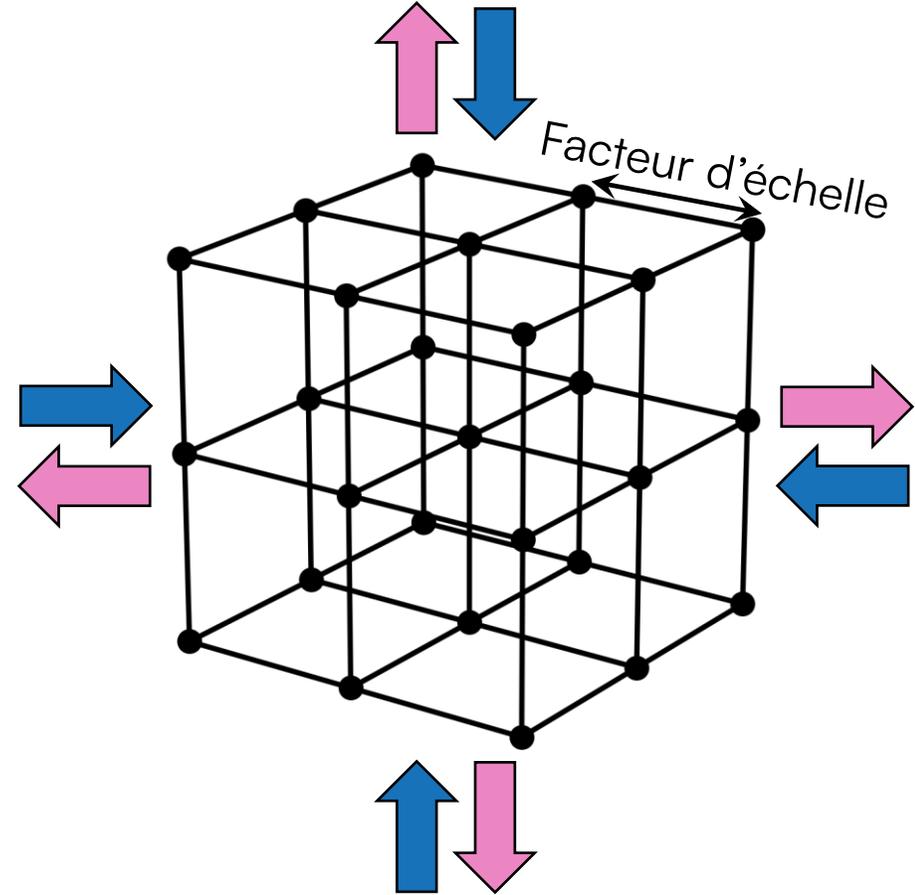
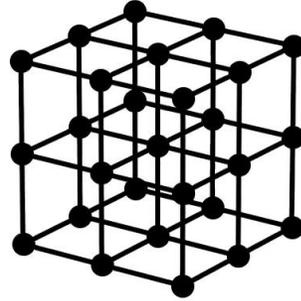
La première équation de Friedmann-Lemaître (1922-1927) : conservation de l'énergie en cosmologie



Alexandre Friedmann
(1888-1925)



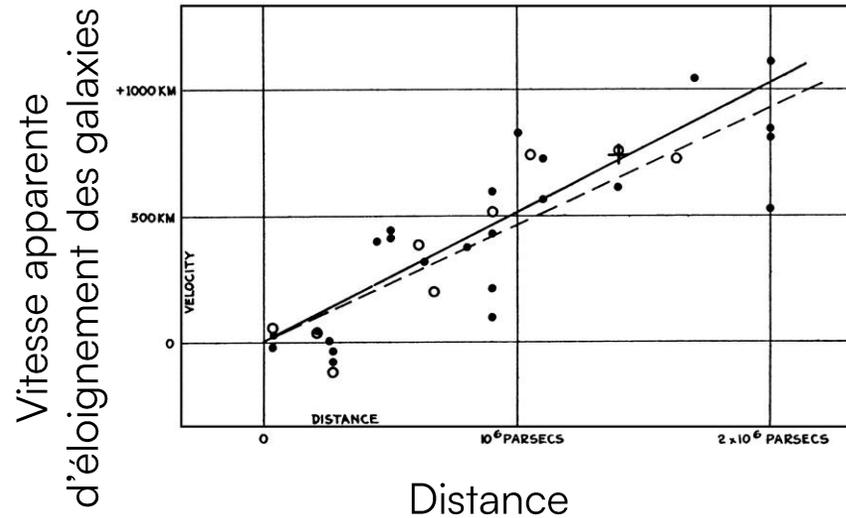
Georges Lemaître
(1894-1966)



Destin de l'Univers = Dynamique – Matière = (?)

L'Univers est en expansion

- Hubble (1929) mesure la vitesse d'éloignement des galaxies en fonction de leur distance.



- Loi de Hubble-Lemaître (1929) : $v = H_0 d$
- On mesure : $H_0 \approx 70 \text{ km/s/Mpc}$.

Dynamique > 0

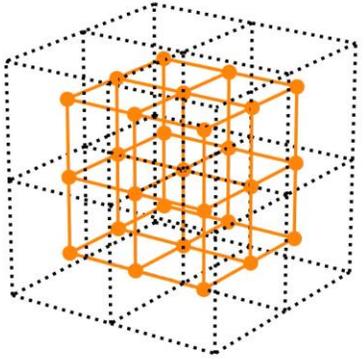
- L'Univers est en **expansion** !



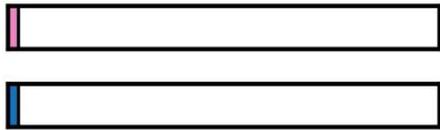
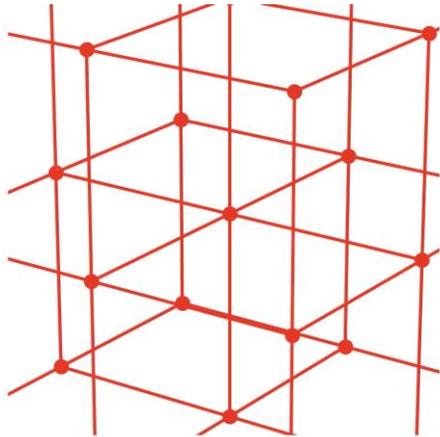
Edwin Hubble
(1889-1953)

Les destins possibles pour un Univers en expansion

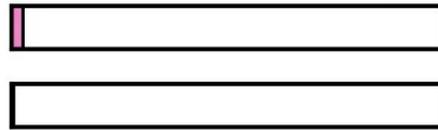
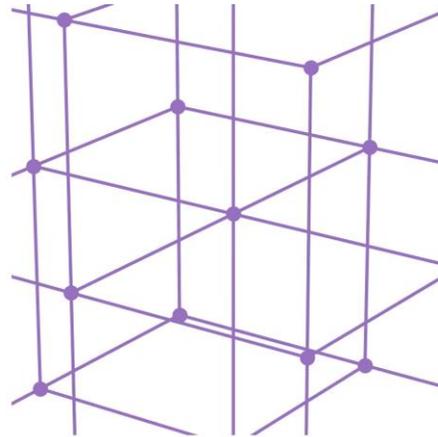
Destin de l'Univers = Expansion – Matière = (?)



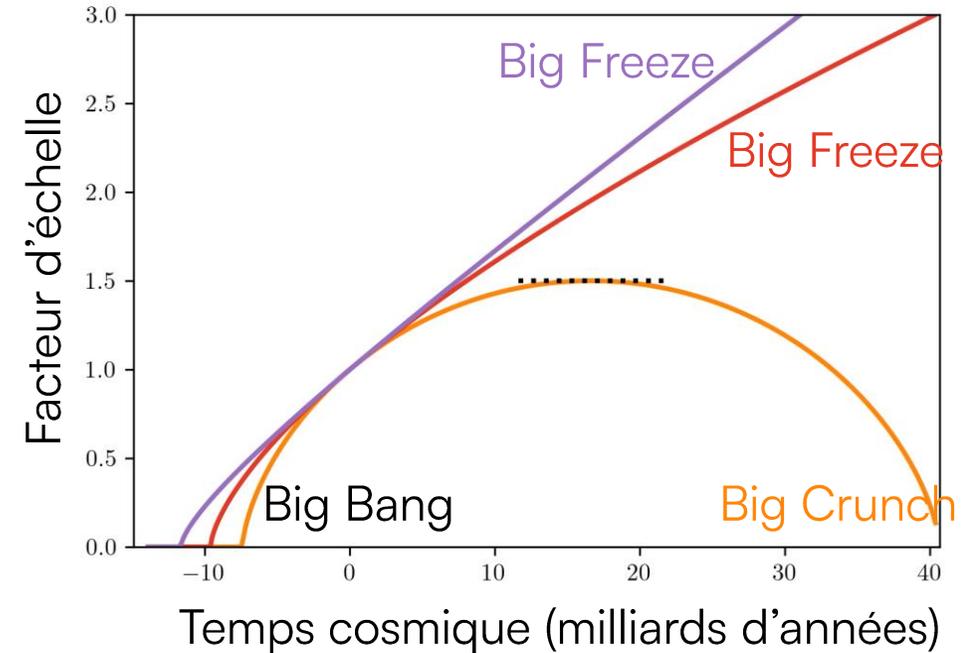
Expansion – Matière < 0



Expansion – Matière = 0



Expansion – Matière > 0



Le contenu en matière de notre Univers ne suffit pas à compenser l'expansion

- On peut « peser » les galaxies en mesurant leur vitesse de rotation.
- On peut « peser » les amas de galaxies en utilisant le lentillage gravitationnel.



Gottlieb *et al.* 2022



Fritz Zwicky
(1898-1974)



Vera Rubin
(1928-2016)



NASA, ESA, J. Lotz and the HFF Team

- Au final, on mesure : **Matière > 0**
- Bien sûr ! Mais pas « assez »...

Le destin de notre Univers est lié à sa courbure spatiale

- On mesure :

$$\text{Destin de l'Univers} = \text{Expansion} - \text{Matière} > 0$$

Notre Univers sera donc pour toujours en expansion.

- Mais la première équation de Friedmann-Lemaître a aussi un membre de droite :

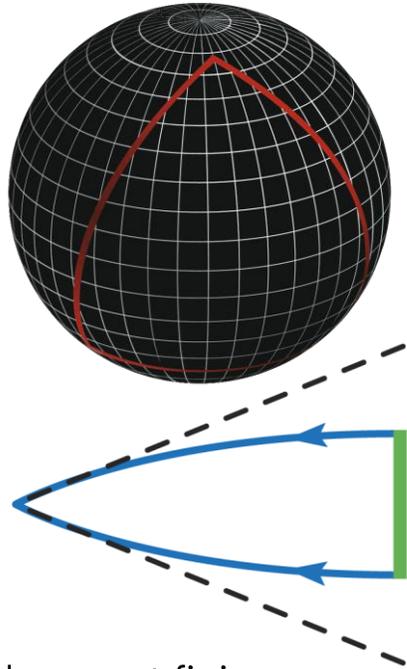
$$\text{Expansion} - \text{Matière} = - \text{Courbure}$$

- Prédiction de la Relativité Générale : le **destin de l'Univers** est lié à sa **courbure** (géométrie spatiale).
- On peut mesurer le taux d'**expansion**, le contenu en **matière**, et la **courbure** indépendamment. On peut donc tester ce modèle cosmologique !
- On a mesuré **expansion** - **matière** > 0, on s'attend donc à **courbure** < 0.

Que fait la courbure ?

Courbure > 0

Géométrie sphérique, Univers fermé



Le volume est fini.

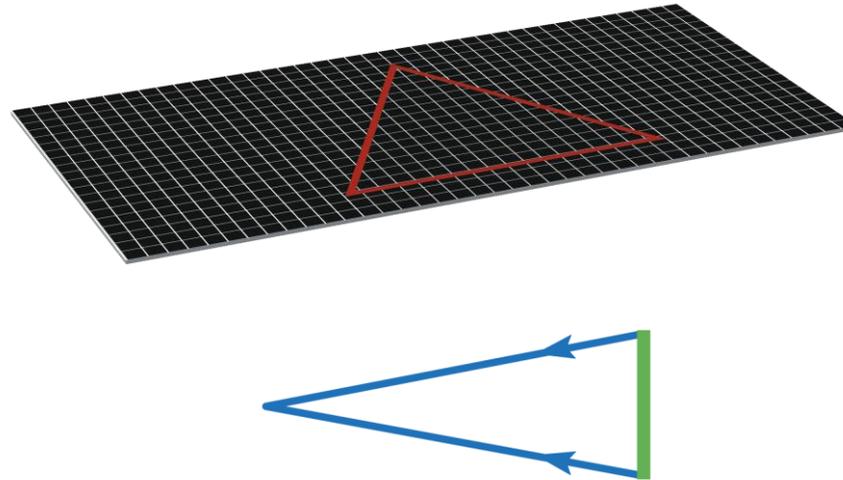
La somme des angles d'un triangle vaut plus de 180° .

Les lignes parallèles convergent.

Les objets distants paraissent plus gros.

Courbure $= 0$

Géométrie euclidienne, Univers plat



Le volume est infini.

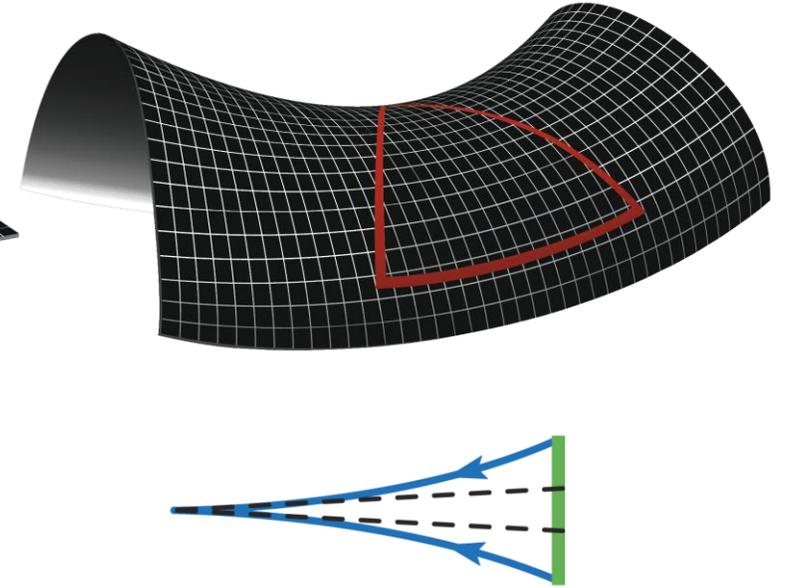
La somme des angles d'un triangle vaut 180° .

Les lignes parallèles restent parallèles.

La taille apparente des objets n'est pas modifiée.

Courbure < 0

Géométrie hyperbolique, Univers ouvert



Le volume est infini.

La somme des angles d'un triangle vaut moins de 180° .

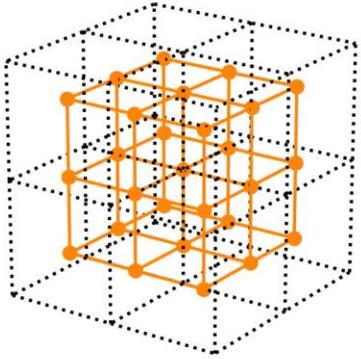
Les lignes parallèles divergent.

Les objets distants paraissent plus petits.

