

# Le squelette cosmique (théorie)

**Sandrine Codis**

**- Institut d'Astrophysique de Paris -**

horizon-AGN

8 janvier 2019

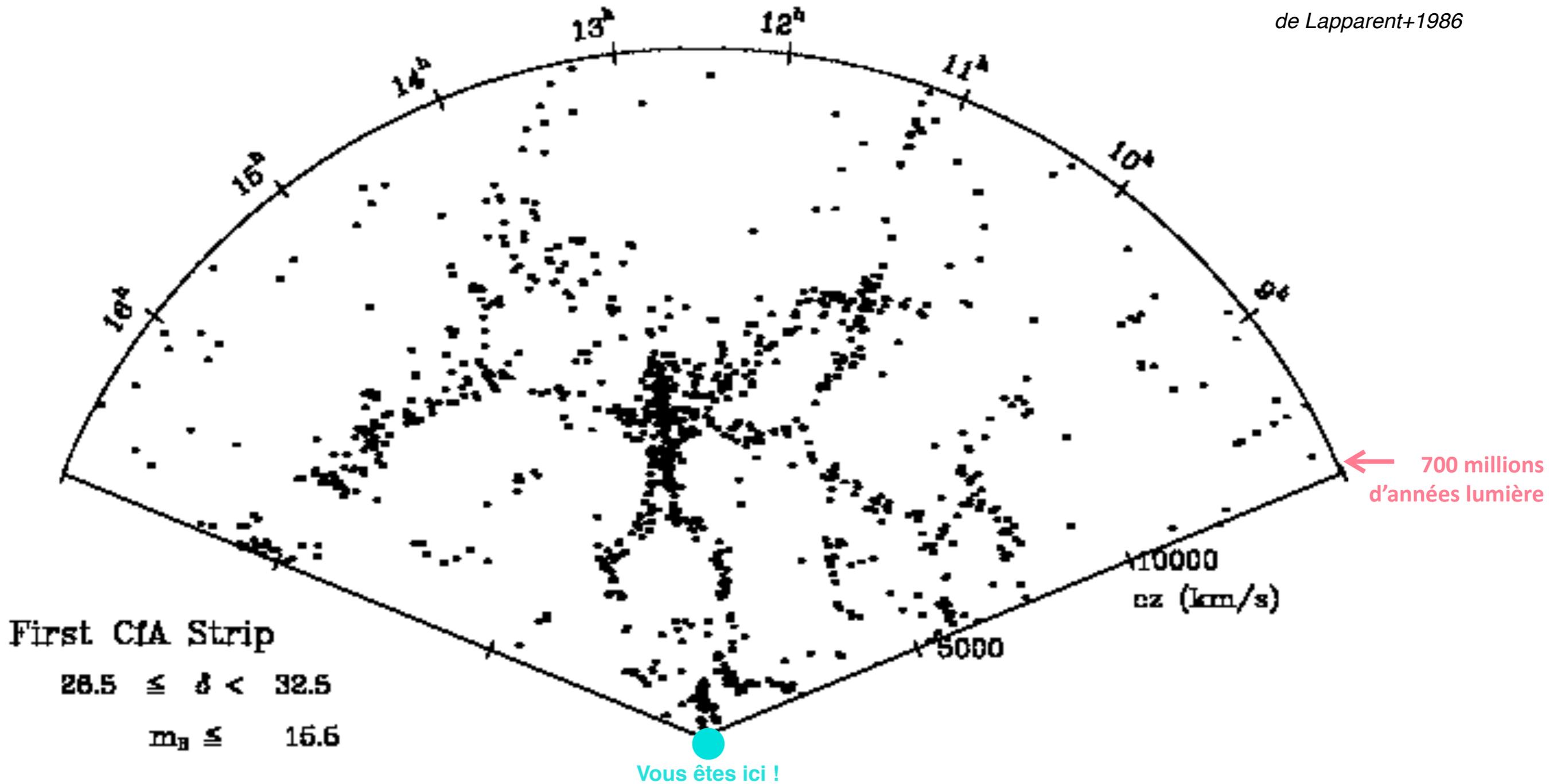
Collège de France

# Le squelette cosmique (théorie)

- ▶ Origine de la toile cosmique
- ▶ Le squelette cosmique
- ▶ Cosmologie et formation des galaxies

# Distribution des galaxies

de Lapparent+1986



# Distribution des galaxies

Chaque point est une galaxie:

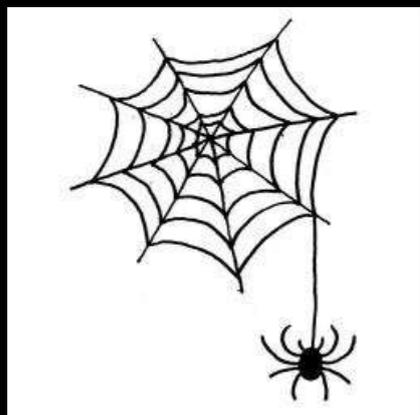
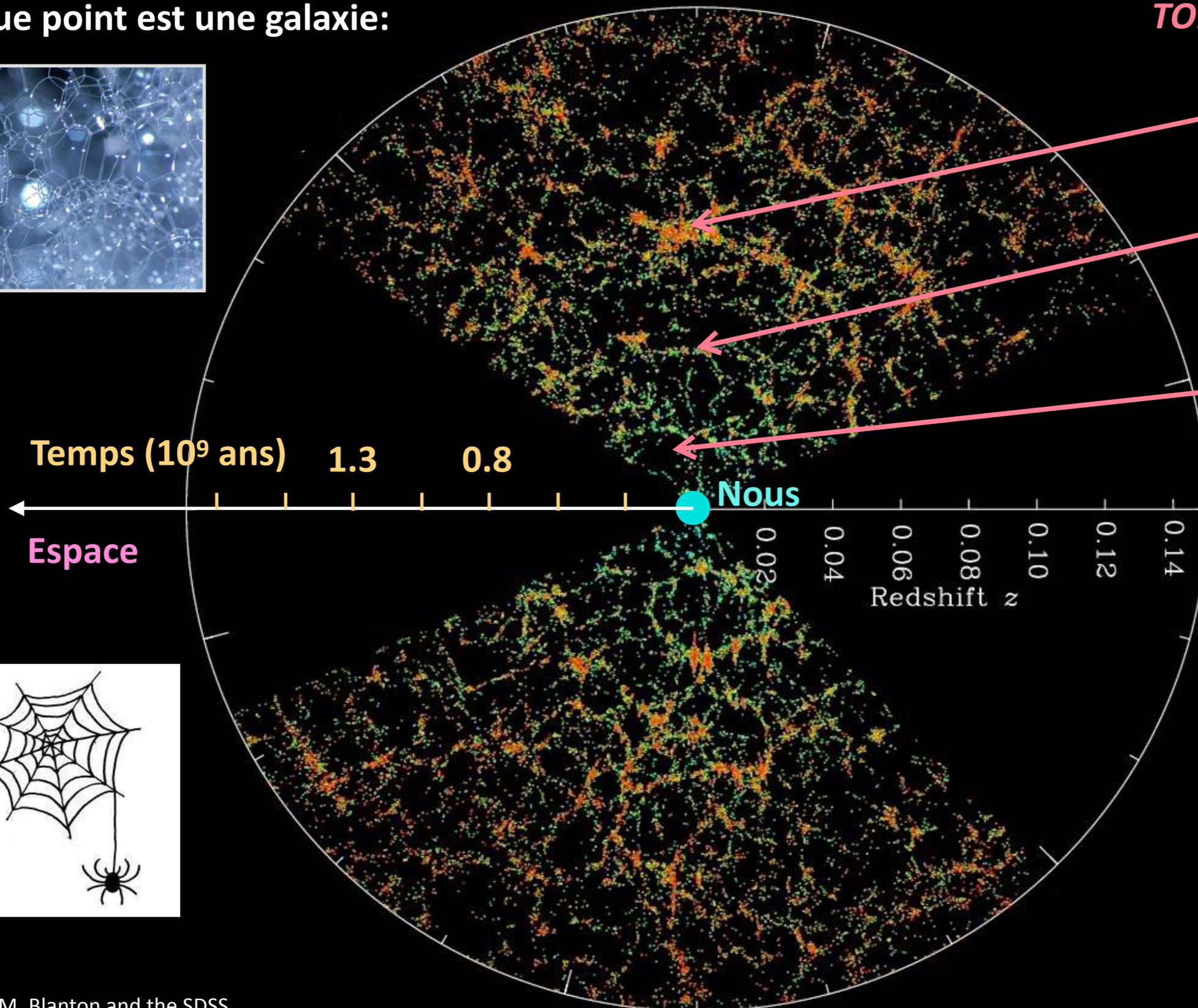


**TOILE COSMIQUE :**

amas

filaments

vides

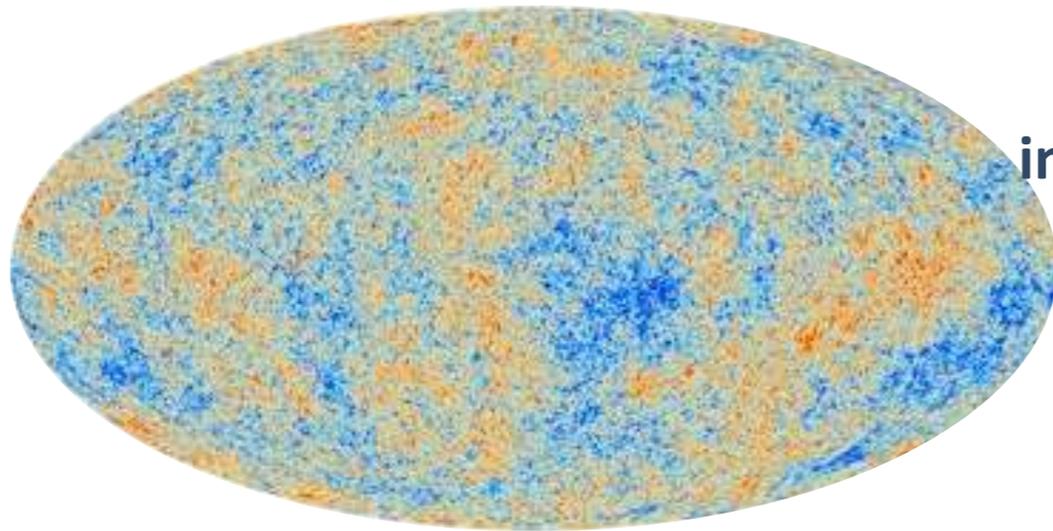


La toile cosmique est naturellement prédite par le **modèle concordant de la cosmologie** au moyen par exemple de simulations numériques.

Au sein de la toile cosmique, la matière s'échappe des vides vers les murs, les filaments et finit dans les noeuds.

# Comment se tisse la toile cosmique?

Fluctuations primordiales Gaussiennes

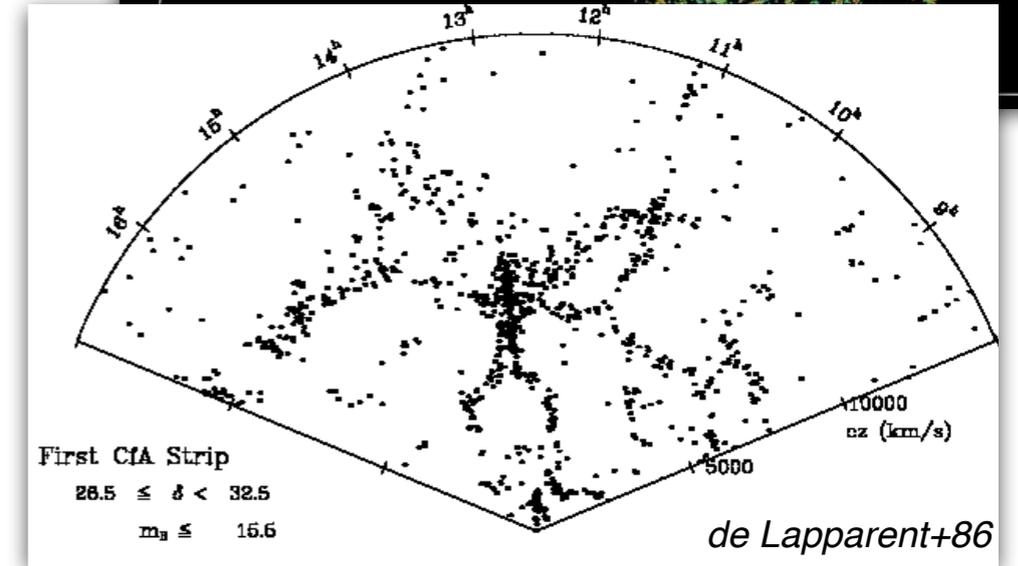
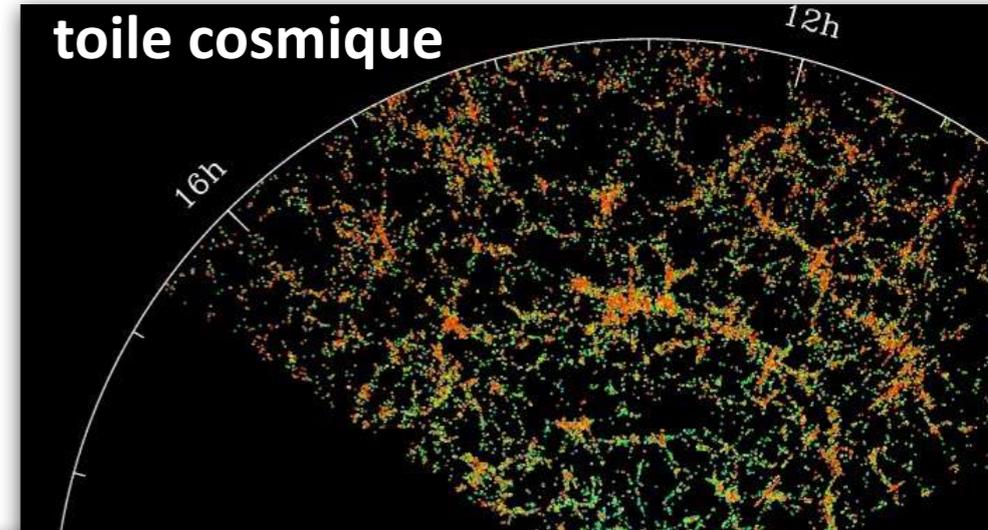


instabilité gravitationnelle



expansion

toile cosmique

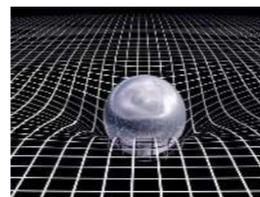
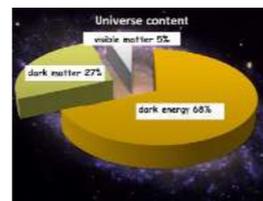


Les modèles de l'Univers primordial prédisent la statistique de ces fluctuations

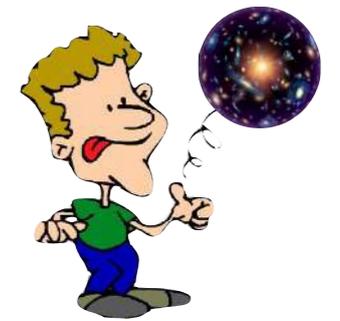


modèle cosmologique

A comparer aux observations



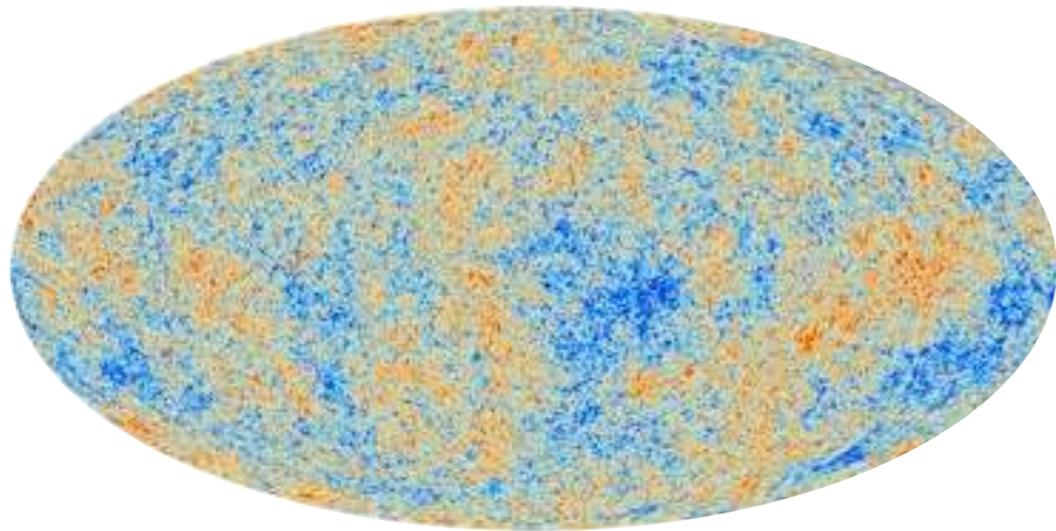
*Nous faisons des prédictions statistiques (pas objet-par-objet) !*



# Comment se tisse la toile cosmique?

*Champ aléatoire Gaussian*

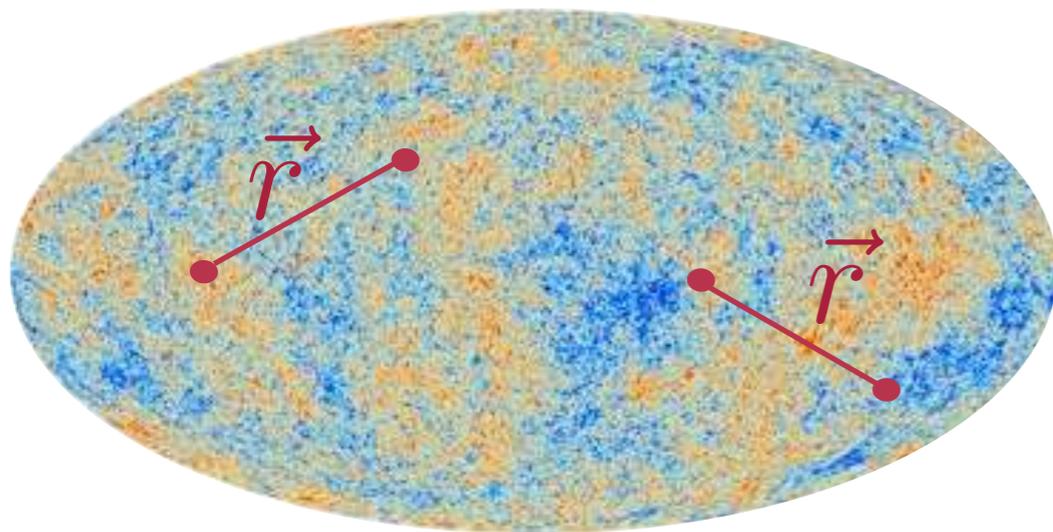
Fluctuations primordiales Gaussiennes



# Comment se tisse la toile cosmique?

## *Champ aléatoire Gaussian*

Fluctuations primordiales Gaussiennes



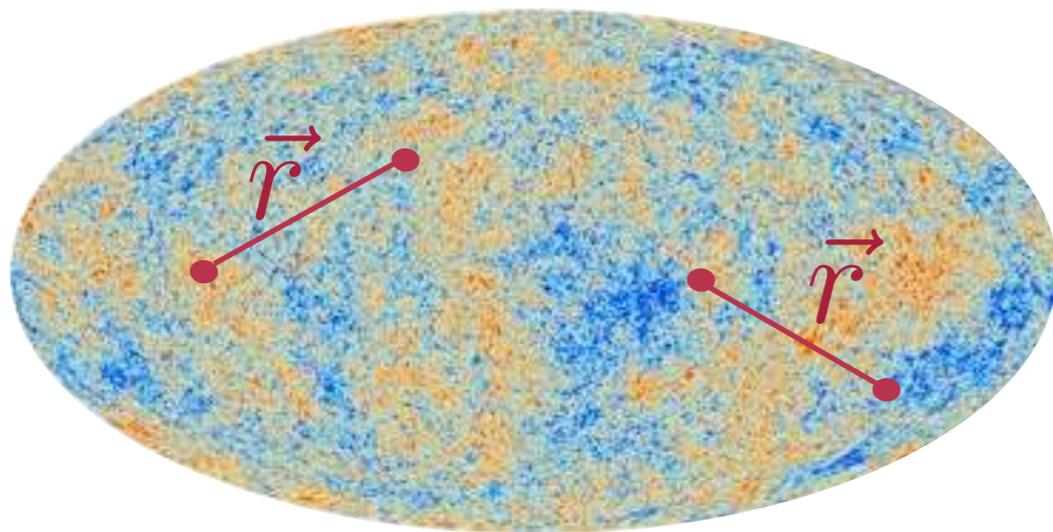
$$\langle \delta(\vec{x}) \delta(\vec{x} + \vec{r}) \rangle = \xi_2(\|\vec{r}\|)$$

Etat initial caractérisé complètement  
par sa fonction de corrélation à 2 points  
( $\Leftrightarrow$  spectre de puissance)

# Comment se tisse la toile cosmique?

## Champ aléatoire Gaussian

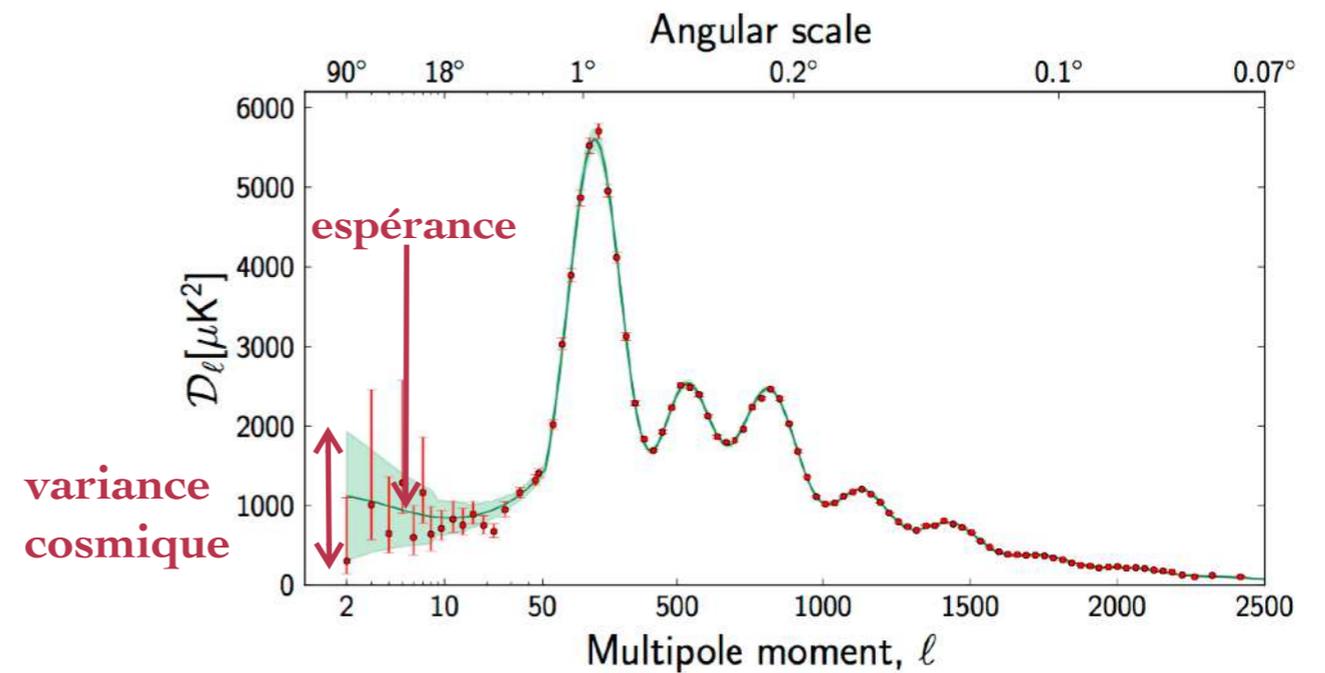
Fluctuations primordiales Gaussiennes



$$\langle \delta(\vec{x}) \delta(\vec{x} + \vec{r}) \rangle = \xi_2(\|\vec{r}\|)$$

Etat initial caractérisé complètement  
par sa fonction de corrélation à 2 points  
( $\Leftrightarrow$  spectre de puissance)

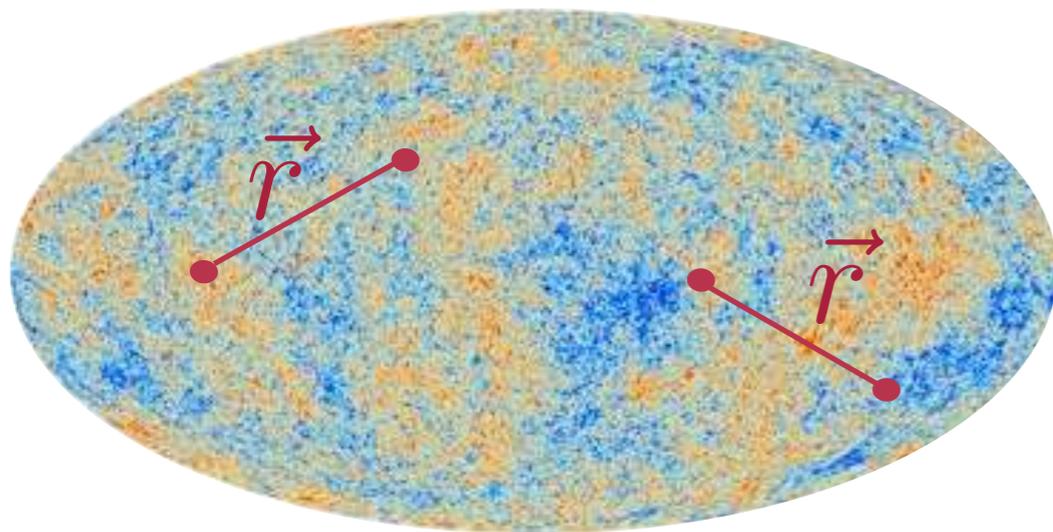
## CMB vu par Planck



# Comment se tisse la toile cosmique?

## *Champ aléatoire Gaussian*

Fluctuations primordiales Gaussiennes



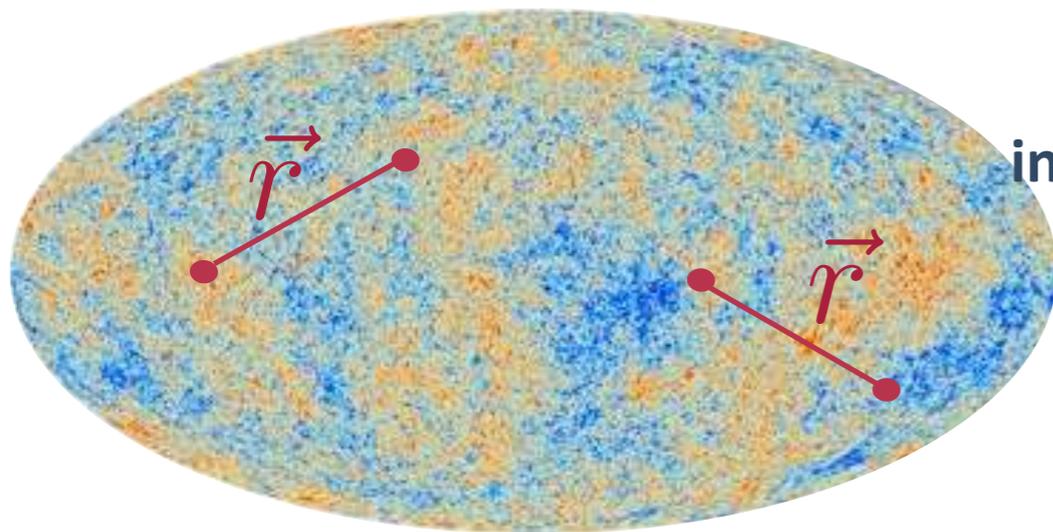
$$\langle \delta(\vec{x}) \delta(\vec{x} + \vec{r}) \rangle = \xi_2(\|\vec{r}\|)$$

Etat initial caractérisé complètement  
par sa fonction de corrélation à 2 points  
( $\Leftrightarrow$  spectre de puissance)

# Comment se tisse la toile cosmique?

## Champ aléatoire Gaussian

Fluctuations primordiales Gaussiennes



instabilité gravitationnelle

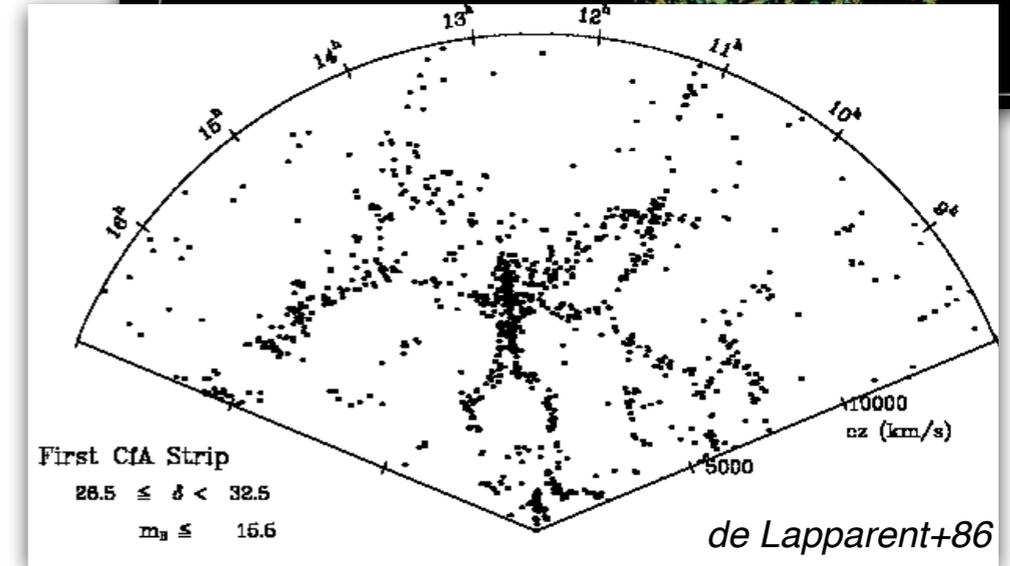
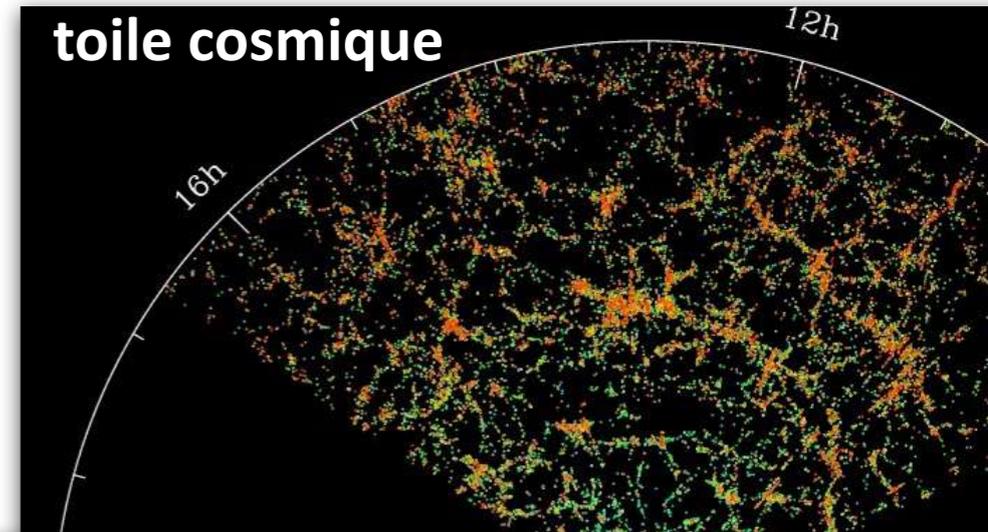


expansion

$$\langle \delta(\vec{x})\delta(\vec{x} + \vec{r}) \rangle = \xi_2(\|\vec{r}\|)$$

Etat initial caractérisé complètement par sa fonction de corrélation à 2 points (<=> spectre de puissance)

## toile cosmique

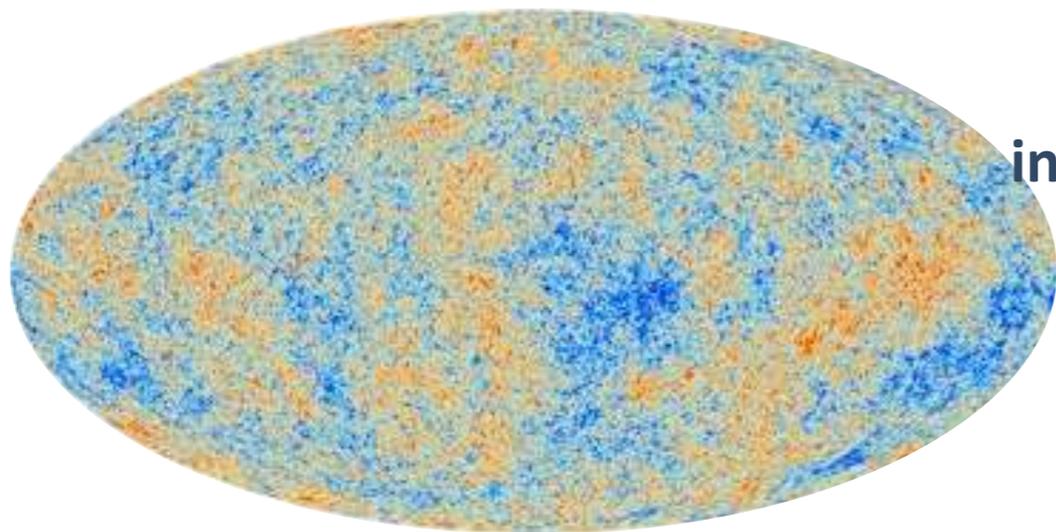


Evolution non-linéaire et apparition de non-Gaussianités

## Champ aléatoire non-Gaussian

# Comment se tisse la toile cosmique?

*Champ aléatoire **Gaussian***

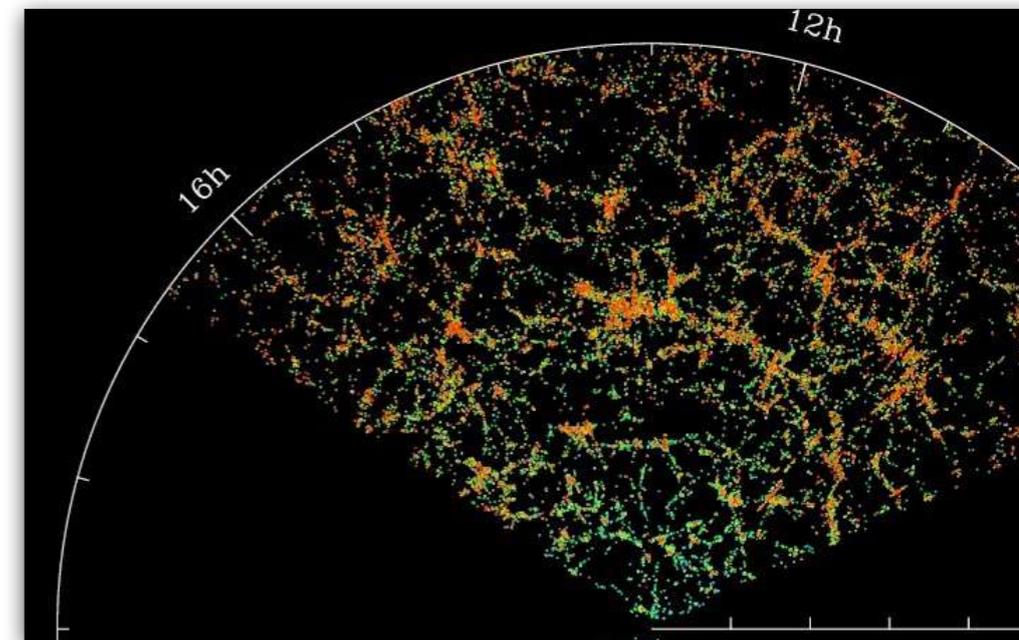


instabilité gravitationnelle



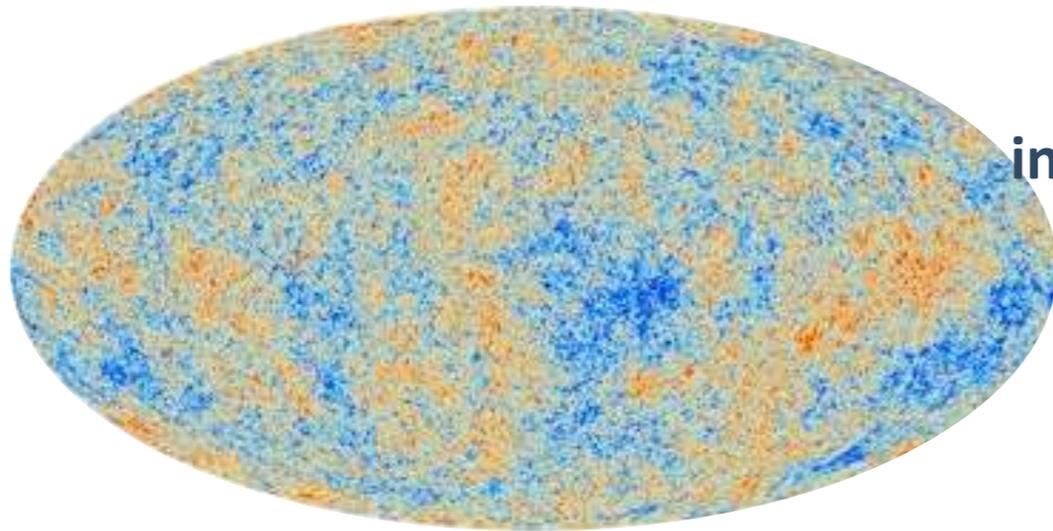
expansion

*Champ aléatoire **non-Gaussian***



# Comment se tisse la toile cosmique?

*Champ aléatoire **Gaussian***



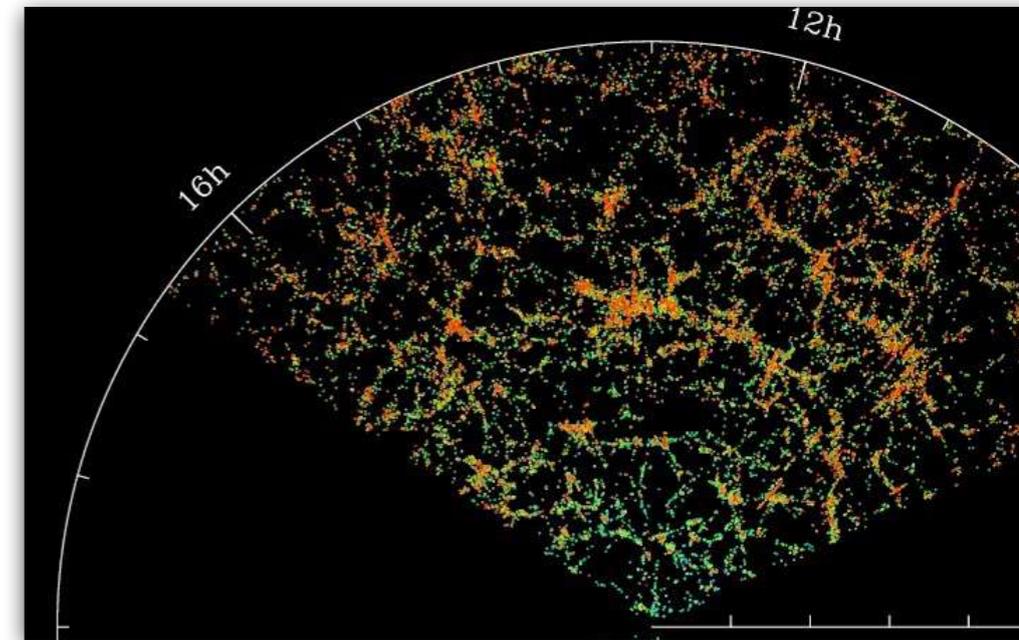
?

instabilité gravitationnelle



expansion

*Champ aléatoire **non-Gaussian***



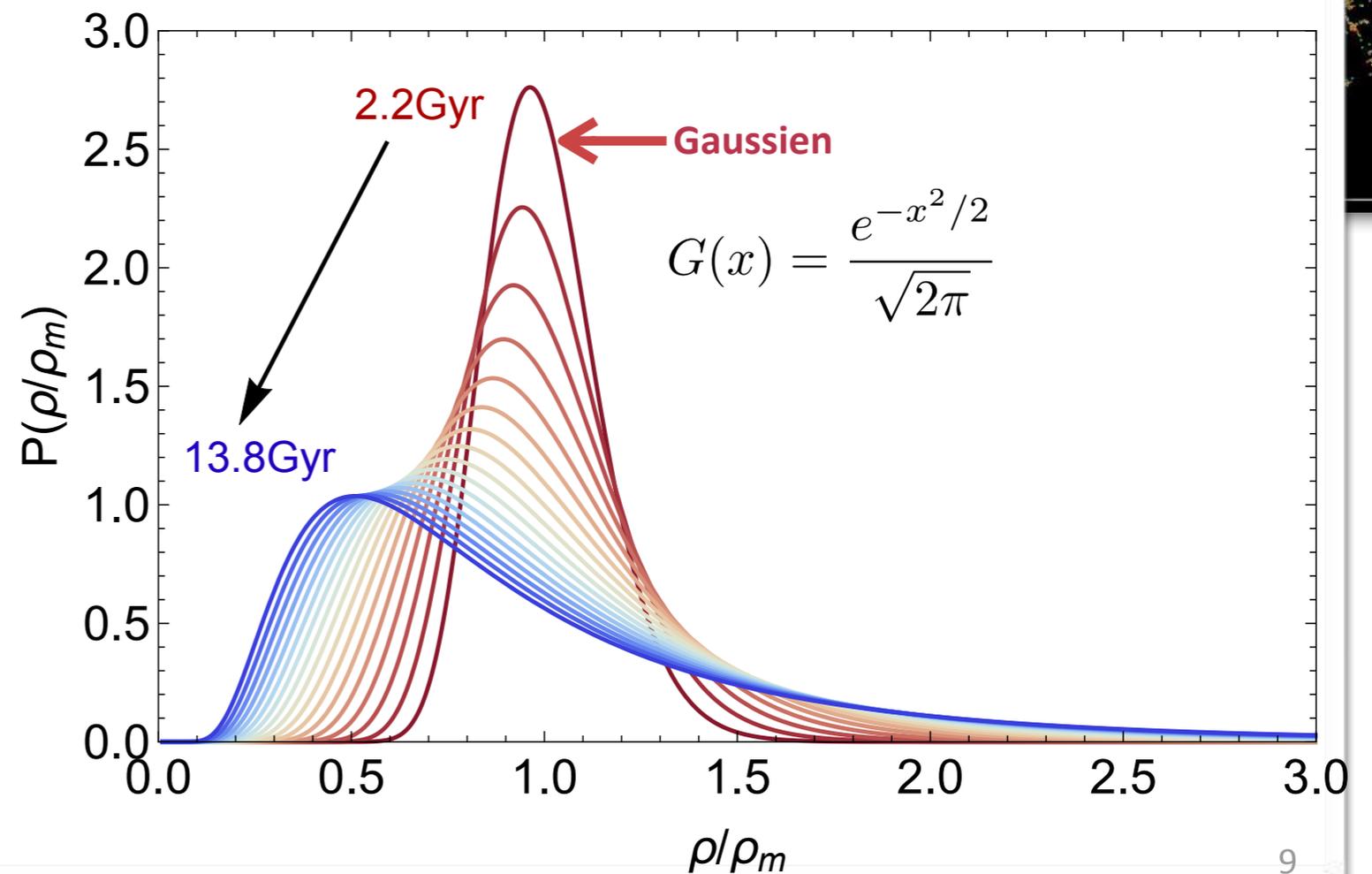
# Comment se tisse la toile cosmique?

Champ aléatoire **Gaussian**

?

Champ aléatoire **non-Gaussian**

instabilité gravitationnelle

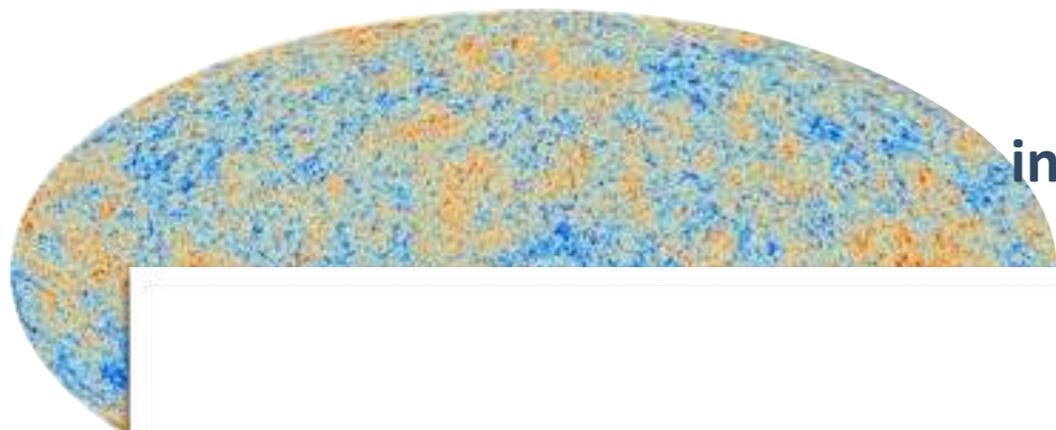


# Comment se tisse la toile cosmique?

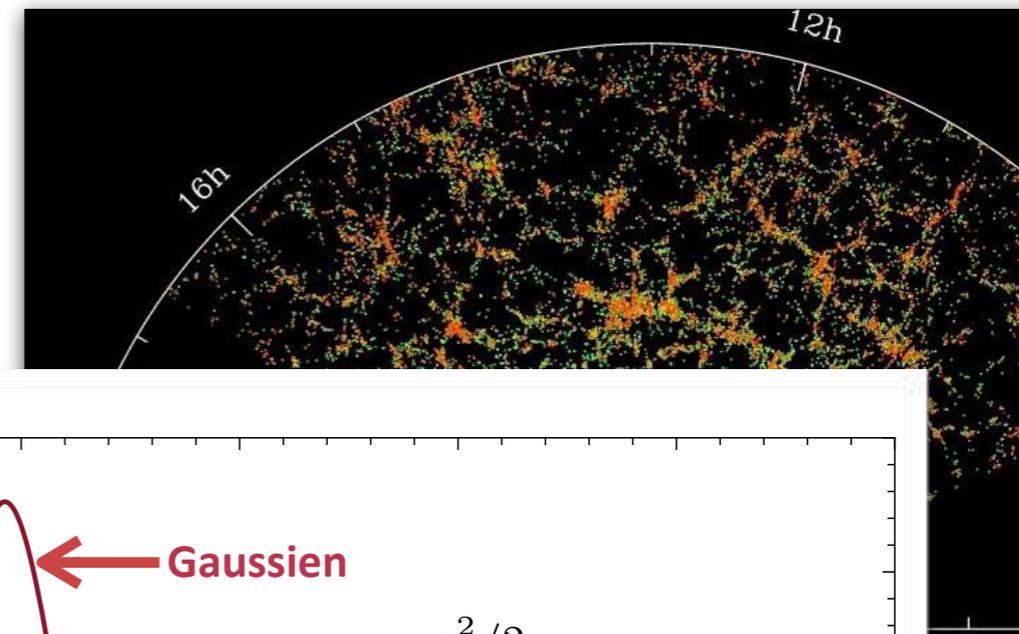
Champ aléatoire **Gaussian**

?

Champ aléatoire **non-Gaussian**

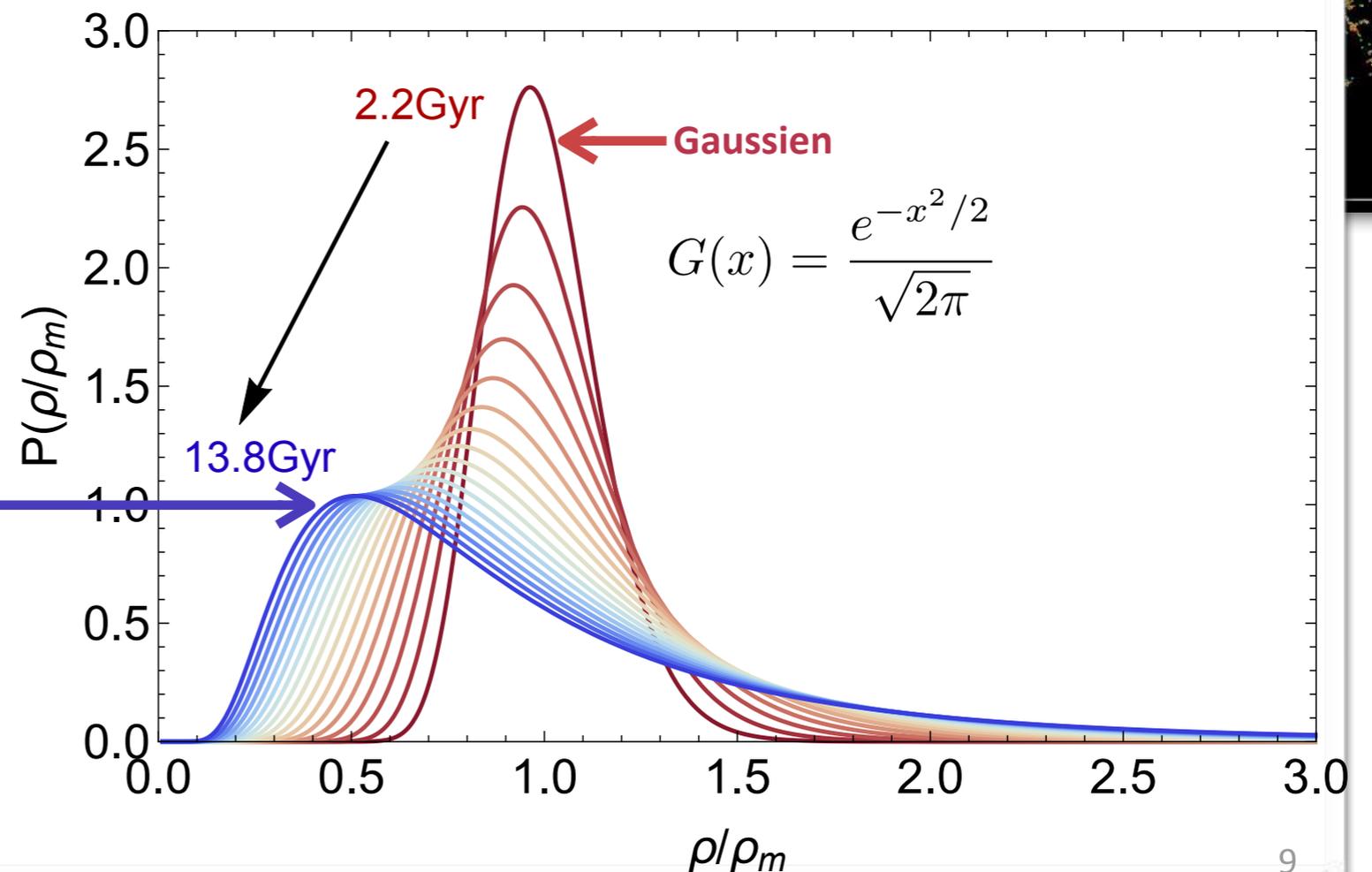


instabilité gravitationnelle



'Positively skewed' PDF:

$$P(x) = G(x) \left[ 1 + \frac{1}{3!} \langle x^3 \rangle H_3(x) + \dots \right]$$

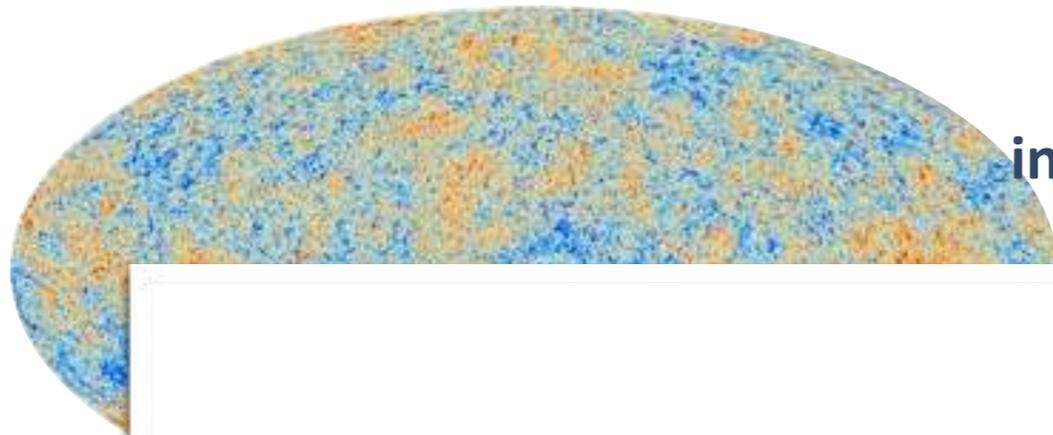


# Comment se tisse la toile cosmique?

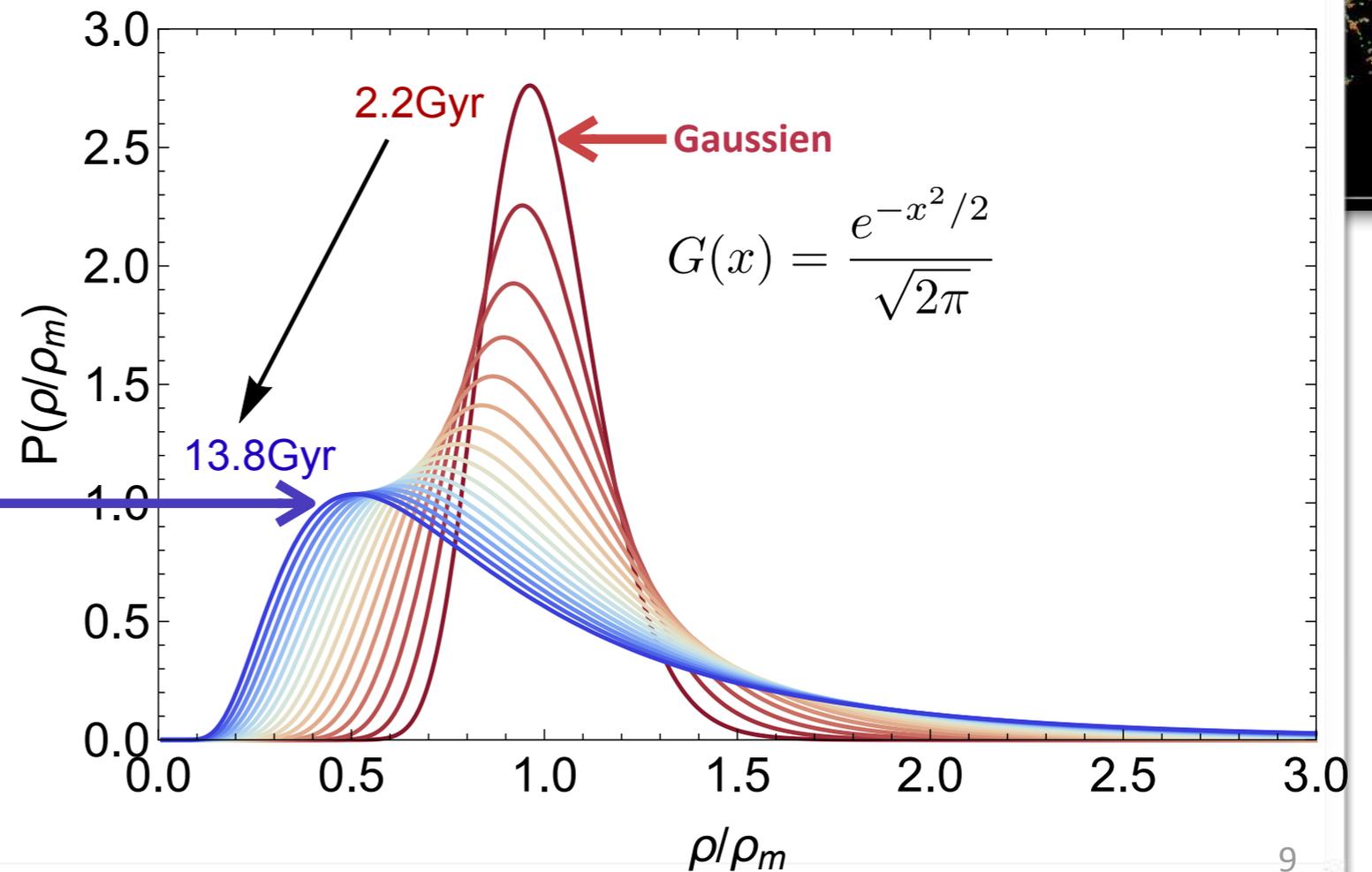
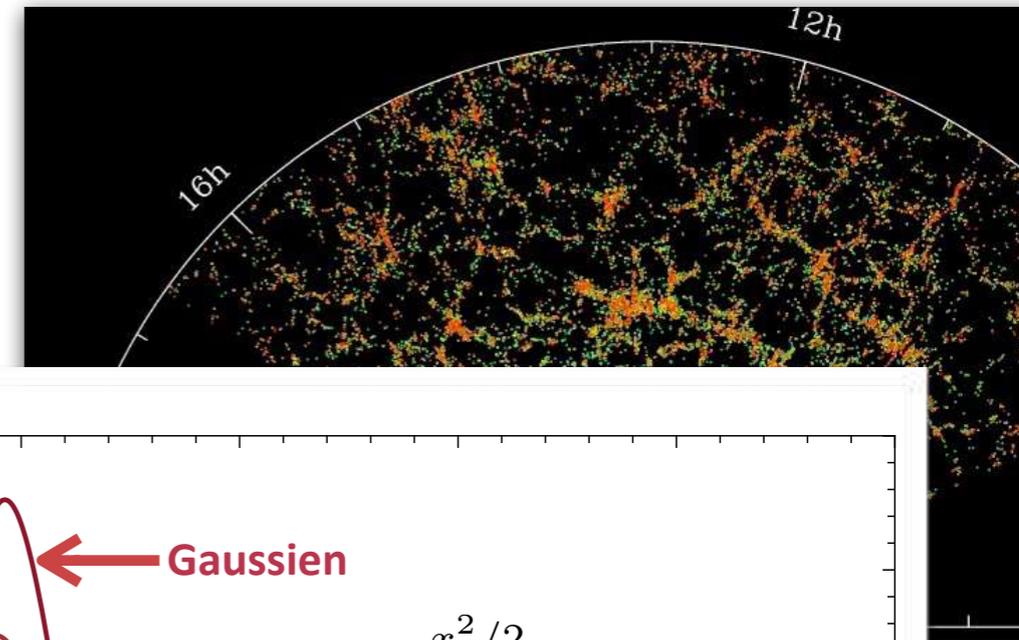
Champ aléatoire **Gaussian**

?

Champ aléatoire **non-Gaussian**



instabilité gravitationnelle



'Positively skewed' PDF:

$$P(x) = G(x) \left[ 1 + \frac{1}{3!} \langle x^3 \rangle H_3(x) + \dots \right]$$

$$= S_3 \sigma^4$$

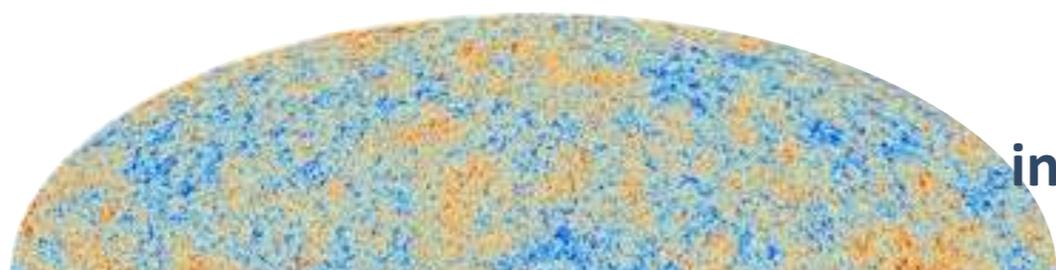
évolution non linéaire  
portée par  $\sigma$

# Comment se tisse la toile cosmique?

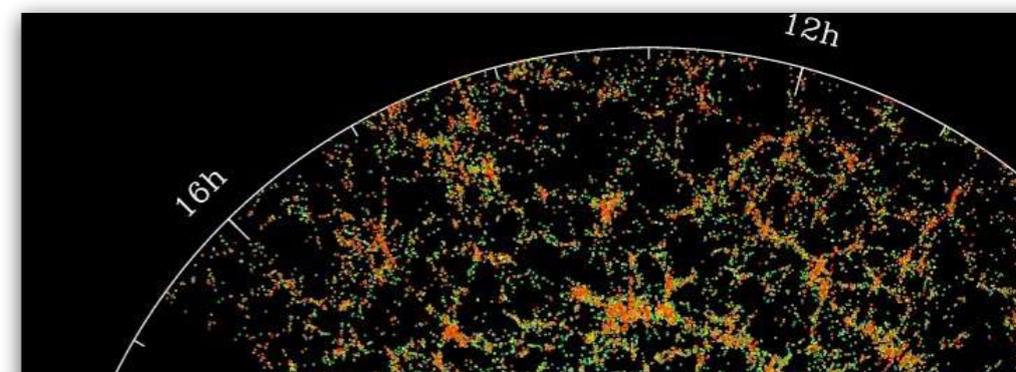
Champ aléatoire **Gaussian**

?

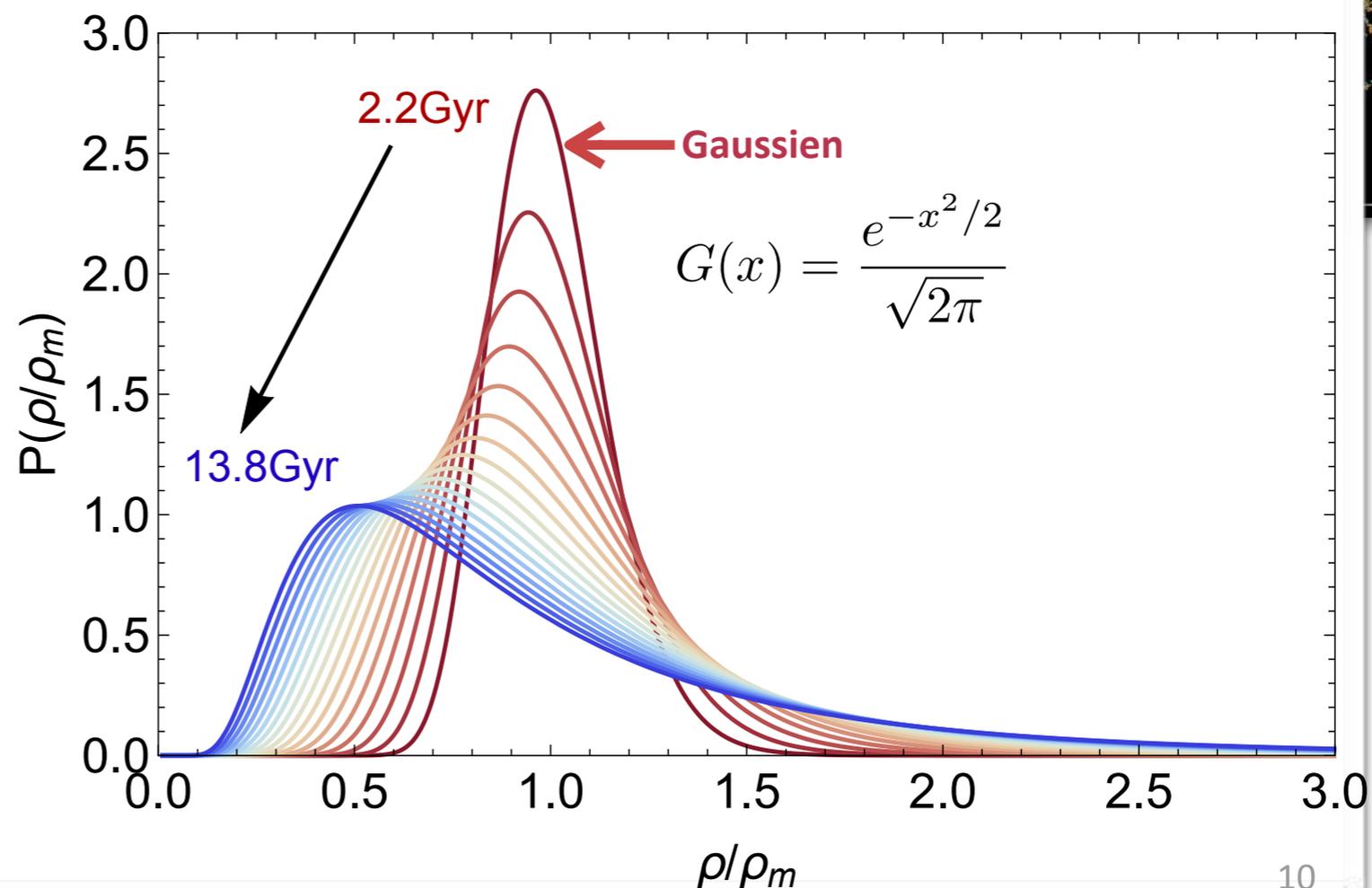
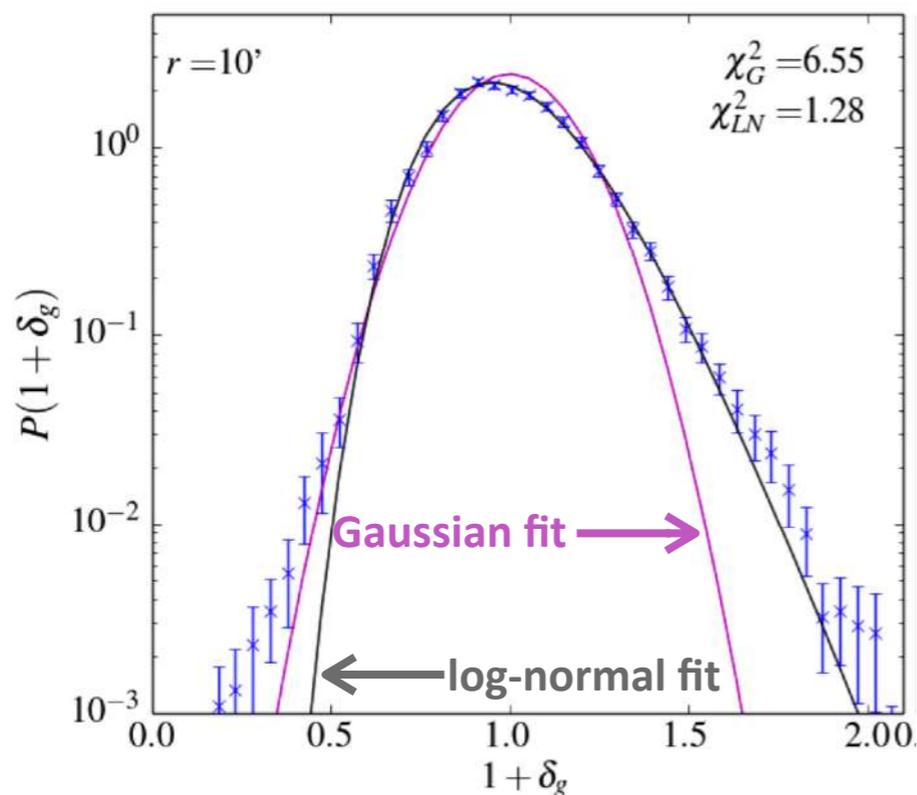
Champ aléatoire **non-Gaussian**



instabilité gravitationnelle



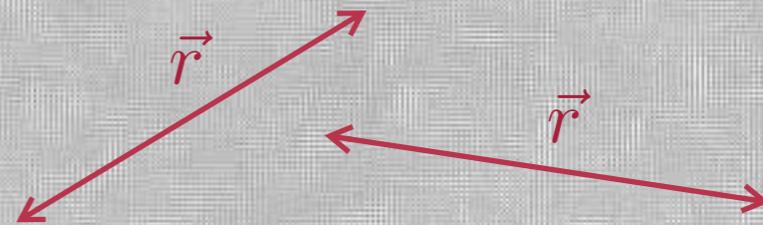
Clerkin'16 (Dark Energy Survey)



# Flots de matière au sein de la toile cosmique

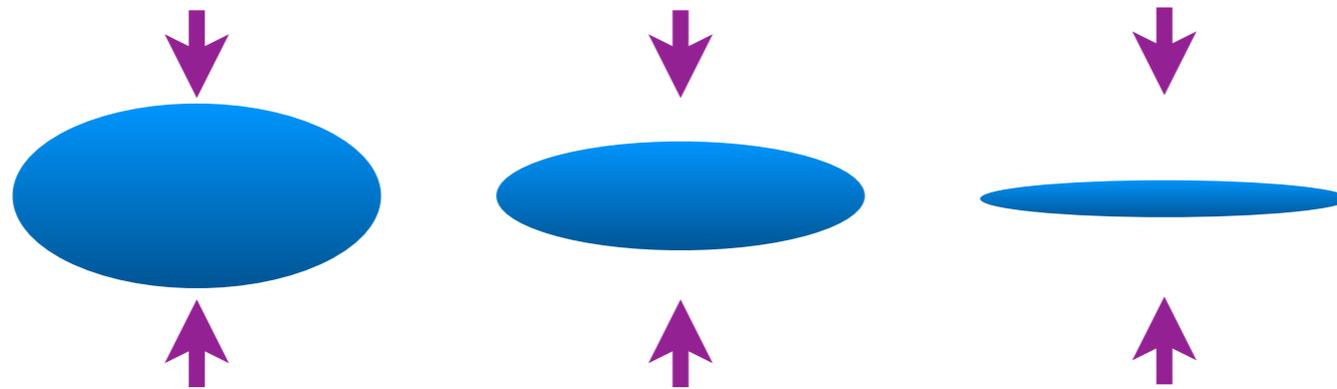
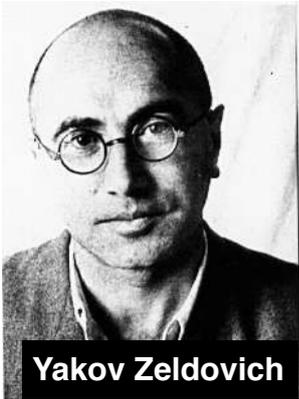
La matière s'échappe des vides vers les murs, les filaments et finit dans les noeuds. Ce processus se produit à tous les temps et toutes les échelles.

$$\langle \delta(\vec{x}) \delta(\vec{x} + \vec{r}) \rangle = \xi_2(|\vec{r}|)$$



# Modèles théoriques

-L'effondrement gravitationnel produit naturellement des objets aplatis, allongés comme les murs et les filaments: les **pancakes de Zeldovich** (70's)



**Compétition  
gravité vs expansion**

**Explication...**

# Modèles théoriques

## Lagrangien vs Eulérien

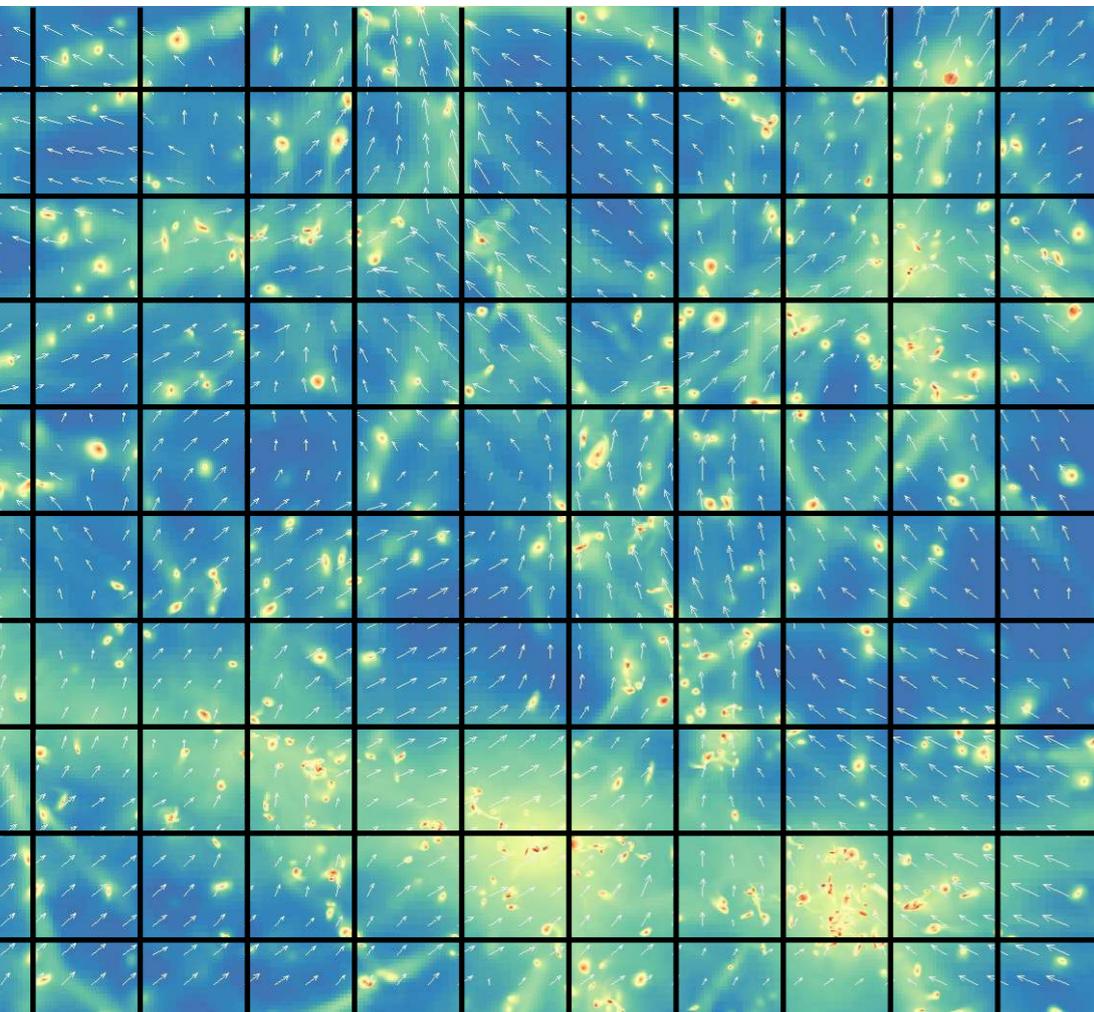
### Eulérien:

référentiel fixe

champs sur une grille

$\delta, u$

« volume-weighted statistics »



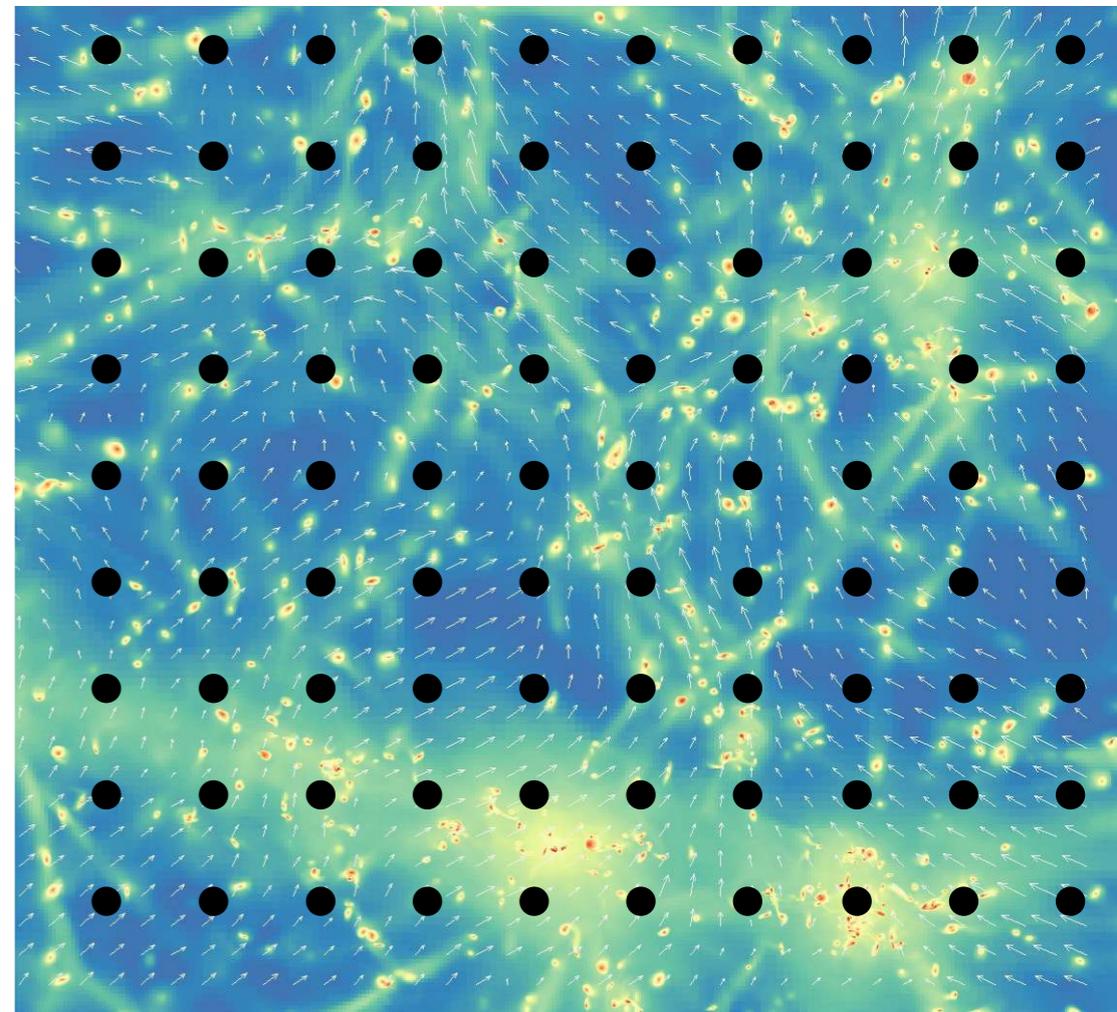
### Lagrangien:

on suit le fluide

particules

$x=q+\psi$

« mass-weighted statistics »



# Modèles théoriques

## Lagrangien vs Eulérien

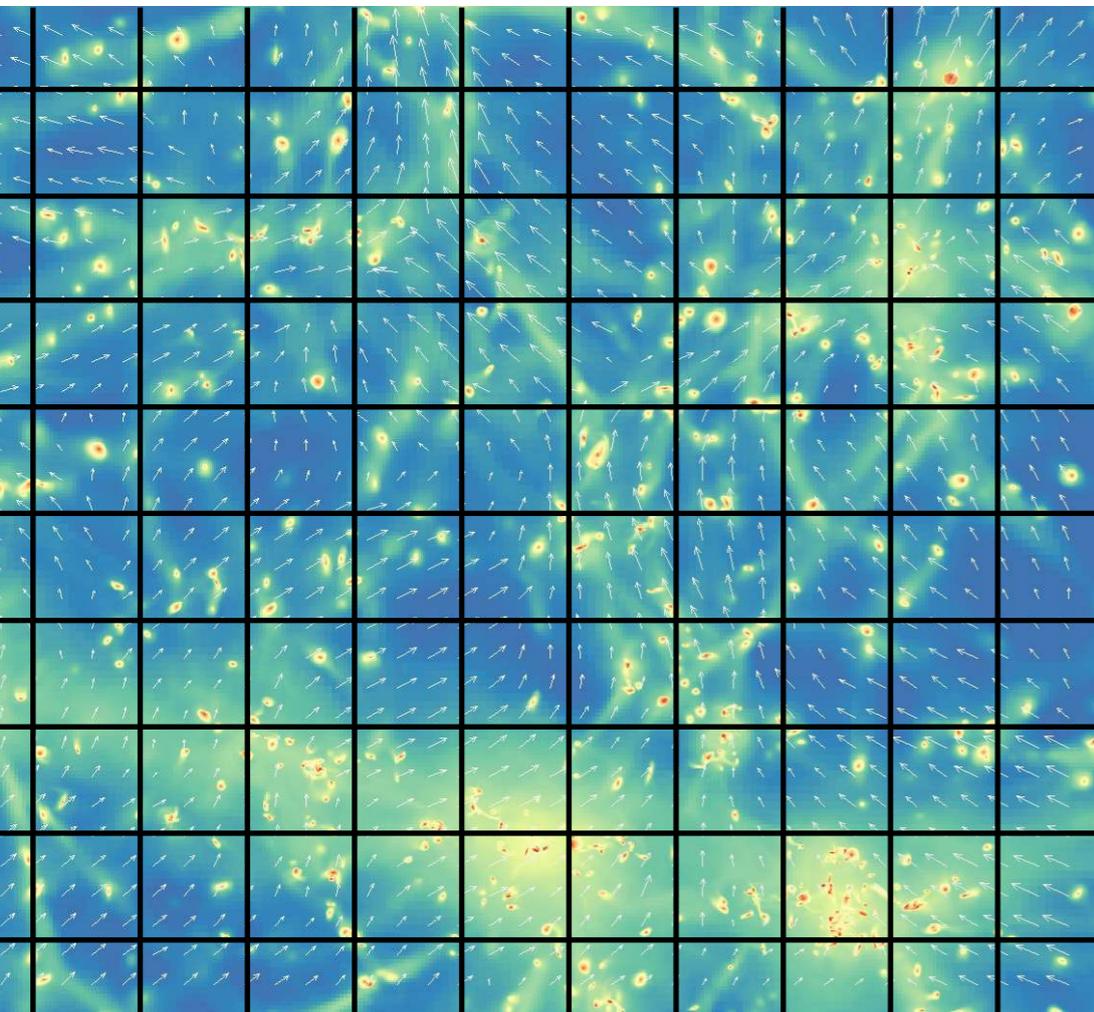
### Eulérien:

référentiel fixe

champs sur une grille

$\delta, u$

« volume-weighted statistics »



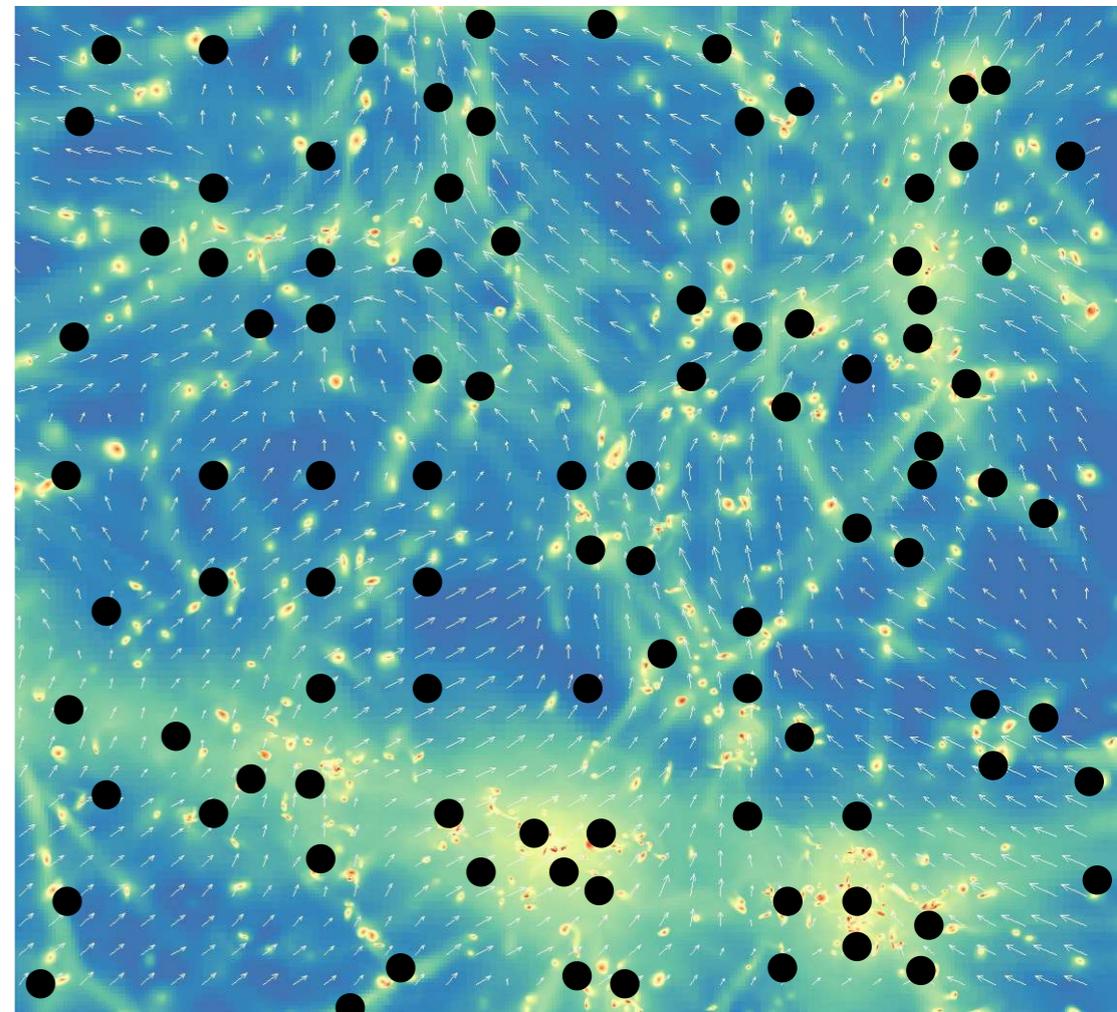
### Lagrangien:

on suit le fluide

particules

$x=q+\psi$

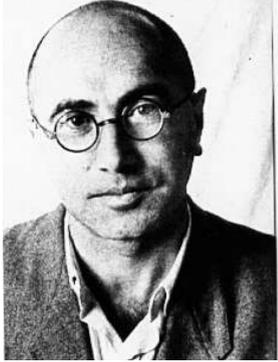
« mass-weighted statistics »



# Modèles théoriques

## Dynamique Lagrangienne : déplacement de Zeldovich

Yakov Zeldovich



position initiale

$$\mathbf{x} = \mathbf{q} + \zeta$$

position finale

déplacement

Si la distribution initiale est homogène, on obtient

$$\rho(\mathbf{q}, t) = \frac{\bar{\rho}}{J}$$

où  $J$  est le Jacobien qui permet de passer des coordonnées Eulériennes aux coordonnées Lagrangiennes

$$J = \left| \frac{d\mathbf{x}}{d\mathbf{q}} \right| = \left| \delta_{ij}^K + \frac{\partial \zeta_i}{\partial q_j} \right|$$

L'équation d'Euler au premier ordre donne alors

$$\ddot{\zeta} + 2H\dot{\zeta} = -\frac{\nabla_{\mathbf{x}}\phi}{a^2}$$

où l'équation de Poisson permet in fine d'obtenir

$$\nabla_{\mathbf{x}}\ddot{\zeta} + 2H\nabla_{\mathbf{x}}\dot{\zeta} = -4\pi G\bar{\rho}\delta = 4\pi G\bar{\rho}\frac{J-1}{J}$$

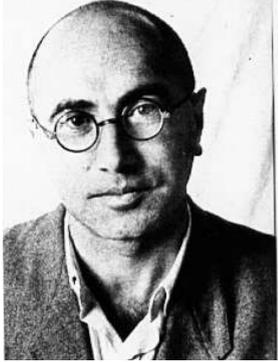
A l'ordre linéaire  $J \approx 1 + \nabla_{\mathbf{q}}\zeta$ , et on obtient donc une equation d'évolution pour le déplacement linéarisé

$$\nabla_{\mathbf{q}}\ddot{\zeta} + 2H\nabla_{\mathbf{q}}\dot{\zeta} = \frac{3}{2}\Omega H^2\nabla_{\mathbf{q}}\zeta$$

# Modèles théoriques

## Dynamique Lagrangienne : déplacement de Zeldovich

Yakov Zeldovich



position initiale

$$\mathbf{x} = \mathbf{q} + \zeta$$

position finale

déplacement

$$\nabla_{\mathbf{q}} \ddot{\zeta} + 2H \nabla_{\mathbf{q}} \dot{\zeta} = \frac{3}{2} \Omega H^2 \nabla_{\mathbf{q}} \zeta$$

Meme solution que pour la densité linéaire...

$$\zeta_{ZA} = D_+(t) \zeta_+(\mathbf{q})$$

Ce qui nous donne pour la densité

$$\rho_{ZA}(\mathbf{q}, t) = \frac{\bar{\rho}}{\left| \prod_{i=1}^3 (1 - D_+(t) \lambda_i) \right|}$$

où les  $\lambda_i$  sont les valeurs propres du tenseur de déformation  $\partial \zeta_+^{(i)} / \partial q_j$  qui n'est rien d'autre que le hessien du potentiel gravitationnel à un facteur près.