Les courbures spatiales possibles d'un Univers rempli de matière

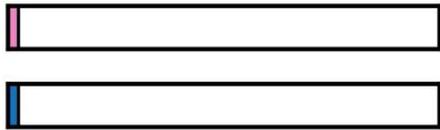
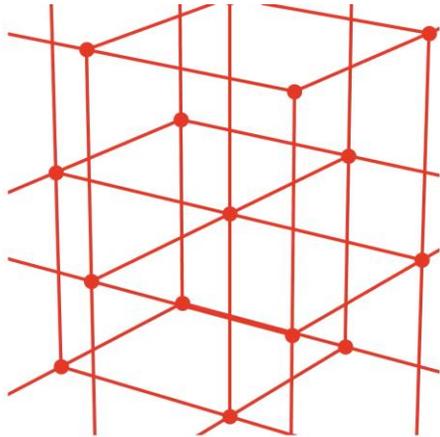
$$\text{Expansion} - \text{Matière} = - \text{Courbure}$$

$$\text{Expansion} + \text{Courbure} = \text{Matière}$$



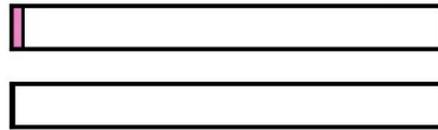
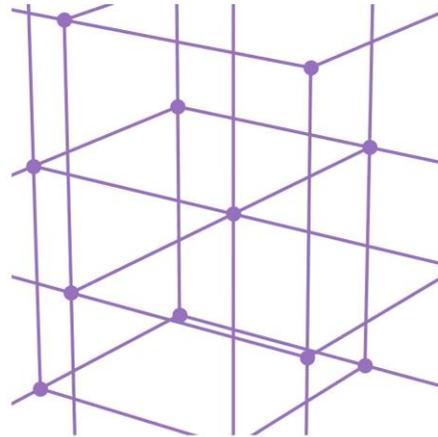
$$\text{Expansion} - \text{Matière} < 0$$

$$\text{Courbure} > 0$$



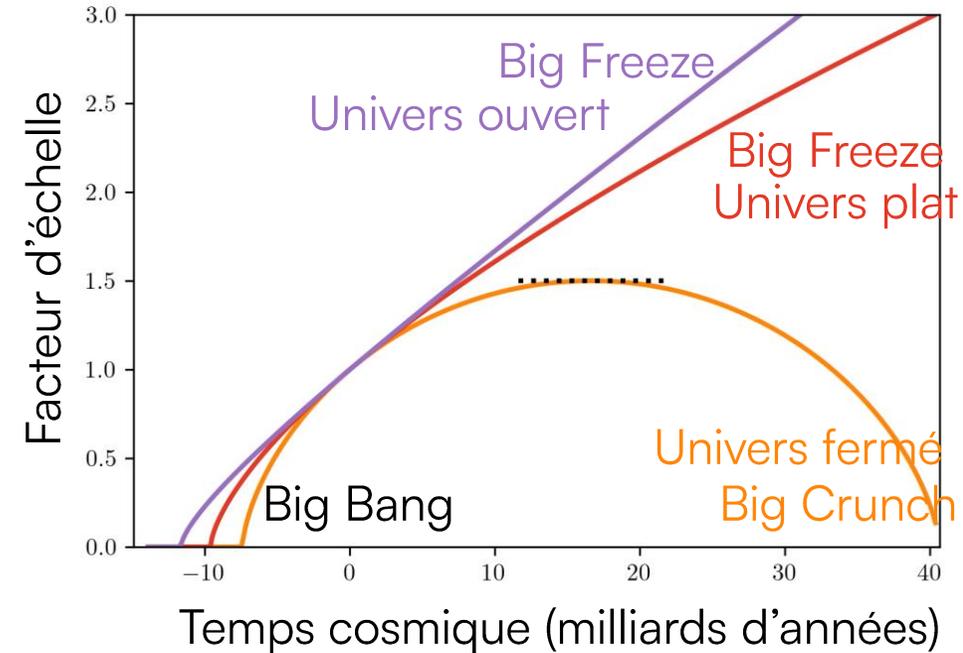
$$\text{Expansion} - \text{Matière} = 0$$

$$\text{Courbure} = 0$$



$$\text{Expansion} - \text{Matière} > 0$$

$$\text{Courbure} < 0$$



Notre Univers est plat

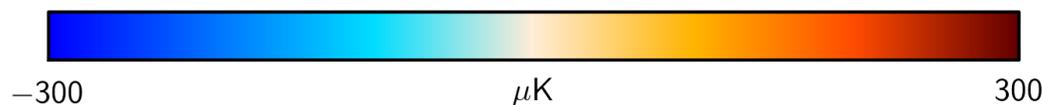
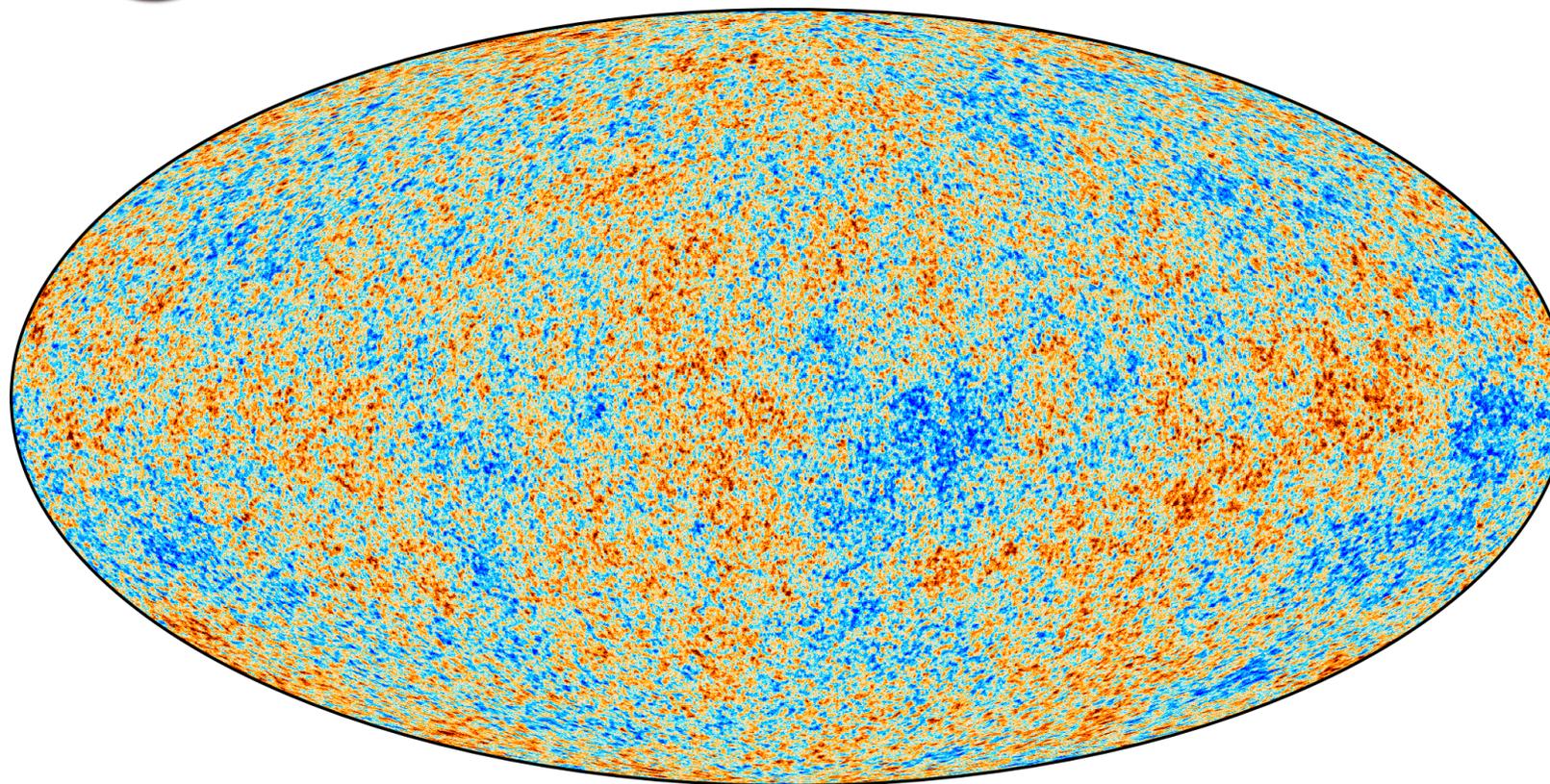


1978: Arno Penzias & Robert Wilson
“for their discovery of cosmic microwave background radiation.”

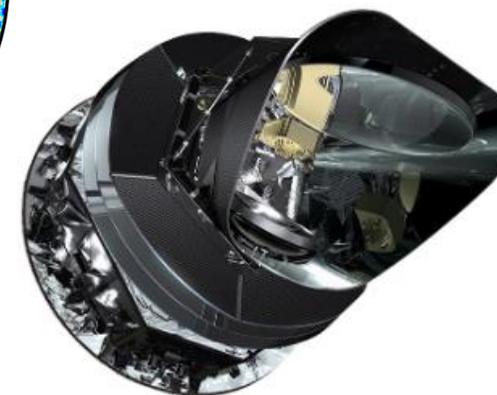
2006: John Mather & George Smoot (COBE)
“for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation.”



Projection de Mollweide



Analyse des fluctuations du fond diffus cosmologique (micro-ondes)



Satellite Planck (2009-2013)

- La mesure de la géométrie de notre Univers indique :

Courbure = 0

L'énergie noire est nécessaire pour accorder les observations du destin et de la courbure de l'Univers

- La première équation de Friedmann-Lemaître prédit :

$$\text{Expansion} - \text{Matière} = - \text{COURBURE}$$

- Mais on mesure :

$$\text{Expansion} - \text{Matière} > 0$$

et

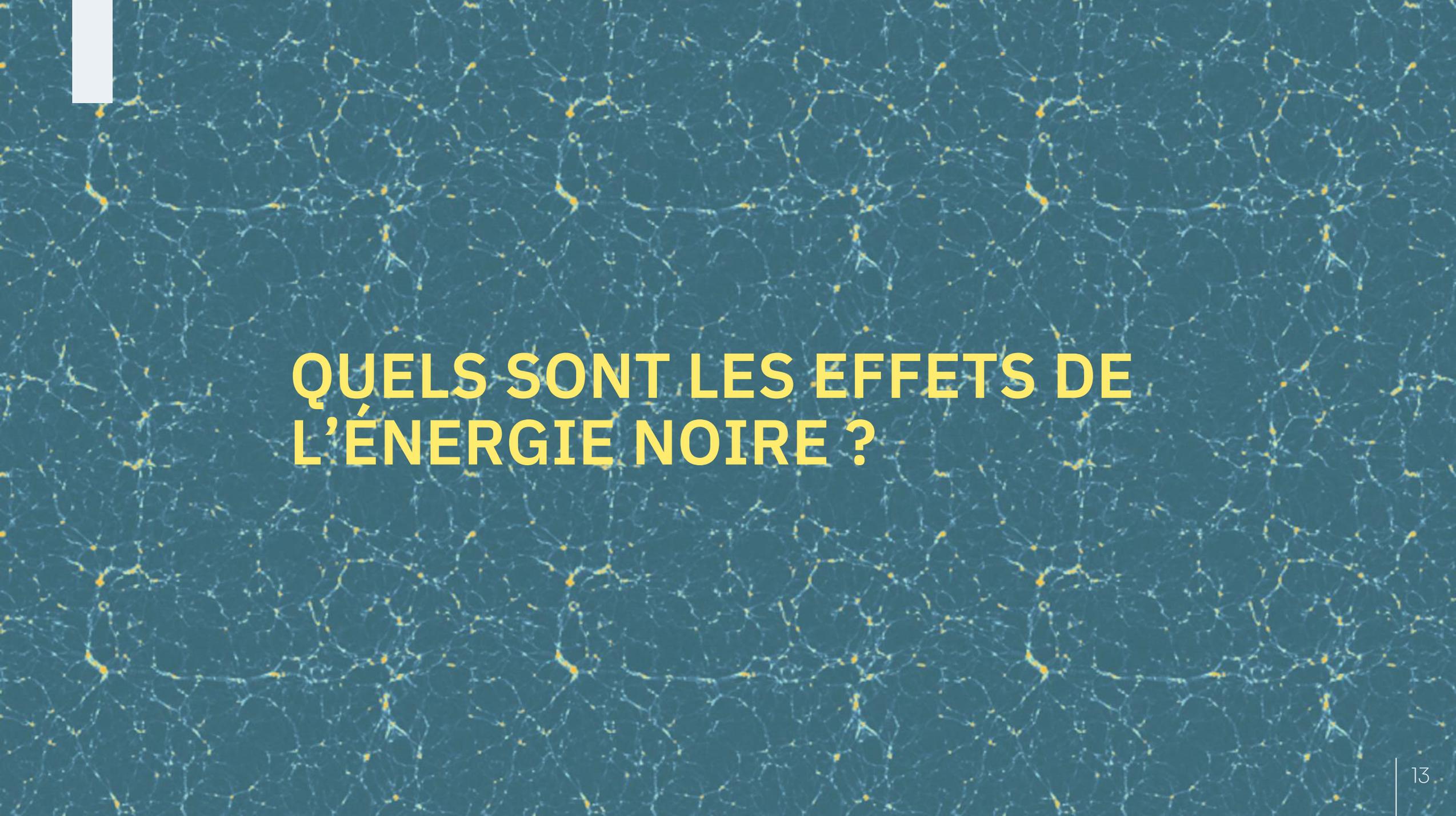
$$\text{COURBURE} = 0$$

- Il faut donc un terme supplémentaire pour équilibrer :

$$\text{Expansion} - \text{Matière} - \text{Énergie noire} = 0 = - \text{COURBURE}$$

- La solution la plus simple est de supposer que ce terme est constant :

$$\text{Énergie noire} = \text{Constante cosmologique}$$

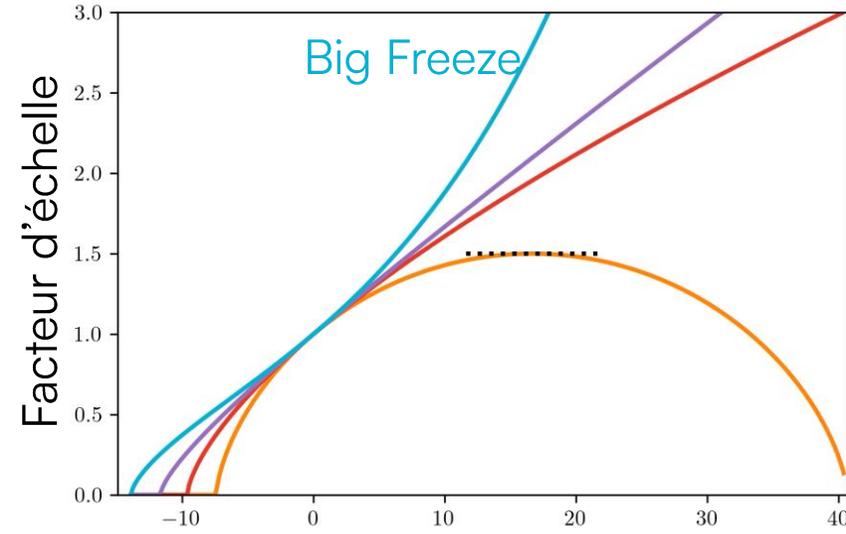
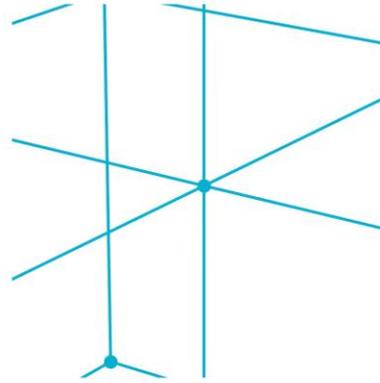
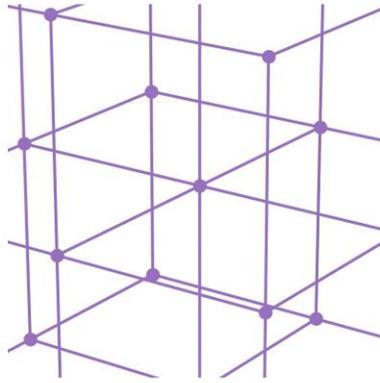
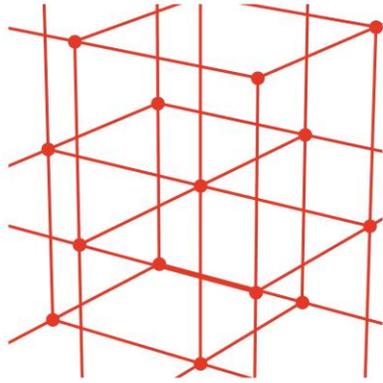
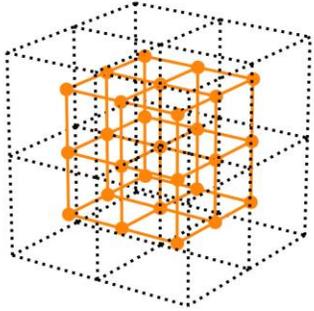
The background of the slide is a complex, interconnected network of thin, light blue lines with small yellow and orange nodes, representing the cosmic web or dark matter distribution. A solid white vertical bar is located in the top-left corner.