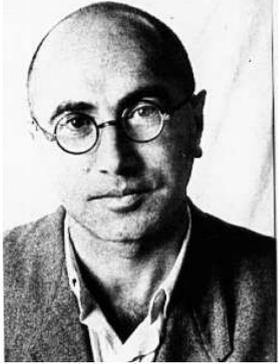
Les déplacements de Zeldovich sont donc des trajectoires rectilignes qui transportent les particules parallèlement à la force initiale.

Cette equation permet de comprendre la formation moyennement non-linéaire des structures en décrivant l'**effondrement anisotrope des structures** qui donnent naissance à la toile cosmique: murs puis filaments et enfin noeuds avec l'apparition de caustiques successives.

# Modèles théoriques

## Dynamique Lagrangienne : déplacement de Zeldovich

Yakov Zeldovich



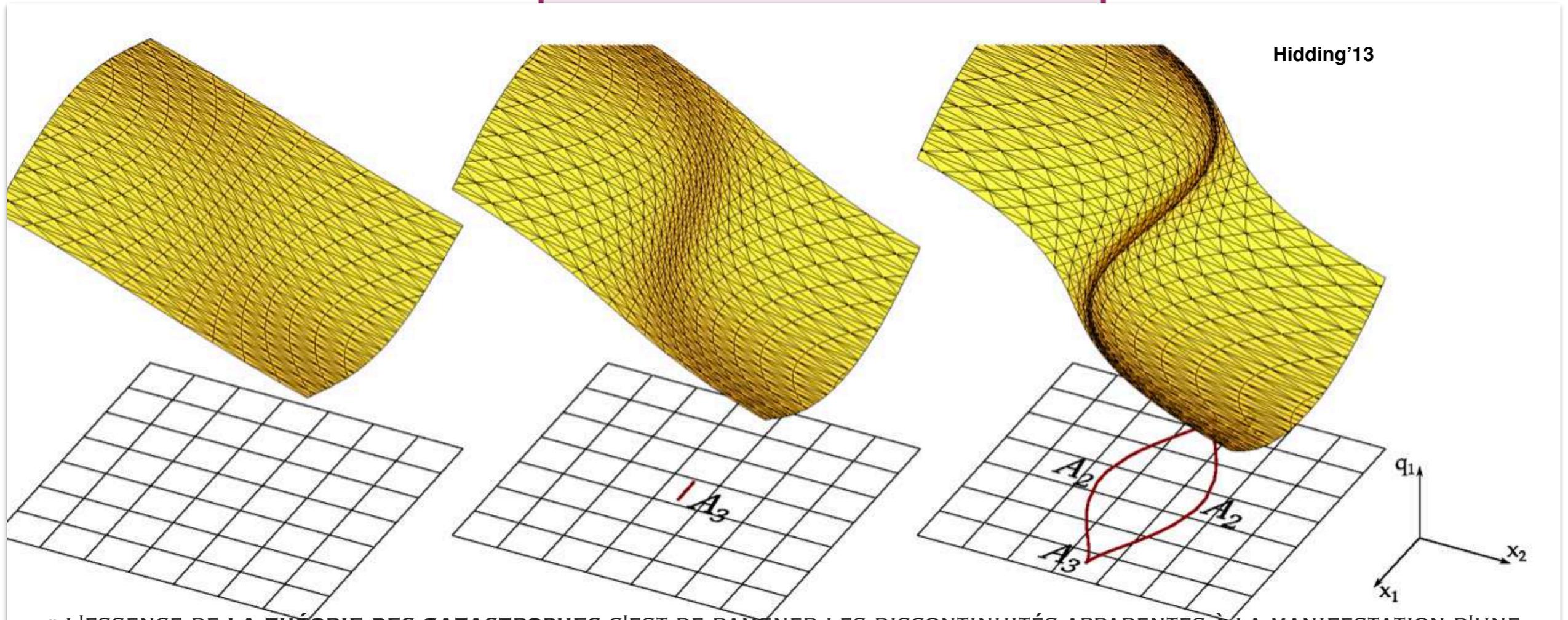
position initiale

$$\mathbf{x} = \mathbf{q} + \zeta$$

position finale

déplacement

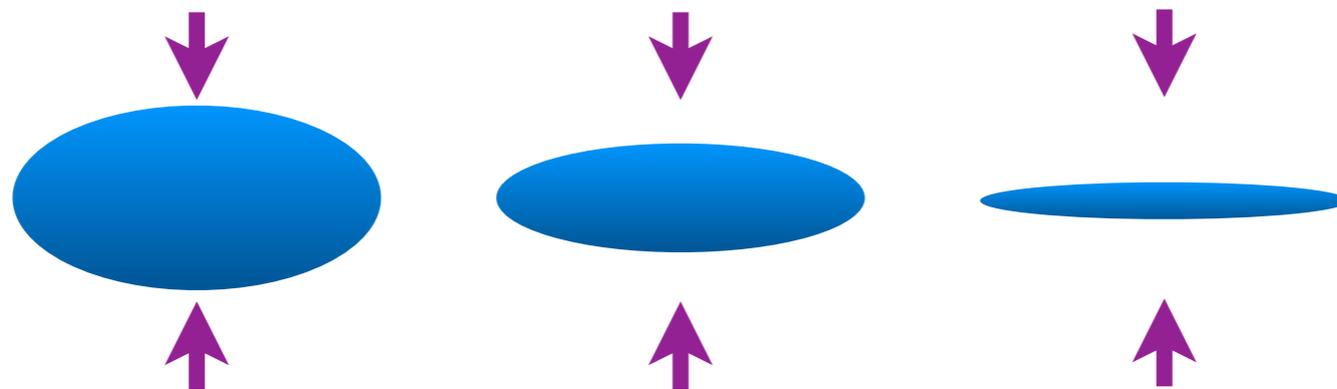
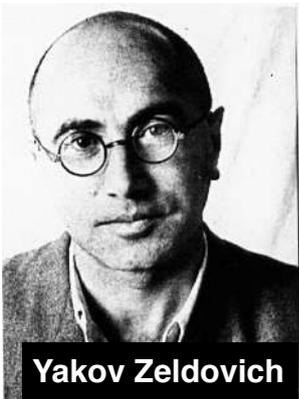
$$\nabla_{\mathbf{q}} \ddot{\zeta} + 2H \nabla_{\mathbf{q}} \dot{\zeta} = \frac{3}{2} \Omega H^2 \nabla_{\mathbf{q}} \zeta$$



« L'ESSENCE DE LA THÉORIE DES CATASTROPHES C'EST DE RAMENER LES DISCONTINUITÉS APPARENTES À LA MANIFESTATION D'UNE ÉVOLUTION LENTE SOUS-JACENTE. LE PROBLÈME EST ALORS DE DÉTERMINER CETTE ÉVOLUTION LENTE QUI, ELLE, EXIGE EN GÉNÉRAL L'INTRODUCTION DE NOUVELLES DIMENSIONS, DE NOUVEAUX PARAMÈTRES. » - RENÉ THOM (1991)

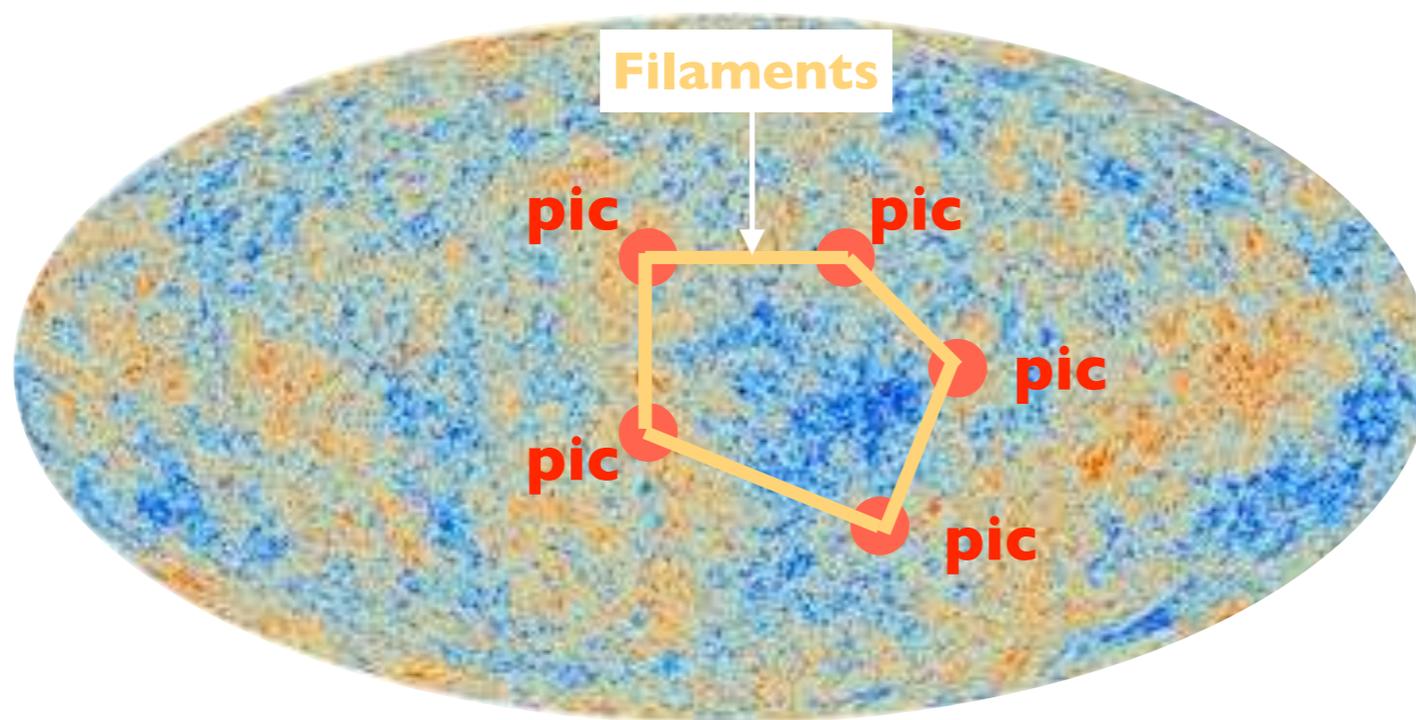
# Modèles théoriques

-L'effondrement gravitationnel produit naturellement des objets aplatis, allongés comme les murs et les filaments: les **pancakes de Zeldovich** (70's)



**Compétition gravité vs expansion**

-1996: J.R. Bond, L. Kofman et D. Pogosyan comprennent l'origine de la toile cosmique dans sa globalité



Les pics de densité dans l'Univers primordial vont croître pour former les noeuds de la toile cosmique (amas).

Entre les pics, des ponts se forment, ce sont les filaments.

**Explication...**

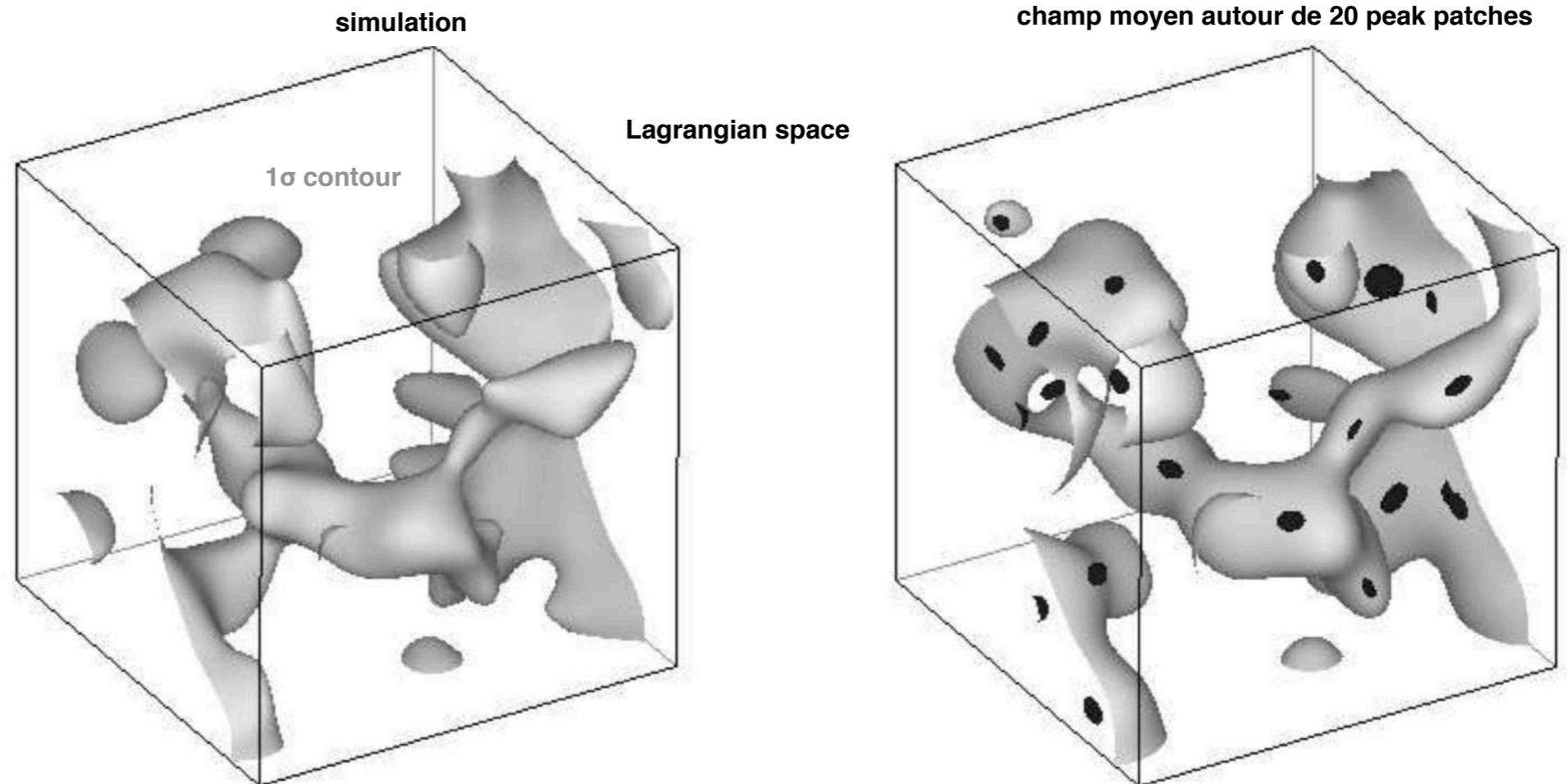
# Modèles théoriques



Bond, Kofman, Pogosyan 1996: compréhension de l'origine de la toile cosmique.

L'origine des vides, murs, filaments et noeuds réside dans les asymétries du champ Gaussien primordial qui sont ensuite amplifiées par l'instabilité gravitationnelle. Les pics rares deviendront les noeuds (amas).

Leur asymétrie initiale définira des directions privilégiées selon lesquelles des *ponts de corrélation* émergeront et les relieront les uns les autres.



Importance de la théorie des pics et des champs contraints

# Modèles théoriques



Dick Bond



Lev Kofman

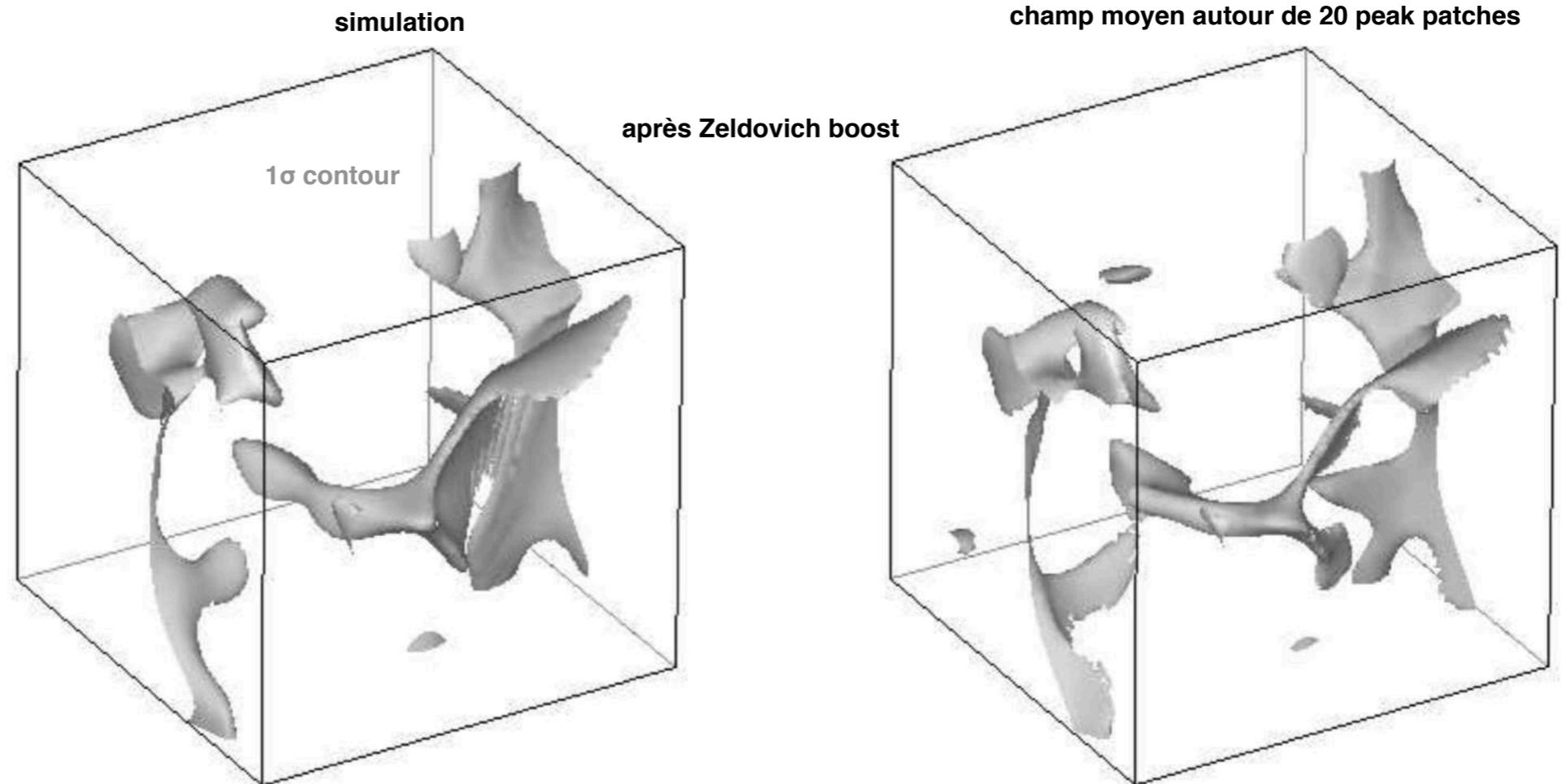


Dmitri Pogosyan

Bond, Kofman, Pogosyan 1996: compréhension de l'origine de la toile cosmique.

L'origine des vides, murs, filaments et noeuds réside dans les asymétries du champ Gaussien primordial qui sont ensuite amplifiées par l'instabilité gravitationnelle. Les pics rares deviendront les noeuds (amas).

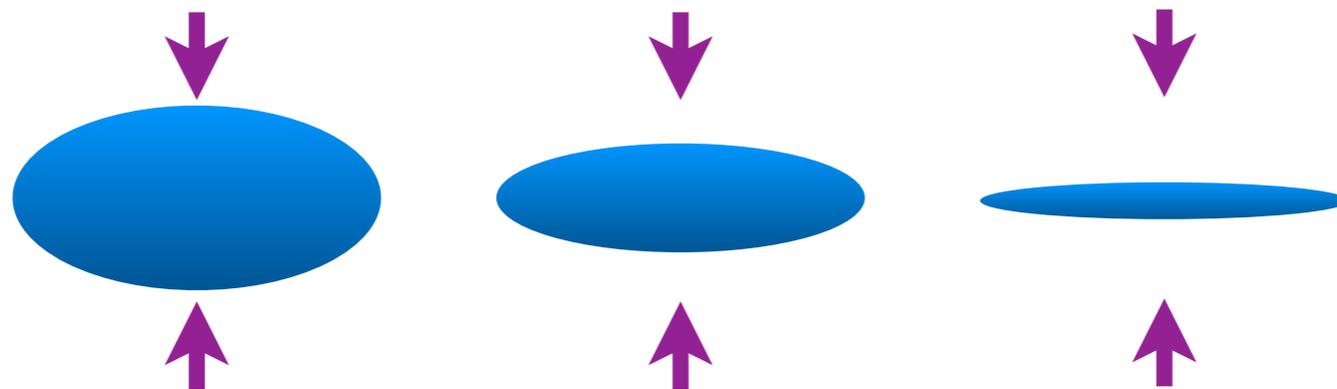
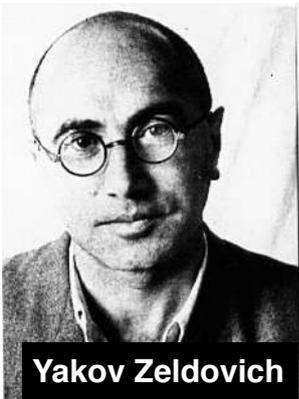
Leur asymétrie initiale définira des directions privilégiées selon lesquelles des *ponts de corrélation* émergeront et les relieront les uns les autres.



Importance de la théorie des pics et des champs contraints

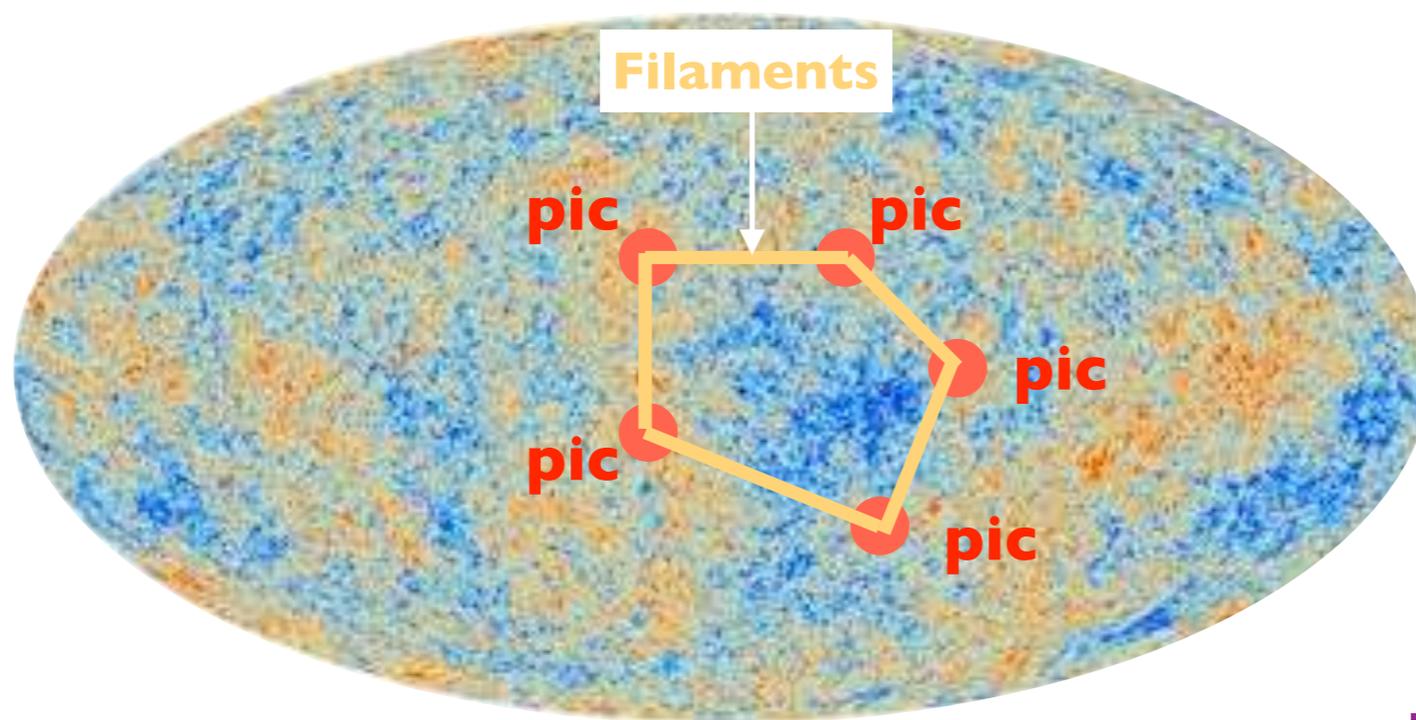
# Modèles théoriques

-L'effondrement gravitationnel produit naturellement des objets aplatis, allongés comme les murs et les filaments: les **pancakes de Zeldovich** (70's)



**Compétition gravité vs expansion**

-1996: J.R. Bond, L. Kofman et D. Pogosyan comprennent l'origine de la toile cosmique dans sa globalité



Les pics de densité dans l'Univers primordial vont croître pour former les noeuds de la toile cosmique (amas).

Entre les pics, des ponts se forment, ce sont les filaments.

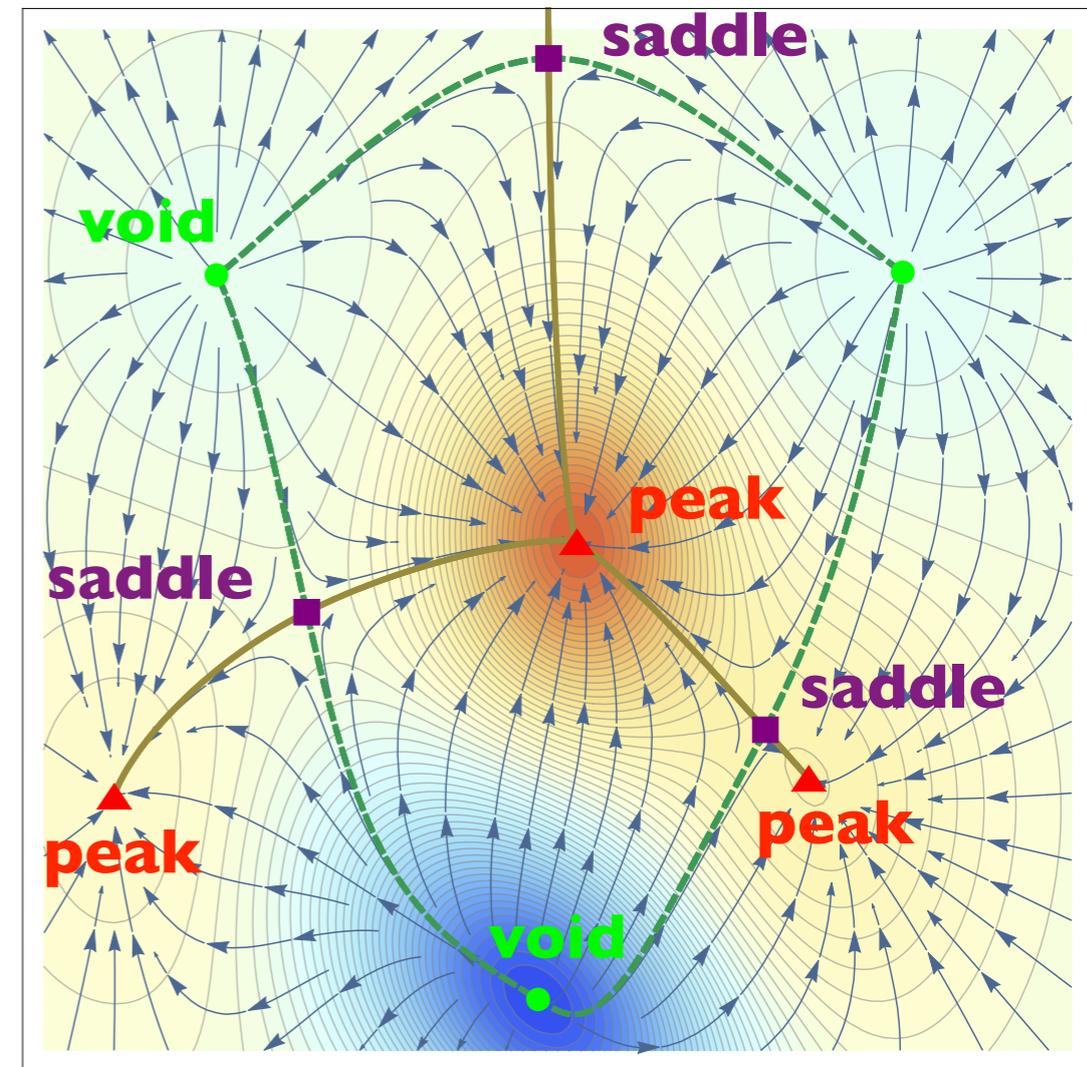
**=> toile cosmique multi-connectée**

# Le squelette cosmique

- ▶ Origine de la toile cosmique
- ▶ **Le squelette cosmique**
- ▶ Cosmologie et formation des galaxies

# Le squelette cosmique

**Les filaments sont les lignes de crêtes  
= les lignes critiques qui joignent les  
maxima en passant par les points selles**



# Le squelette cosmique

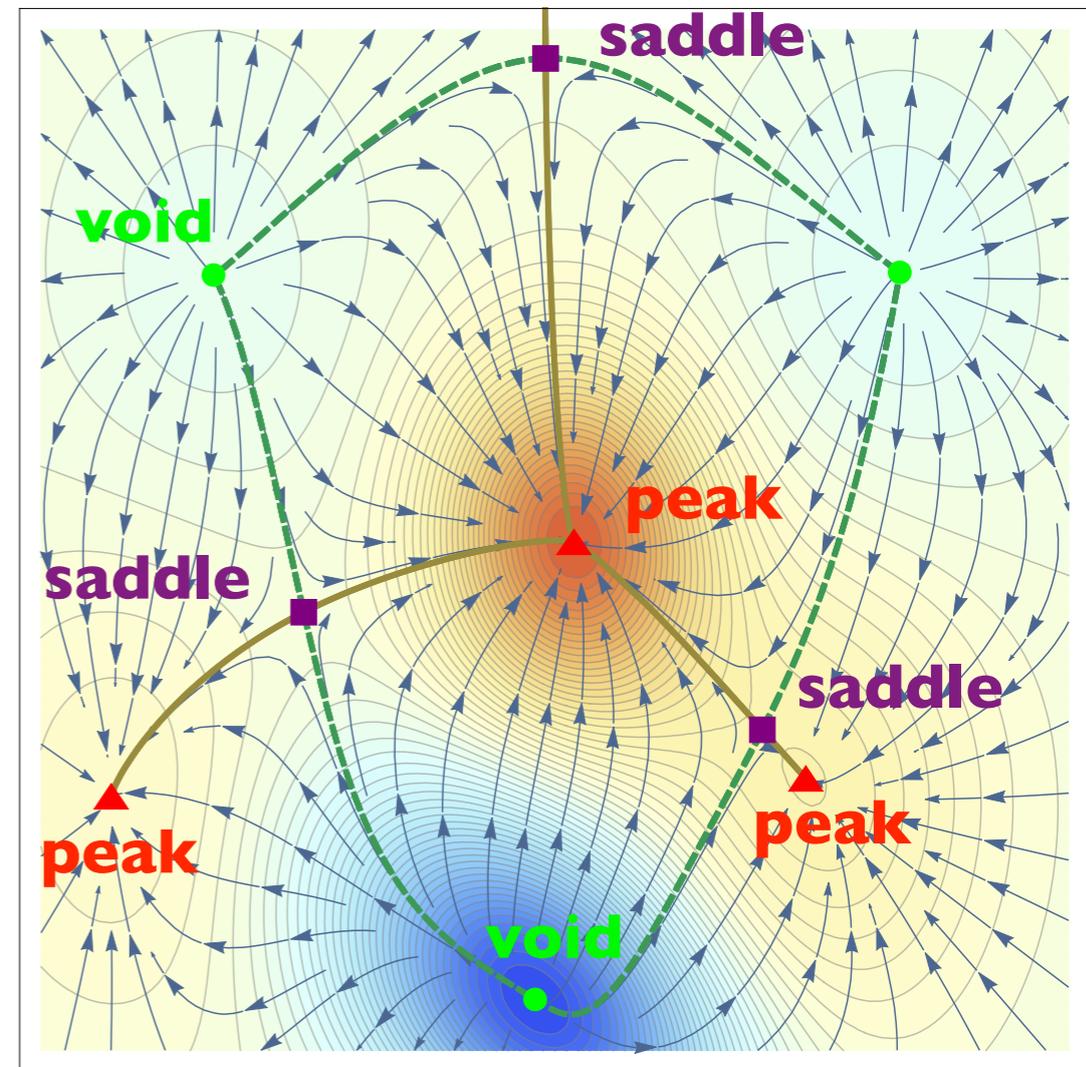


# Le squelette cosmique

**Les filaments sont les lignes de crêtes  
= les lignes critiques qui joignent les  
maxima en passant par les points selles**

Cette idée est basée sur la théorie de Morse.  
Elle permet d'écrire notamment des *algorithmes*  
d'extraction du squelette cosmique (water-shedding).

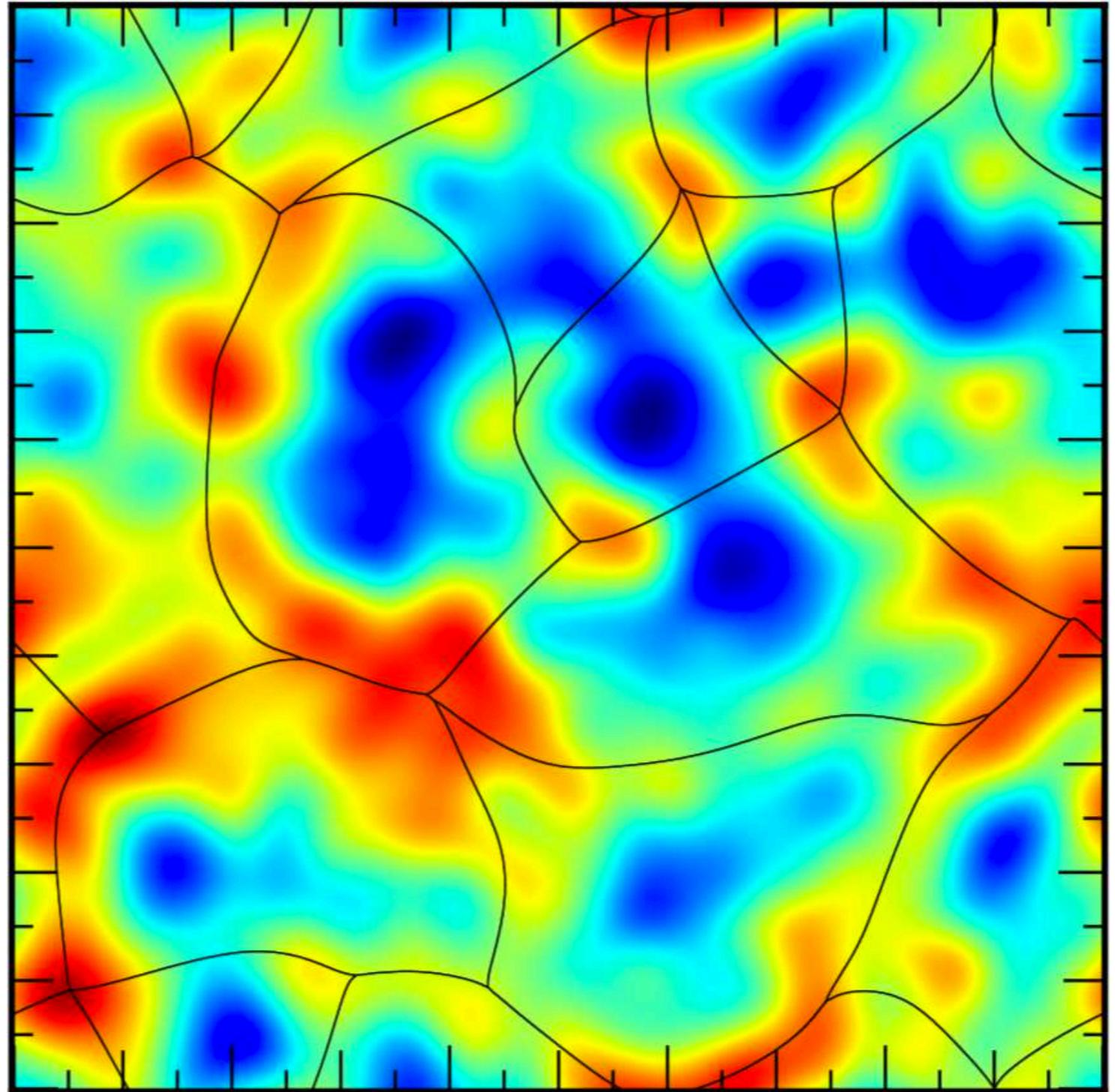
*Sousbie+08, Sousbie+11, ...\**



\* among many others!

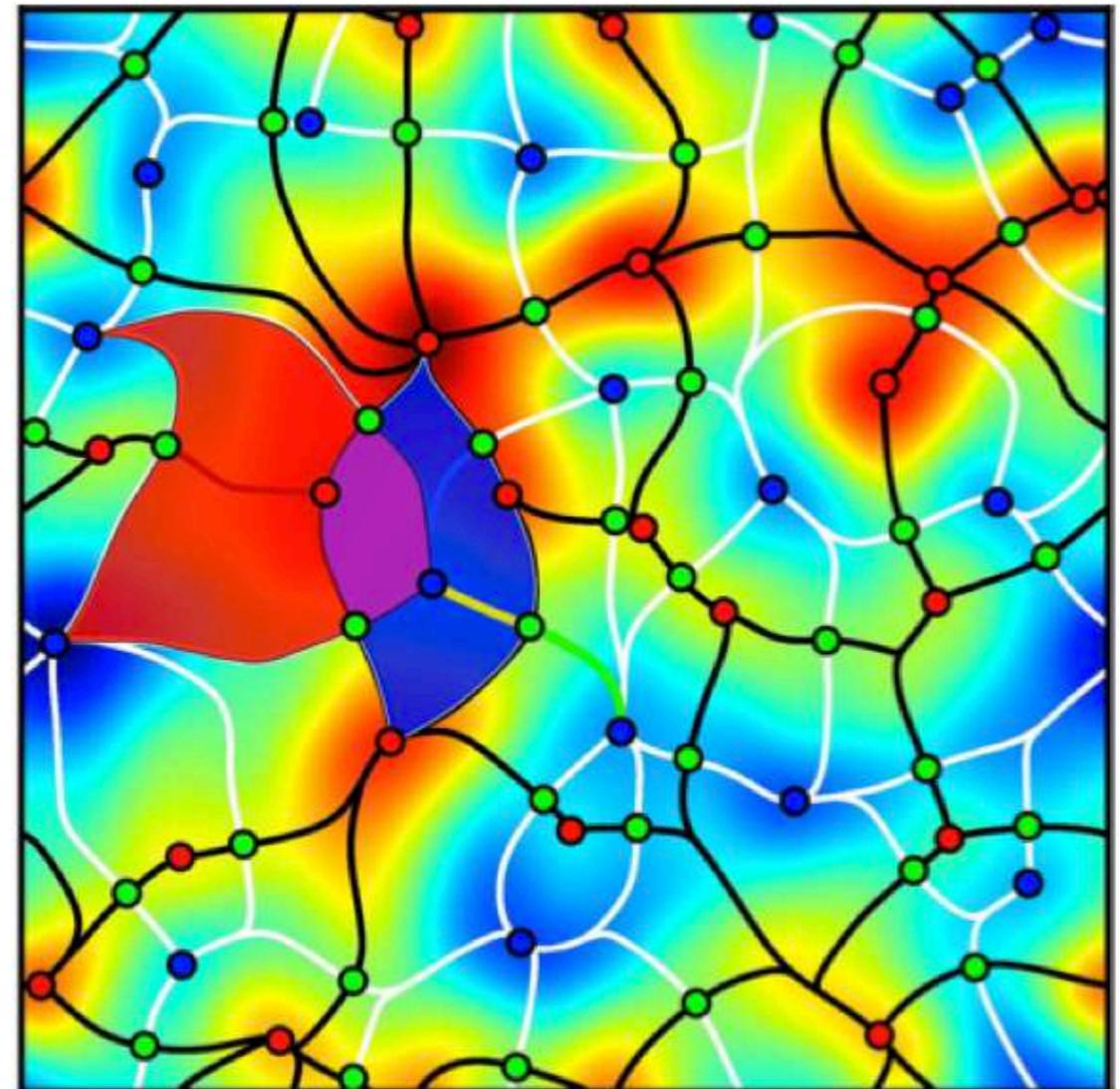
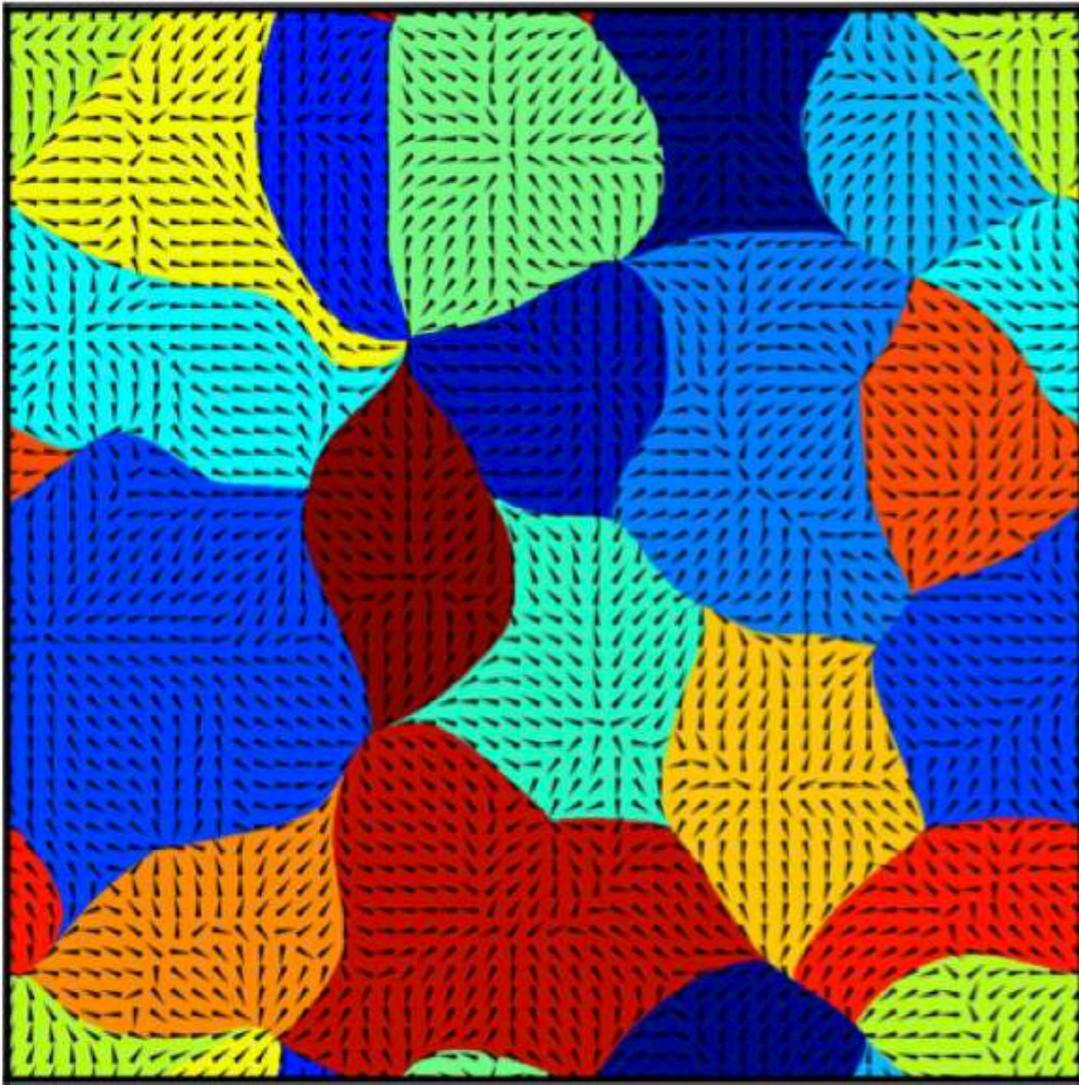
# Le squelette cosmique

A 2D:



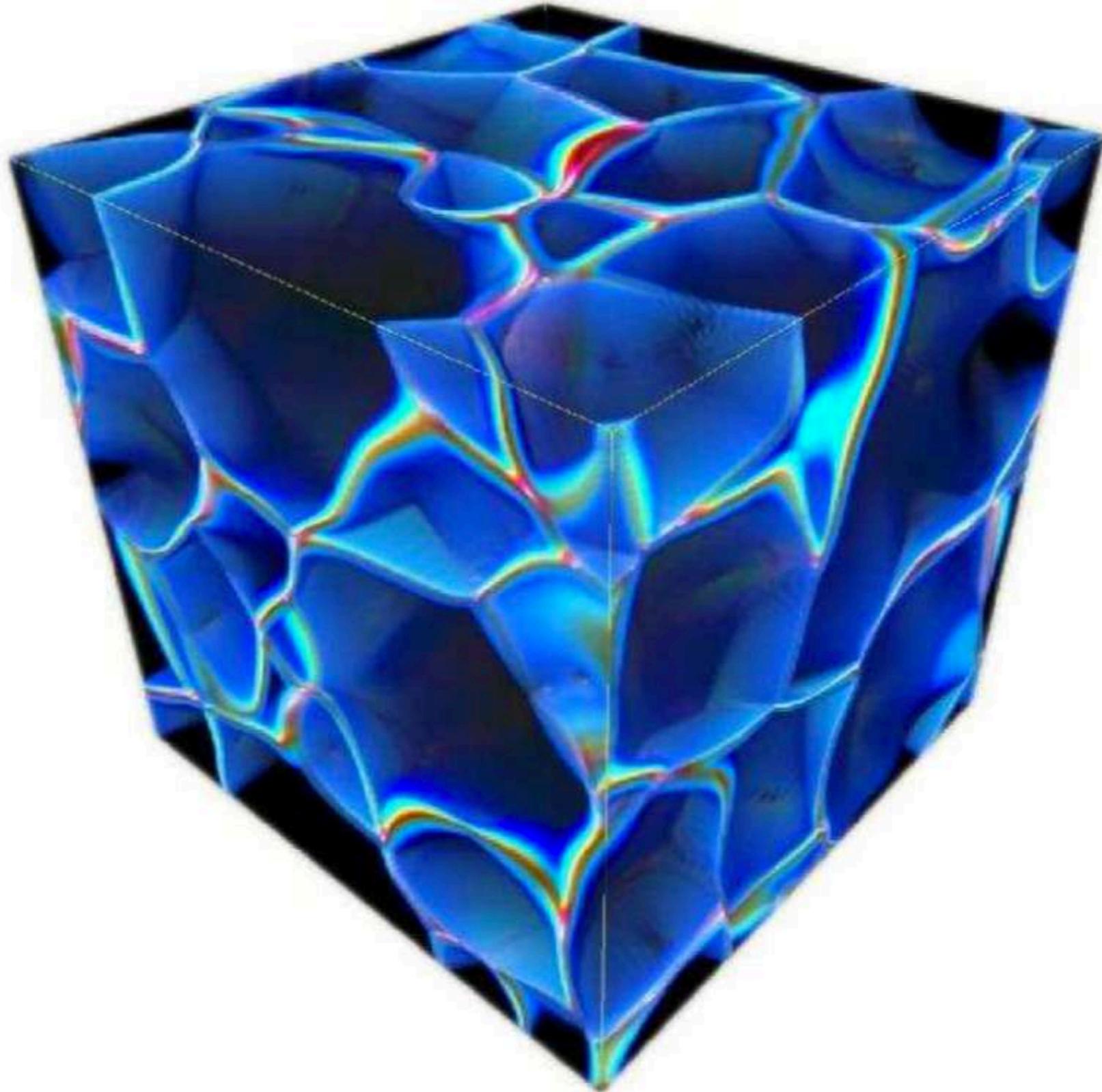
# Le squelette cosmique

- 1) on obtient les « Void Patches » en pavant l'espace en fonction des gradients
- 2) le squelette est le bord de ces patches



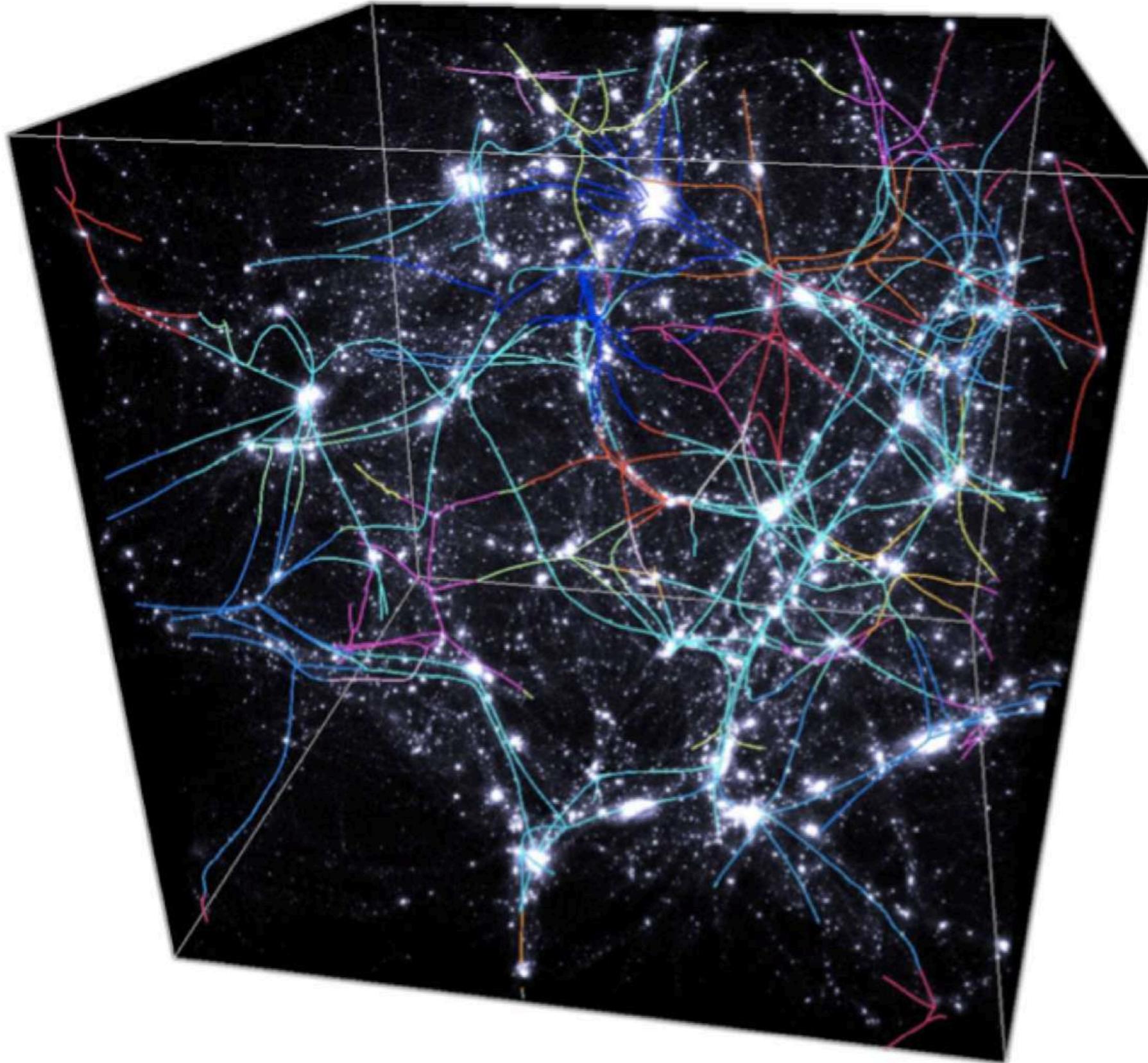
# Le squelette cosmique

A 3D:



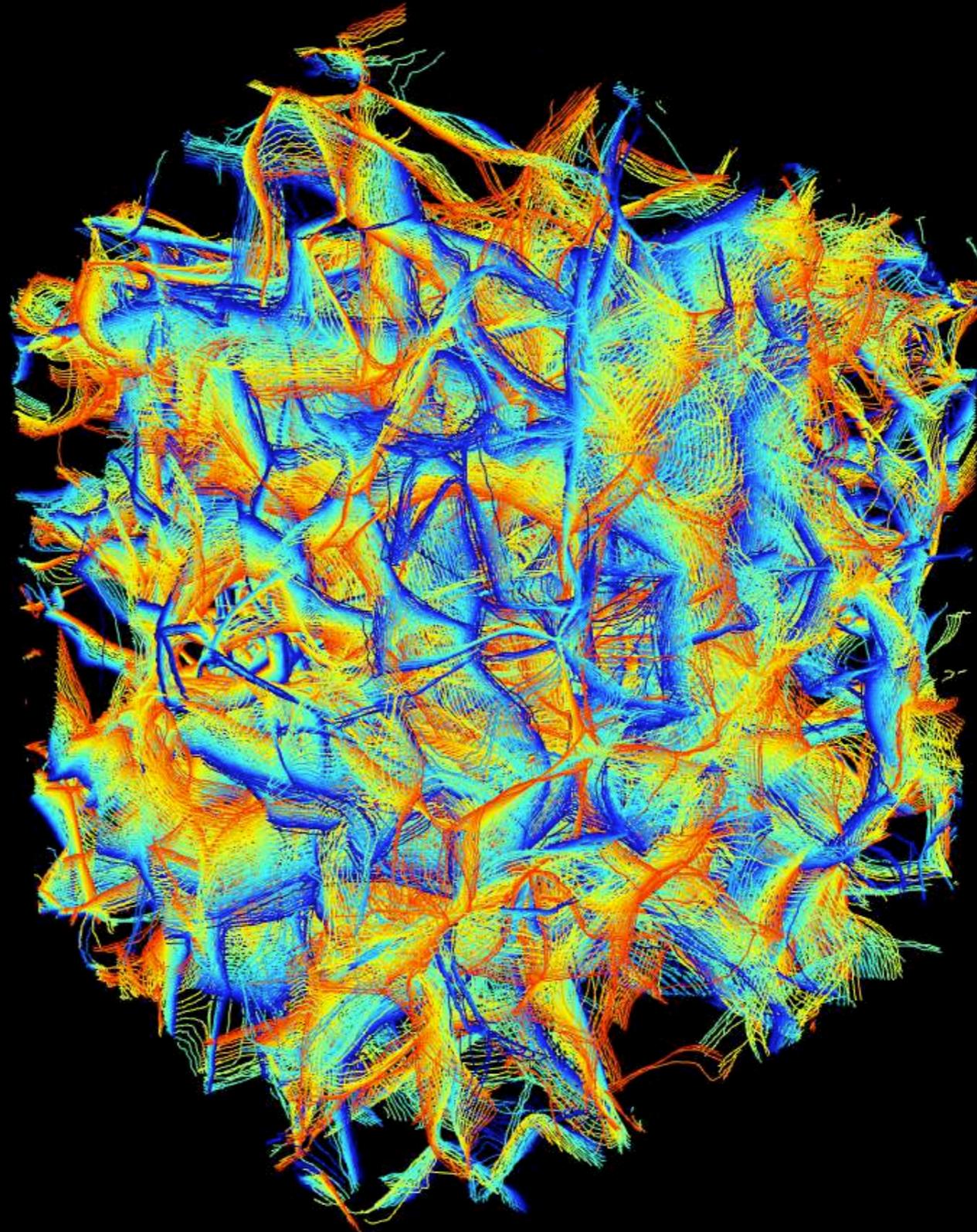
# Le squelette cosmique

A 3D:



# Le squelette cosmique

A 3D:



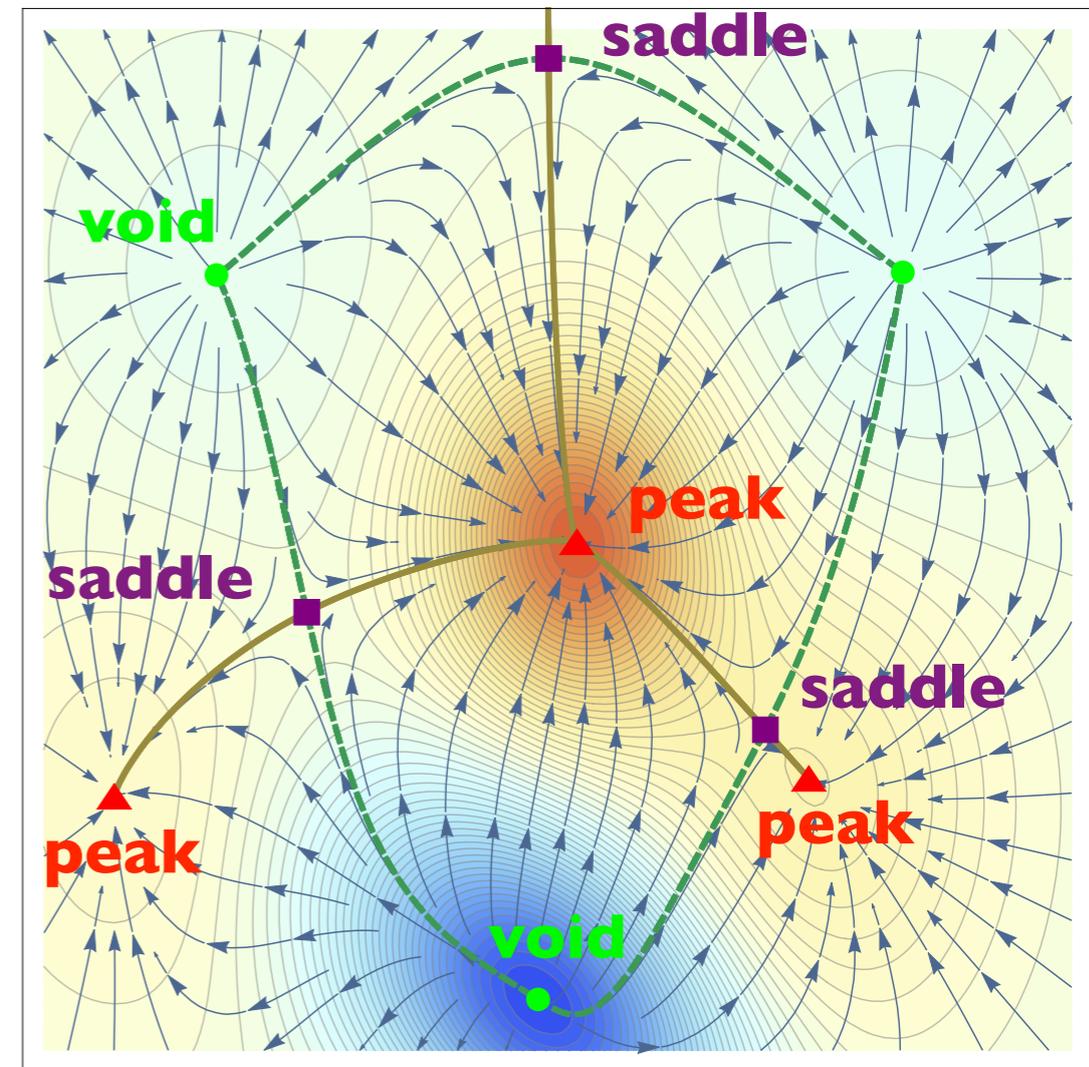
# Le squelette cosmique

**Les filaments sont les lignes de crêtes  
= les lignes critiques qui joignent les  
maxima en passant par les points selles**

Cette idée est basée sur la théorie de Morse.  
Elle permet d'écrire notamment des *algorithmes*  
d'extraction du squelette cosmique (water-shedding).

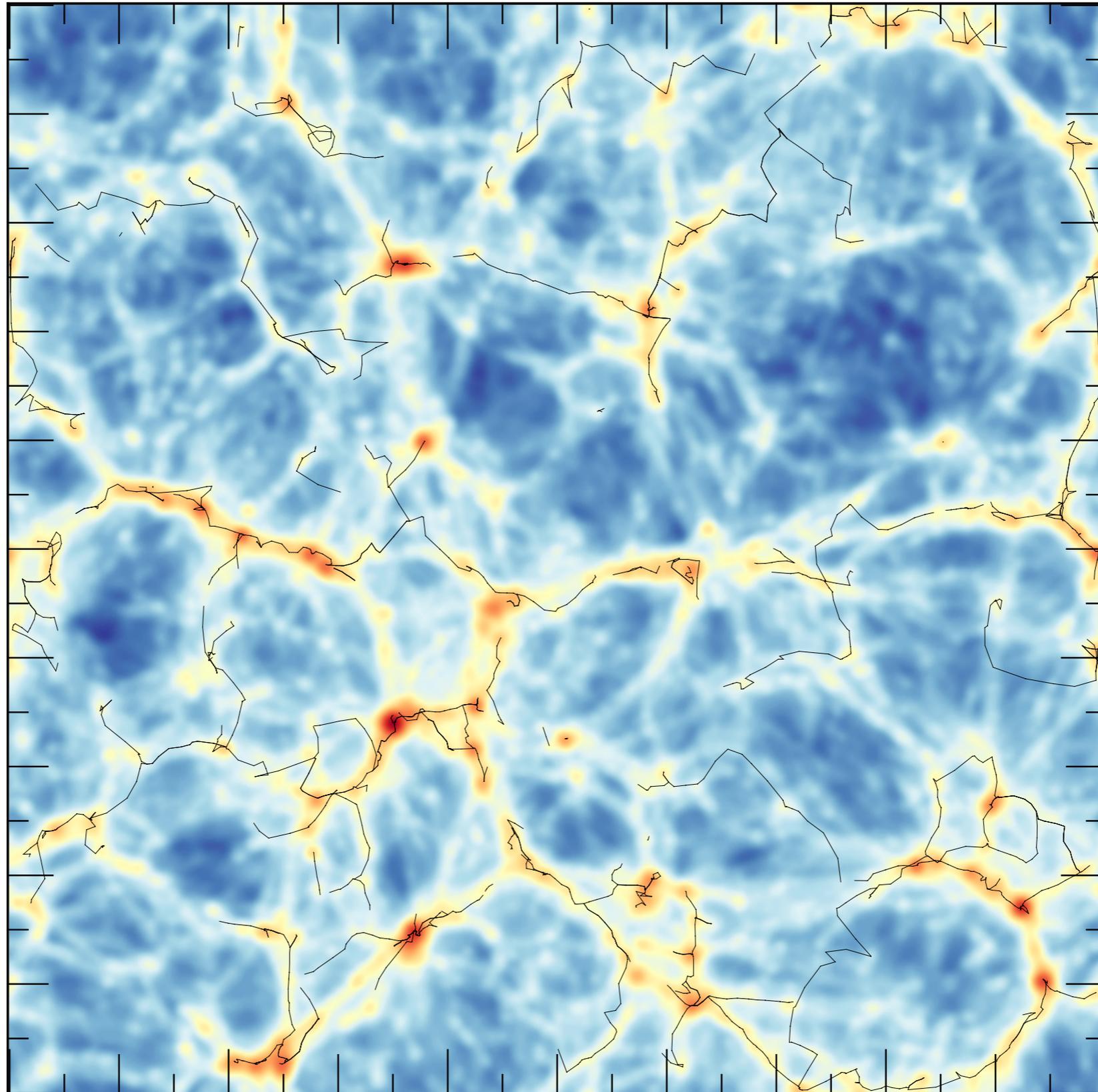
*Sousbie+09, ...\**

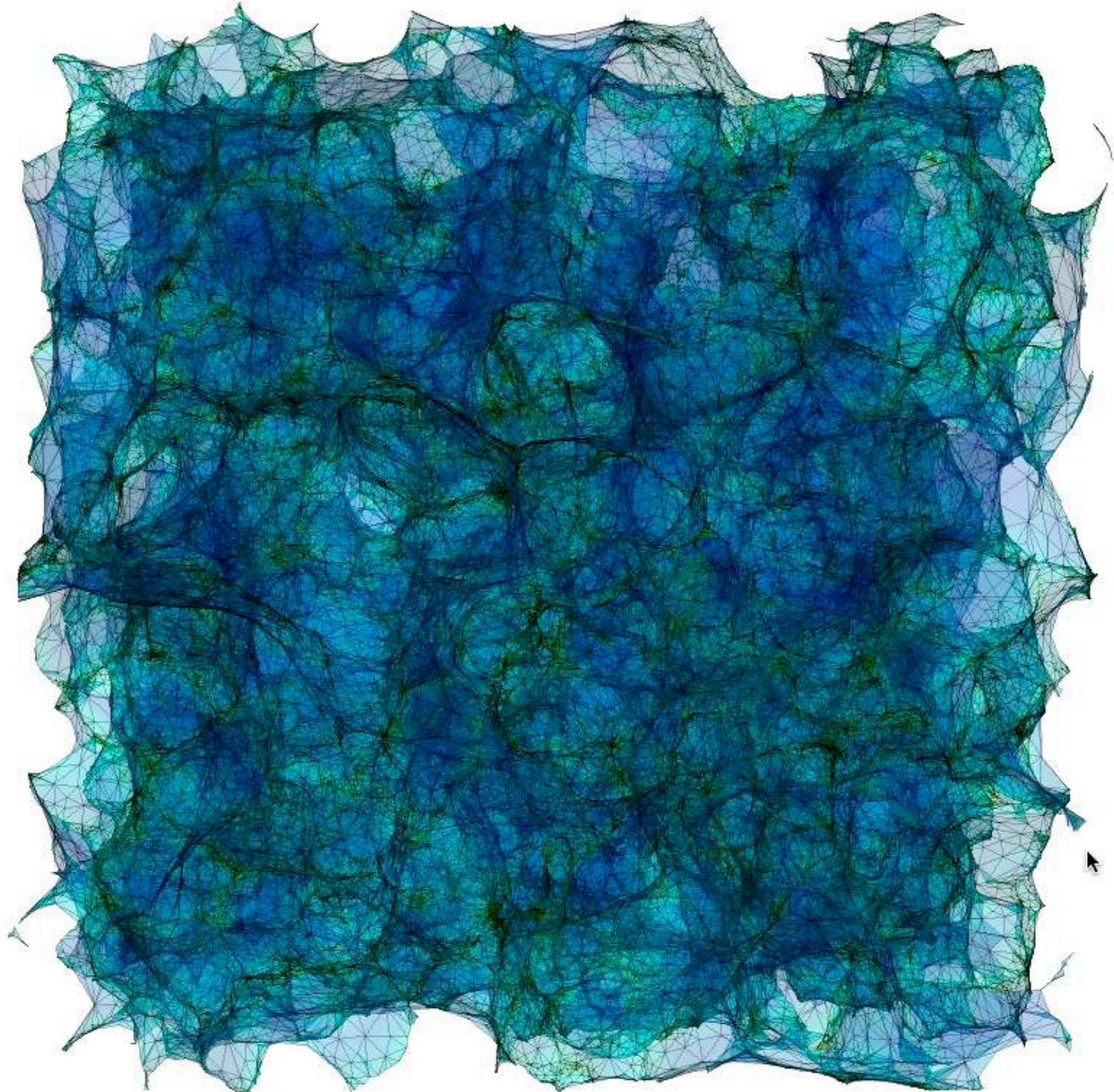
Elle peut être étendue dans le cas discret via le  
squelette persistant *Sousbie+11*



\* among many others!

# Le squelette cosmique persistant





# Le squelette cosmique

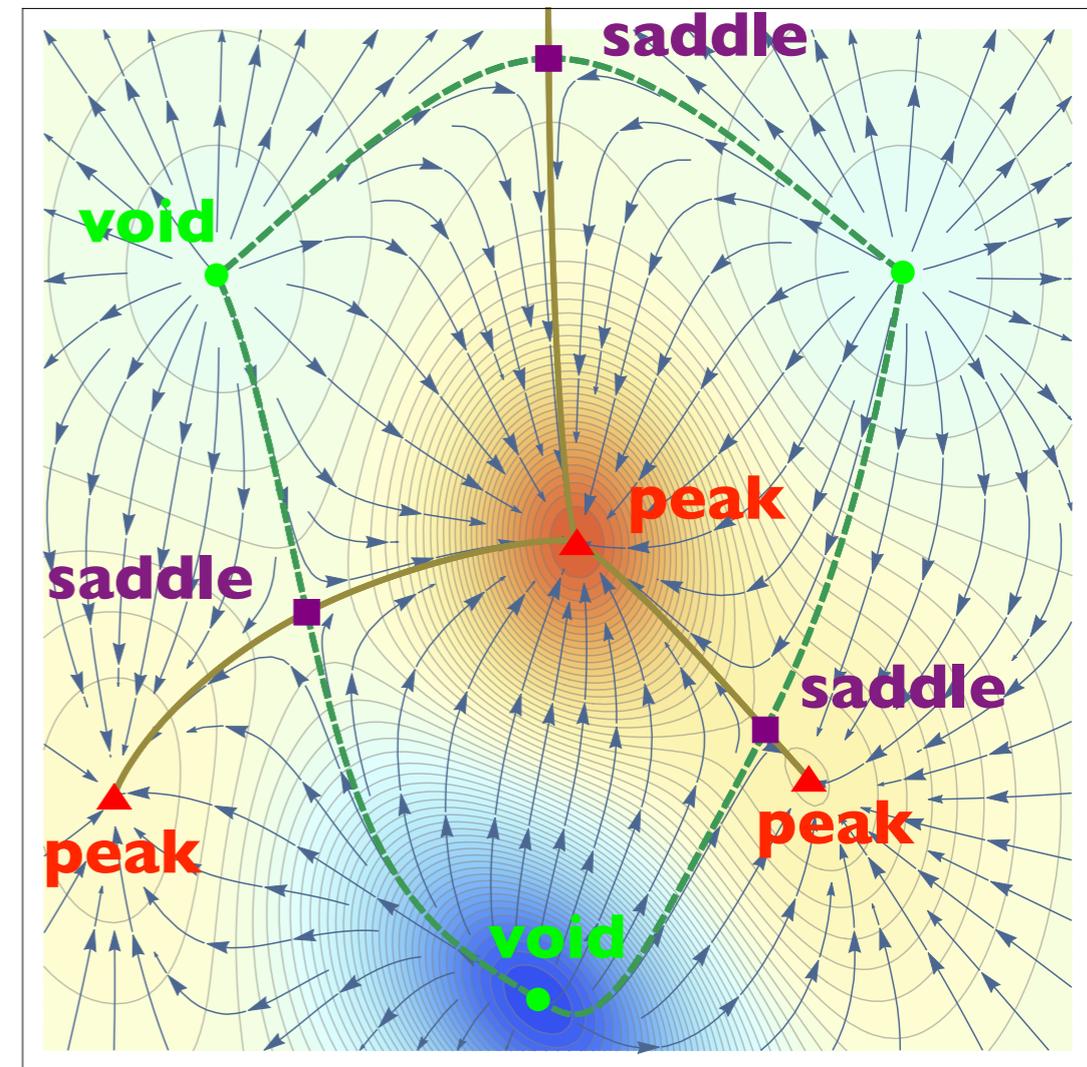
**Les filaments sont les lignes de crêtes  
= les lignes critiques qui joignent les  
maxima en passant par les points selles**

Cette idée est basée sur la théorie de Morse.  
Elle permet d'écrire notamment des *algorithmes*  
d'extraction du squelette cosmique (water-shedding).

*Sousbie+09, ...\**

Elle peut être étendue dans le cas discret via le  
squelette persistant *Sousbie+11*

Elle permet aussi d'écrire une théorie locale du  
squelette et de faire des prédictions!



comptage de pics

courbure du squelette

longueur des filaments

surface des murs

connectivité

\* among many others!

# Le squelette cosmique

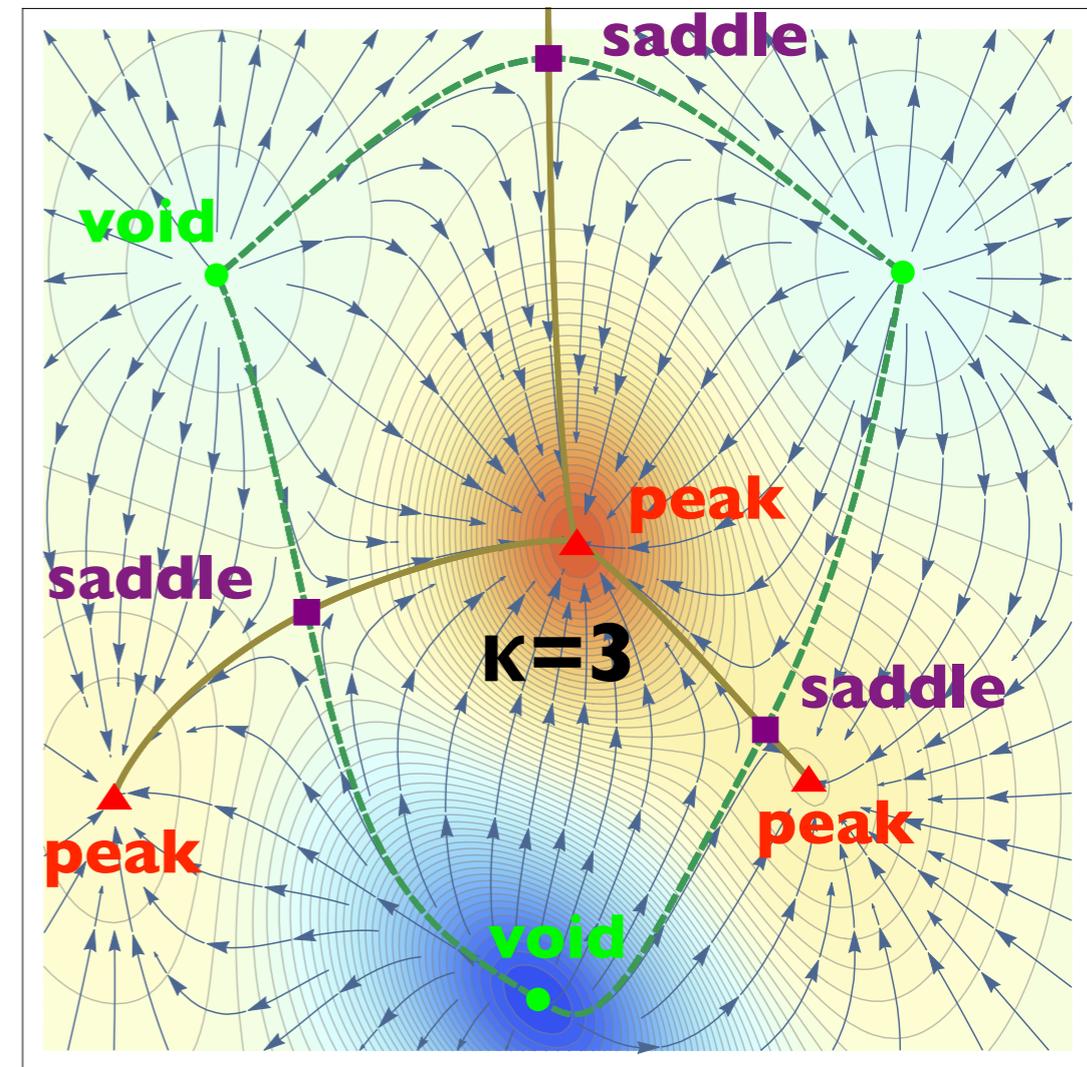
**Les filaments sont les lignes de crêtes  
= les lignes critiques qui joignent les  
maxima en passant par les points selles**

Cette idée est basée sur la théorie de Morse.  
Elle permet d'écrire notamment des *algorithmes*  
d'extraction du squelette cosmique (water-shedding).

*Sousbie+09, ...\**

Elle peut être étendue dans le cas discret via le  
squelette persistant *Sousbie+11*

Elle permet aussi d'écrire une théorie locale du  
squelette et de faire des prédictions!



comptage de pics

courbure du squelette

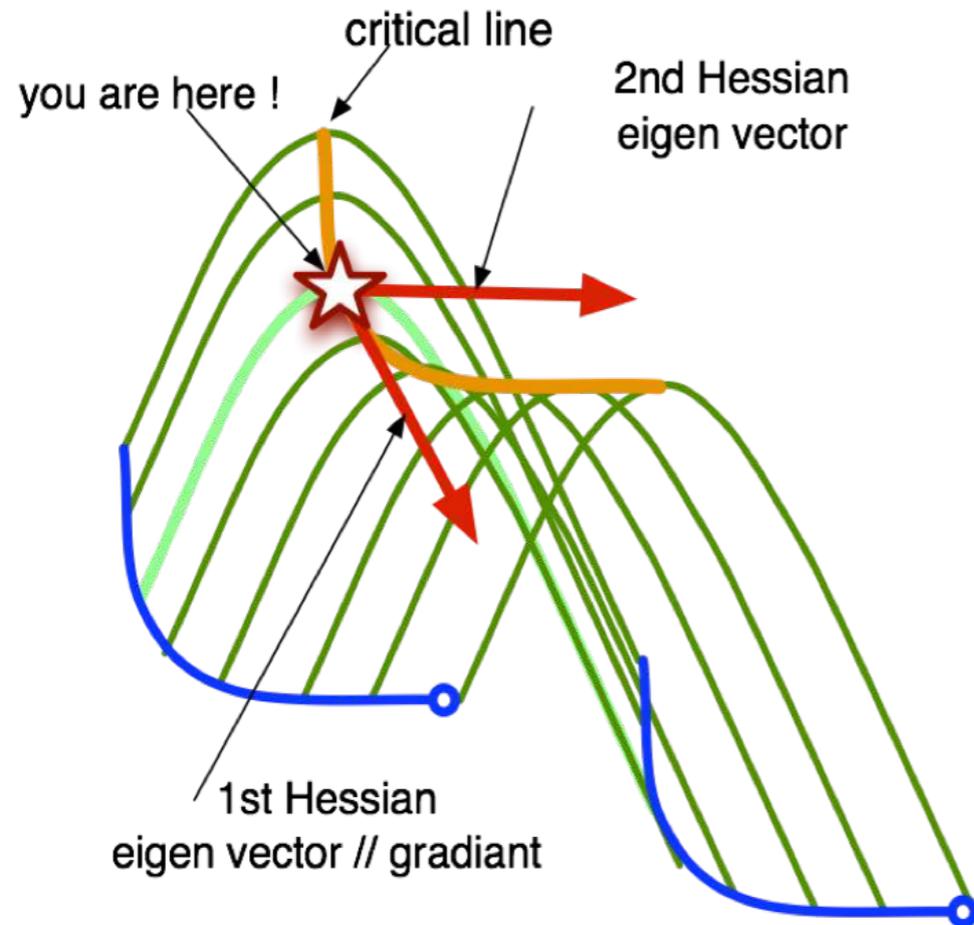
longueur des filaments

surface des murs

connectivité

\* among many others!