QUELS SONT LES EFFETS DE L'ÉNERGIE NOIRE ?

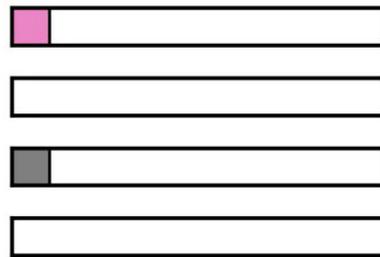
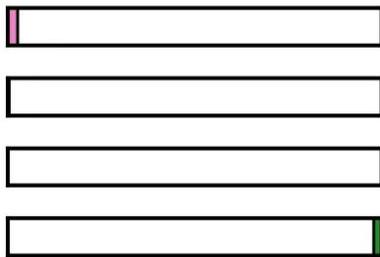
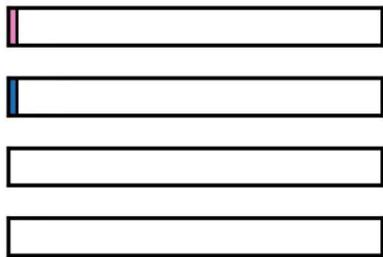
La dynamique d'un Univers avec une constante cosmologique

$$\text{Expansion} - \text{Matière} - \text{Énergie noire} = - \text{Courbure}$$

$$\text{Expansion} + \text{Courbure} = \text{Matière} + \text{Énergie noire}$$



Temps cosmique (milliards d'années)



Expansion < Matière Expansion = Matière Expansion > Matière Expansion > Matière

Énergie noire = 0

Énergie noire = 0

Énergie noire = 0

Énergie noire > 0

Courbure > 0

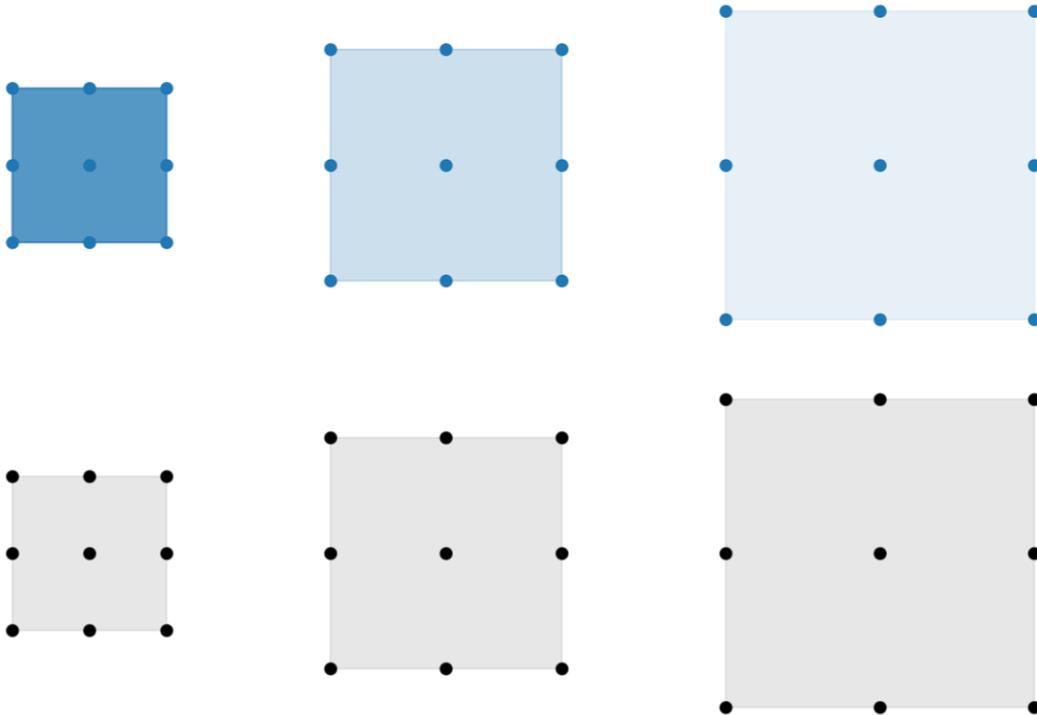
Courbure = 0

Courbure < 0

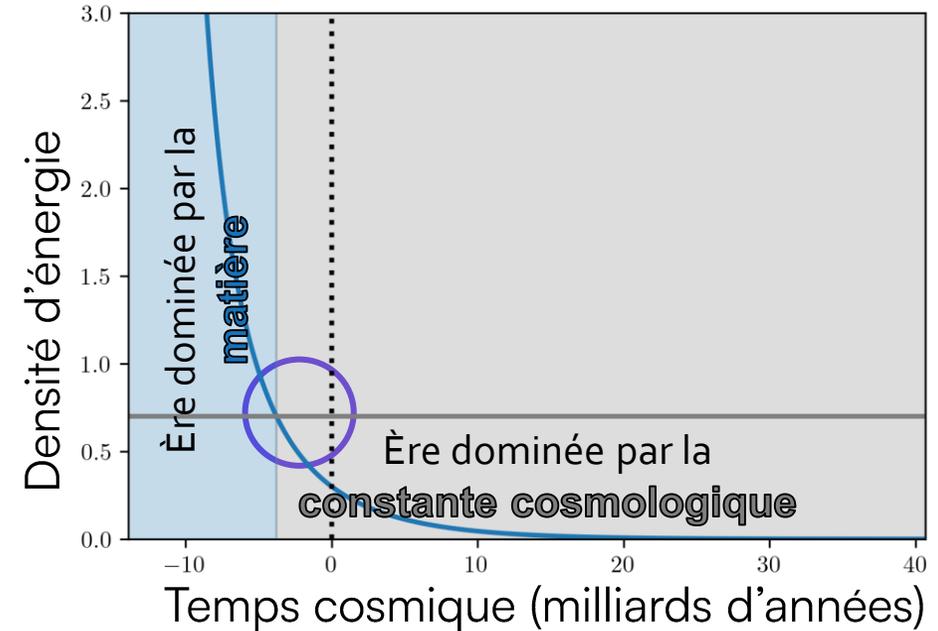
Courbure = 0

Que fait l'énergie noire si sa densité est constante à mesure que l'Univers s'étend ?

Matière



Constante cosmologique



- La **constante cosmologique** ne se dilue pas. Nous avons la chance de voir (déjà) les effets de la constante cosmologique !
- Nous vivons dans un Univers dominé par la **constante cosmologique**. Notre horizon cosmologique se réduit. Nous avons la chance qu'il y ait (encore) des **galaxies** à observer !
- Comment expliquer cette « coïncidence cosmique » ?

La deuxième équation de Friedmann-Lemaître (1922-1927) : la loi de la dynamique cosmologique

- Analogie : mécanique Newtonienne :

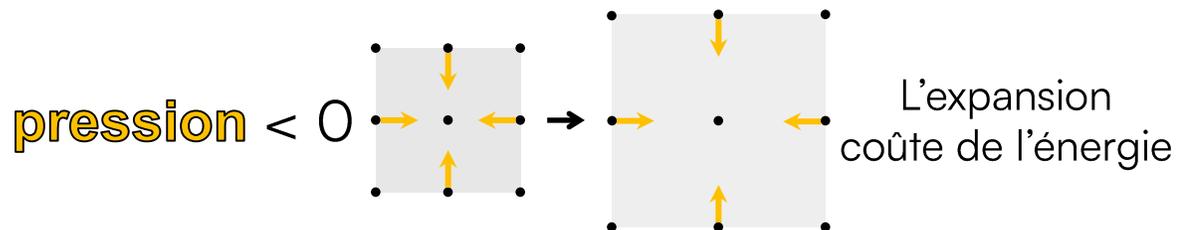
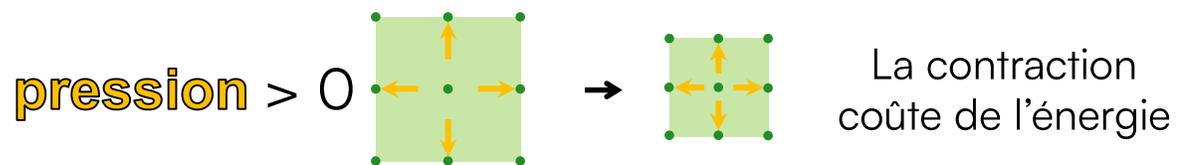
$$\text{Force} = (\text{Masse} \times) \text{Accélération}$$

- Deuxième équation de Friedmann-Lemaître :

$$\begin{aligned} \text{Accélération} &= - (\text{Densité} + 3 \times \text{Pression}) \\ &= - (\text{Densité} - 3 \times \text{Tension}) \end{aligned}$$

- En relativité générale, les forces de **pression** gravitent.
- La **tension** est une **pression** négative. L'**énergie noire** exerce une **tension** sur l'Univers.

- Attention : l'**accélération** ne vient pas de la **densité** d'énergie noire.
- À **densité** d'énergie constante :



Toute **densité** (y compris d'**énergie noire**) tend à **décélérer** l'expansion.

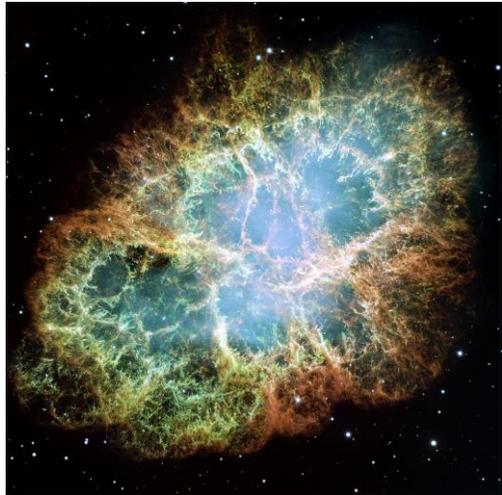
Mais on peut avoir **accélération** > 0 si **densité** + 3x **pression** < 0, c'est-à-dire

$$w = \frac{\text{pression}}{\text{densité}} < -\frac{1}{3}$$

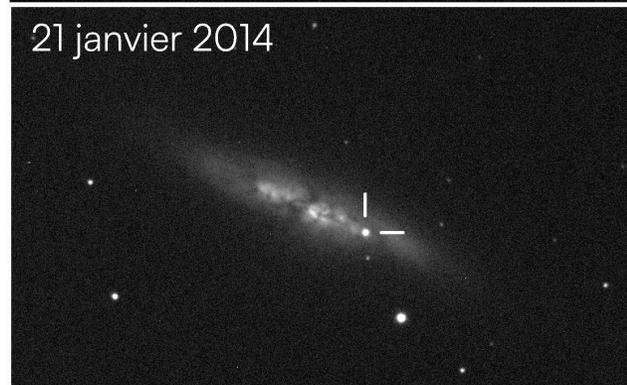
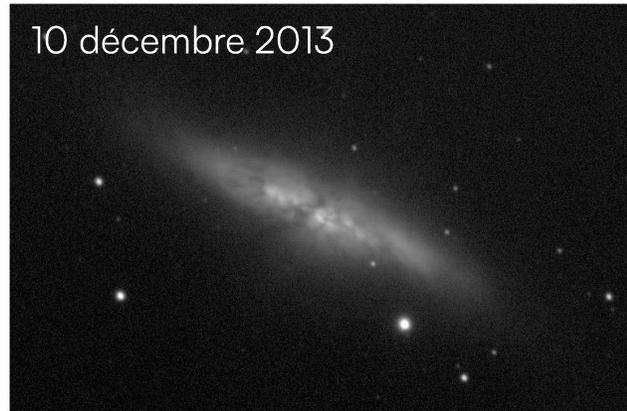
- Pour la **matière**, **pression** ≈ 0 donc $w \approx 0$.
- Pour la **constante cosmologique**, la conservation de la densité d'énergie impose $w = -1$.

L'Univers est en expansion accélérée

- Les supernovæ correspondent à l'explosion d'une étoile.

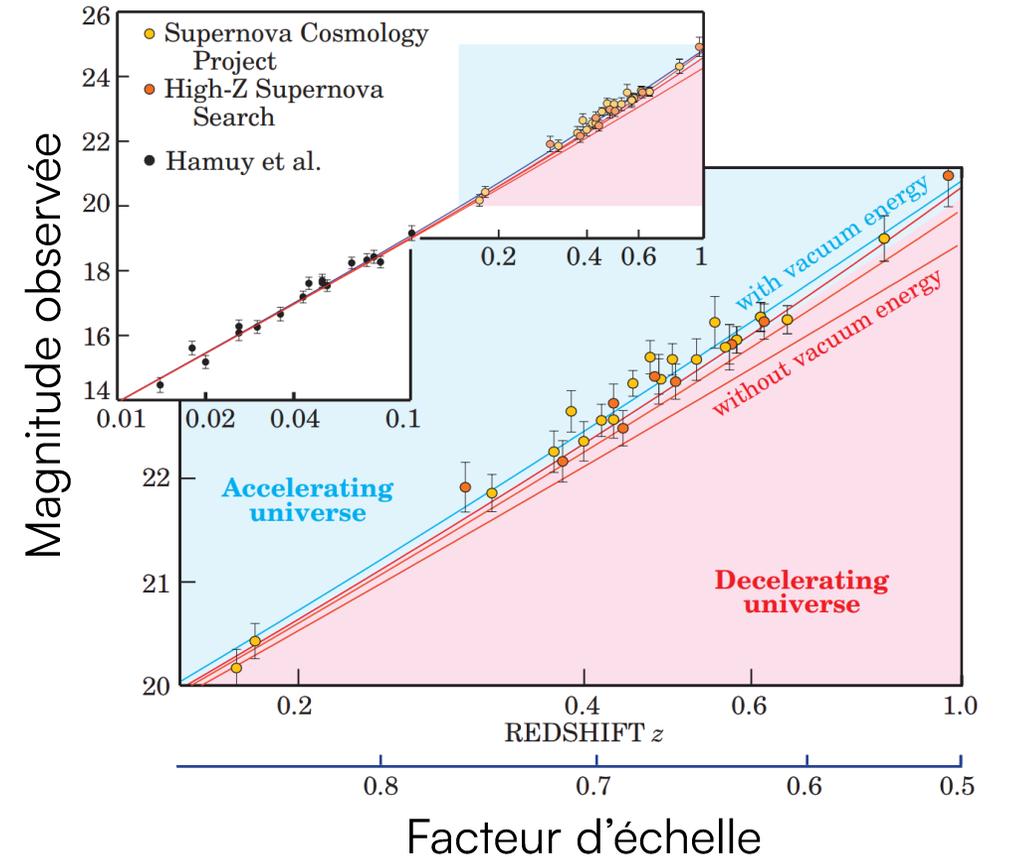


La nébuleuse du Crabe, rémanent de SN 1054



SN 2014J dans la galaxie du Cigare (M82)

- Certains types de supernovæ permettent de mesurer précisément l'histoire de l'expansion de l'Univers, et donc son **accélération**.



2011: Adam Riess, Brian P. Schmidt, Saul Perlmutter
 “for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae.”

Résumé : les effets de la constante cosmologique sur la courbure et la dynamique de l'Univers

- Une **énergie noire** qui s'ajoute à celle de la **matière** et pour expliquer la **courbure** nulle :

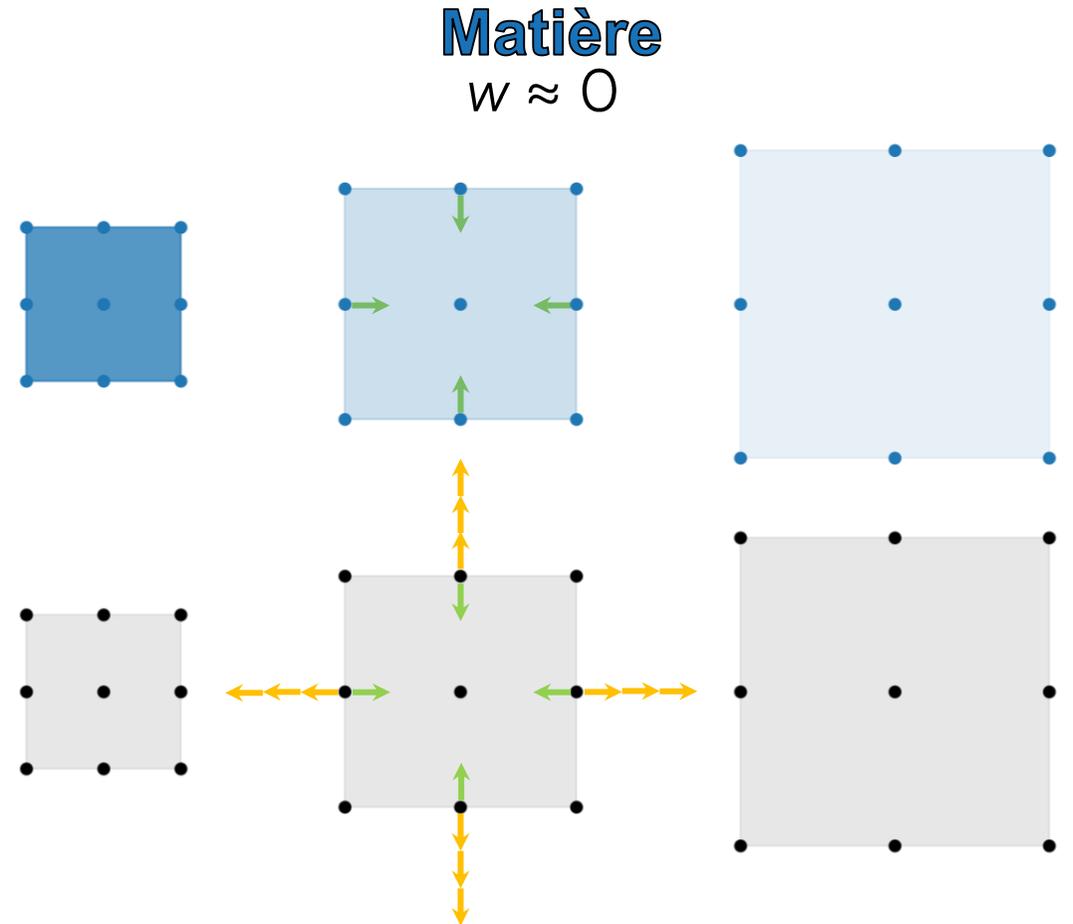
Expansion – Matière
– Constante cosmologique = 0 = – **Courbure**

- Une **densité** d'énergie constante.
- Une **tension** égale à sa **densité** qui exerce un effet gravitationnel (purement relativiste) dominant.
- Au final, une gravité totale répulsive :

Densité – 3x Tension < 0

- Et donc, la cause de l'**accélération** de l'expansion dans l'Univers tardif :

Accélération = 2x Tension (constante cosmologique) – Densité (matière) > 0

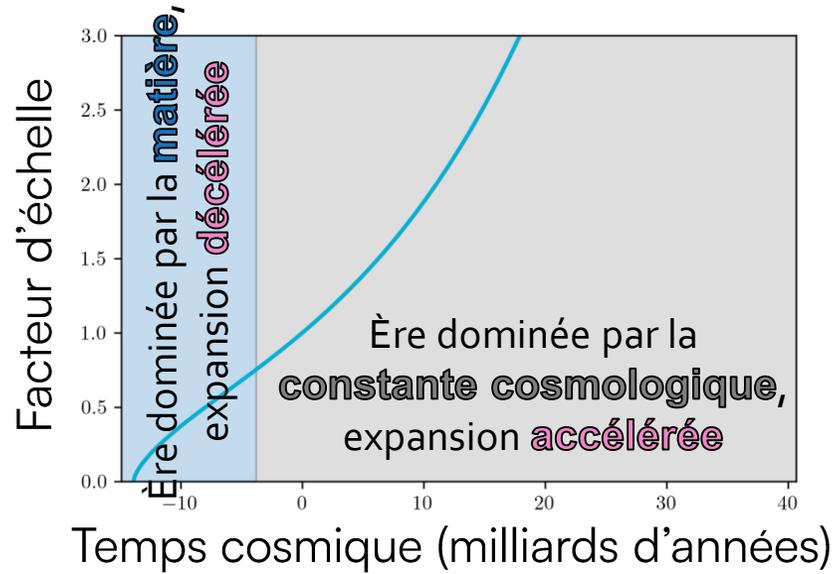
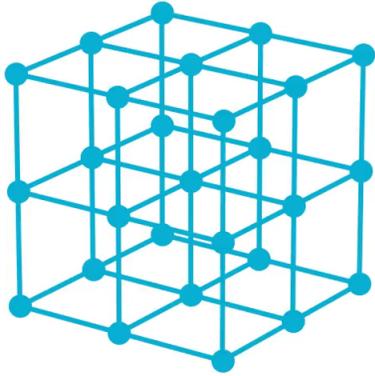


Constante cosmologique

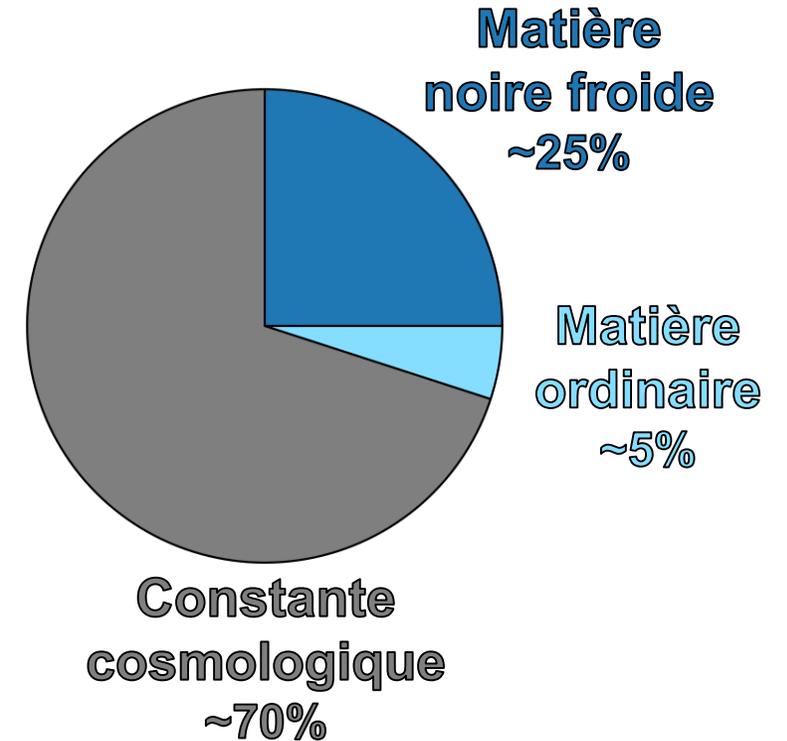
$$w = \frac{\text{pression}}{\text{densité}} = -1$$

Le modèle standard de la cosmologie : l'Univers Λ CDM plat

Constante cosmologique, Matière noire froide, Courbure = 0



Plus précisément, aujourd'hui :

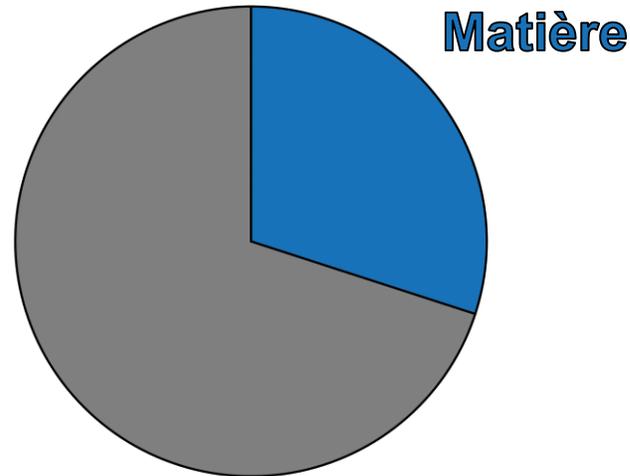


Expansion

Matière

Constante cosmologique

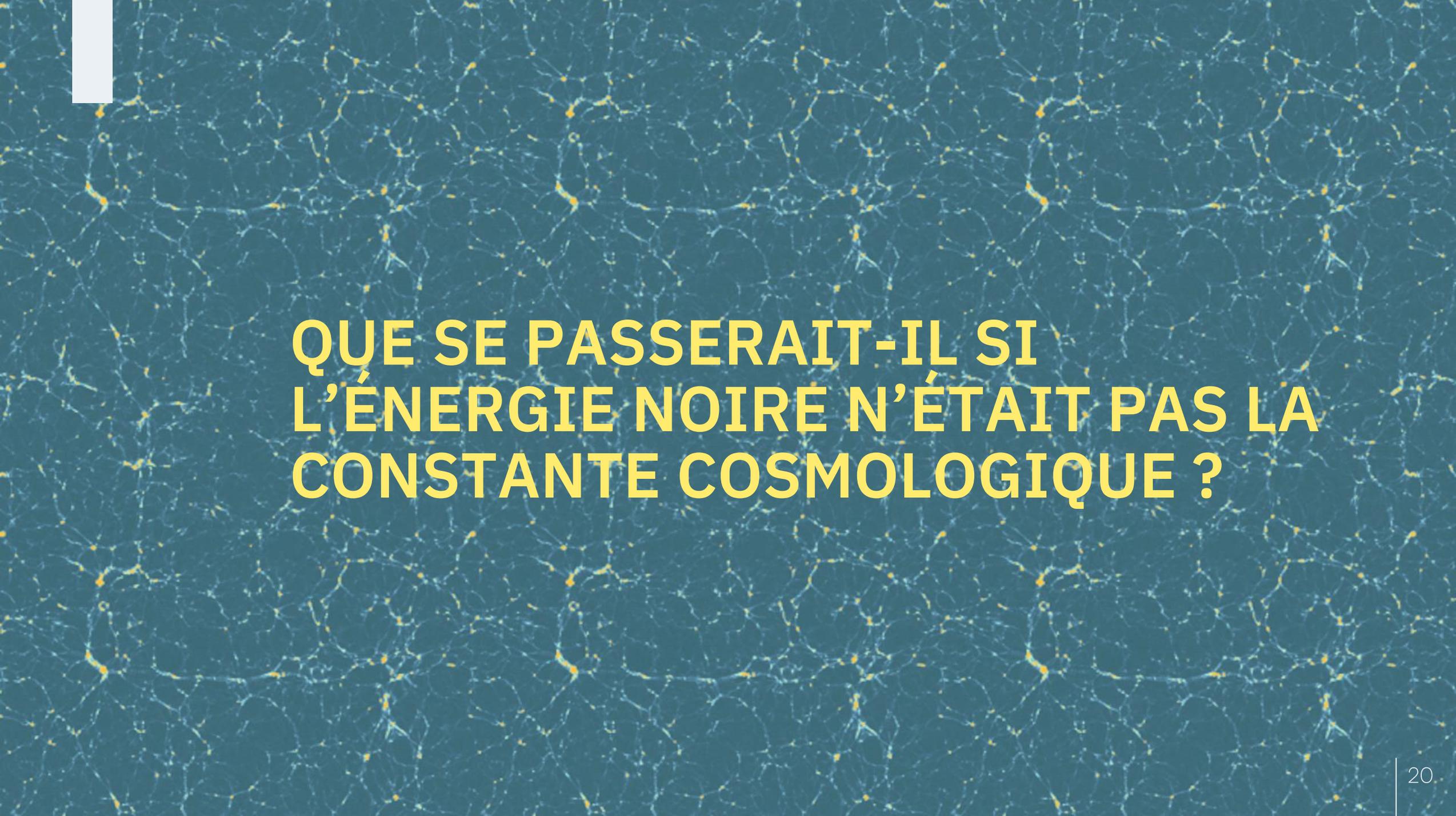
Courbure = 0



Constante cosmologique



2019 : James Peebles
"for theoretical discoveries in
physical cosmology"

The background of the slide is a complex, interconnected network of blue and yellow lines, resembling a cosmic web or a neural network. The lines are thin and form a dense, irregular pattern across the entire frame. In the top-left corner, there is a solid white vertical bar.