# Une théorie locale du squelette cosmique



La condition locale de squelette s'écrit:

$$(\nabla \nabla \rho \cdot \nabla \rho) \cdot \nabla \rho = 0$$

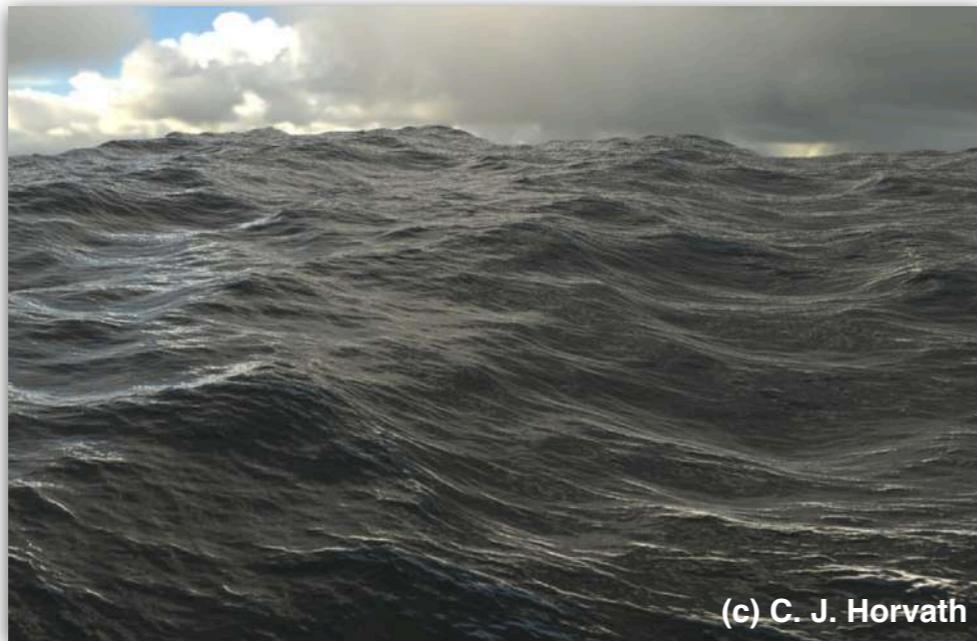
i.e la pente est une direction propre du tenseur de courbure.



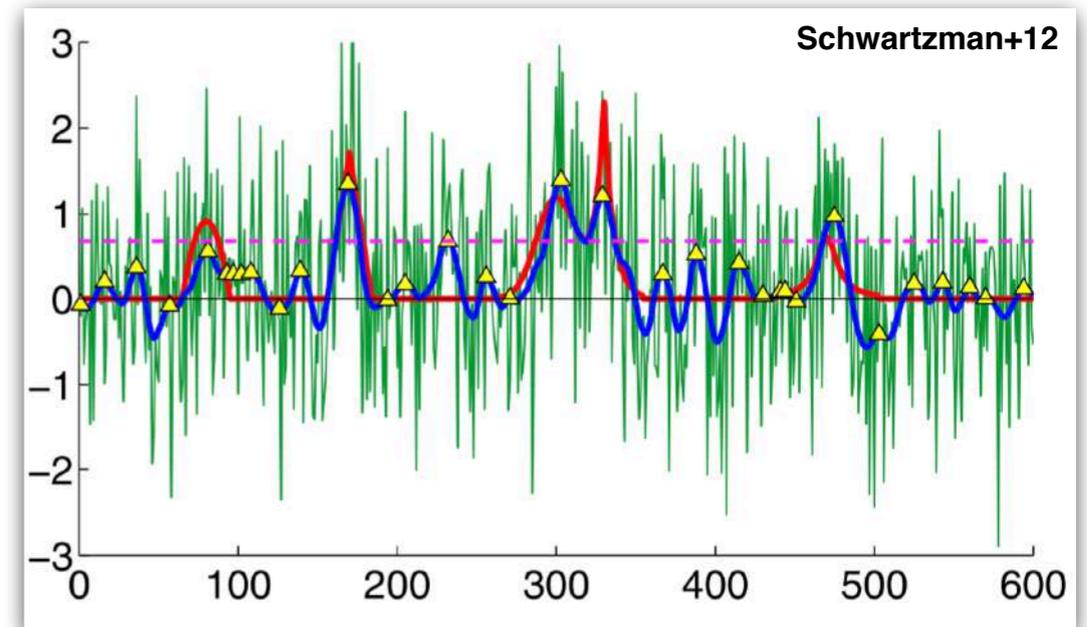
**théorie des pics!**

# Théorie des pics

1940's: Kac-Rice étudient les pics de signaux à 1D, avec des applications importantes en théorie de la communication et des signaux électroniques



Viennent ensuite des applications à la cosmologie avec Doroshkevich (1970), Bardeen-Bond-Kaiser-Szalay (1986) et beaucoup d'autres depuis...



1957: Longuet-Higgins étend ces travaux au cas 2D dans le contexte des ondes de surface océaniques (hauteur et formes des crêtes, distance entre les creux, etc)

# théorie des pics: le cas Gaussien

Si le champ est Gaussien (grandes échelles/temps courts), la densité totale de points critiques peut facilement être obtenue:

**2D**

$$\langle n_{\max} \rangle = \langle n_{\min} \rangle = \frac{1}{8\sqrt{3}\pi R_{\star}^2}$$

$$\langle n_{\text{sad}} \rangle = \frac{1}{4\sqrt{3}\pi R_{\star}^2}$$

**3D**

$$\langle n_{\max} \rangle = \langle n_{\min} \rangle = \frac{29\sqrt{15} - 18\sqrt{10}}{1800\pi^2 R_{\star}^3}$$

$$\langle n_{\text{sadf}} \rangle = \langle n_{\text{sadw}} \rangle = \frac{29\sqrt{15} + 18\sqrt{10}}{1800\pi^2 R_{\star}^3},$$

# théorie des pics: le cas Gaussien

Si le champ est Gaussien (grandes échelles/temps courts), la densité totale de points critiques peut facilement être obtenue:

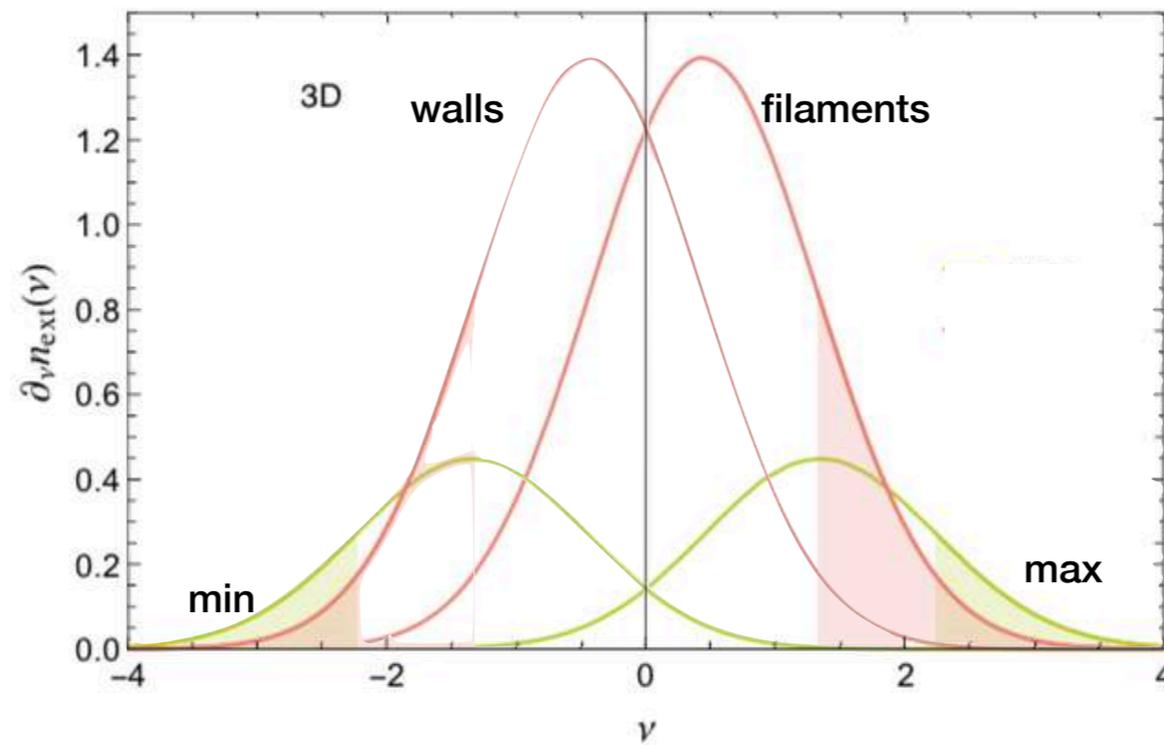
**2D**

$$\langle n_{\max} \rangle = \langle n_{\min} \rangle = \frac{1}{8\sqrt{3}\pi R_{\star}^2}$$
$$\langle n_{\text{sad}} \rangle = \frac{1}{4\sqrt{3}\pi R_{\star}^2}$$

**3D**

$$\langle n_{\max} \rangle = \langle n_{\min} \rangle = \frac{29\sqrt{15} - 18\sqrt{10}}{1800\pi^2 R_{\star}^3}$$
$$\langle n_{\text{sadf}} \rangle = \langle n_{\text{sadw}} \rangle = \frac{29\sqrt{15} + 18\sqrt{10}}{1800\pi^2 R_{\star}^3},$$

et en fonction de la hauteur de ces points critiques (analytique à 2D, numérique à 3D) :



# Théorie des pics: vers de faibles non-Gaussianités

Gay+11

see also Pogosyan+00, Gay+11, SC+13

**Un développement de Gram-Charlier** (analogue au développement Taylor):

$$P(x) = G(x) \left[ 1 + \sum_{n=3}^{\infty} \frac{1}{n!} \langle x^n \rangle_{GC} H_n(x) \right]$$

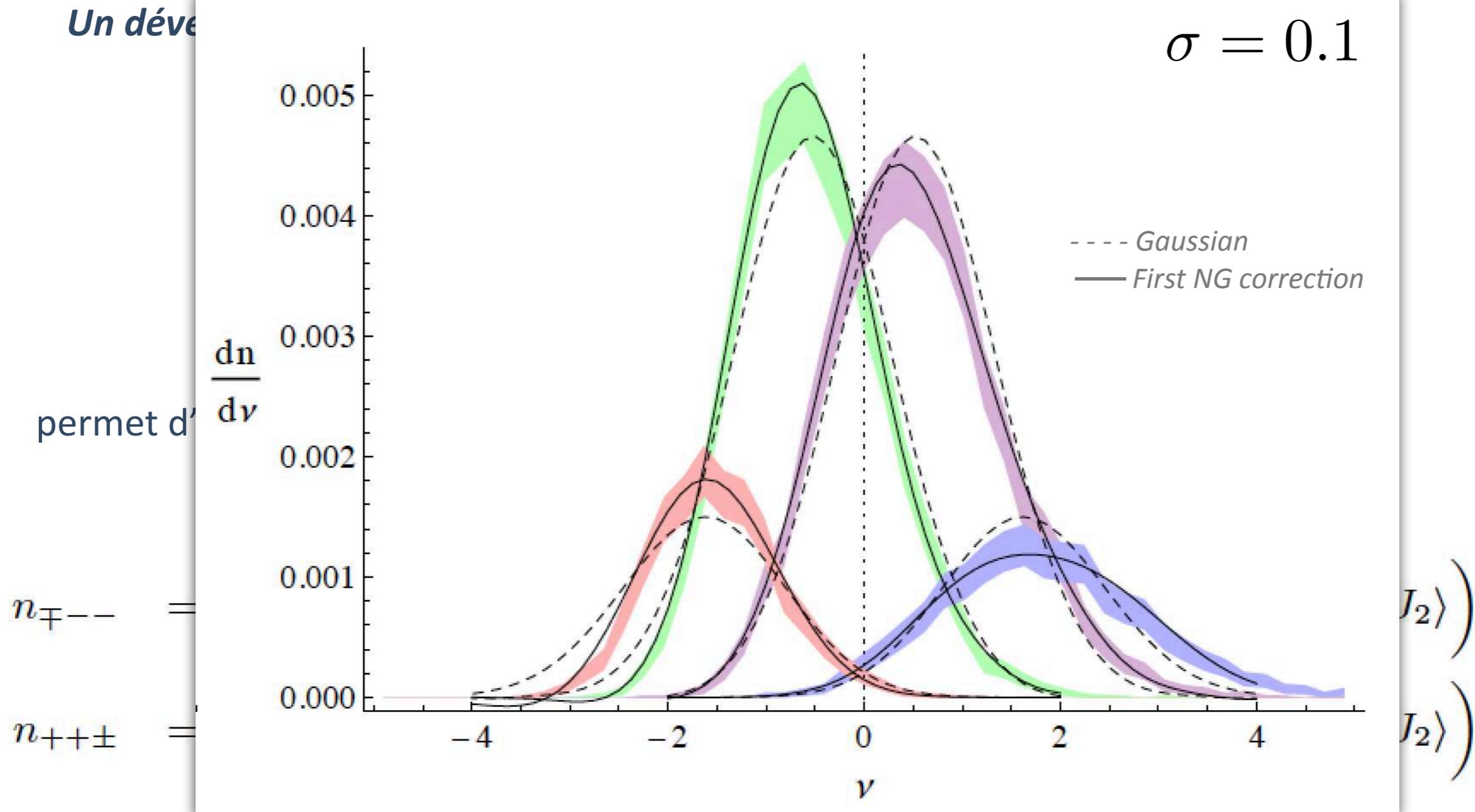
permet d'obtenir des predictions pour de faibles non-Gaussianités:

$$n_{\mp--} = \frac{29\sqrt{15} \mp 18\sqrt{10}}{1800\pi^2 R_*^3} + \frac{5\sqrt{5}}{24\pi^2 \sqrt{6\pi} R_*^3} \left( \langle q^2 J_1 \rangle - \frac{8}{21} \langle J_1^3 \rangle + \frac{10}{21} \langle J_1 J_2 \rangle \right)$$
$$n_{++\pm} = \frac{29\sqrt{15} \mp 18\sqrt{10}}{1800\pi^2 R_*^3} - \frac{5\sqrt{5}}{24\pi^2 \sqrt{6\pi} R_*^3} \left( \langle q^2 J_1 \rangle - \frac{8}{21} \langle J_1^3 \rangle + \frac{10}{21} \langle J_1 J_2 \rangle \right)$$

# Théorie des pics: vers de faibles non-Gaussianités

Gay+11

see also Pogosyan+00, Gay+11, SC+13



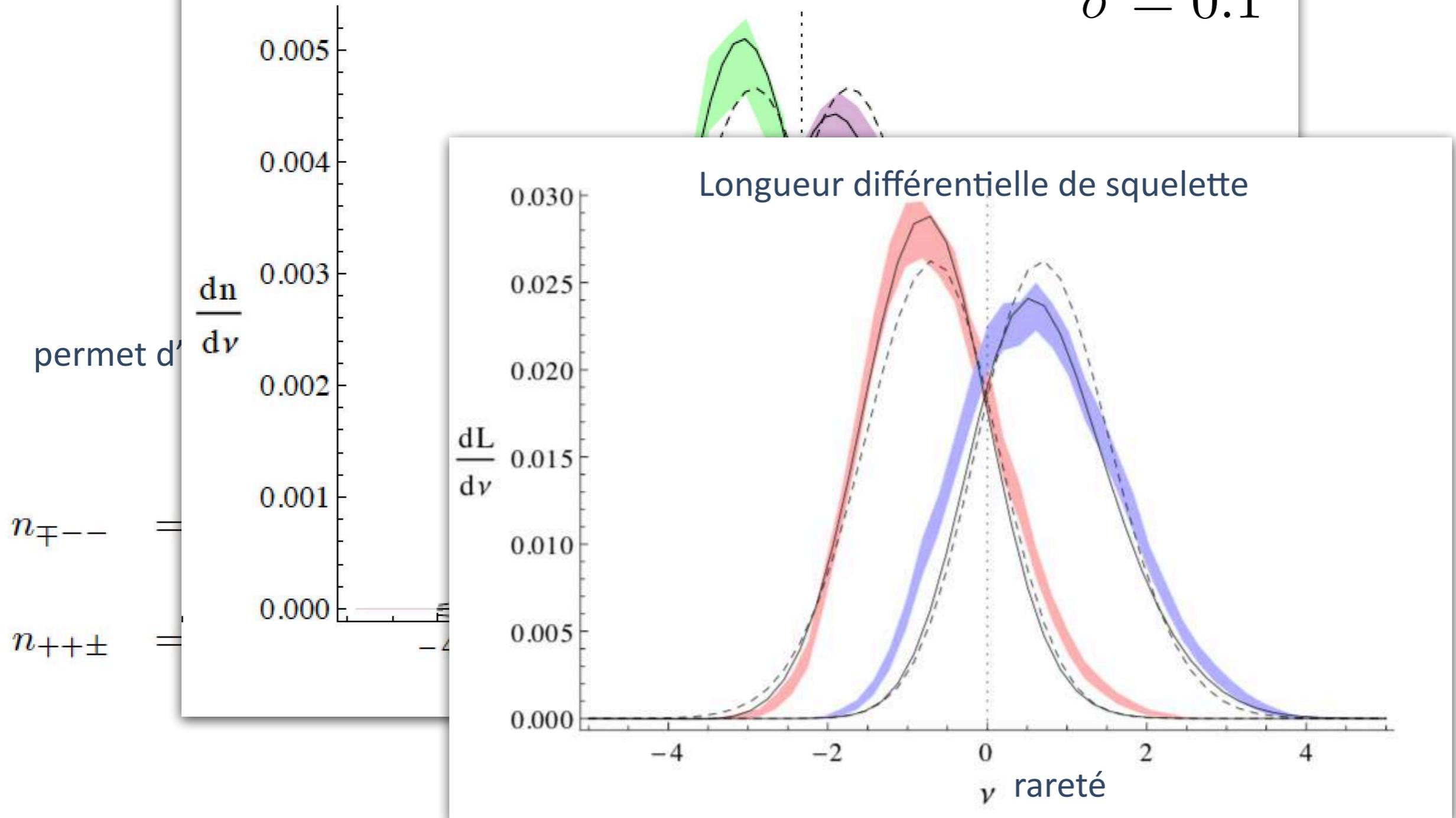
# Théorie des pics: vers de faibles non-Gaussianités

Gay+11

see also Pogosyan+00, Gay+11, SC+13

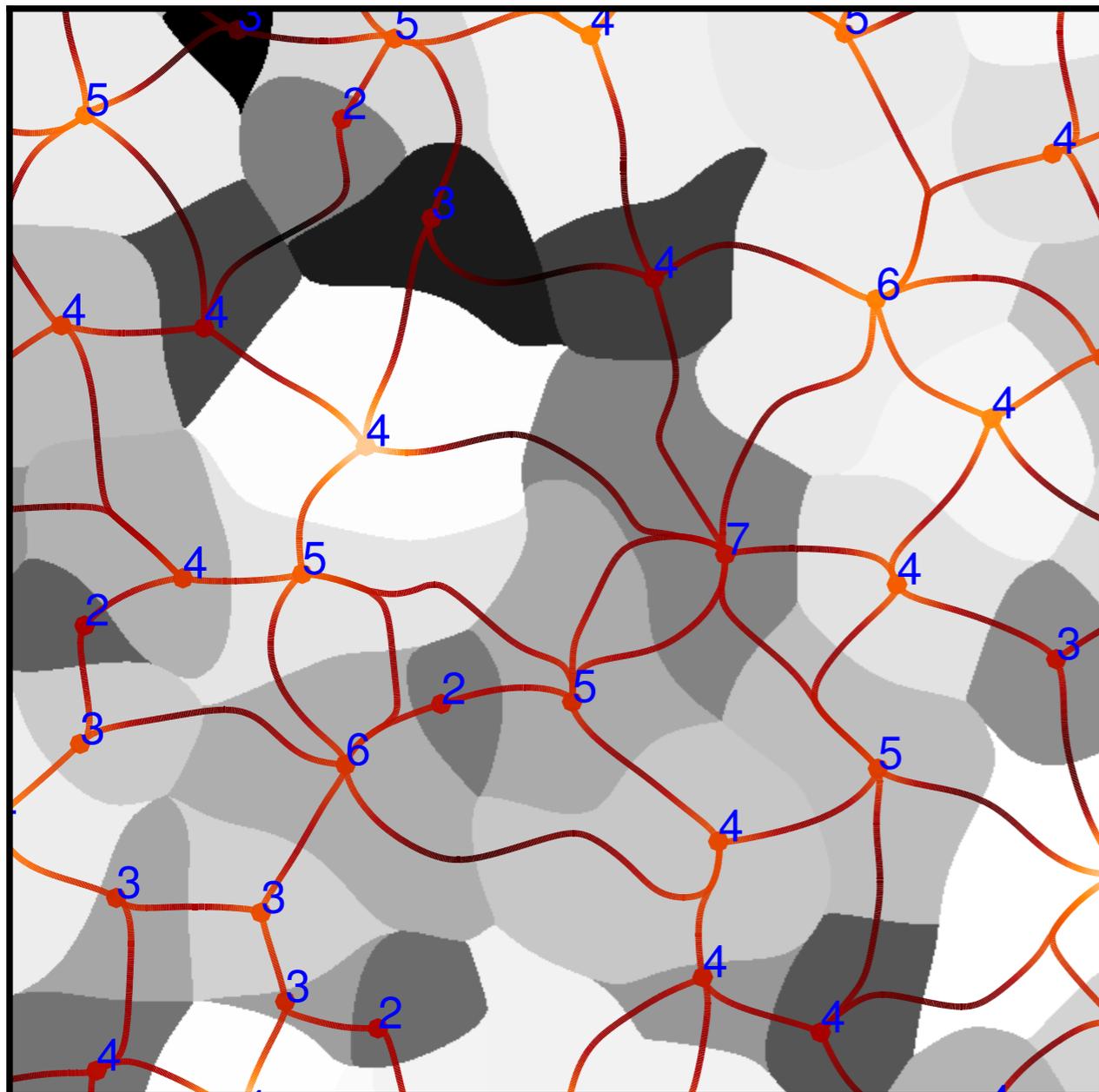
Un déve

$$\sigma = 0.1$$



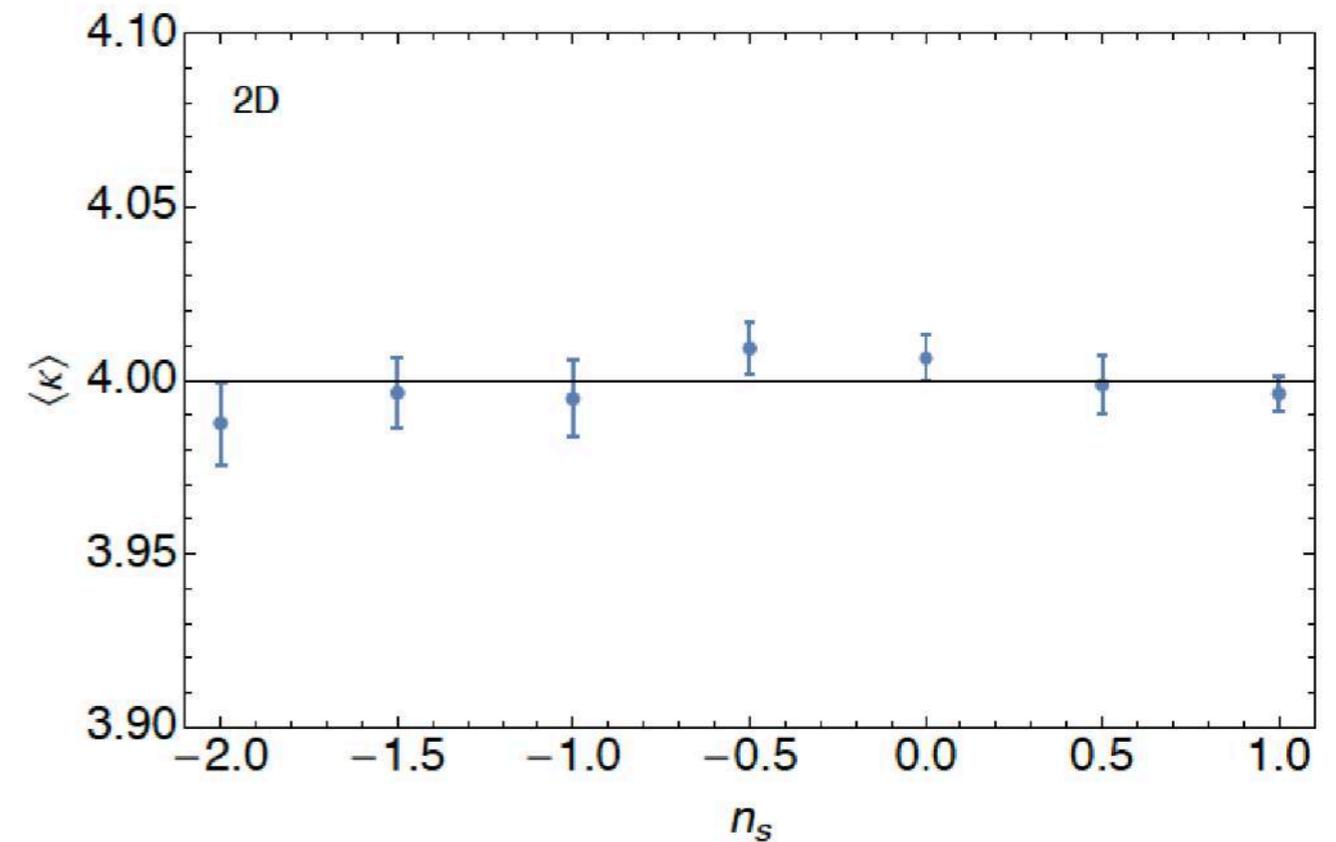
# Connectivité cosmique

SC+18



Combien de filaments se connectent à un noeud?

Mesure du nombre moyen de points selles connectés à un noeud dans un champ Gaussien aléatoire (algorithme DISPERSE, Sousbie+11):



Peut-on prédire cette connectivité moyenne?

# Connectivité cosmique

Un filament passe par un et un seul point selle, donc en moyenne:

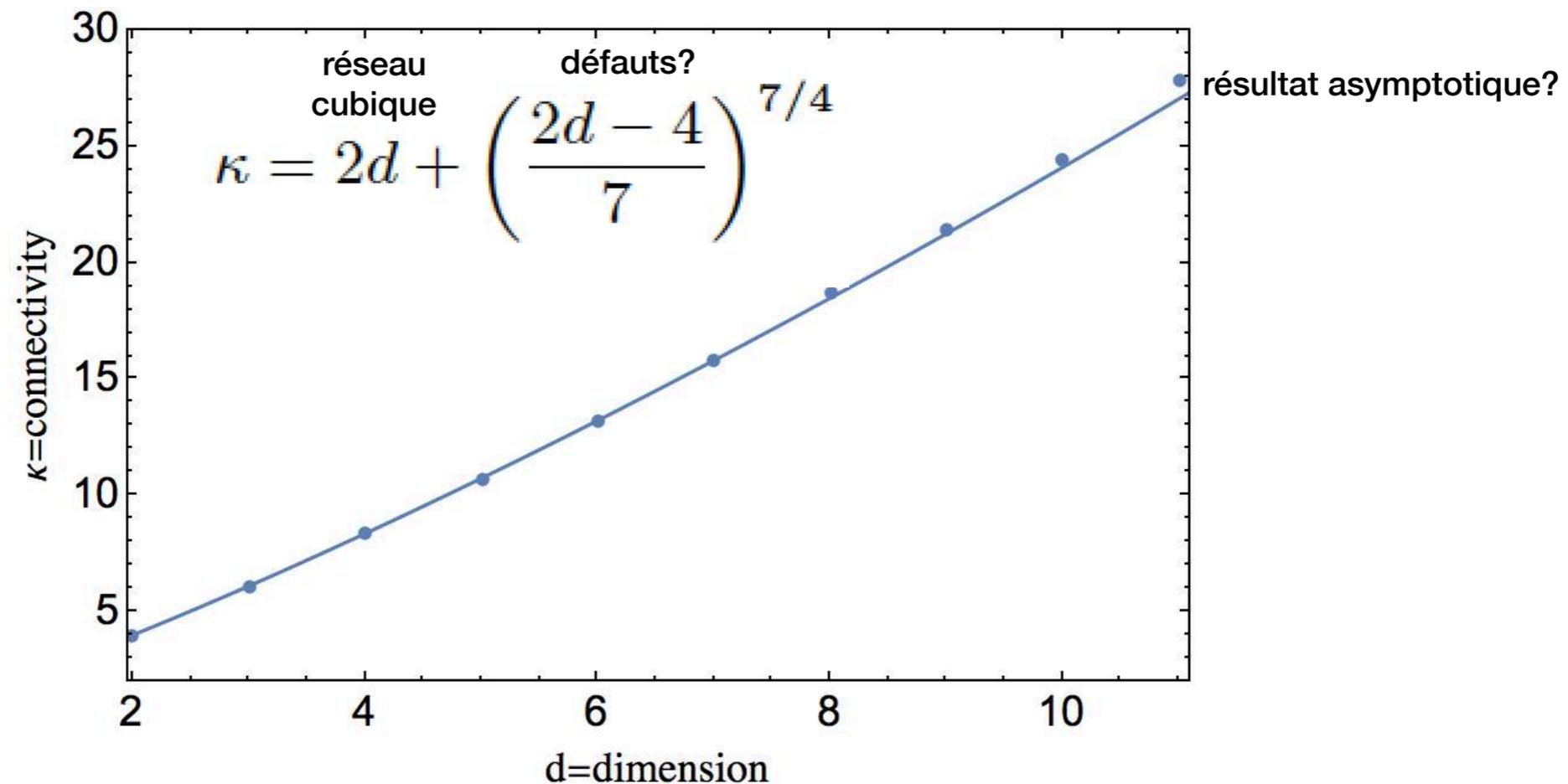
$$\begin{aligned}\langle \kappa \rangle &= \frac{2\bar{n}_{\text{sad}}}{\bar{n}_{\text{max}}} \\ &= 4 \quad \text{à 2D} \\ &= \frac{2(1057 + 348\sqrt{6})}{625} \approx 6.11 \quad \text{à 3D}\end{aligned}$$

# Connectivité cosmique

Un filament passe par un et un seul point selle, donc en moyenne:

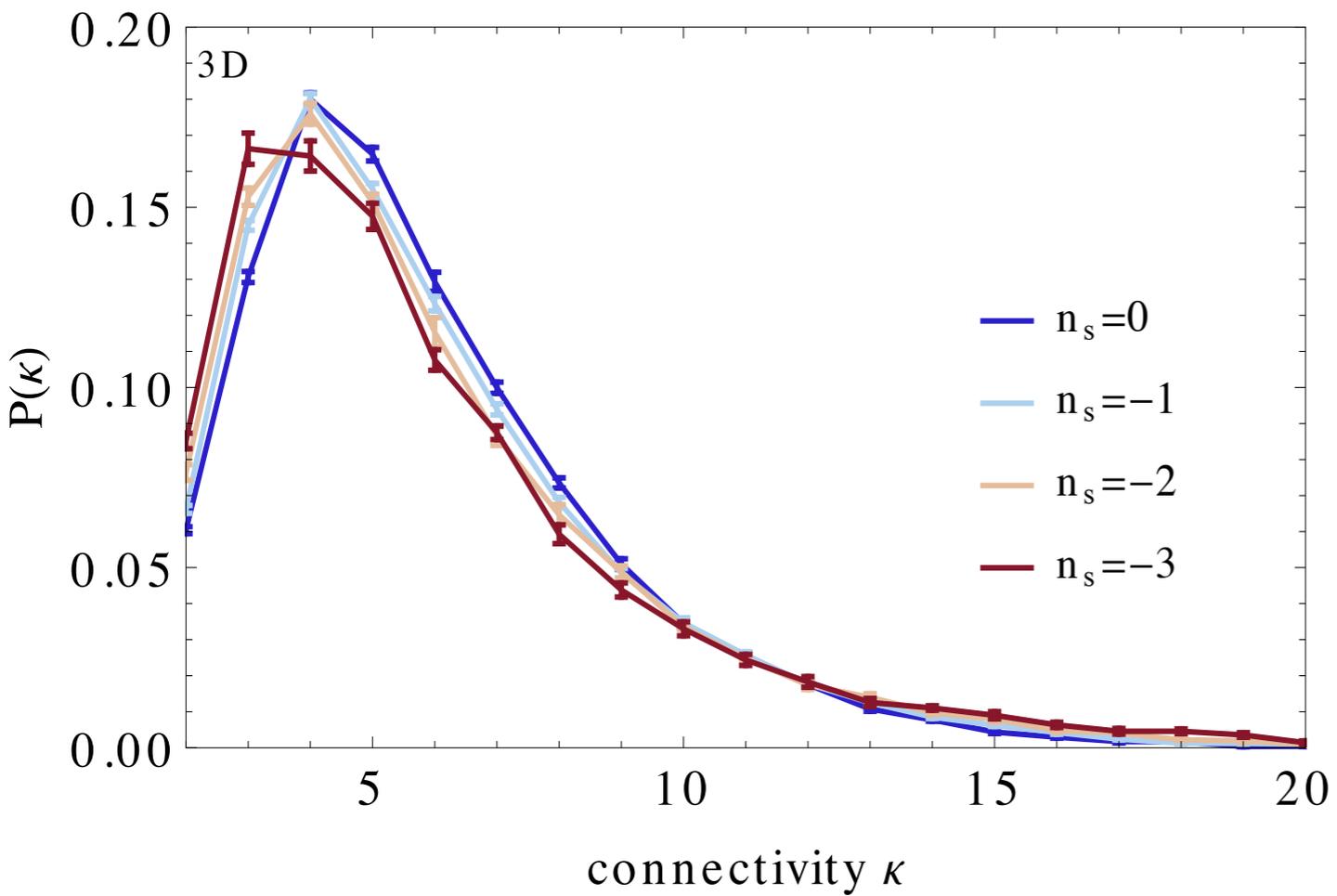
$$\begin{aligned}\langle \kappa \rangle &= \frac{2\bar{n}_{\text{sad}}}{\bar{n}_{\text{max}}} \\ &= 4 \quad \text{à 2D} \\ &= \frac{2(1057 + 348\sqrt{6})}{625} \approx 6.11 \quad \text{à 3D}\end{aligned}$$

En d dimensions, une intégration numérique donne:

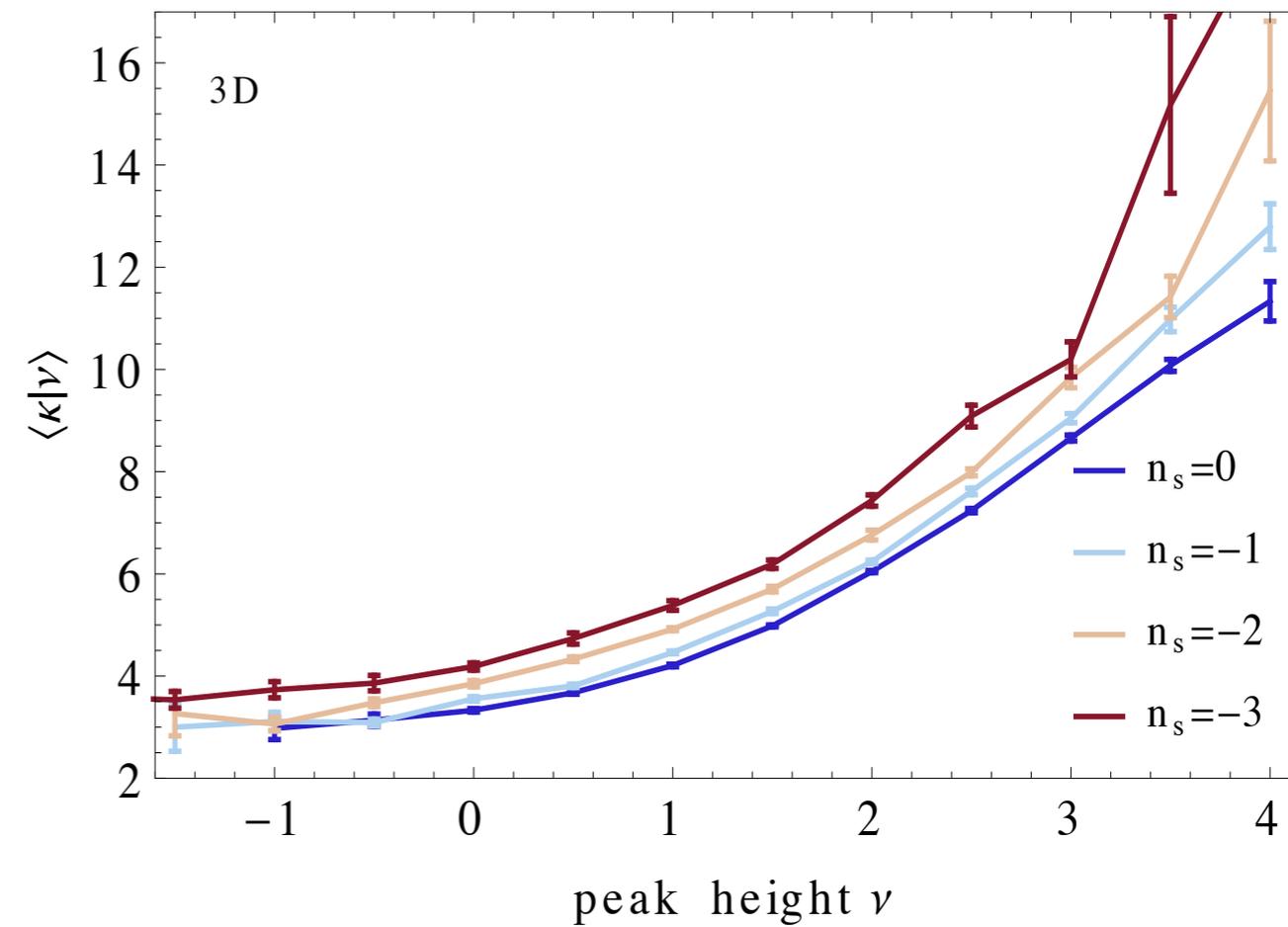


# Connectivité cosmique

Distribution de la connectivité:



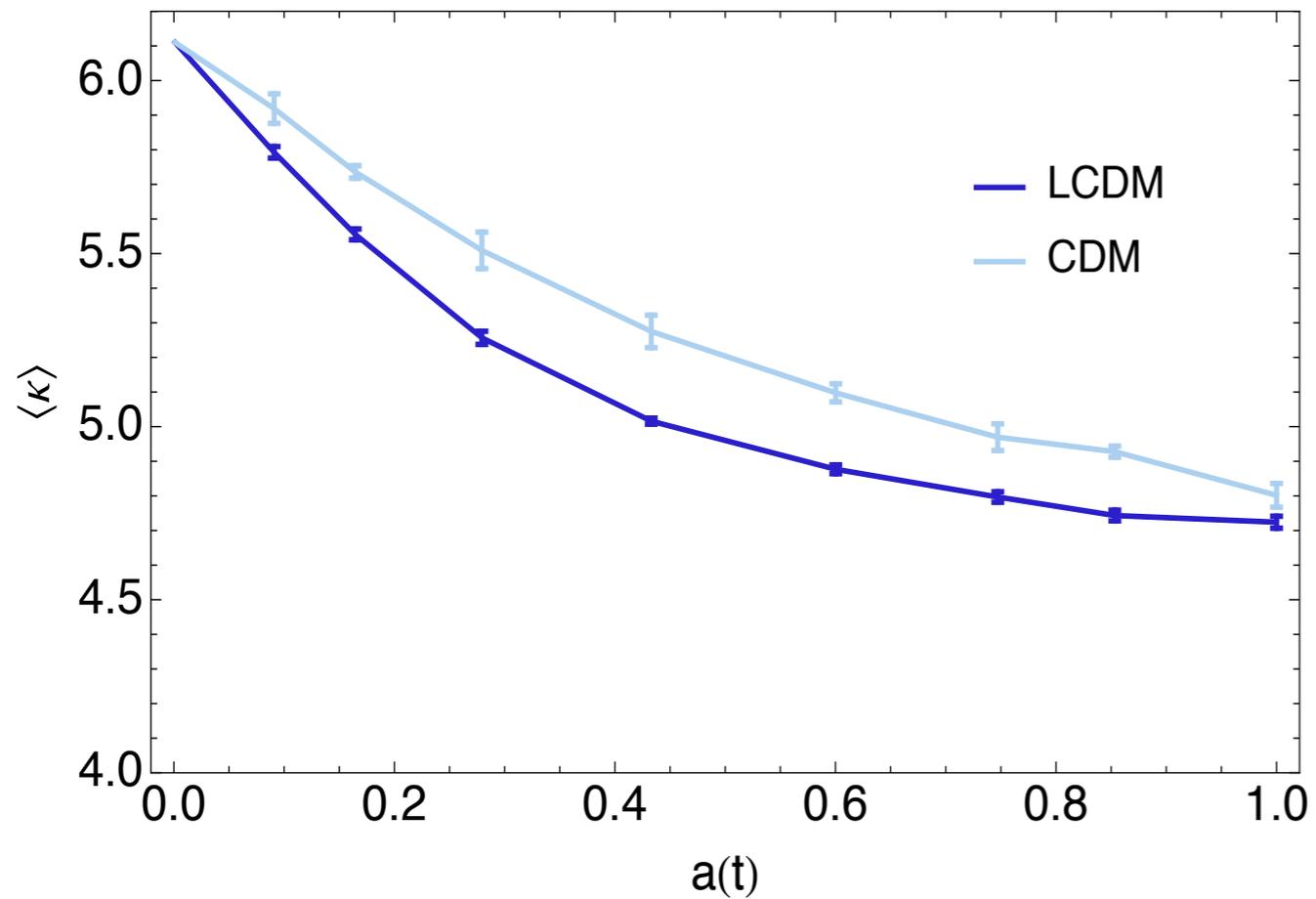
Dépendance avec la hauteur du pic:



**Plus le pic est haut, plus il est connecté!**

# Connectivité cosmique: évolution temporelle

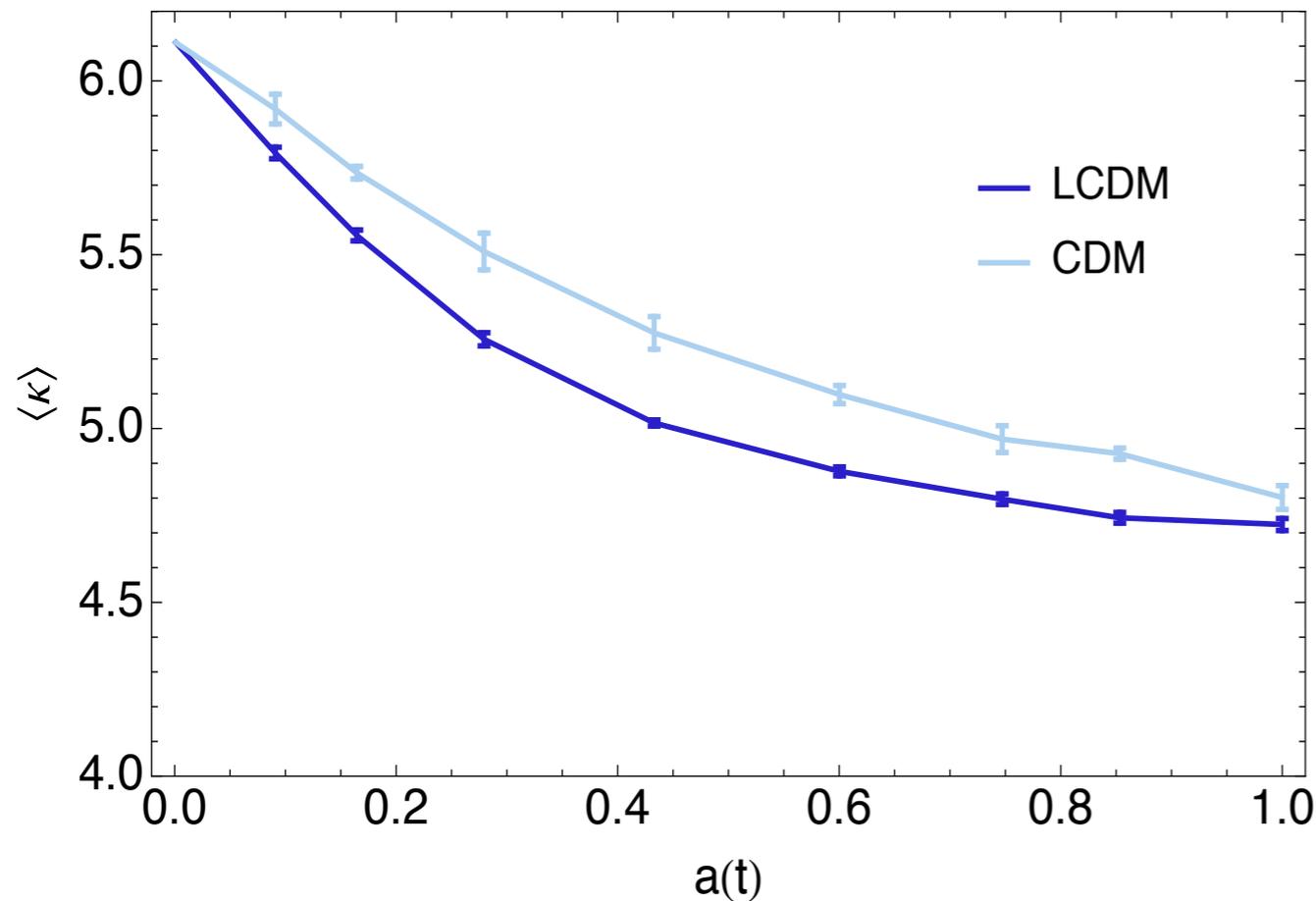
► Mesure dans des simulations cosmologiques:



**Les filaments fusionnent de façon cosmologie-dépendante**

# Connectivité cosmique: évolution temporelle

► Mesure dans des simulations cosmologiques:



Les filaments fusionnent de façon cosmologie-dépendante

► Prédictions:

On peut aussi prédire perturbativement cette évolution

$$\langle \kappa \rangle = \kappa^G \left( 1 + \sum_{i \geq 1} \kappa^{(i)} \sigma_0^i \right)$$

avec

$$\kappa^G = 2 \times \frac{29\sqrt{3} + 18\sqrt{2}}{29\sqrt{3} - 18\sqrt{2}} \approx 6.11$$

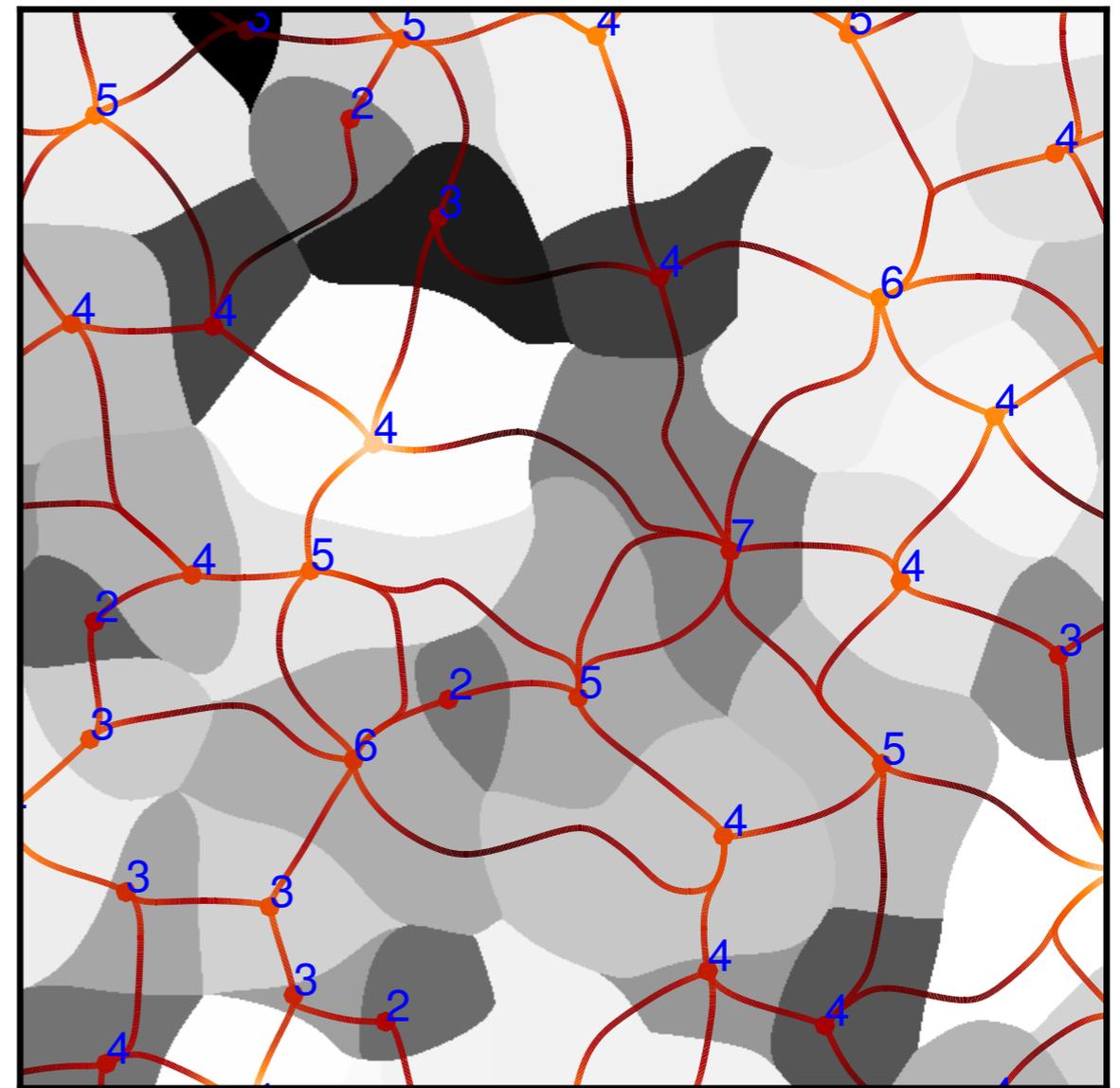
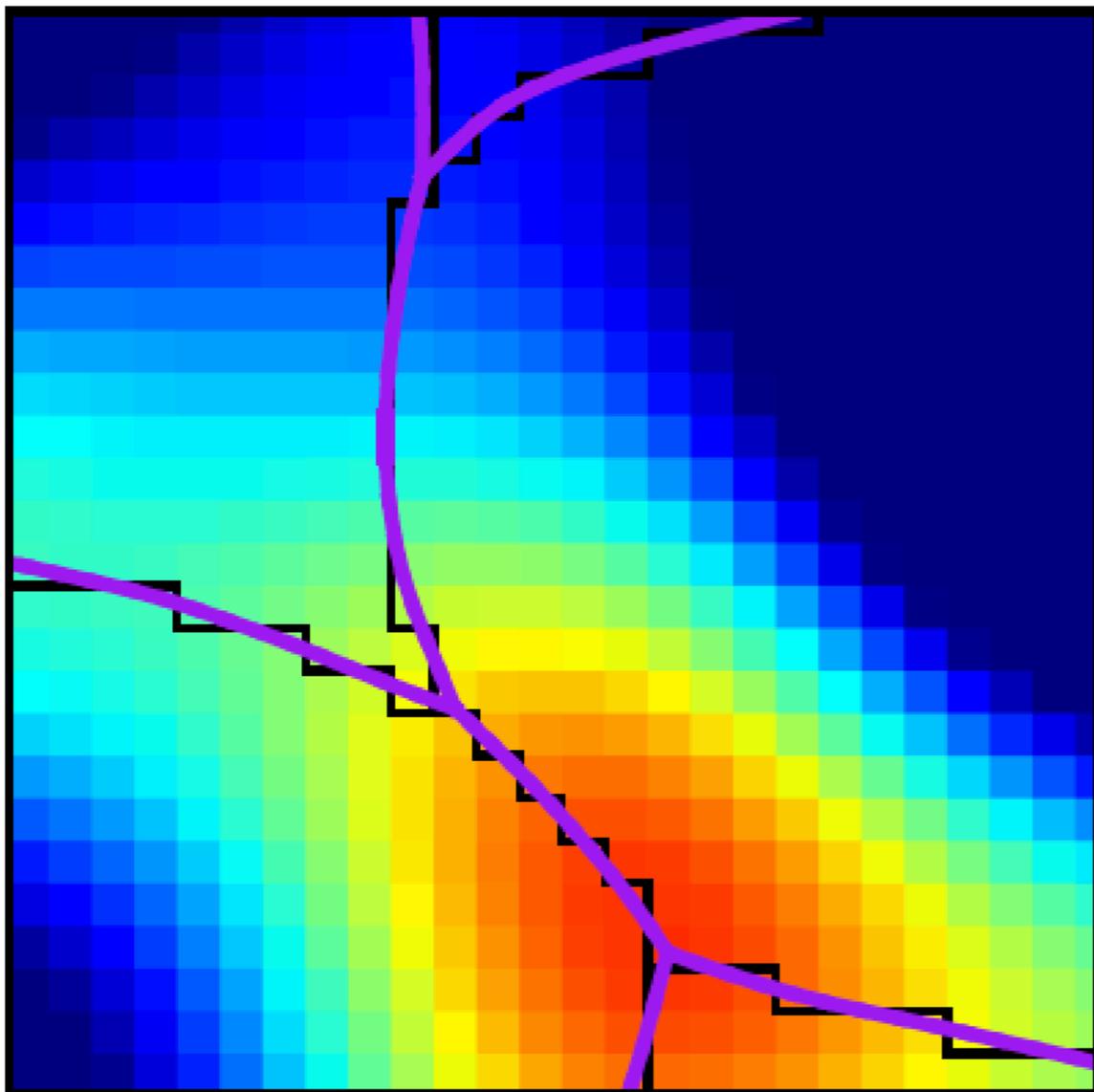
$$\kappa^{(1)} = \frac{4\sqrt{3}}{35\sqrt{\pi}\sigma_0} (8 \langle J_1^3 \rangle - 10 \langle J_1 J_2 \rangle - 21 \langle q^2 J_1 \rangle)$$

# Connectivité cosmique: multiplicité locale et points de bifurcations

Formation des galaxies: ce qui compte est le nombre de filaments connectés **localement**.

A suffisamment petite échelle, un pic est toujours **ellipsoïdal** avec **deux** branches de filaments qui émergent. Ensuite, ces branches bifurquent, parfois très proche (non pertinent physiquement), parfois plus loin.

On définit alors la **multiplicité** comme le nombre local de filaments.

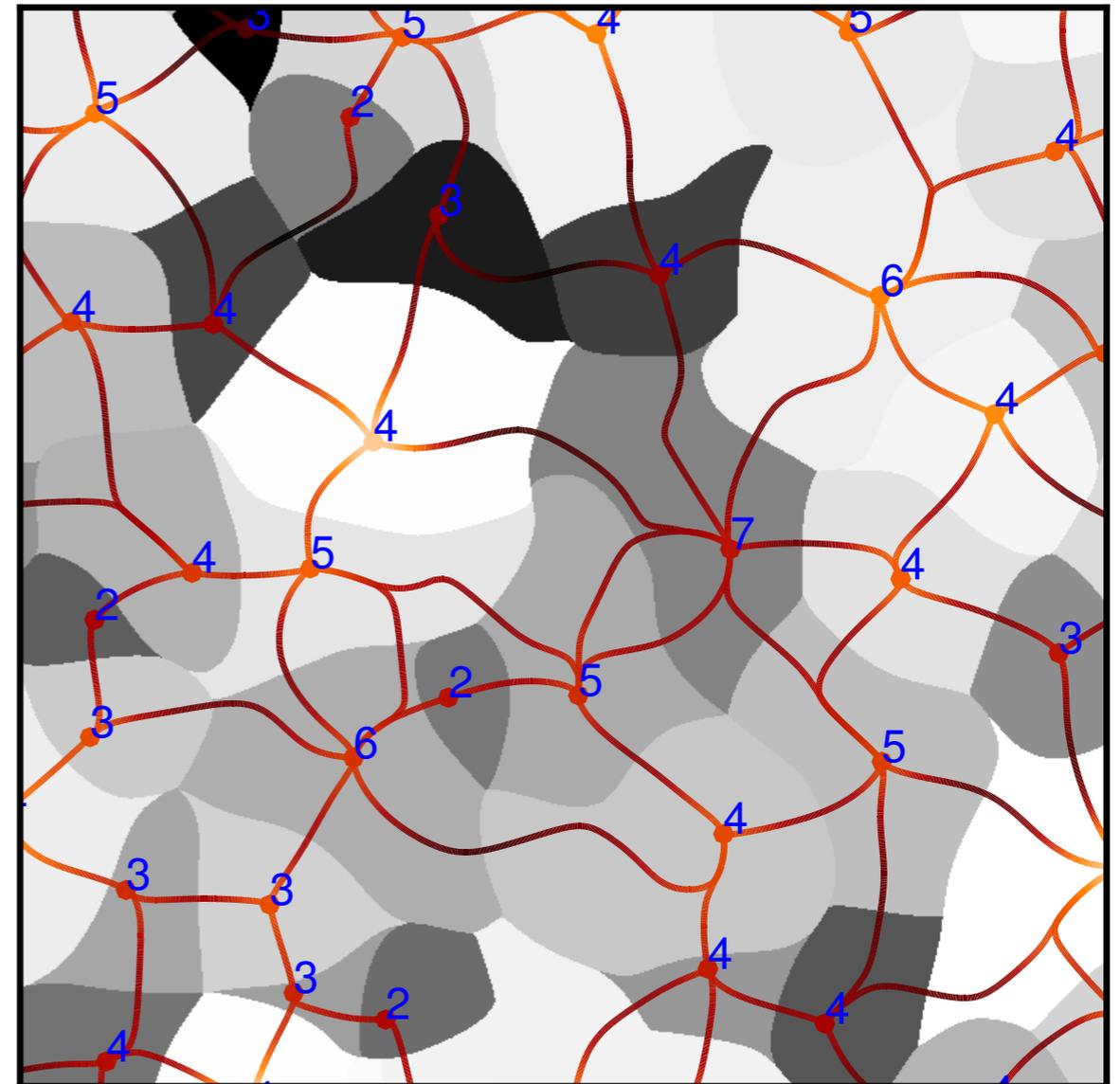
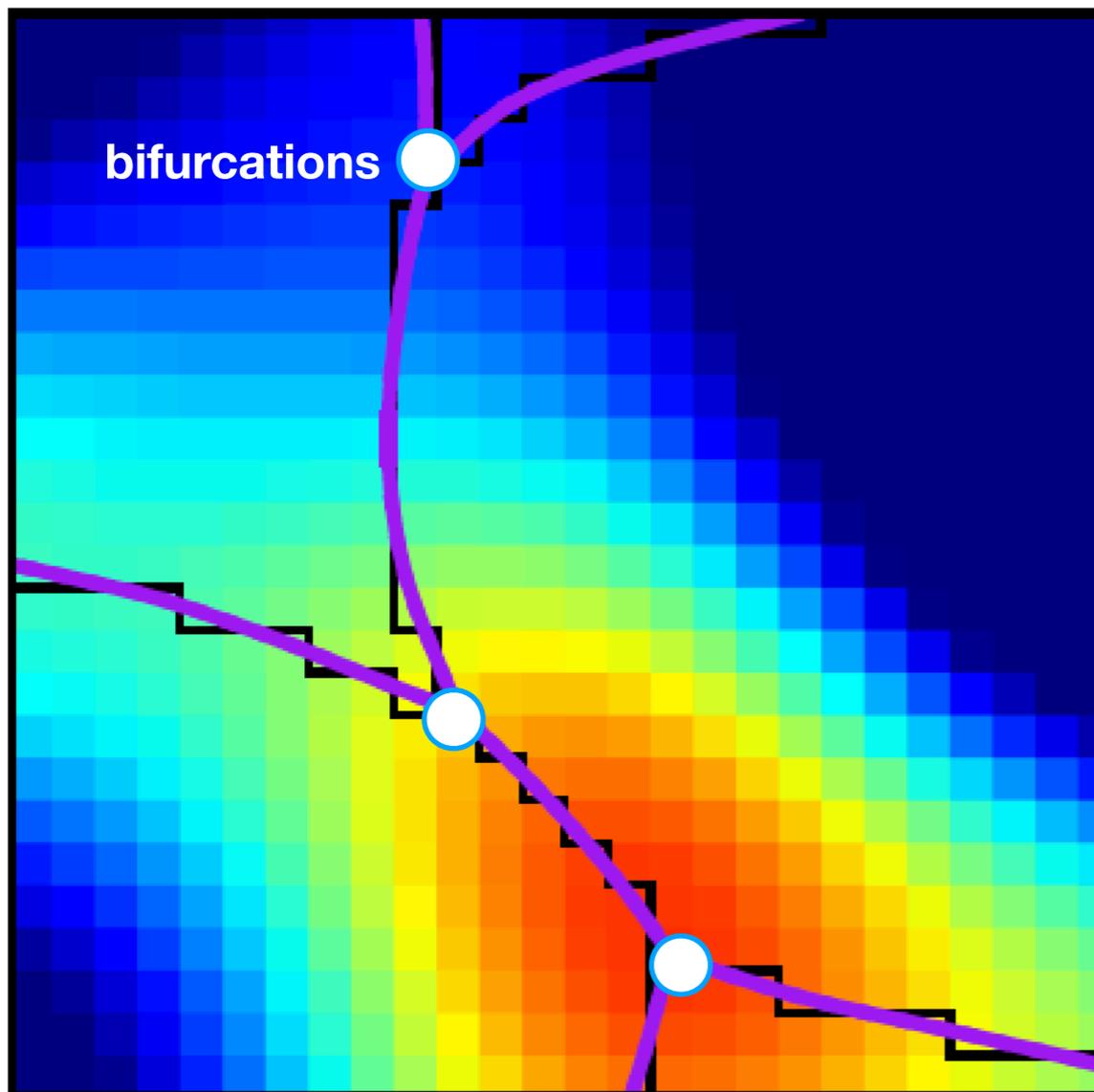


# Connectivité cosmique: multiplicité locale et points de bifurcations

Formation des galaxies: ce qui compte est le nombre de filaments connectés **localement**.

A suffisamment petite échelle, un pic est toujours **ellipsoïdal** avec **deux** branches de filaments qui émergent. Ensuite, ces branches bifurquent, parfois très proche (non pertinent physiquement), parfois plus loin.

On définit alors la **multiplicité** comme le nombre local de filaments.



# Connectivité cosmique: multiplicité locale et points de bifurcations

Formation des galaxies: ce qui compte est le nombre de filament connectés **localement**.

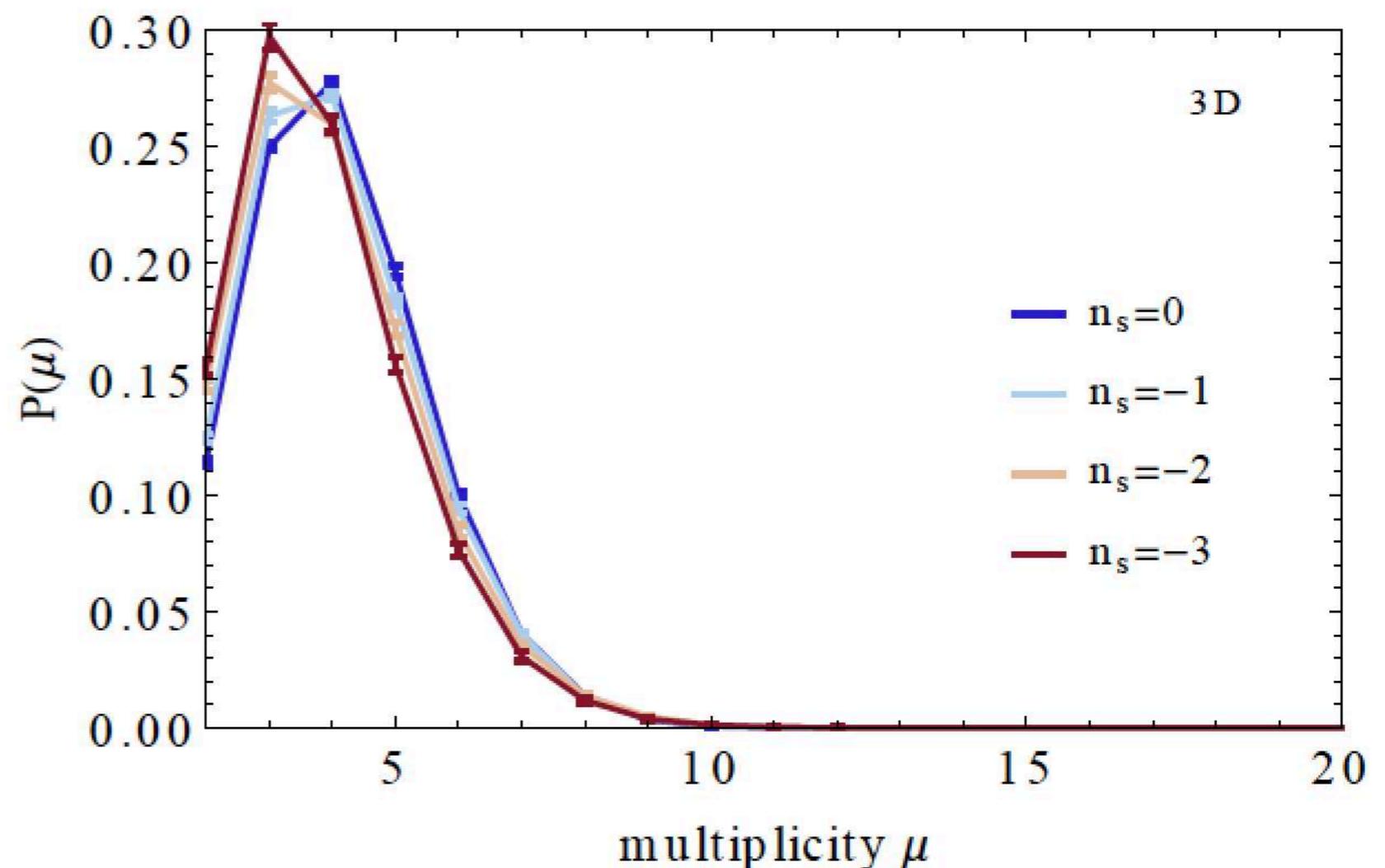
A suffisamment petite échelle, un pic est toujours **ellipsoïdal** avec **deux** branches de filaments qui émergent. Ensuite, ces branches bifurquent, parfois très proche (non pertinent physiquement), parfois plus loin.

On définit alors la **multiplicité** comme le nombre local de filaments.

$$\mu = \kappa - n_{\text{bifurcations}}$$

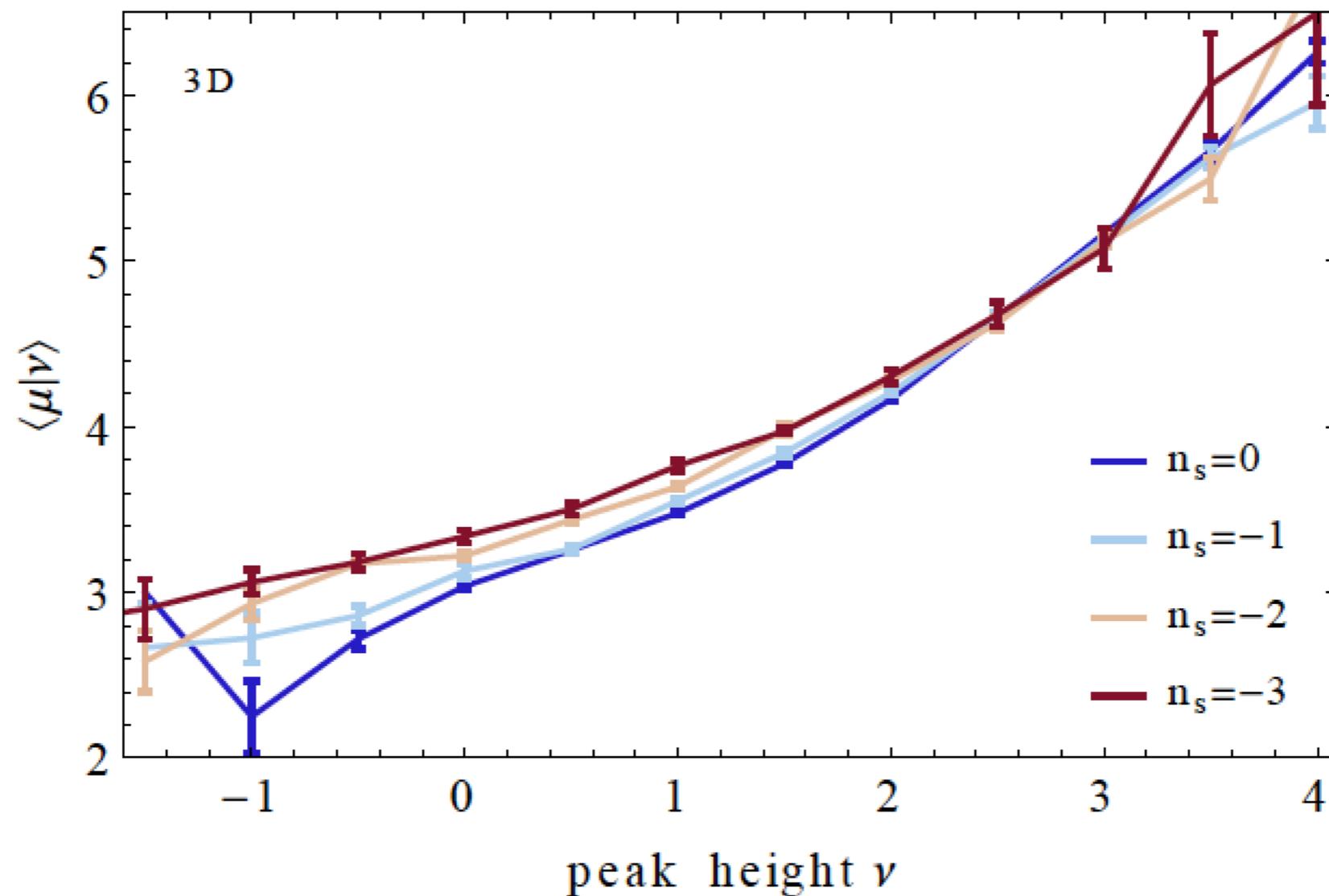
$$\mu \approx 3 \quad \text{in 2D}$$

$$\mu \approx 4 \quad \text{in 3D}$$



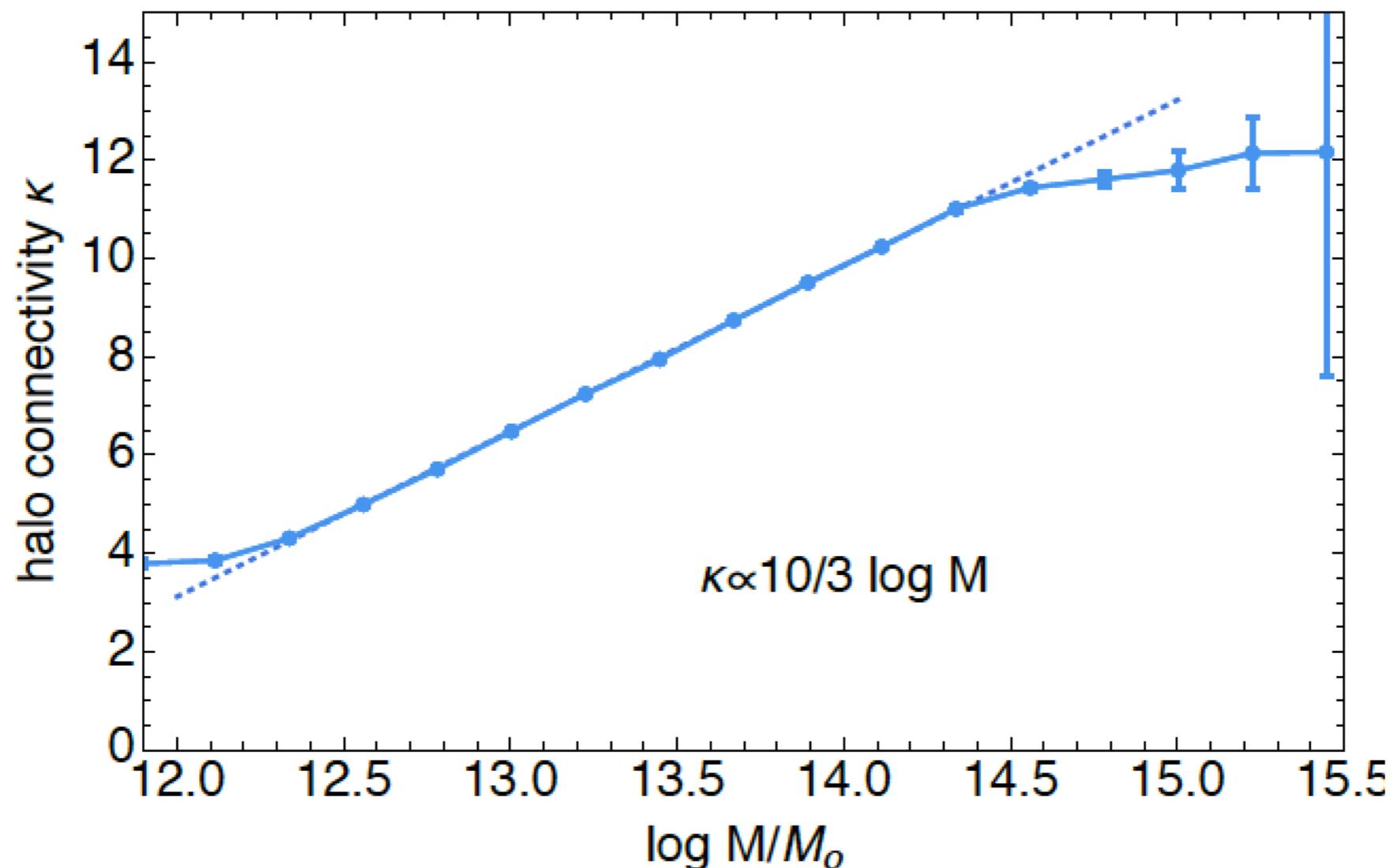
# Connectivité cosmique: multiplicité locale et points de bifurcations

Plus l'environnement est dense, plus la multiplicité est grande and amène donc du moment angulaire de façon désordonnée, incohérente... générant donc des galaxies plus ellipsoïdales?



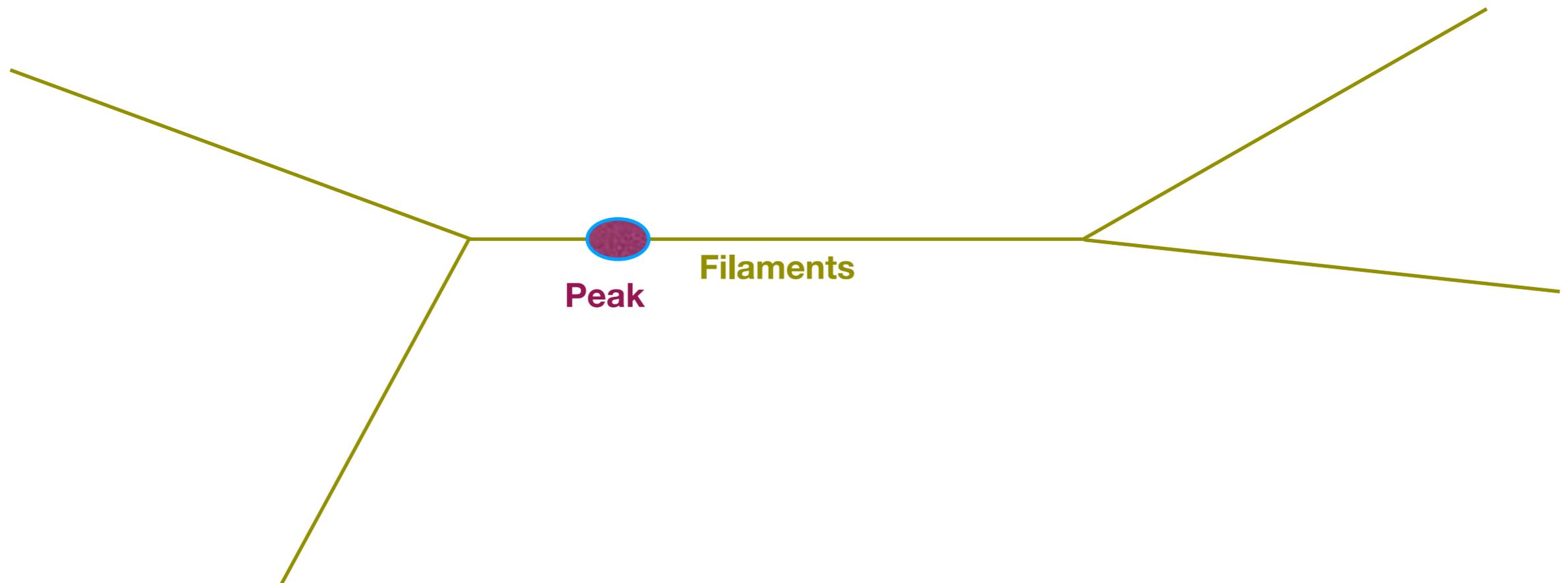
# Connectivité cosmique: multiplicité locale et points de bifurcations

Plus l'environnement est dense, plus la multiplicité est grande and amène donc du moment angulaire de façon désordonnée, incohérente... générant donc des galaxies plus ellipsoïdales?



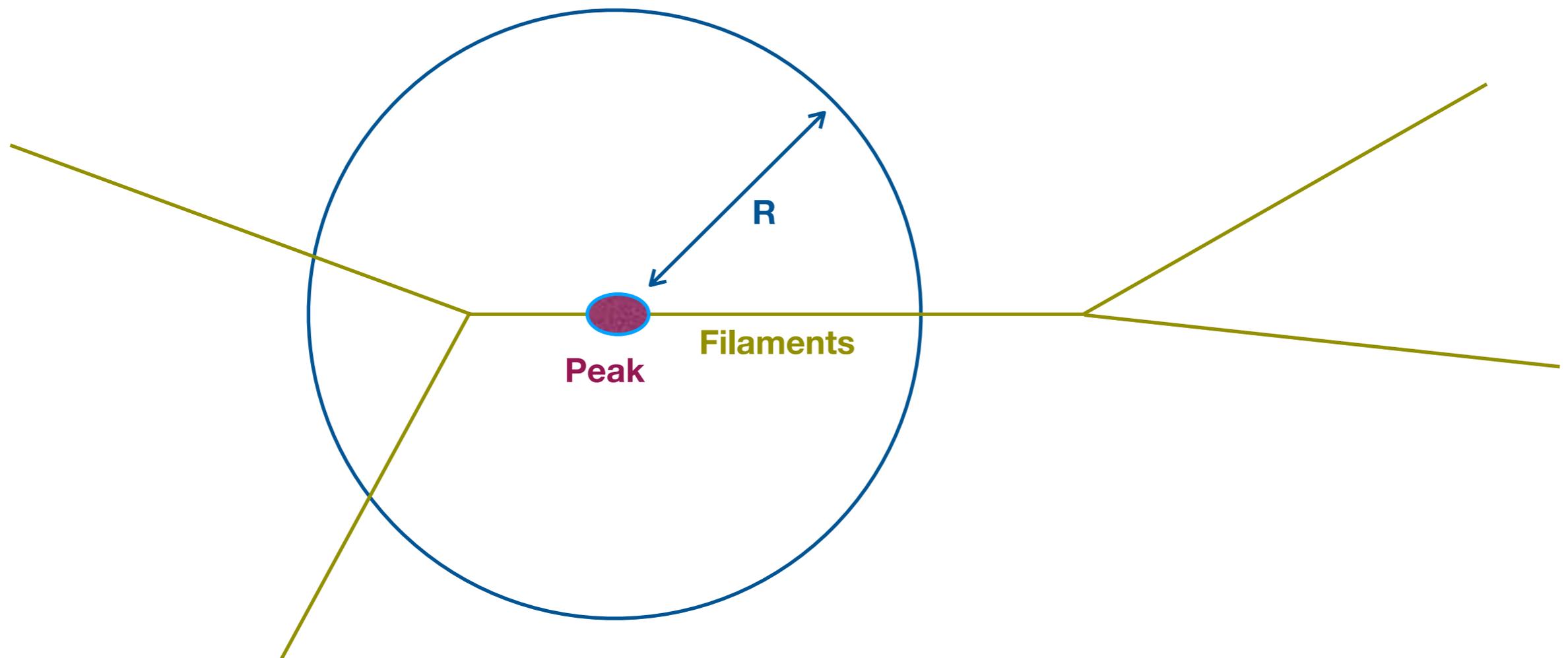
# Théorie de la multiplicité locale?

On peut compter le nombre de filaments intersectant une sphère de rayon  $R$  autour du pic central....



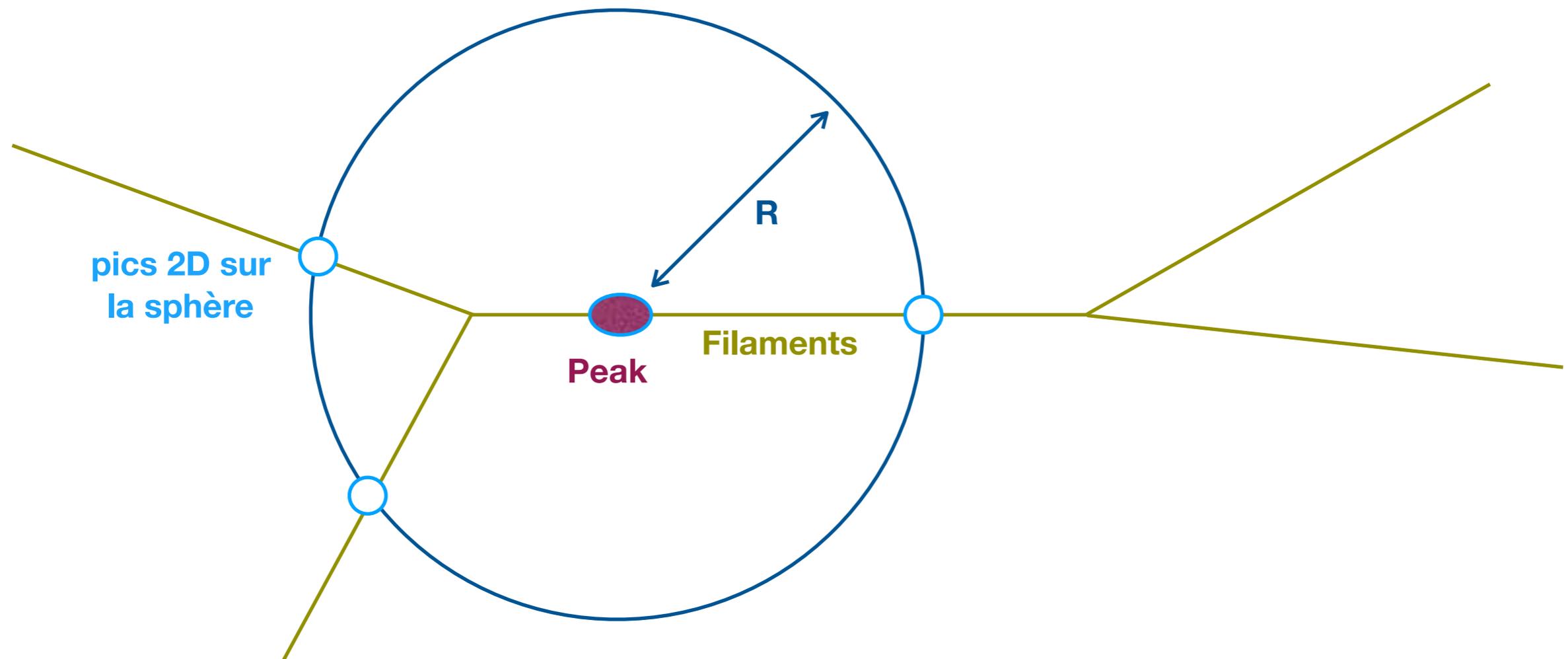
# Théorie de la multiplicité locale?

On peut compter le nombre de filaments intersectant une sphère de rayon  $R$  autour du pic central....