**QUE SE PASSERAIT-IL SI
L'ÉNERGIE NOIRE N'ÉTAIT PAS LA
CONSTANTE COSMOLOGIQUE ?**

Au-delà de la constante cosmologique : classification des modèles d'énergie noire dynamique

- Deuxième équation de Friedmann-Lemaître :

$$\text{Accélération} = - (\text{Densité} + 3 \times \text{Pression})$$

- Pour expliquer une **accélération** > 0 , il faut :

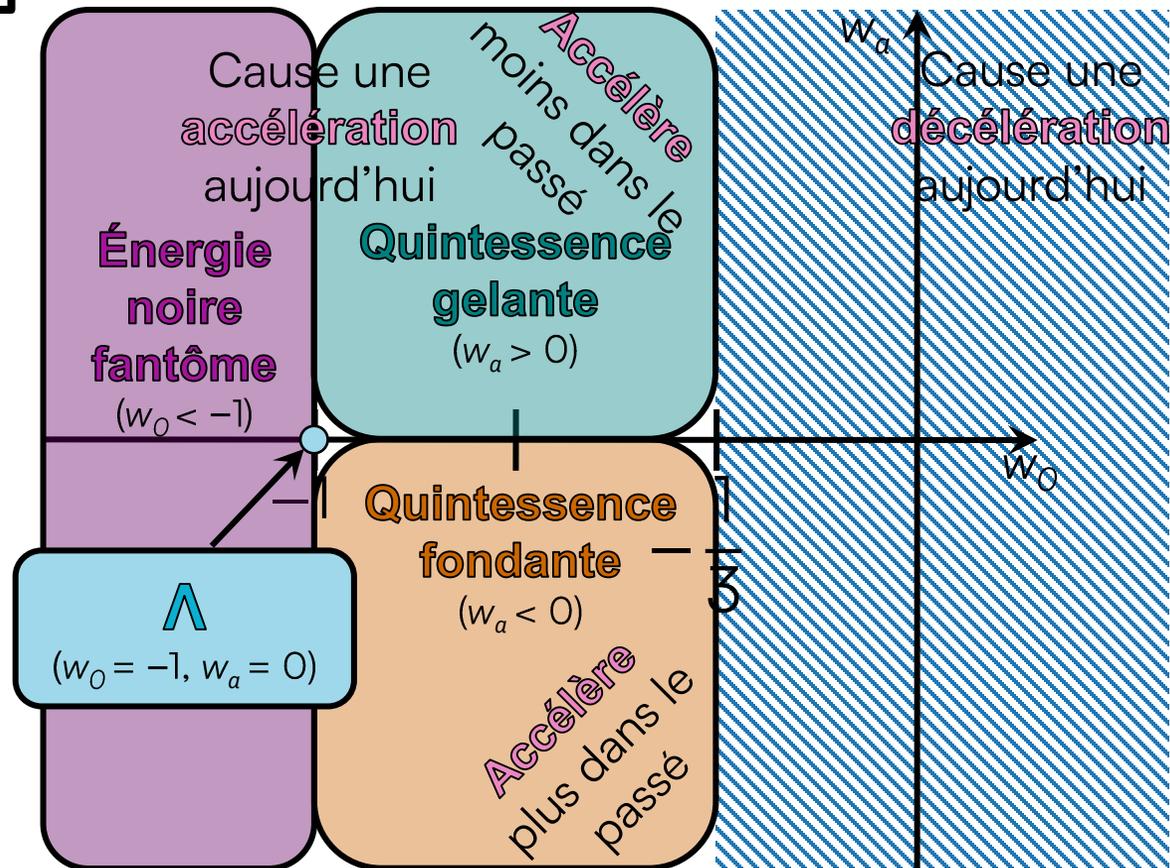
$$w = \frac{\text{pression}}{\text{densité}} < -\frac{1}{3}$$

- La **constante cosmologique** Λ correspond à $w = -1$. Mais w n'est pas nécessairement constant dans le temps !
- On paramétrise habituellement l'**énergie noire dynamique** par :

$$w(t) = w_0 + w_a \times (1 - a(t))$$

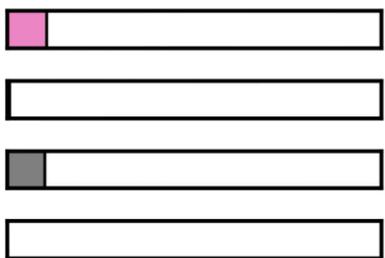
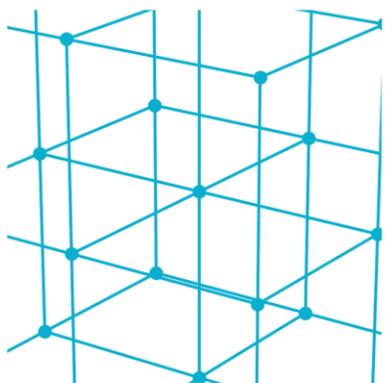
Facteur d'échelle de l'Univers

- Le « bestiaire » de l'**énergie noire** se représente donc dans un plan :



Les destins possibles pour un Univers avec une énergie noire dynamique

Constante cosmologique

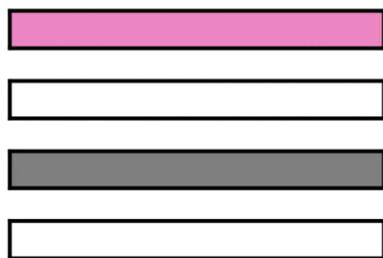
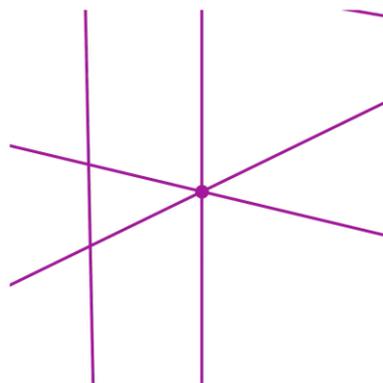


Expansion > Matière

Énergie noire > 0

Courbure = 0

Énergie noire fantôme

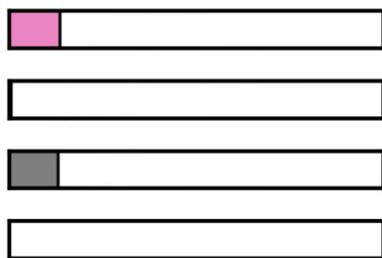
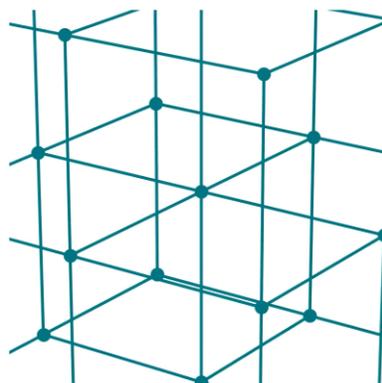


Expansion > Matière

Énergie noire ≥ 0

Courbure = 0

Quintessence gelante

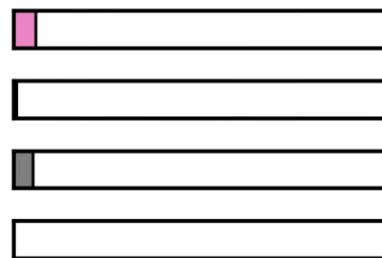
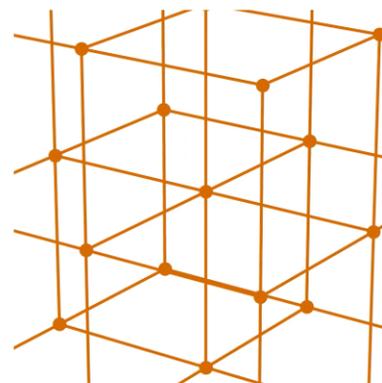


Expansion > Matière

Énergie noire ≥ 0

Courbure = 0

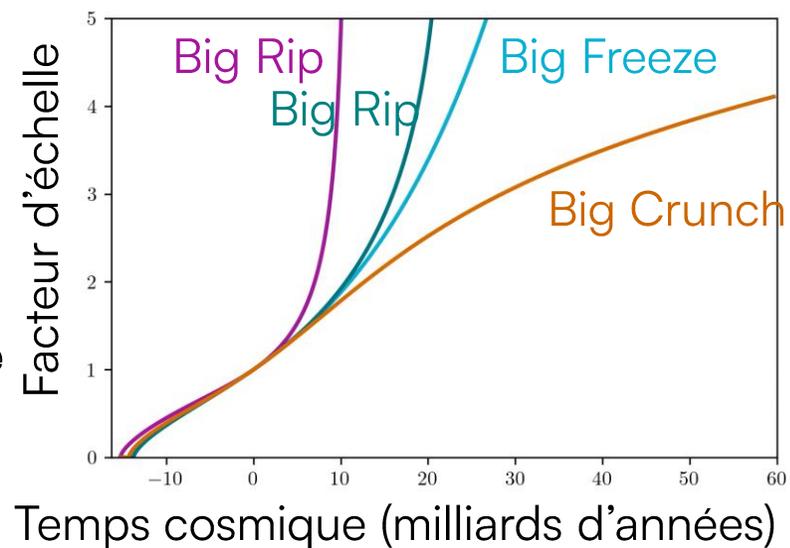
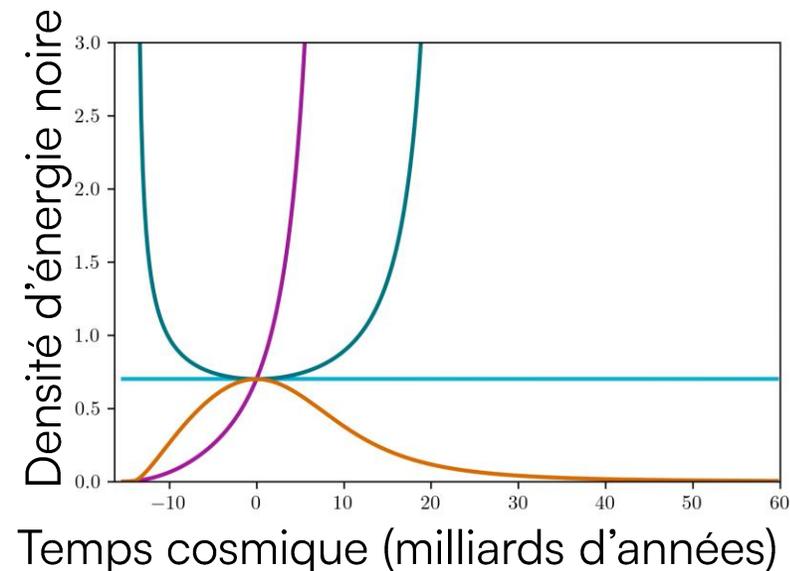
Quintessence fondante



Expansion > Matière

Énergie noire ≥ 0

Courbure = 0



The background of the slide is a complex, interconnected network of blue and yellow lines, resembling a cosmic web or a neural network. The lines are thin and form a dense, irregular pattern across the entire frame. In the top-left corner, there is a solid white vertical bar.

LE SATELLITE EUCLID EN QUÊTE DE LA NATURE DE L'ÉNERGIE NOIRE



1^{er} juillet 2023, 17:12 CEST

Le volume des données transmises par Euclid



Salle de contrôle principale à ESOC (ESA European Space Operations Centre), Darmstadt, Allemagne

- Les images sont exceptionnelles :
 - Champ de vue des instruments d'Euclid : deux fois et demi la surface de la pleine Lune.
 - En quelques jours, Euclid obtient des images correspondant à toutes les images du Hubble Space Telescope cumulées depuis 30 ans.
 - Les images font plusieurs gigaoctets chacune.
- Le volume de données est sans précédent :
 - Transmission : 75 Mo/s à 26 GHz (nouvelle fréquence, plus haute).
 - 100 Go par jour pendant 6 ans (deux fois le volume transmis par JWST/Gaia depuis L2).
 - Total : 30 Po d'images, 150 Po produits pour l'exploitation scientifique.
- Comment analyser ces données et faire le lien avec la physique de l'énergie noire ?



LA CROISSANCE DES DONNÉES, MODÈLES, MÉTHODES, ET ORDINATEURS

La croissance des données, modèles, méthodes, et ordinateurs

- Nous vivons dans un âge où tout croît vite. Mais qu'est-ce qui croît le plus vite ?

Les données
?

Les modèles
?

Les méthodes
?

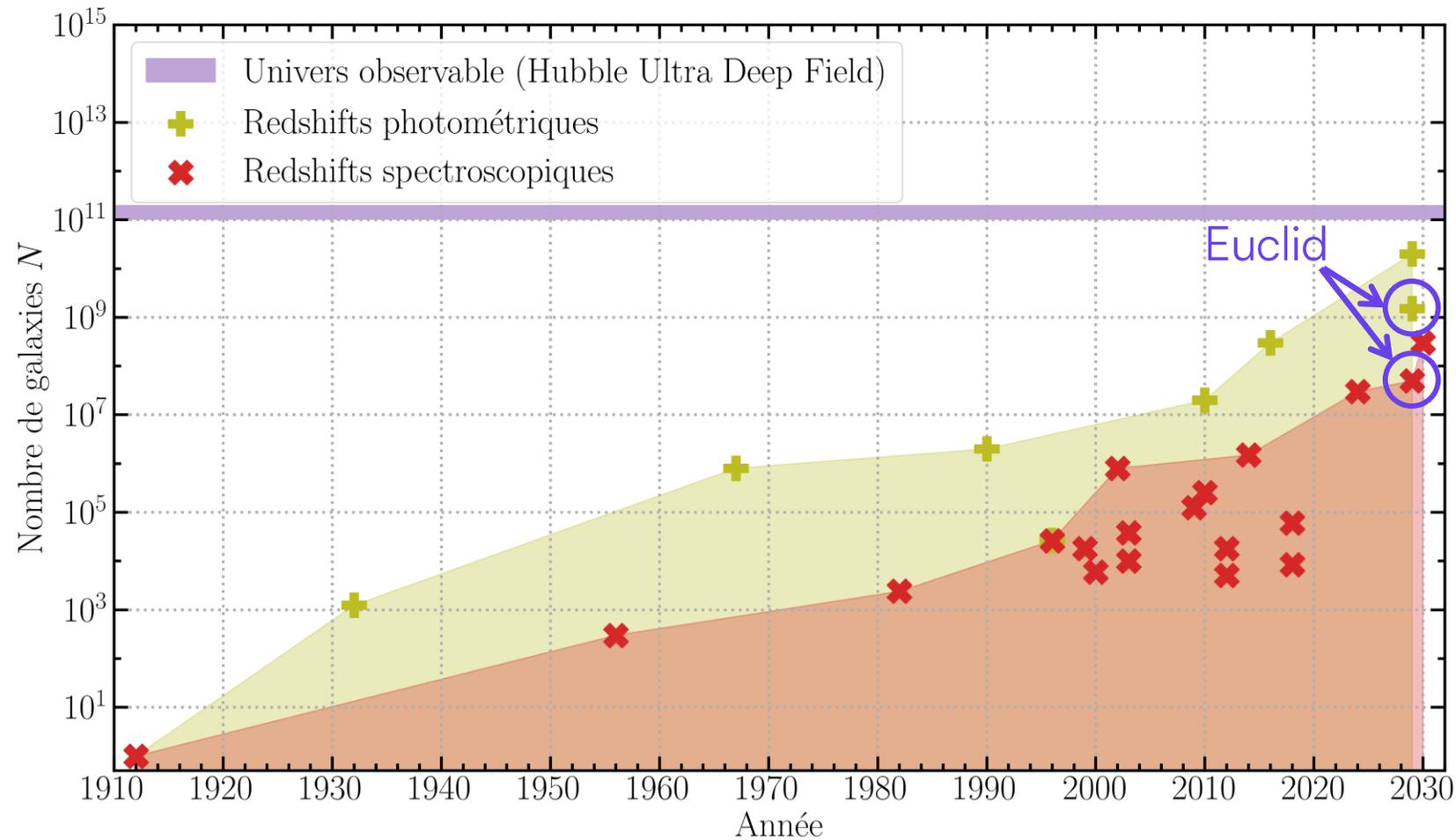
Les ordinateurs
?



Euclid's view of the Perseus cluster of galaxies, ESA, 07/11/2023

La croissance des données

- Le nombre de **galaxies observées** croît exponentiellement depuis 1910.



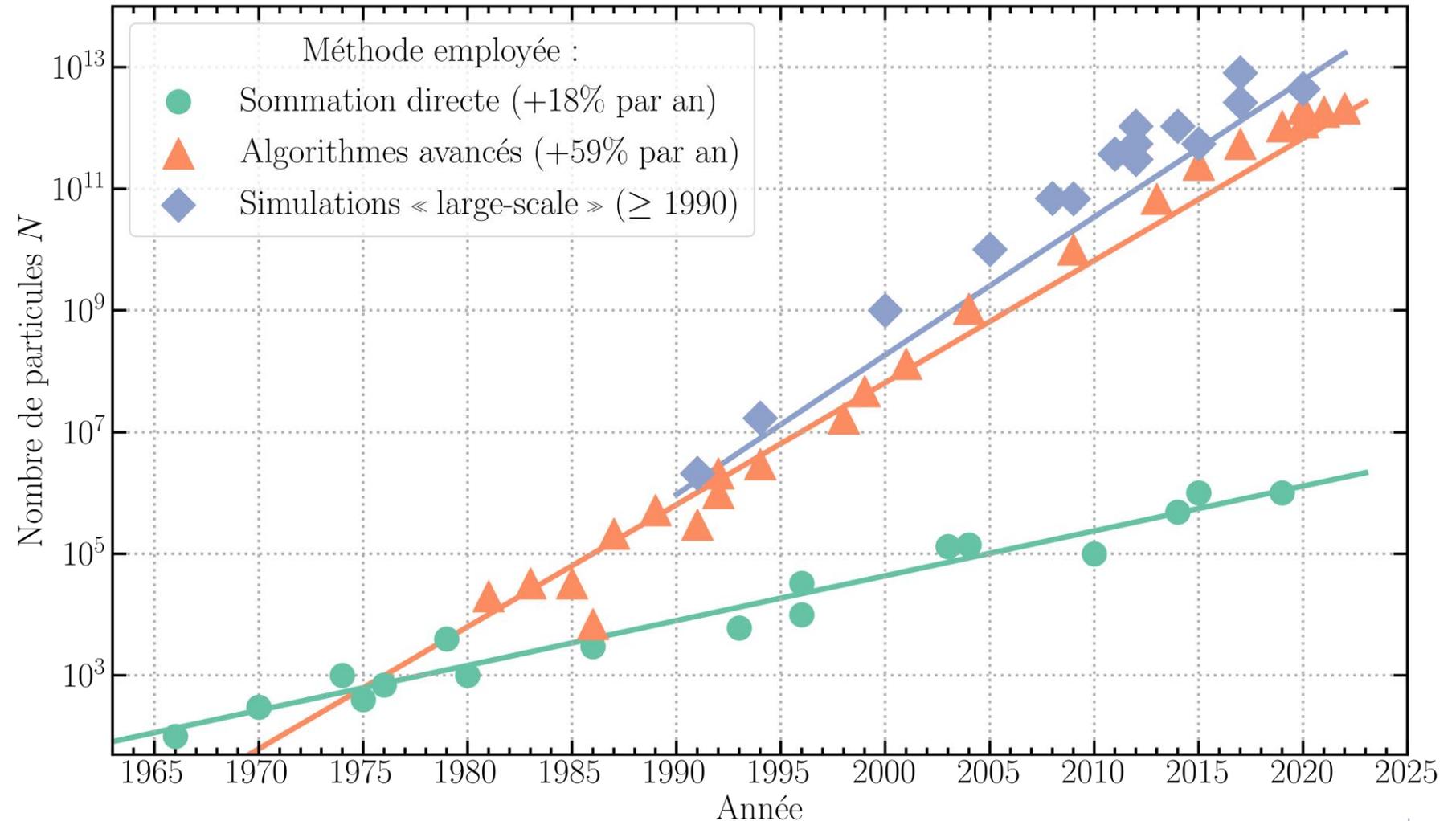


La croissance des modèles

- Les simulations numériques sont la nouvelle façon d'exprimer les modèles théoriques.



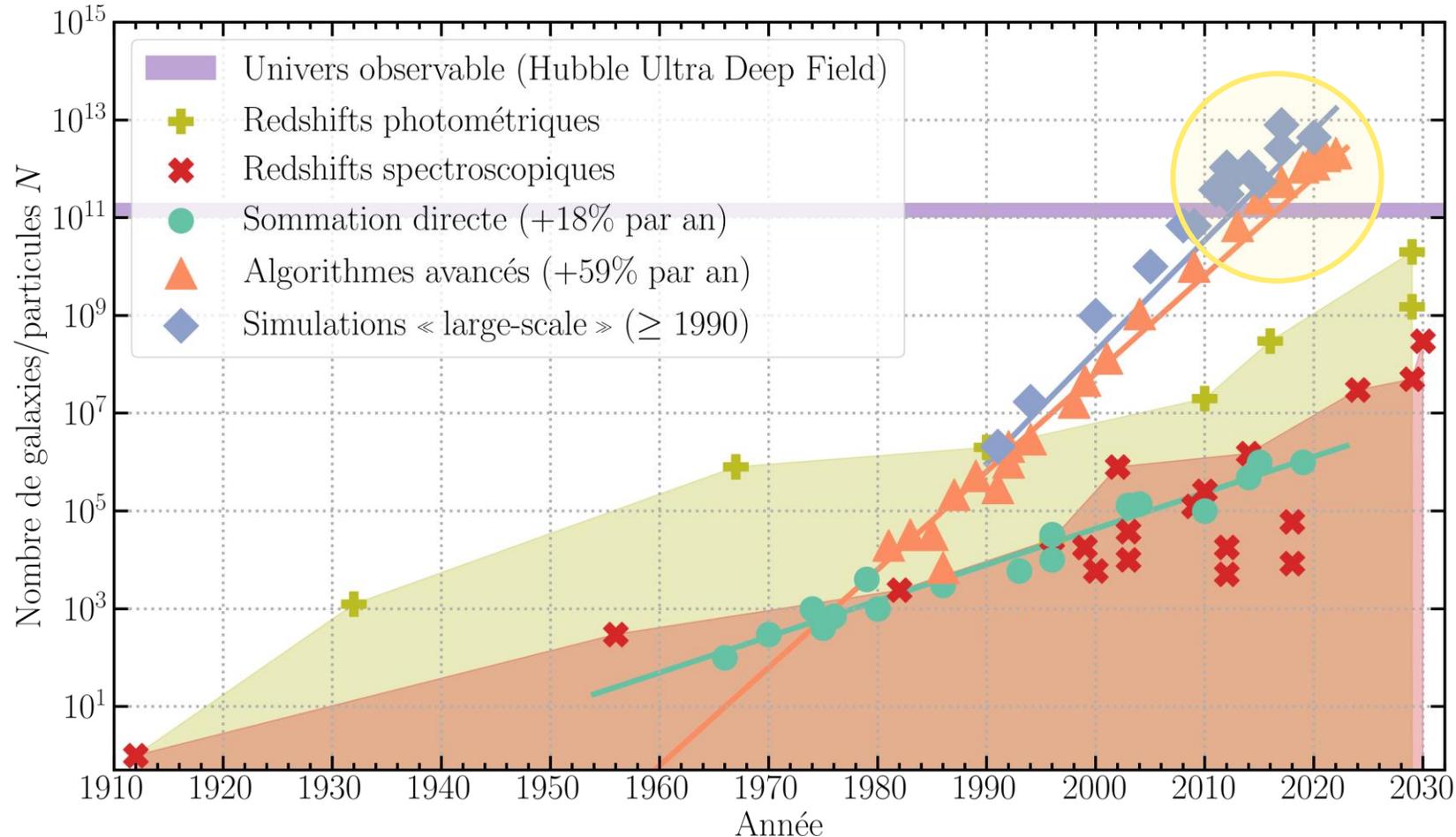
Euclid Flagship simulation,
Consortium Euclid (Stadel *et al.* 2017)



Simulations cosmologiques : [Github:florent-leclercq/Moore_law_cosmosims](https://github.com/florent-leclercq/Moore_law_cosmosims)

La croissance comparée des données et des modèles

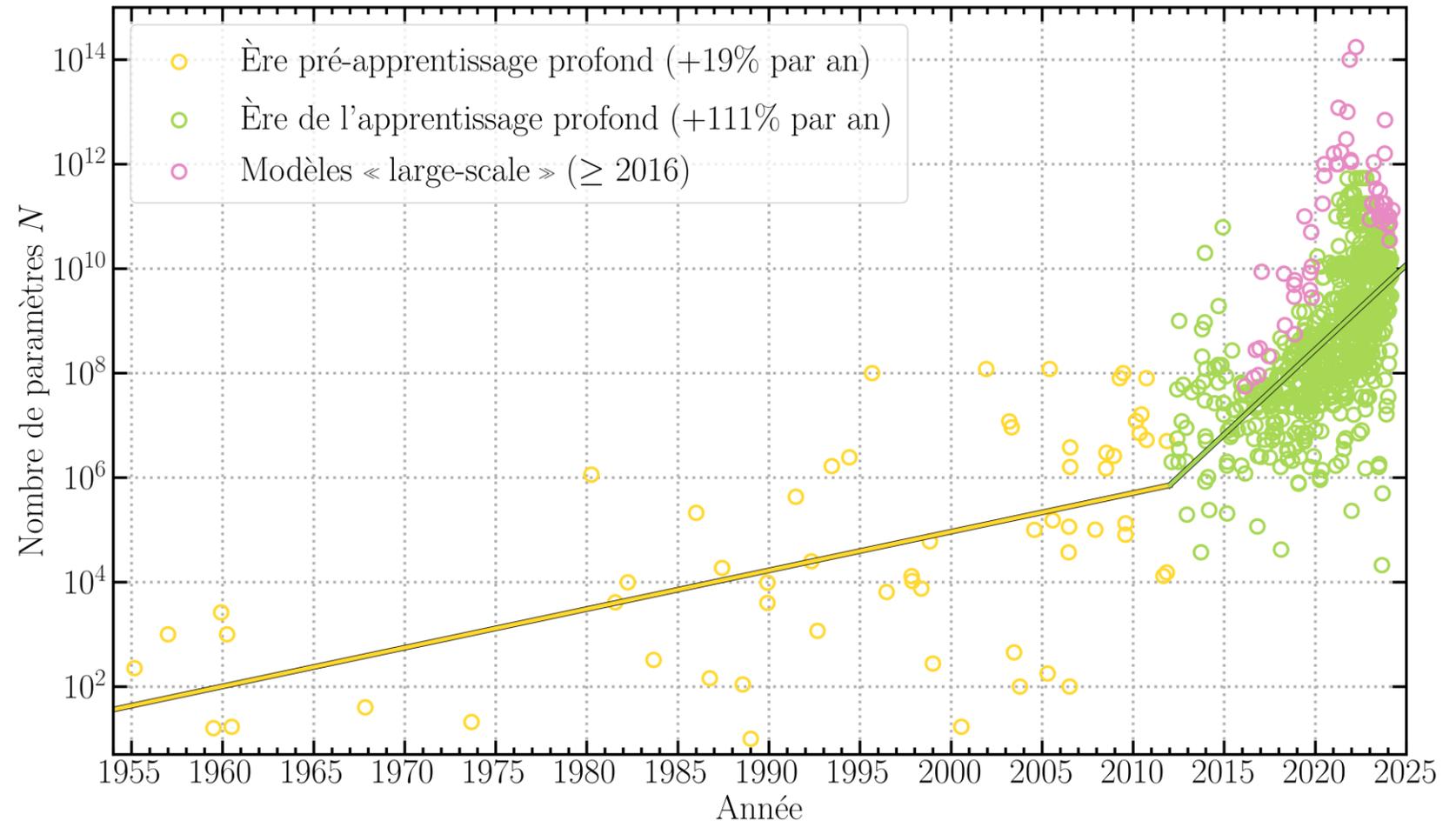
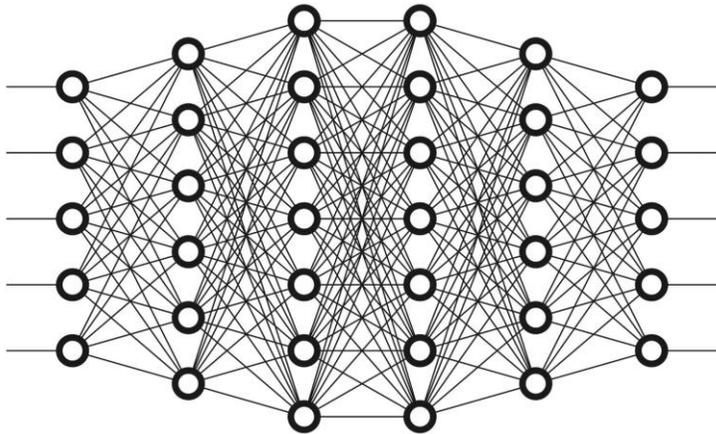
- Nous utilisons plus de particules dans les **simulations** qu'il y a de **galaxies** dans l'Univers observable !



Relevés de galaxies : figure inspirée par J. Peacock, données collectées par J. Jasche
Simulations cosmologiques : [Github:florent-leclercq/Moore_low_cosmosims](https://github.com/florent-leclercq/Moore_low_cosmosims)

La croissance des méthodes

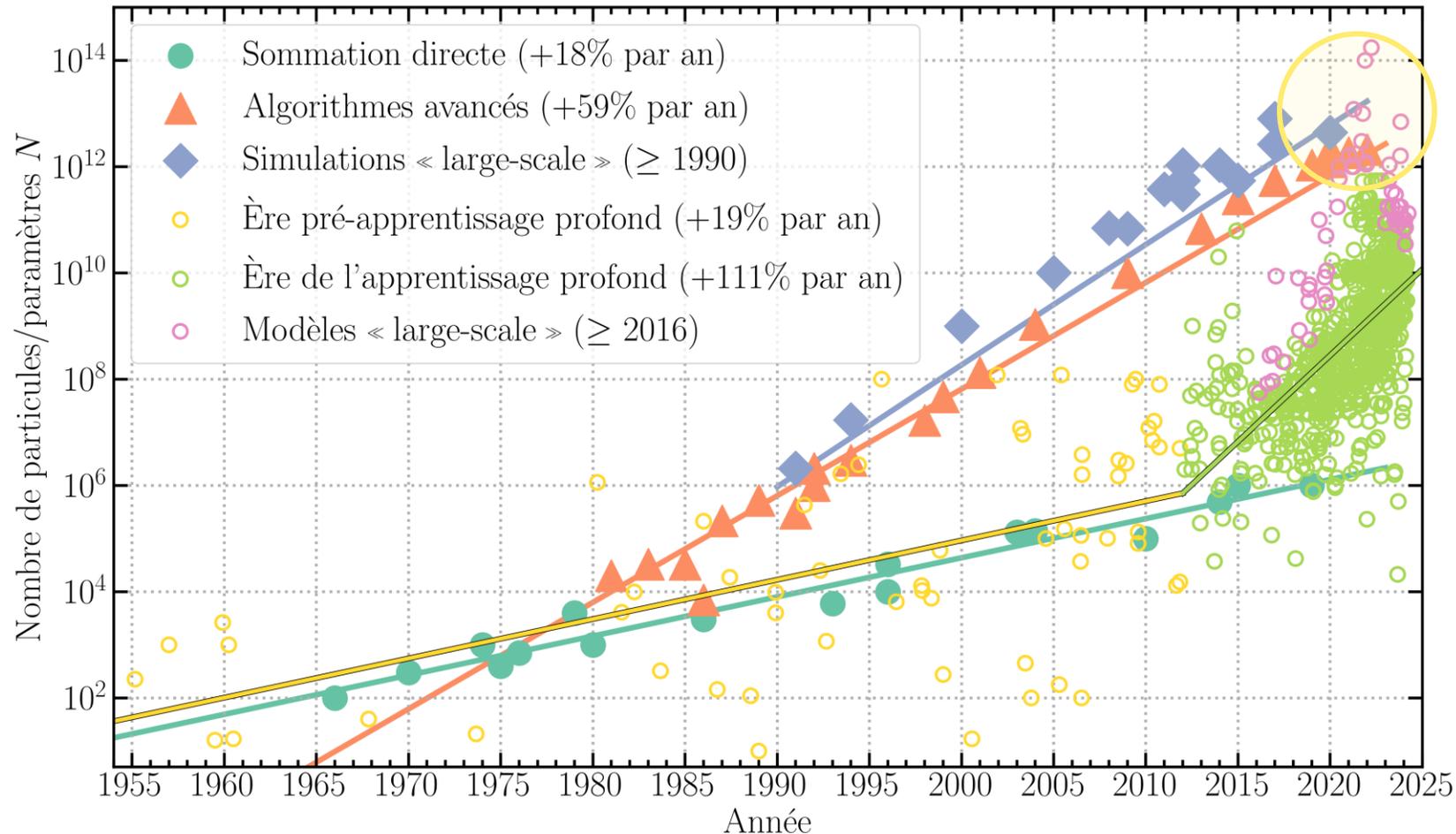
- Les méthodes d'intelligence artificielle sont caractérisées par leur nombre de paramètres.



Modèles d'IA : données epochai.org

La croissance comparée des modèles et des méthodes

- Les méthodes d'intelligence artificielle ont rattrapé les simulations cosmologiques !