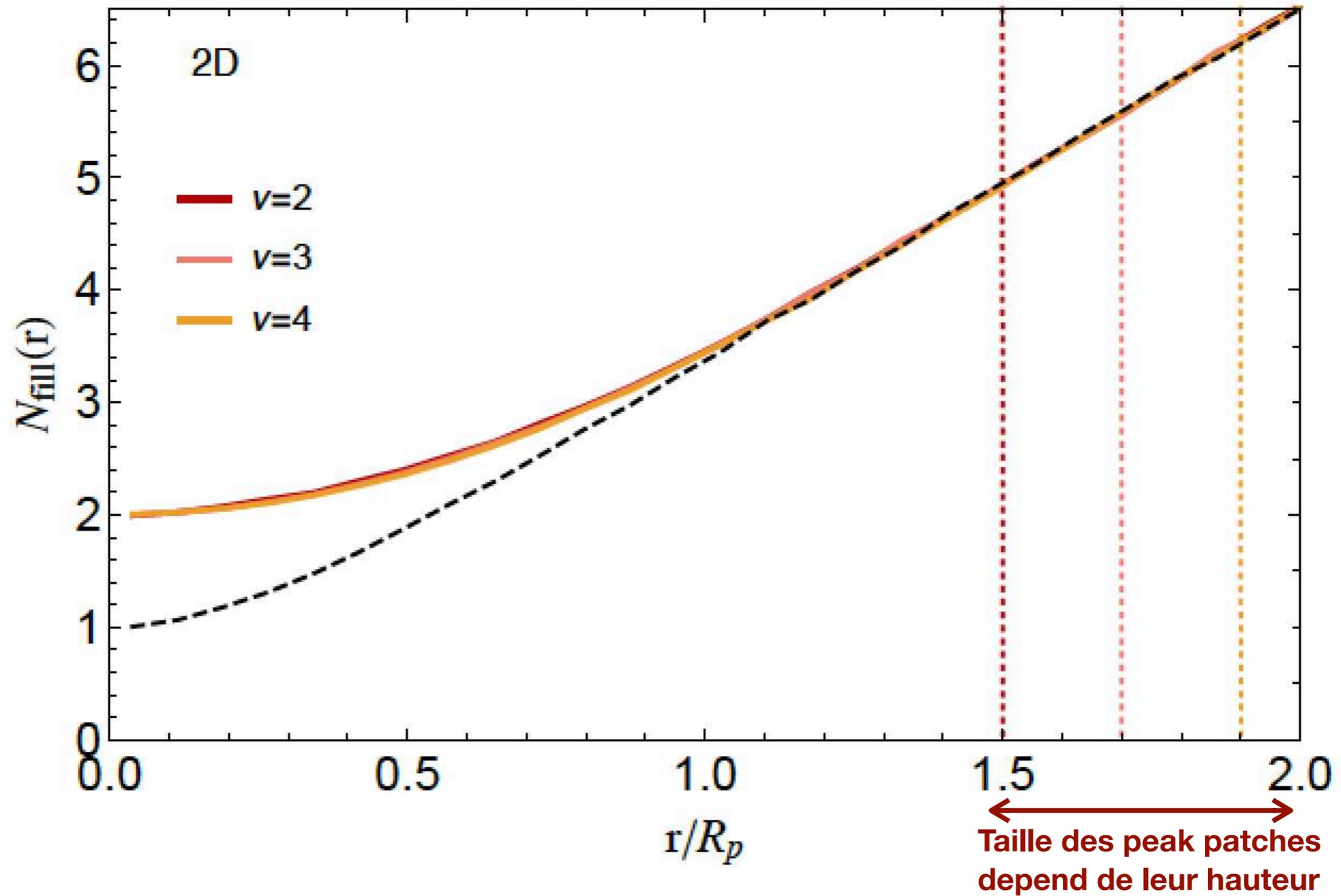


# Théorie de la multiplicité locale?

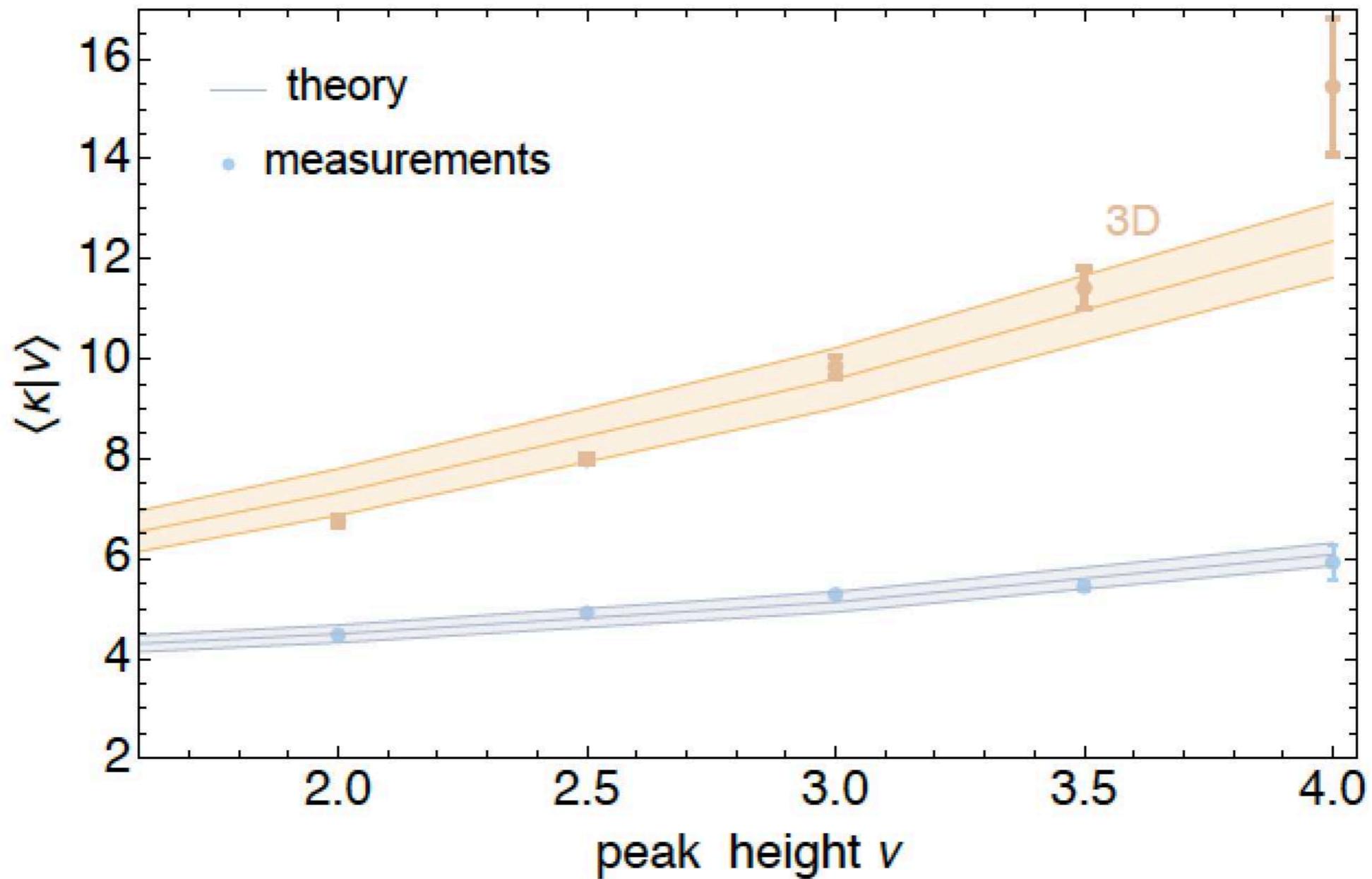
On peut compter le nombre de filaments intersectant une sphère de rayon  $R$  autour du pic central....



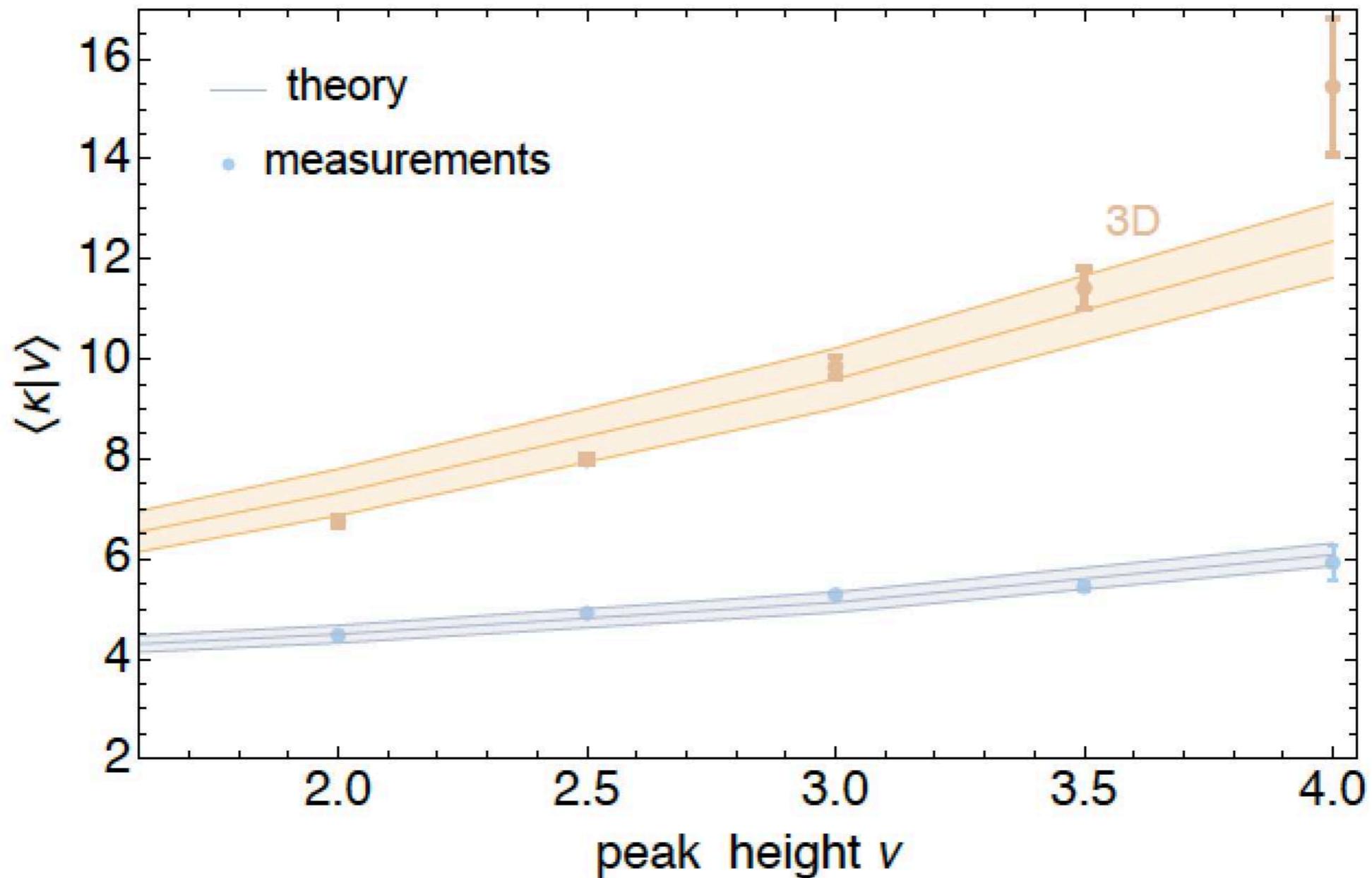
# Théorie de la multiplicité locale?



# Local multiplicity: towards a theoretical prediction

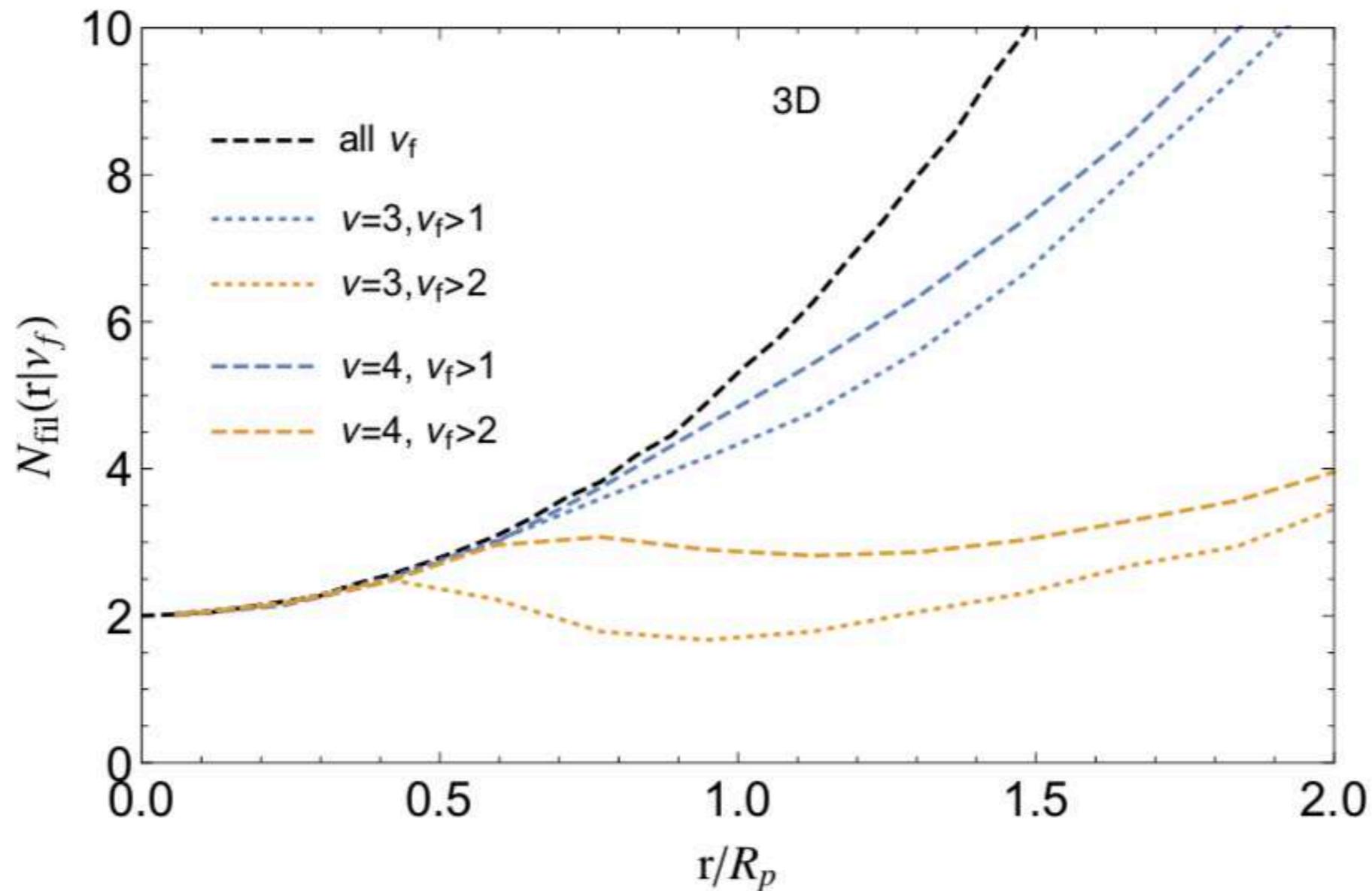


# Local multiplicity: towards a theoretical prediction



Mais ces filaments sont-ils suffisamment denses pour être pertinents?

# Local multiplicity: towards a theoretical prediction

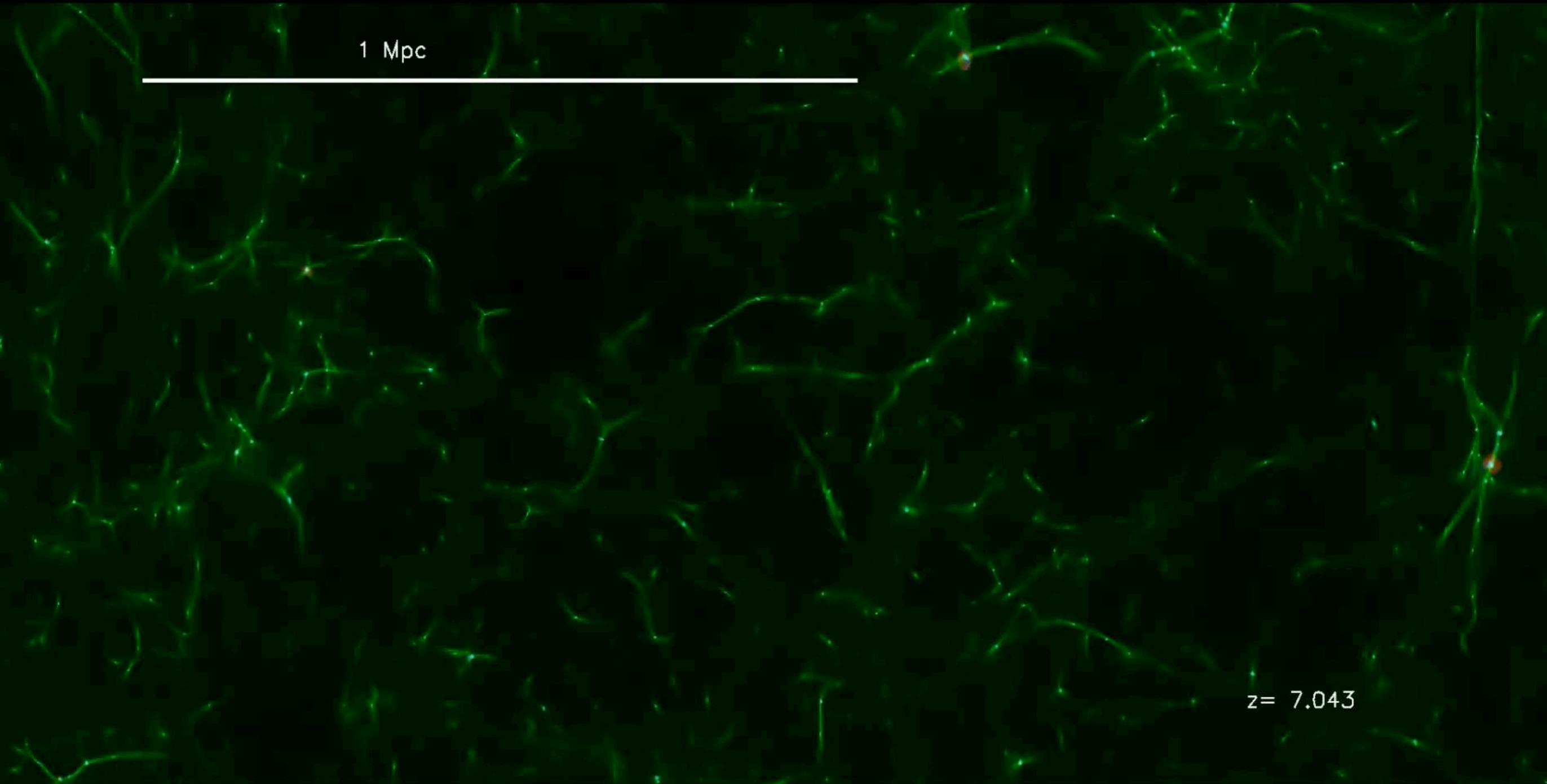


Typiquement, 2 à 3 filaments denses dominant et définissent donc un **plan d'accrétion**... en accord avec les simulations numériques (e.g Danovich+12) et les observations de plans de satellites autour de galaxies centrales.

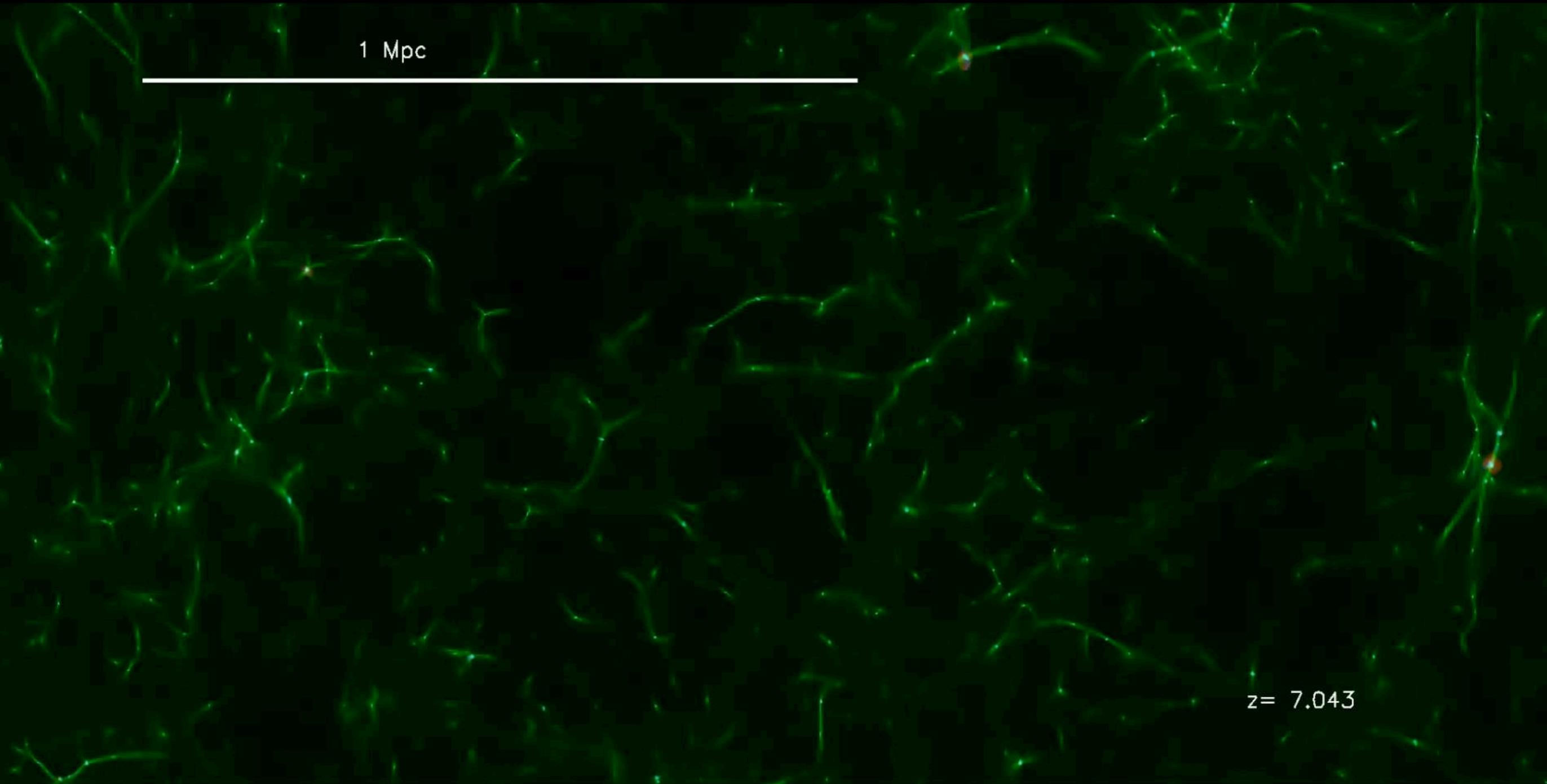
# Le squelette cosmique

- ▶ Origine de la toile cosmique
- ▶ Le squelette cosmique
- ▶ Cosmologie et formation des galaxies

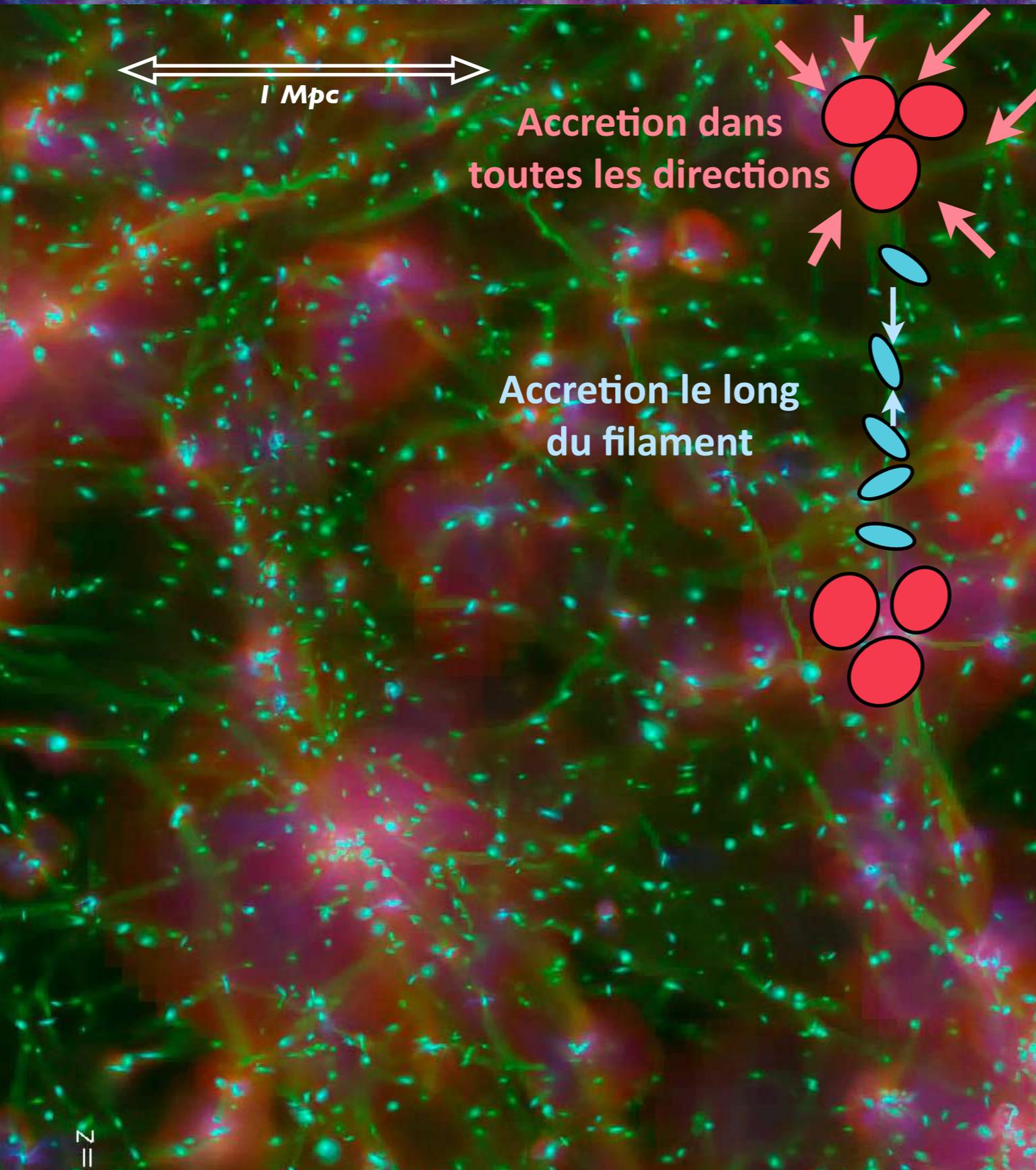
# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique



# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique



# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique

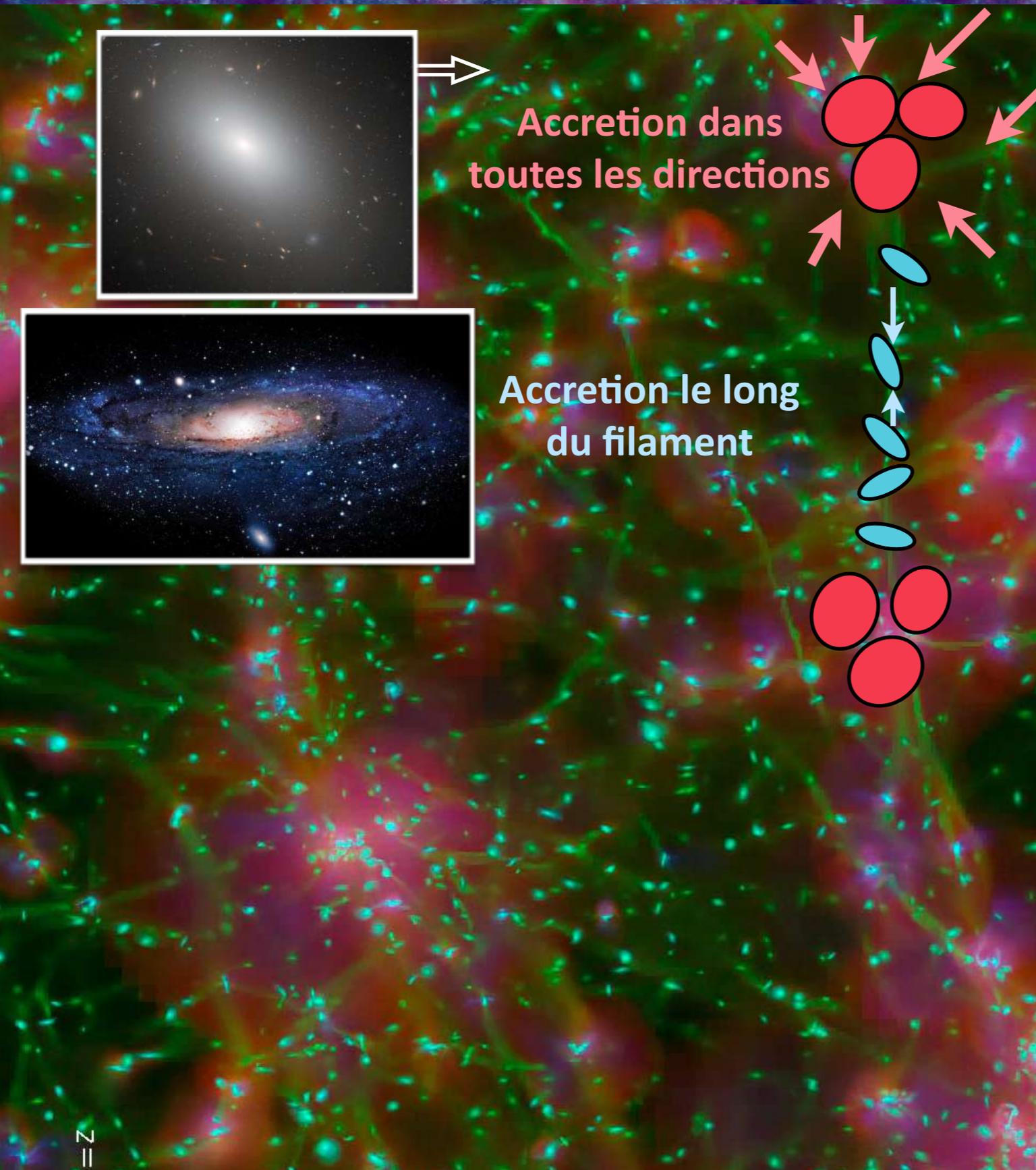


L'environnement a un impact sur les propriétés des galaxies car il influence en particulier l'accrétion de matière.

Aux noeuds de la toile cosmique, on retrouve les galaxies (Oemler 74, Guzzo+97):

-les plus massives

# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique

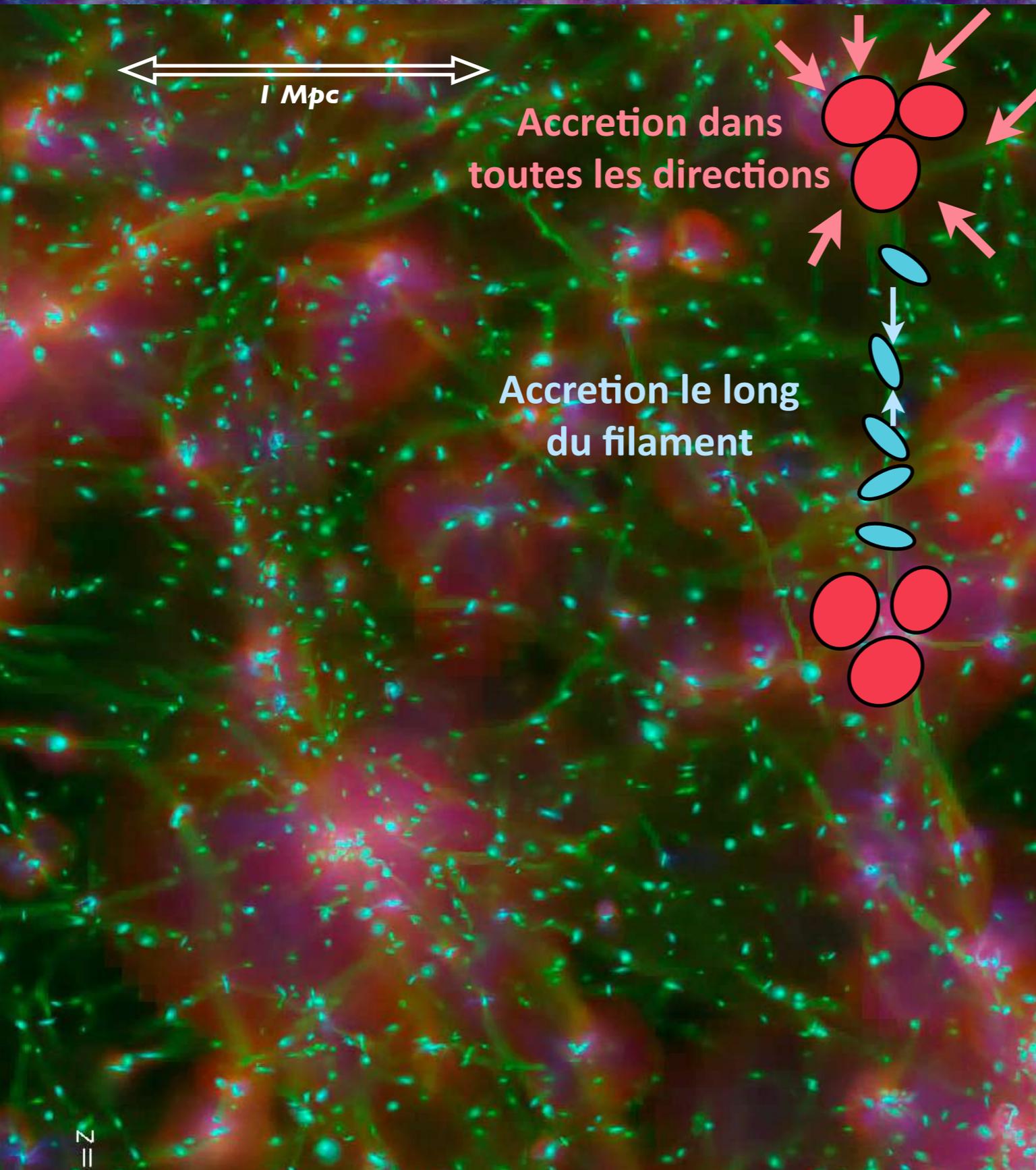


L'environnement a un impact sur les propriétés des galaxies car il influence en particulier l'accrétion de matière.

Aux noeuds de la toile cosmique, on retrouve les galaxies (Oemler 74, Guzzo+97):

- les plus massives
- plutôt des elliptiques

# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique

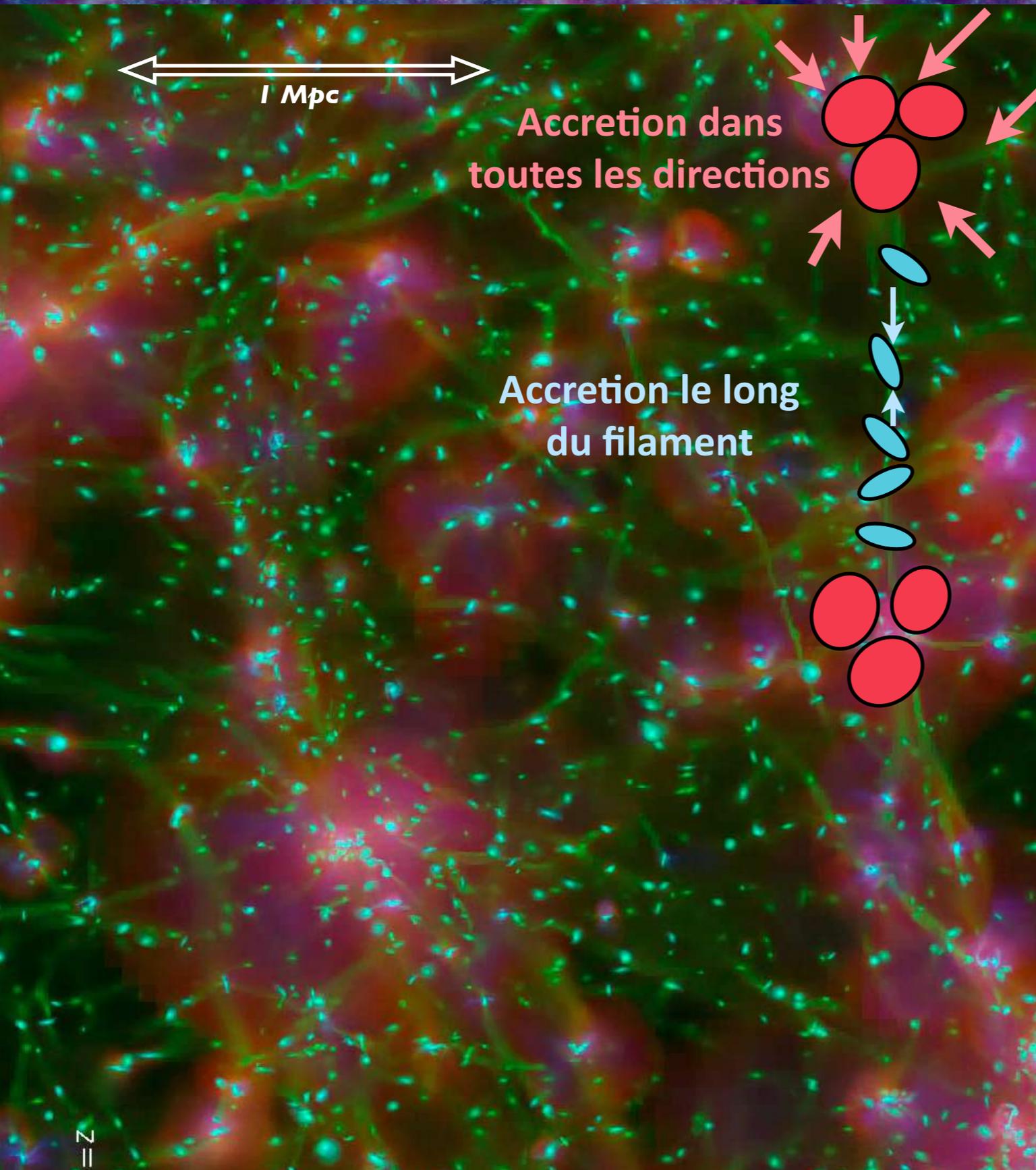


L'environnement a un impact sur les propriétés des galaxies car il influence en particulier l'accrétion de matière.

Aux noeuds de la toile cosmique, on retrouve les galaxies (Oemler 74, Guzzo+97):

- les plus massives
- plutôt des elliptiques
- qui sont passives (ne forment plus d'étoiles)

# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique



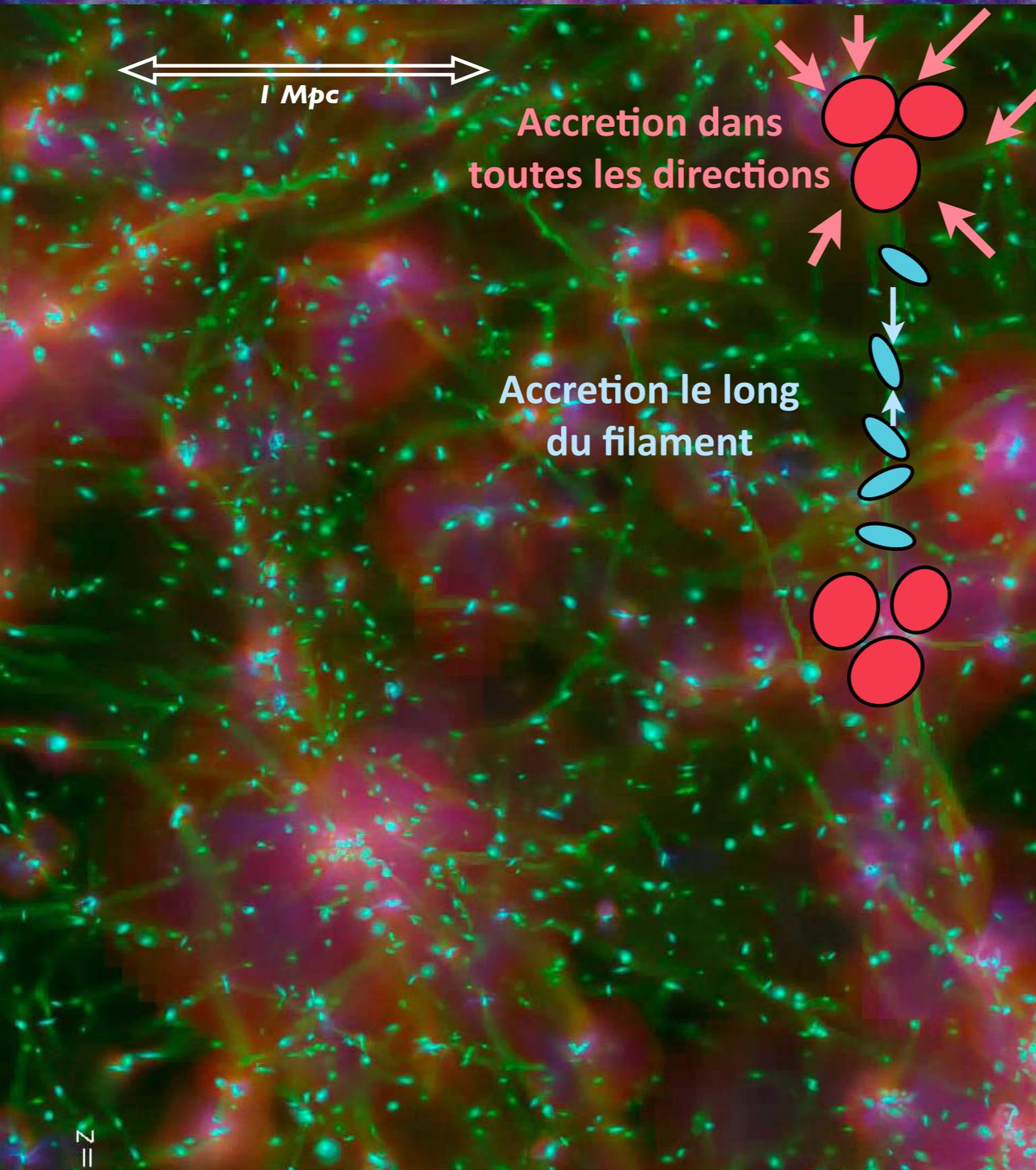
L'environnement a un impact sur les propriétés des galaxies car il influence en particulier l'accrétion de matière.