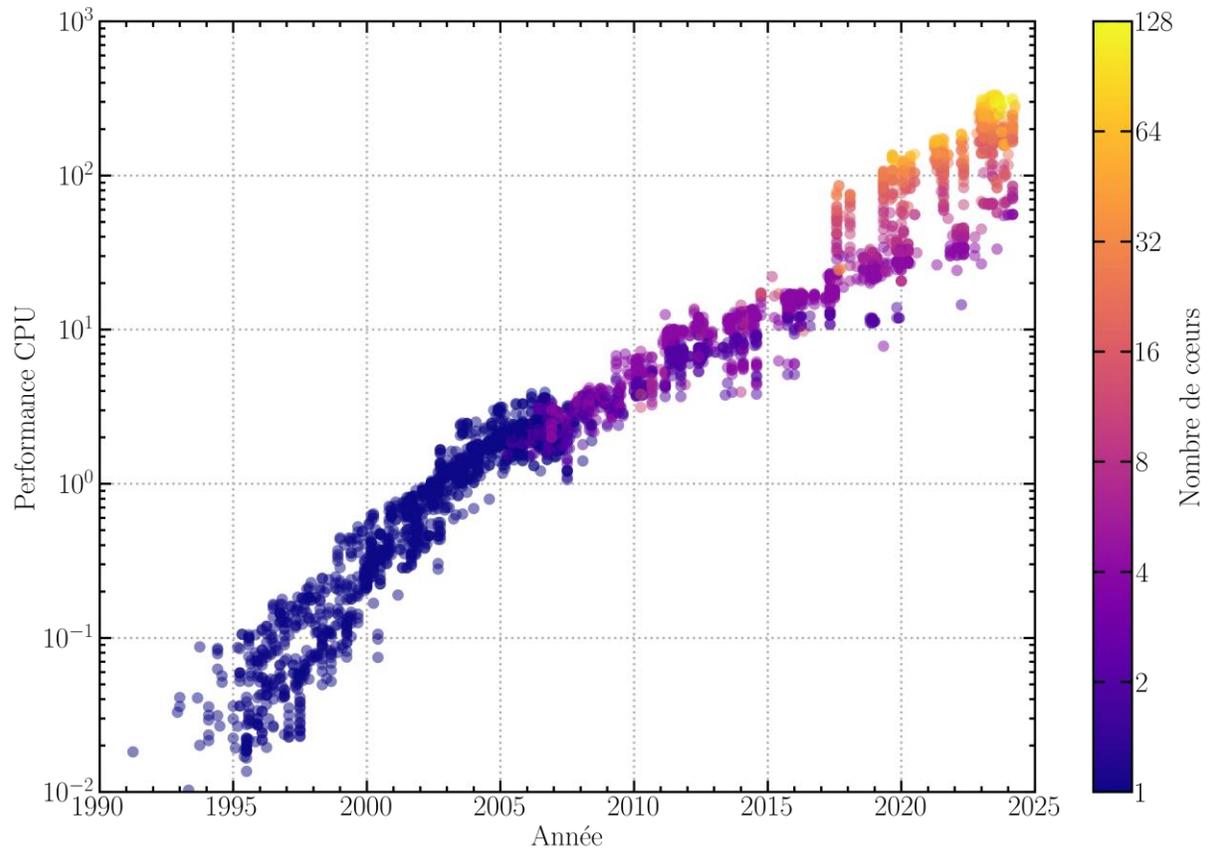


Simulations cosmologiques : [Github:florent-leclercq/Moore_law_cosmosims](https://github.com/florent-leclercq/Moore_law_cosmosims)
Modèles d'IA : données epochai.org

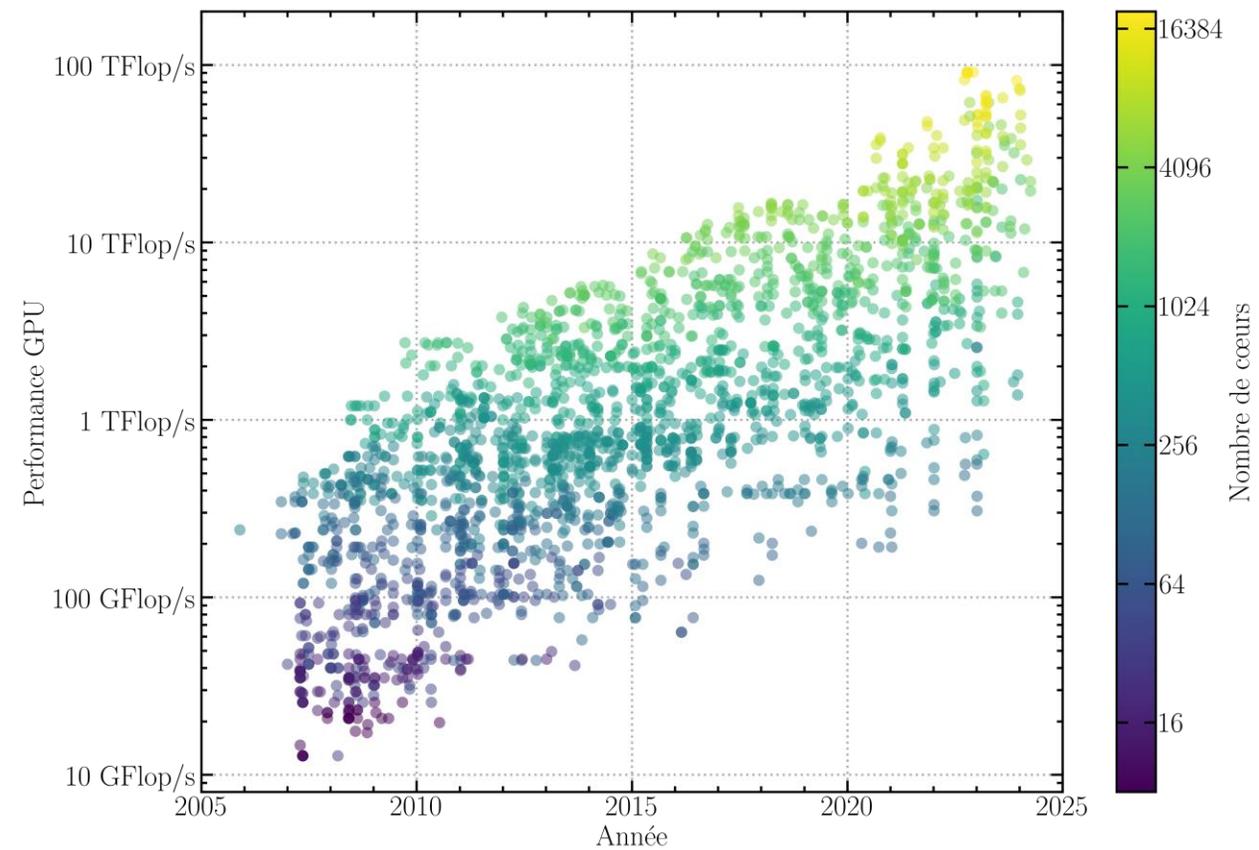
La croissance des ordinateurs



- Les **architectures matérielles** traditionnelles (CPU à un cœur) ont atteint leur limite physique : les performances plafonnent.
- Les améliorations récentes se basent sur des **accélérateurs matériels** (GPUs, puces reconfigurables ou dédiées : FPGAs, ASICs).



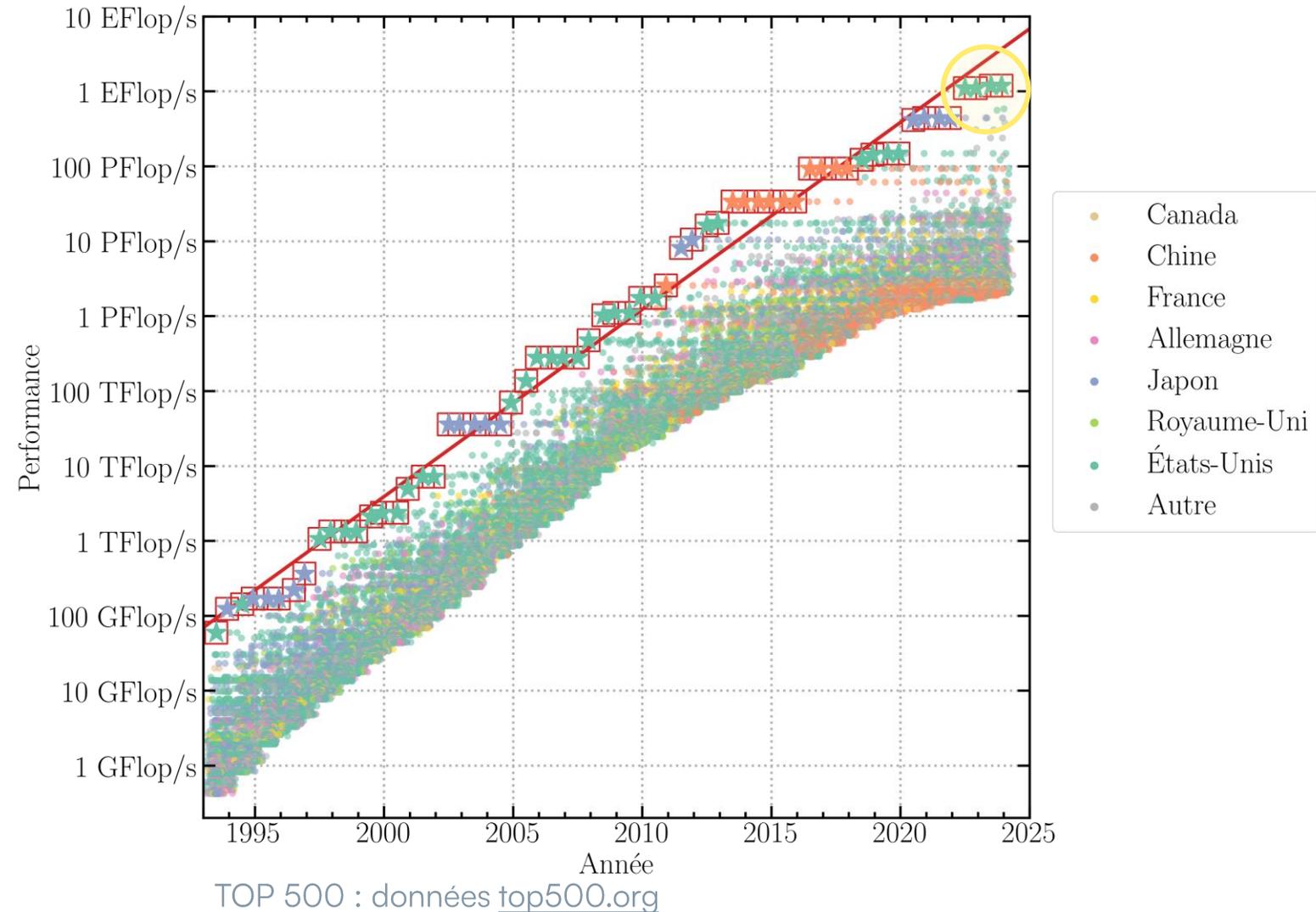
Performance CPU : basé sur un ajustement des données spec.org



Performance GPU : basé sur les données techpowerup.com

La croissance des ordinateurs

- Nous venons d'entrer dans l'ère des **supercalculateurs exaflopiques**.



The background of the slide is a deep blue field filled with a complex, interconnected network of thin, light blue lines and small, bright yellow-orange dots, resembling a cosmic web or a neural network. A solid white vertical bar is positioned in the top-left corner.

L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE AU SERVICE DE L'ANALYSE DES DONNÉES COSMOLOGIQUES

Aux sources de l'intelligence artificielle : la formule de Bayes

- Comment mesurer une grandeur ? Comment vérifier une théorie ? Plus généralement, comment la connaissance progresse-t-elle ?
- La formule de Bayes (1763): une identité mathématique sur la façon dont nous **analysons des observations** et **changeons d'avis** lorsque nous obtenons de nouvelles informations.
- Mais pourquoi l'utiliser ?
 - La formule de Bayes est triviale et dépassée.
 - Elle mesure la **croissance**. Elle dit que nous pouvons apprendre même à partir de données manquantes ou incomplètes, à partir d'approximations, à partir de l'ignorance. Elle va à l'encontre de la conviction que la science exige objectivité et précision.
 - Après la mort de Laplace, elle a été déclarée morte et enterrée.



Thomas Bayes
(1701-1761)



Richard Price
(1723-1791)



Pierre-Simon de Laplace
(1749-1827)

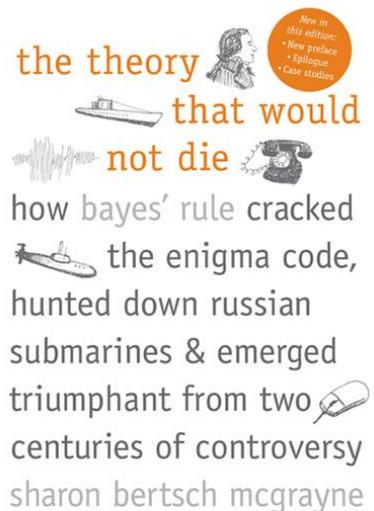
← Ce n'est (probablement !) pas la bonne personne.



Photos prises à Bunhill Fields Burial Ground, City of London, en 2021

La théorie qui ne voulait pas mourir

- Et pourtant, la formule de Bayes a aidé à résoudre beaucoup de problèmes pratiques :
 - Prouver l'innocence d'Alfred Dreyfus (Henri Poincaré, 1899-1906),
 - Sauver le système téléphonique Bell de la panique financière (Edward C. Molina, 1907),
 - Prédire les tremblements de terre et les tsunamis (Harold Jeffreys, 1930-1940),
 - Casser le code Enigma de la marine allemande (Alan Turing, 1940-1944),
 - Prouver que la cigarette cause le cancer du poumon (Jerome Cornfield, 1951)...
 - Rechercher une bombe H puis un sous-marin perdu en mer (John P. Craven, 1966-1968)



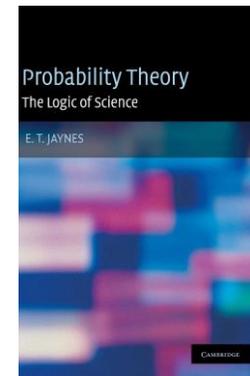
"If you're not thinking like a Bayesian, perhaps you should be."
—John Allen Paulos, *New York Times Book Review*

Sharon Bertsch McGrayne (2012)

- La bataille scientifique a duré 150 ans, jusqu'à l'arrivée des ordinateurs.

La supériorité des méthodes bayésiennes est aujourd'hui un fait largement démontré dans une centaine de domaines différents. On peut argumenter avec une philosophie ; il n'est pas si facile d'argumenter avec une sortie d'ordinateur, qui nous dit : « Indépendamment de toute votre philosophie, voici les faits de performance réelle ».

Jaynes 2002, *Probability Theory — The logic of science*



Jaynes (2002)



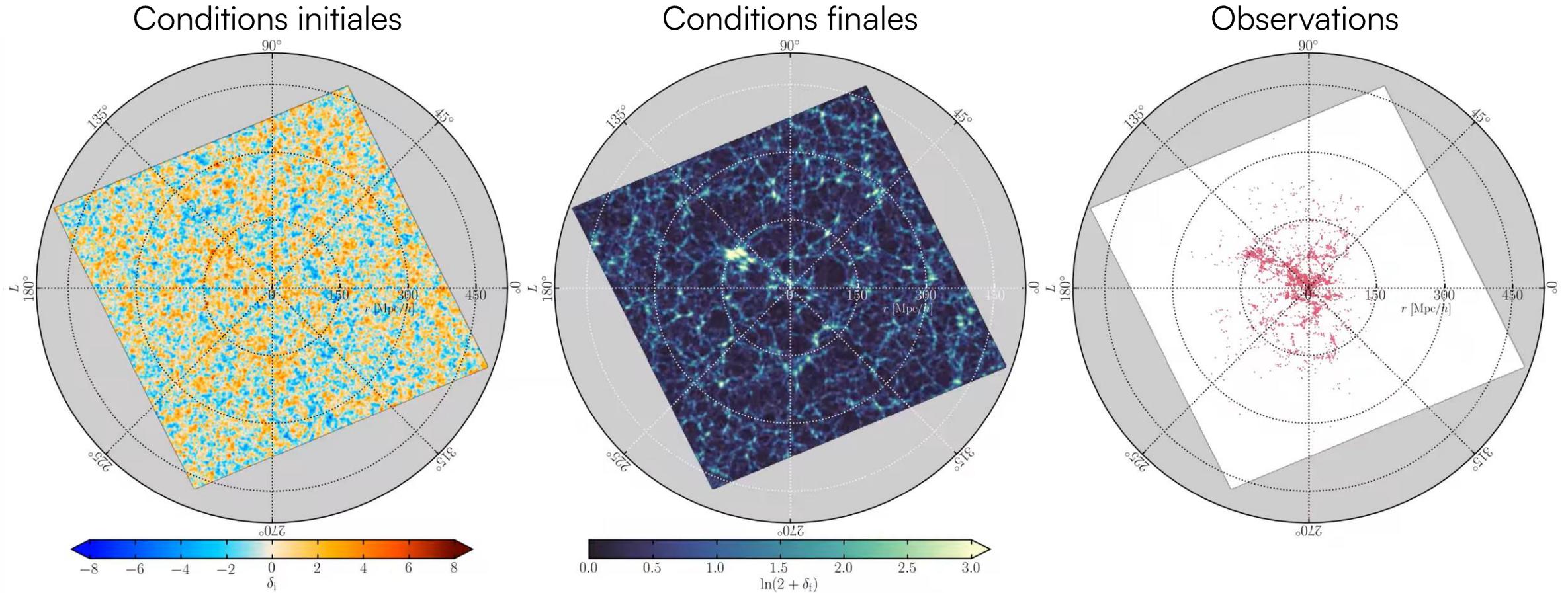
Richard Threlkeld Cox
(1898-1991)



Edwin Thompson
Jaynes (1922-1998)

- [Théorème de Cox-Jaynes](#) (1946) : la théorie (bayésienne) des probabilités est la seule « logique de la science » possible.

Bayes au travail en cosmologie : *Bayesian Origin Reconstruction from Galaxies (BORG)*



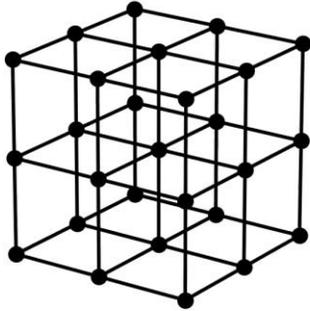
67 224 galaxies, ≈ 17 millions d'éléments de volume, 5 To de données générées, 10 000 réalisations d'« Univers possible », ≈ 500 000 simulations, 1,5 million d'heures-CPU (2 mois de supercalculateur)

Jasche & Wandelt (2013) ; Jasche, Leclercq & Wandelt (2015) ; Jasche & Lavaux (2019) ; Lavaux, Jasche & Leclercq (2019)

Quelques exemples d'intelligence artificielle en 2024...

- Grands modèles de langage (*large language models, LLMs*), chatbots

Exemples : Generative Pre-trained Transformers (ChatGPT)



```
python Copy code  
  
import matplotlib.pyplot as plt  
  
# Coordinates for the points  
x = [0, 1, 2, 0, 1, 2, 0, 1, 2]  
y = [0, 0, 0, 1, 1, 1, 2, 2, 2]  
  
# Create the figure and axes  
fig, ax = plt.subplots()  
  
# Plot the points  
ax.scatter(x, y)
```

[Github:florent-leclercq/homogeneous_cosmology_animations](https://github.com/florent-leclercq/homogeneous_cosmology_animations)

- Génération d'images à partir de descriptions textuelles

Exemples : Dall-E, Stable Diffusion, Midjourney

« Cute cats working on new AI research as digital art »



Généré avec DALL-E 2 le 08/10/2022



Généré avec DALL-E 3 le 08/03/2024

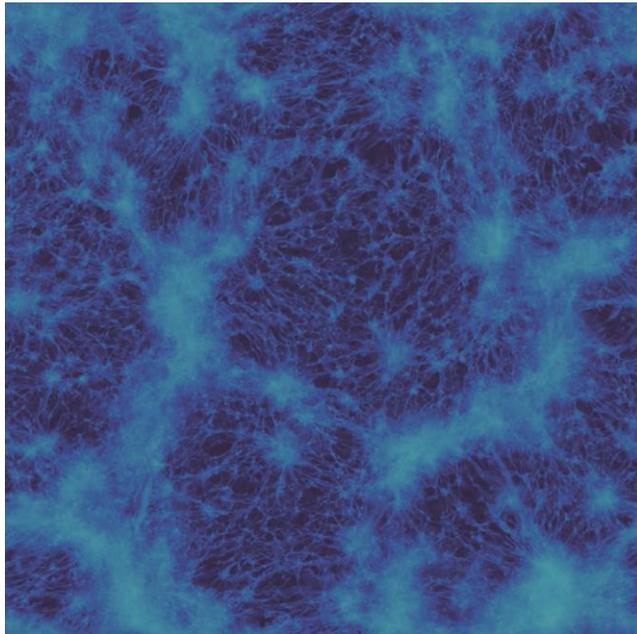
Pourquoi de l'intelligence artificielle en cosmologie ?



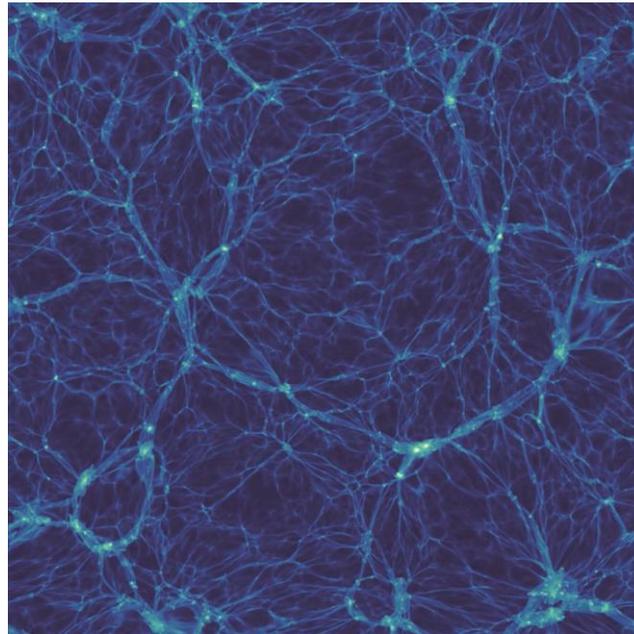
Dernière conférence à l'IAP (novembre 2023)

Imaginer d'autres Univers, accélérer, aller au-delà des approximations

- Exemple : l'émergence de la complexité dans la formation des structures cosmiques.



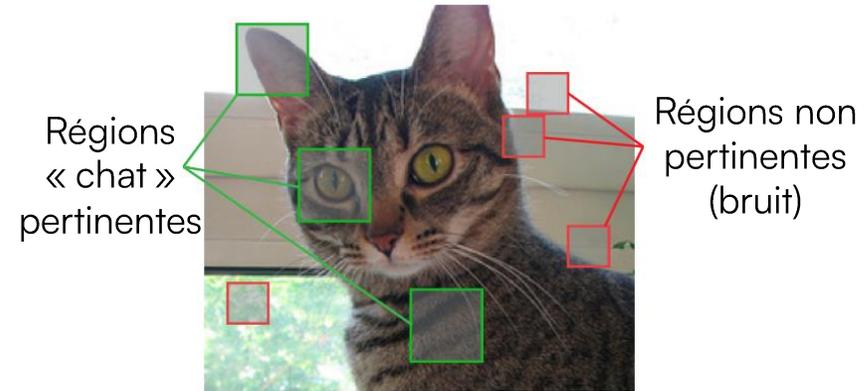
Modèle analytique



Univers numérique simulé

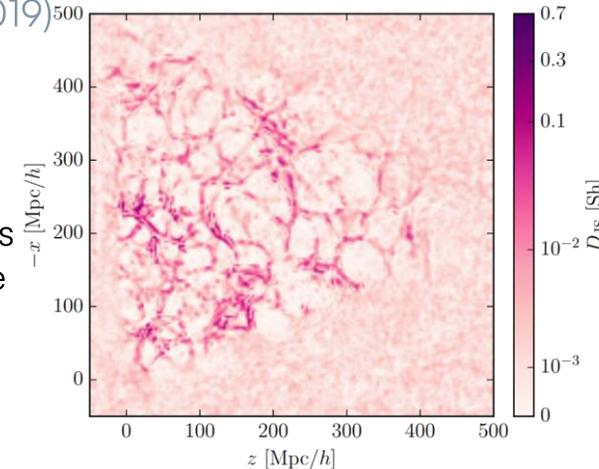
Exemples : He *et al.* (2018) ; Mootooyaloo, Jaffe, Heavens & Leclercq (2022) ; Jamieson *et al.* (2022)

Rechercher et résumer l'information pertinente pour tester les modèles cosmologiques



Microsoft Research Blog (2019)

Une carte des régions de l'Univers local contenant de l'information sur l'énergie noire



Exemples : Leclercq *et al.* (2016) ; Charnock *et al.* (2018) ; Leclercq (2018) ; Makinen *et al.* (2021)

La révolution des réseaux de neurones



Epoch
000,465

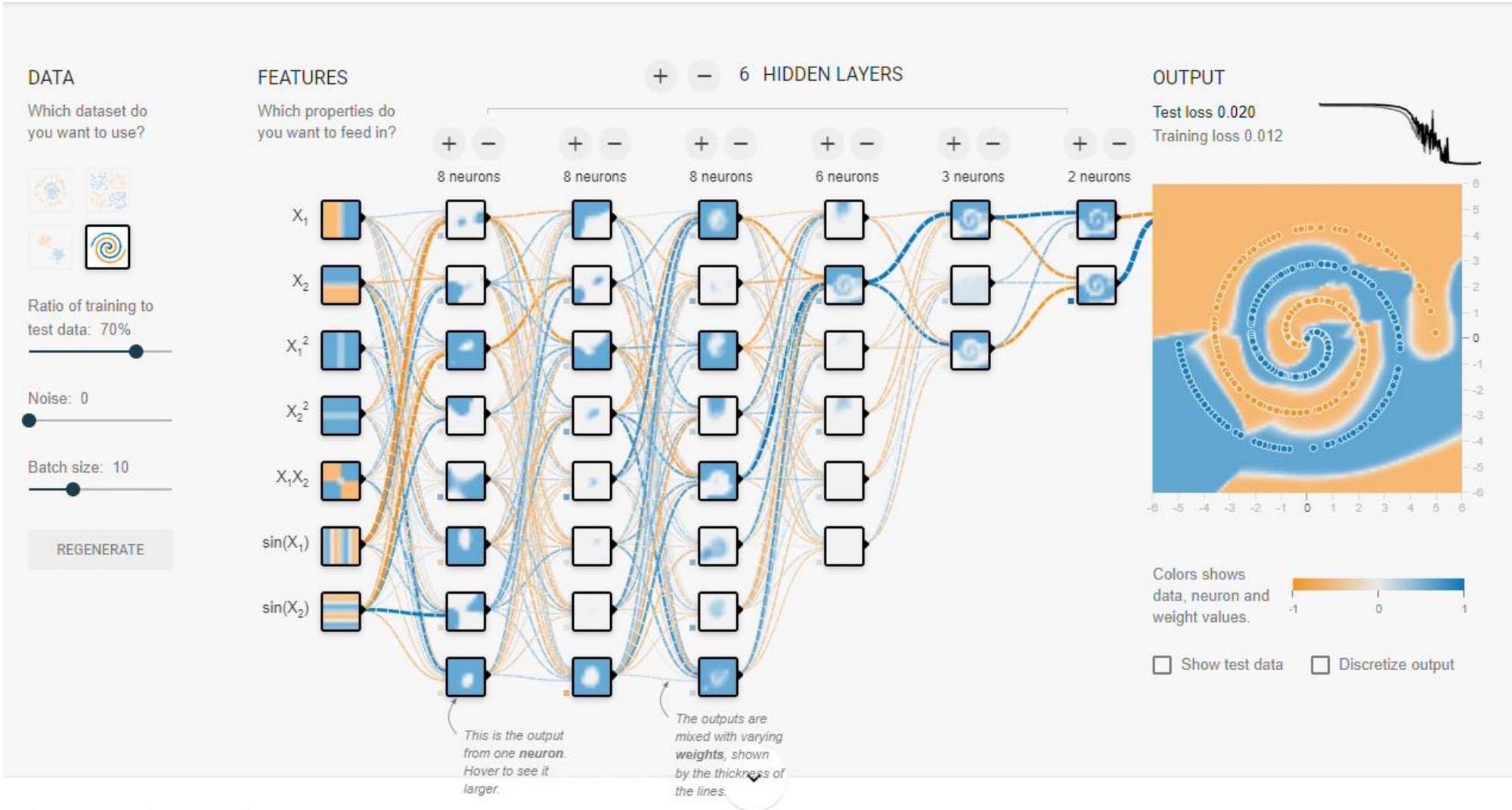
Learning rate
0.01

Activation
ReLU

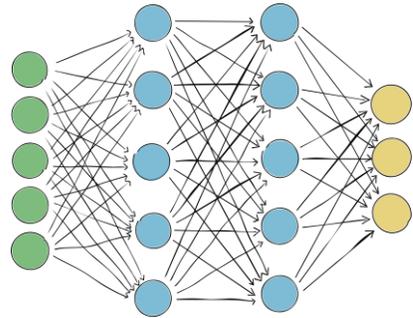
Regularization
None

Regularization rate
0.001

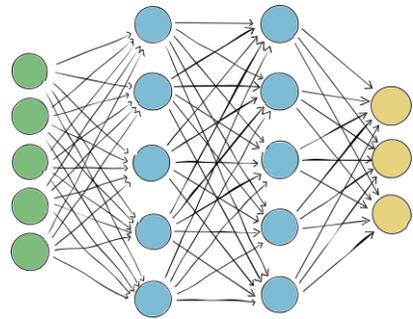
Problem type
Classification



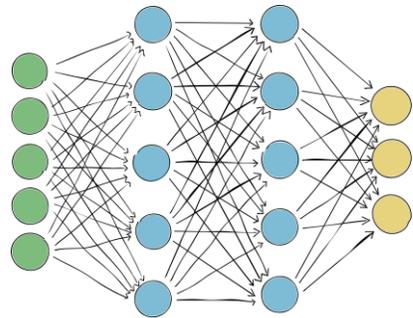
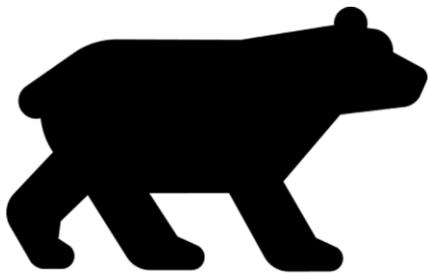
Comment un réseau de neurones comprend-il le monde ?



ours



ours



???

- Ce genre d'« attaque par exemple contradictoire » (*adversarial attack*) permet de tester la robustesse du modèle appris.
- Ce type de réseau de neurones (convolutif) semble raisonner sur la texture et non sur la forme générale.



Les réseaux de neurones se créent un **langage interne** très puissant pour manipuler, analyser, générer des données et objets **complexes**.



Mais ce langage interne reste assez **mystérieux** : il n'y a pas de théorie disponible. Prochain défi : le décrypter !

Conclusion : Énergie noire et intelligence artificielle

La nature de l'énergie noire est l'une des questions les plus fascinantes de la cosmologie contemporaine.

Le satellite Euclid va réaliser le premier relevé depuis l'espace destiné à étudier ce mystère.

L'intelligence artificielle sera un élément clé pour analyser les données et faire la connexion avec la physique.