Aux noeuds de la toile cosmique, on retrouve les galaxies (Oemler 74, Guzzo+97):

- les plus massives
- plutôt des elliptiques
- qui sont passives (ne forment plus d'étoiles)

**Au delà d'un effet isotrope?**

# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique



L'environnement a un impact sur les propriétés des galaxies car il influence en particulier l'accrétion de matière.

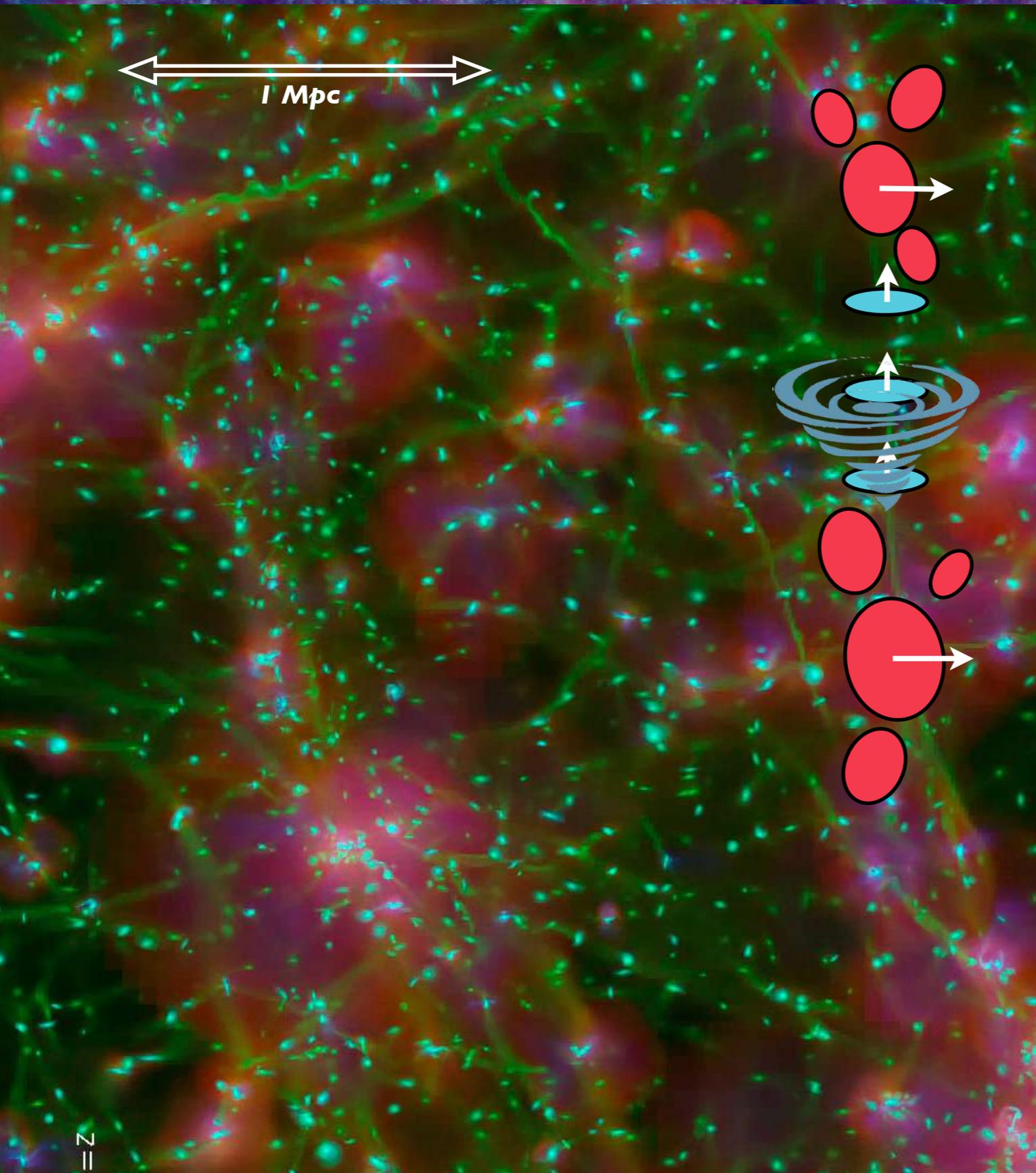
Aux noeuds de la toile cosmique, on retrouve les galaxies (Oemler 74, Guzzo+97):

- les plus massives
- plutôt des elliptiques
- qui sont passives (ne forment plus d'étoiles)

## **Au delà d'un effet isotrope?**

- qtés scalaires: difficile! (ex: biais d'assemblage)
- qtés vectorielles, tensorielles

# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique



L'environnement a un impact sur les propriétés des galaxies car il influence en particulier l'accrétion de matière.

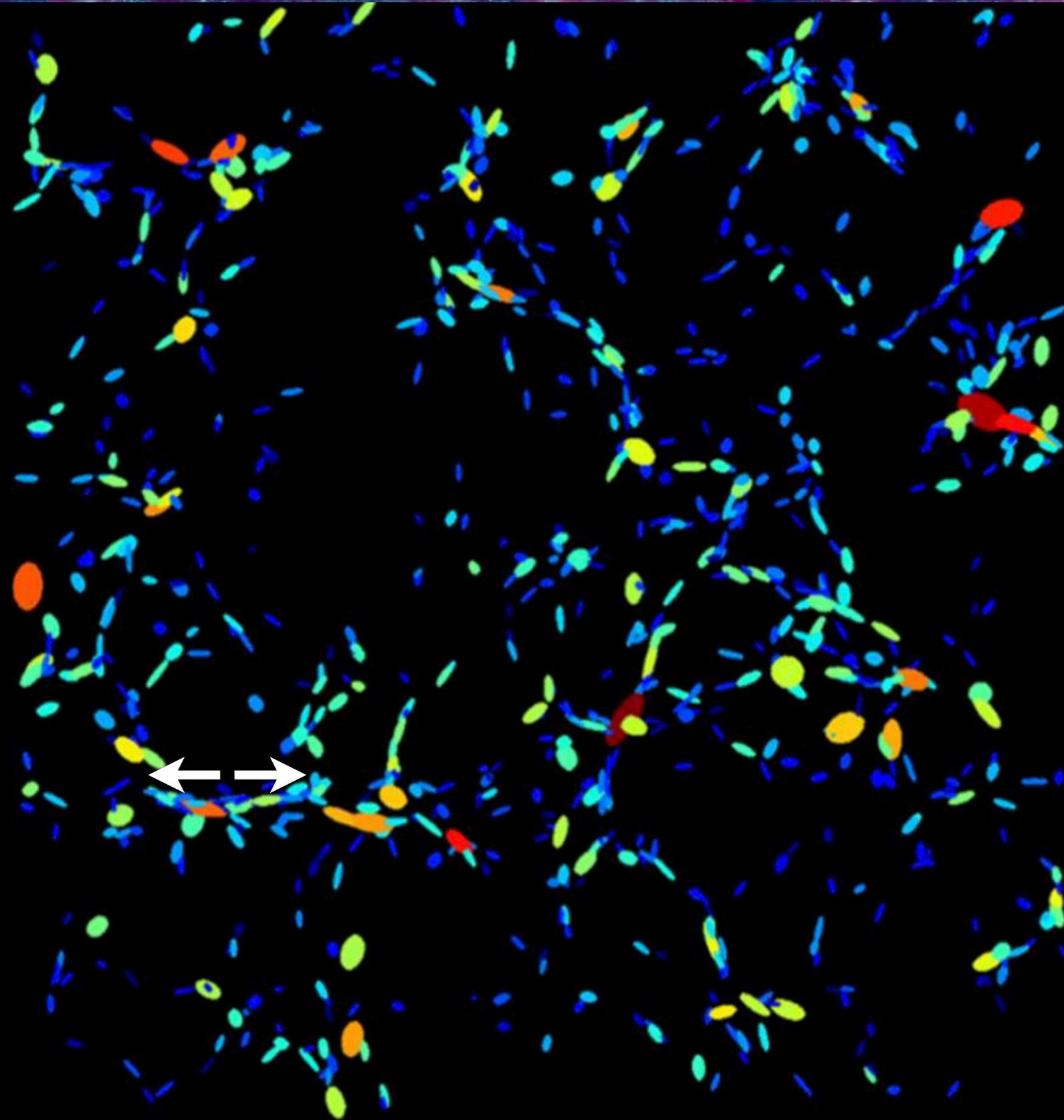
Aux noeuds de la toile cosmique, on retrouve les galaxies (Oemler 74, Guzzo+97):

- les plus massives
- plutôt des elliptiques
- qui sont passives (ne forment plus d'étoiles)

## **Au delà d'un effet isotrope?**

L'axe de rotation des galaxies spirales a tendance à s'aligner avec les filaments.

# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique



L'environnement a un impact sur les propriétés des galaxies car il influence en particulier l'accrétion de matière.

Aux noeuds de la toile cosmique, on retrouve les galaxies (Oemler 74, Guzzo+97):

- les plus massives
- plutôt des elliptiques
- qui sont passives (ne forment plus d'étoiles)

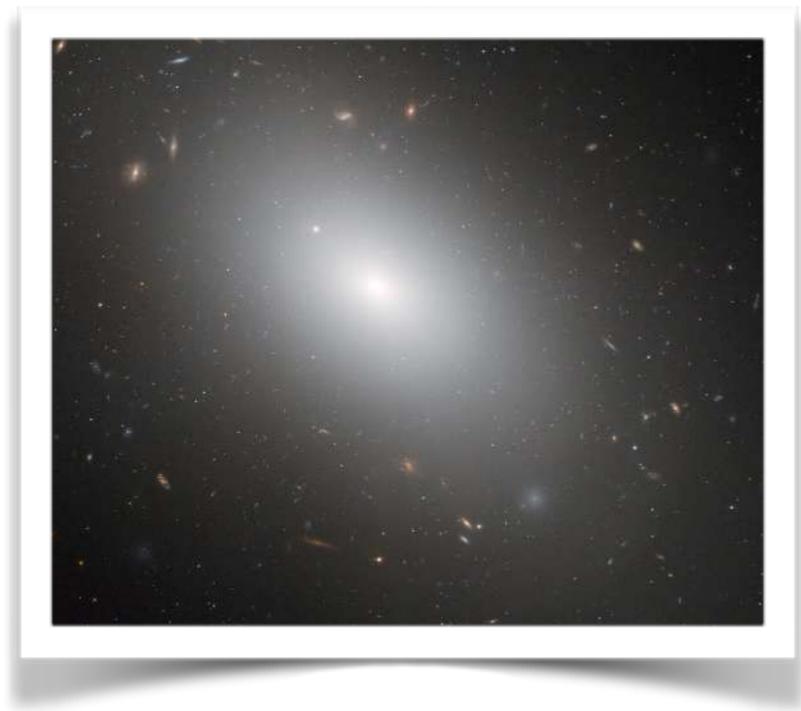
## **Au delà d'un effet isotrope?**

L'axe de rotation des galaxies spirales a tendance à s'aligner avec les filaments.

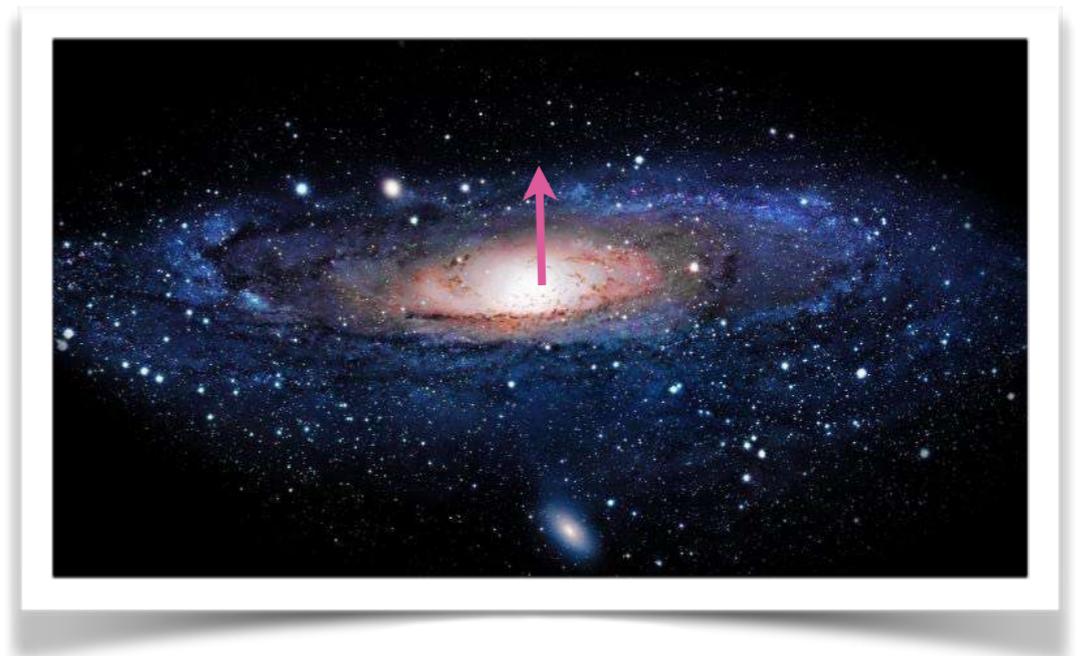
Les galaxies elliptiques s'étirent le long des filaments.

**Explication...**

# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique



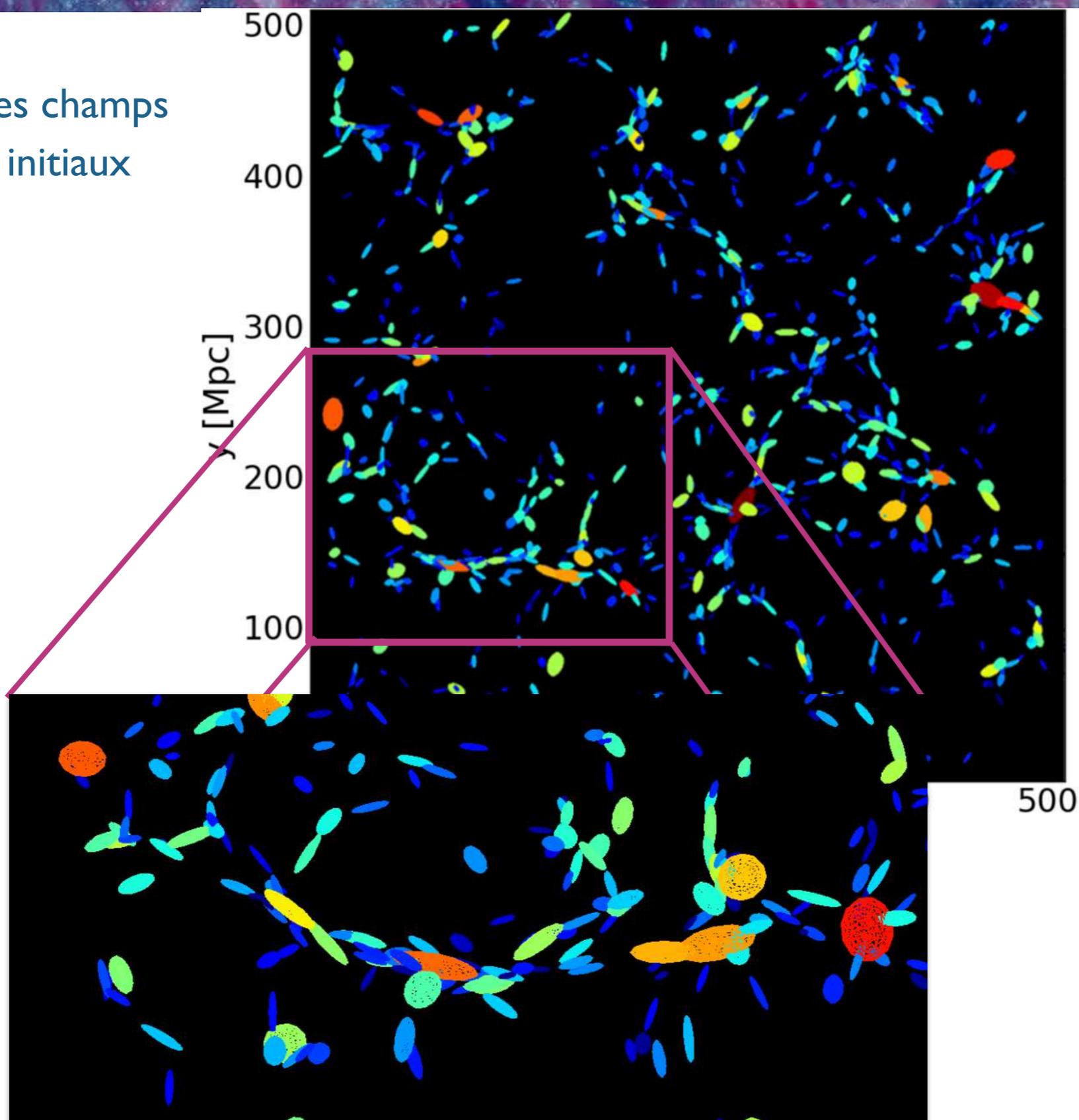
Les **elliptiques** sont étirées par l'effet des champs de marée (tidal stretching) et sujettes à l'accrétion anisotrope.



Les **spiraux** sont dominées par leur **spin** qui est acquis au temps de formation par effet de couple de marée (tidal torquing).

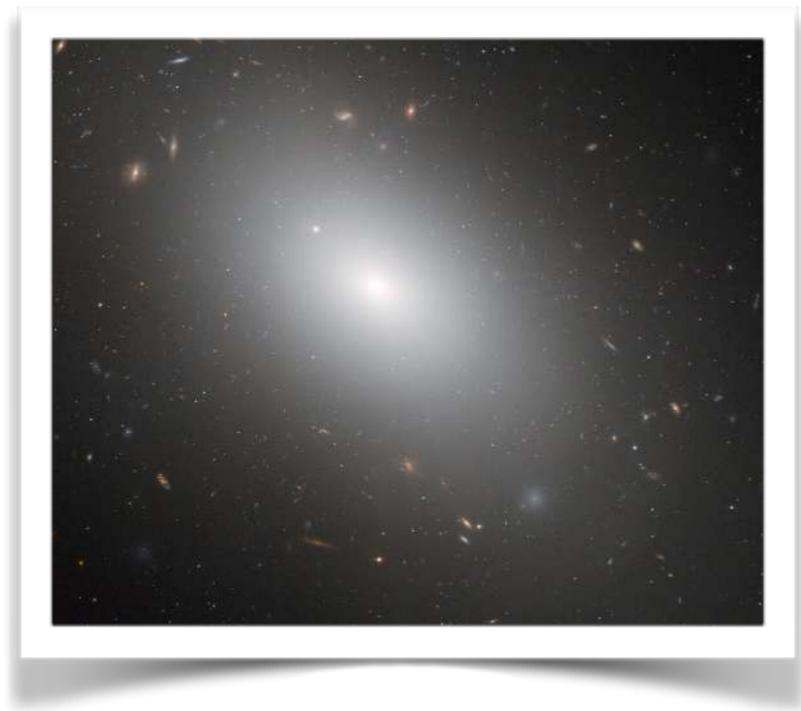
# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique

asymétrie des champs  
de marée initiaux

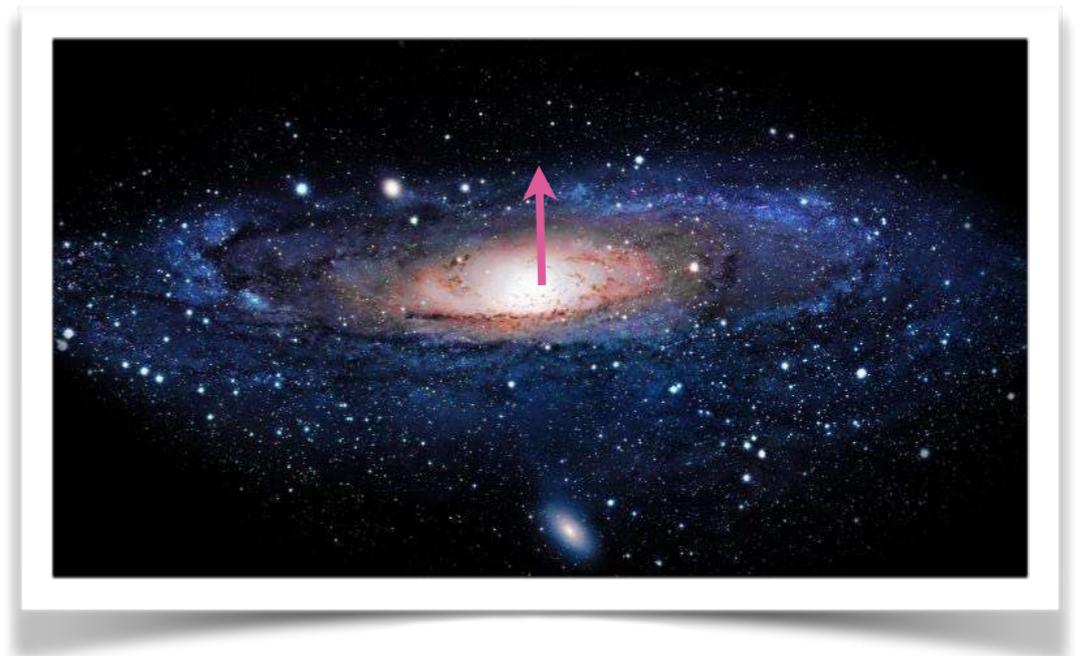


CITA group: Alvarez, Bond,  
SC, Regaldo, Stein

# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique



Les **elliptiques** sont étirées par l'effet des champs de marée (tidal stretching) et sujettes à l'accrétion anisotrope.

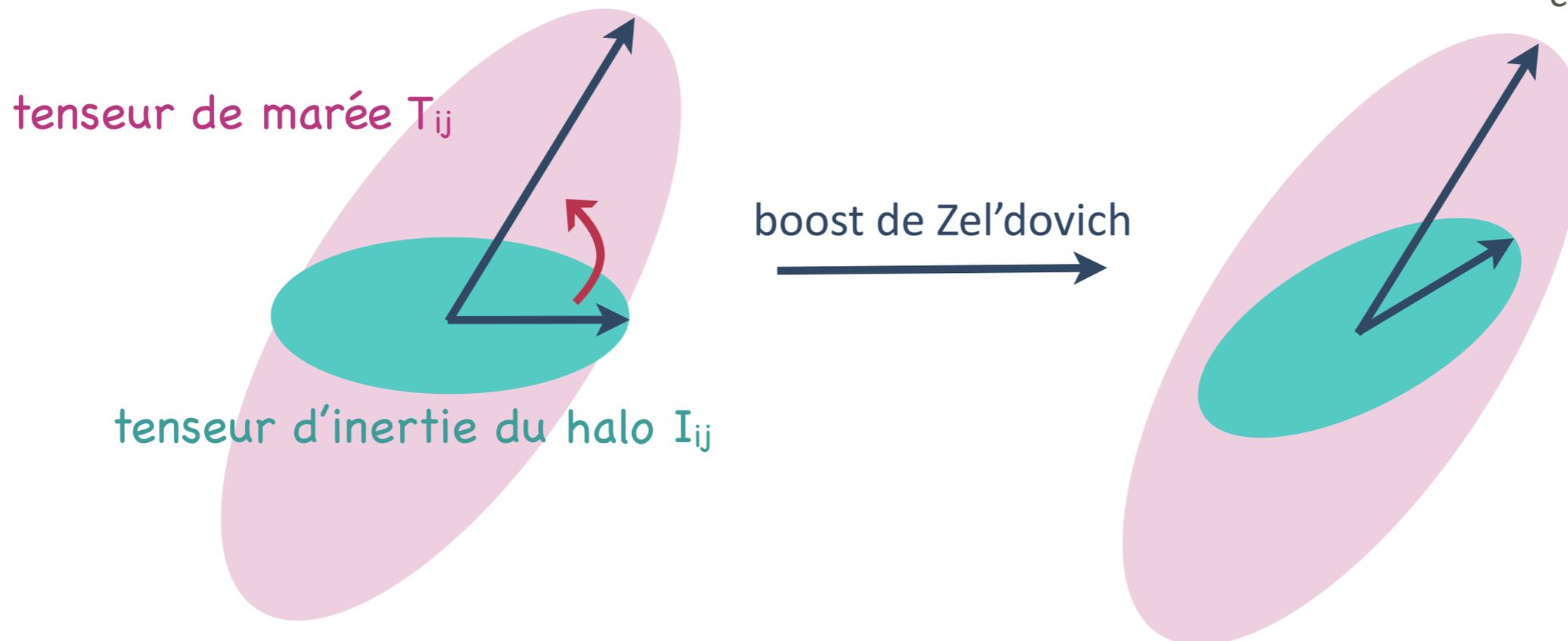


Les **spirales** sont dominées par leur **spin** qui est acquis au temps de formation par effet de couple de marée (tidal torquing).

# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique

## Théorie des couples de marée:

Hoyle49, Doroshkevich70,  
White 84, Heavens+88,  
Catelan+96, Crittenden+01,  
Schafer09,...

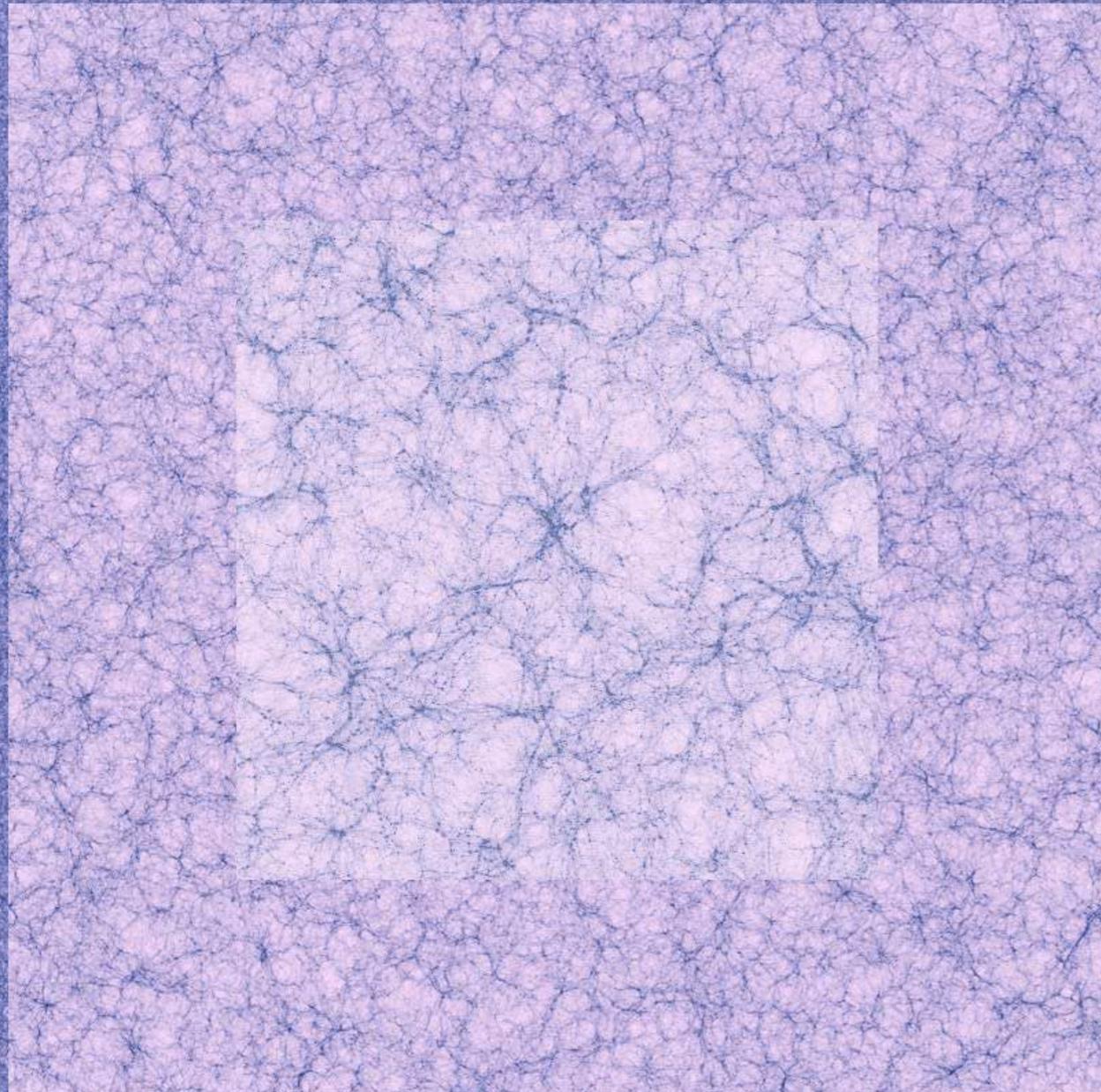


Les champs de marée environnants exercent un couple sur l'objet en formation qui peut acquérir du spin jusqu'à son moment de formation proportionnellement au désalignement de  $I$  et  $T$ :

$$L_k \propto \epsilon_{ijk} I_{li} T_{lj}$$

**Comment sont affectés les axes de rotation des galaxies?**

# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique



simulation Horizon-4Pi: *Teyssier+09*

DM uniquement

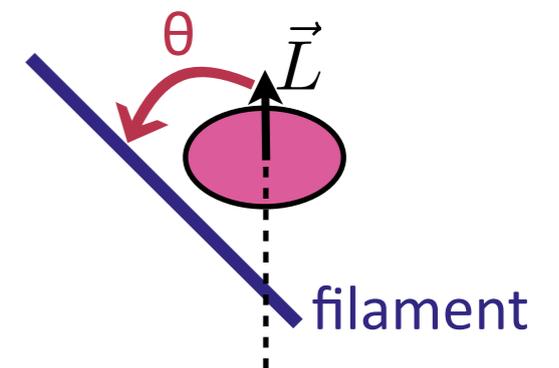
2Gpc/h

73 millions de halos à  $z=0$

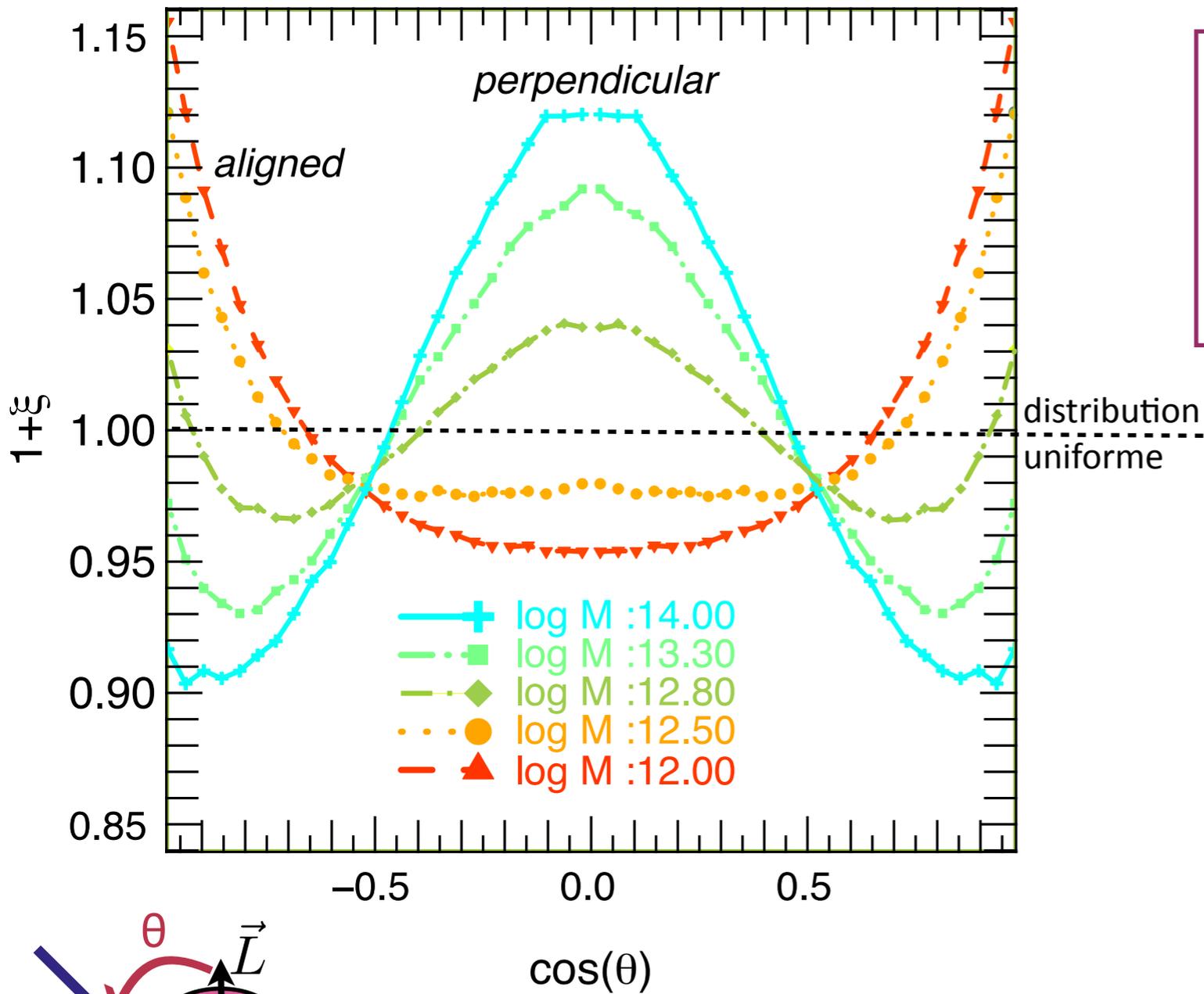
filaments extraits avec le squelette global *Sousbie+09*

Les spins sont définis comme:

$$\vec{L} = m \sum_i (\vec{r}_i - \vec{r}_0)(\vec{v}_i - \vec{v}_0)$$



# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique



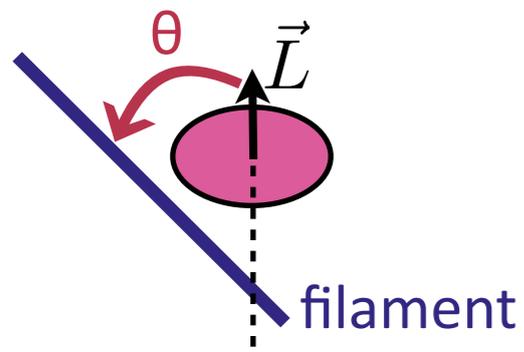
alignement entre spins et filaments:

$M < M_{\text{tr}}$  : alignés

$M > M_{\text{tr}}$  : perpendiculaires

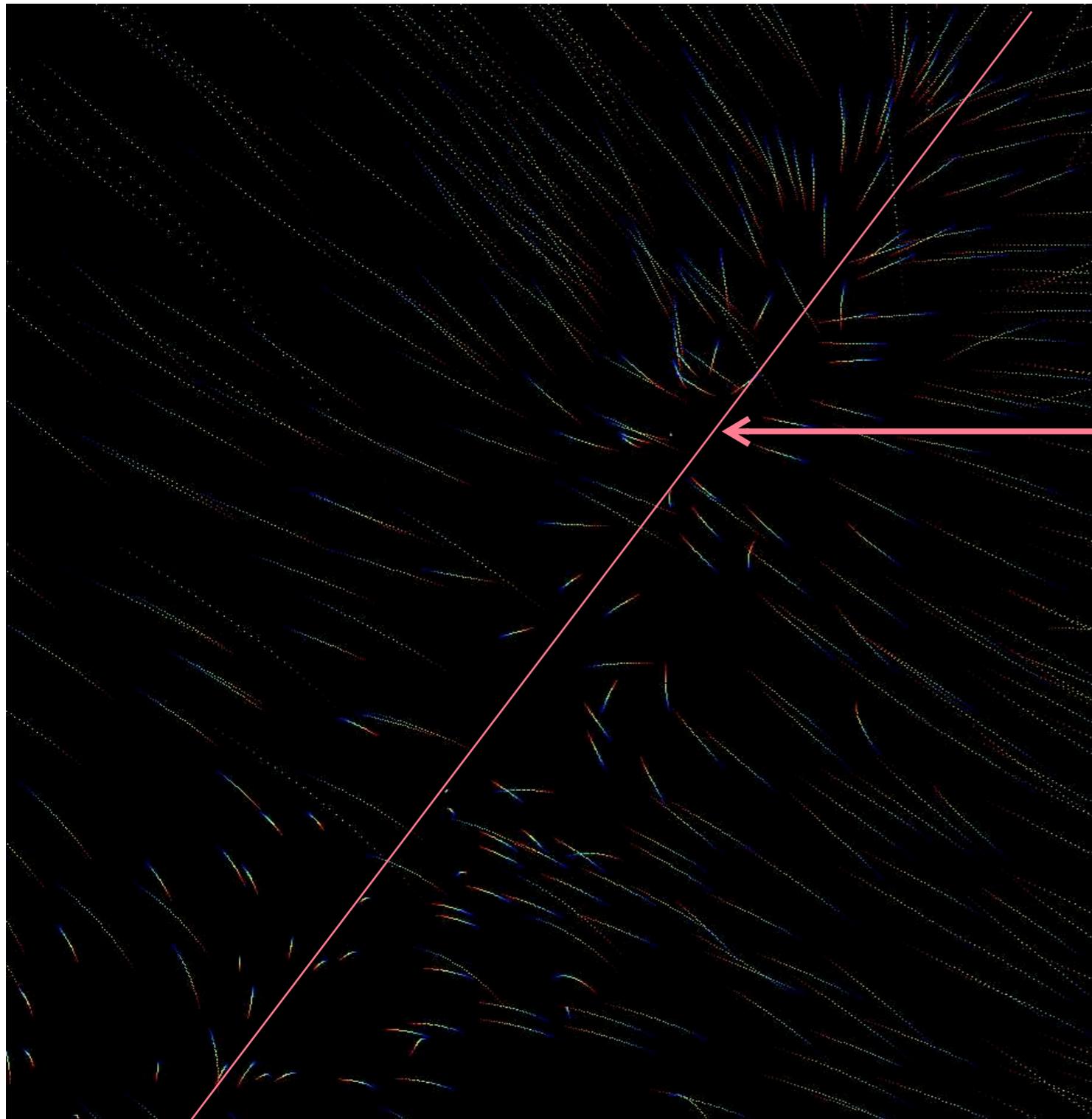
$M_{\text{tr}} = 5.10^{12} M_{\text{sun}}$

explication?



# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique

## La formation des filaments génère de la vorticité...



Première génération de petits halos par enroulement des murs.

filament en formation

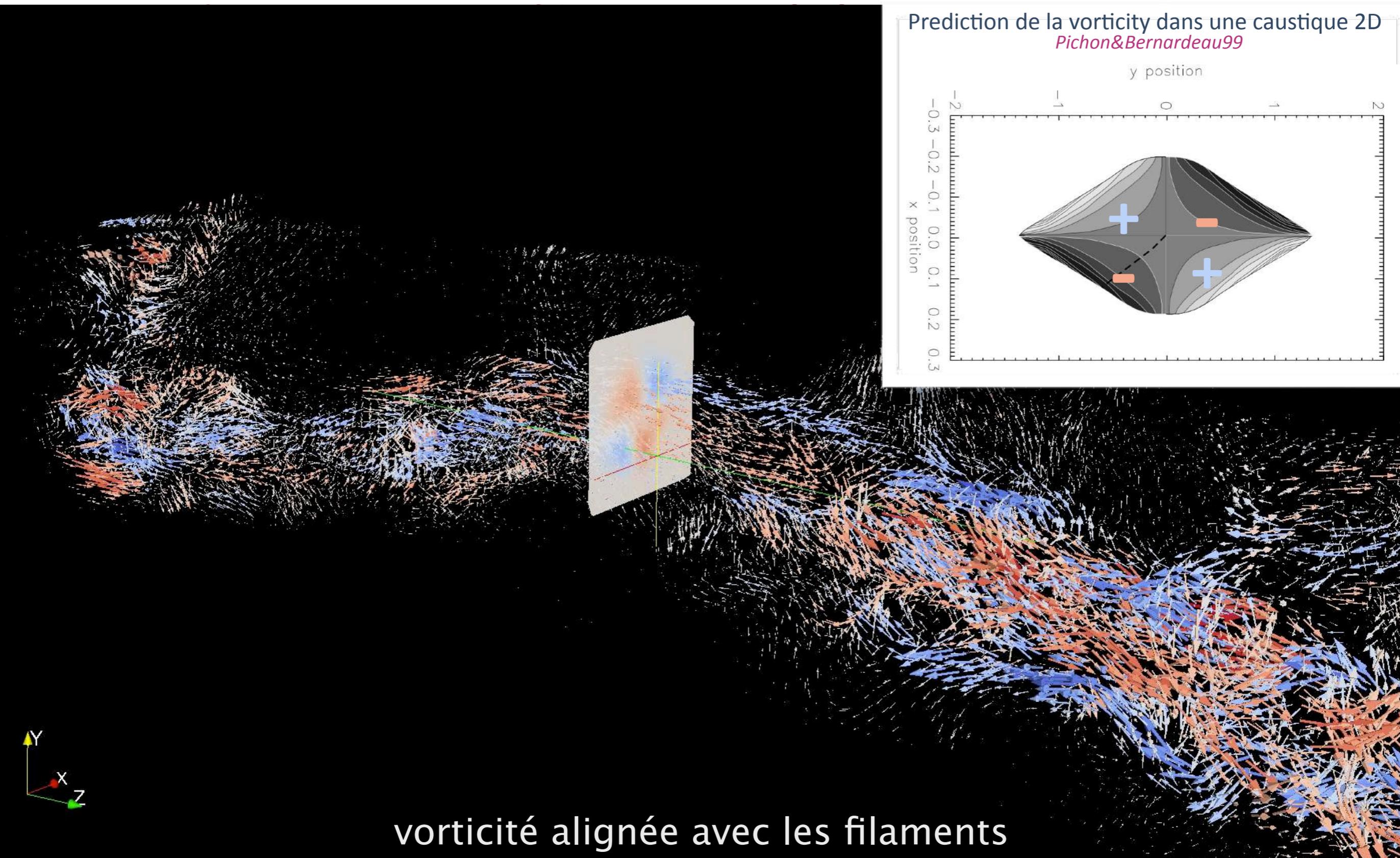
La vorticité est crée dans les régions multi-flots qui définissent les filaments



$$\omega = \nabla \times \vec{v}$$

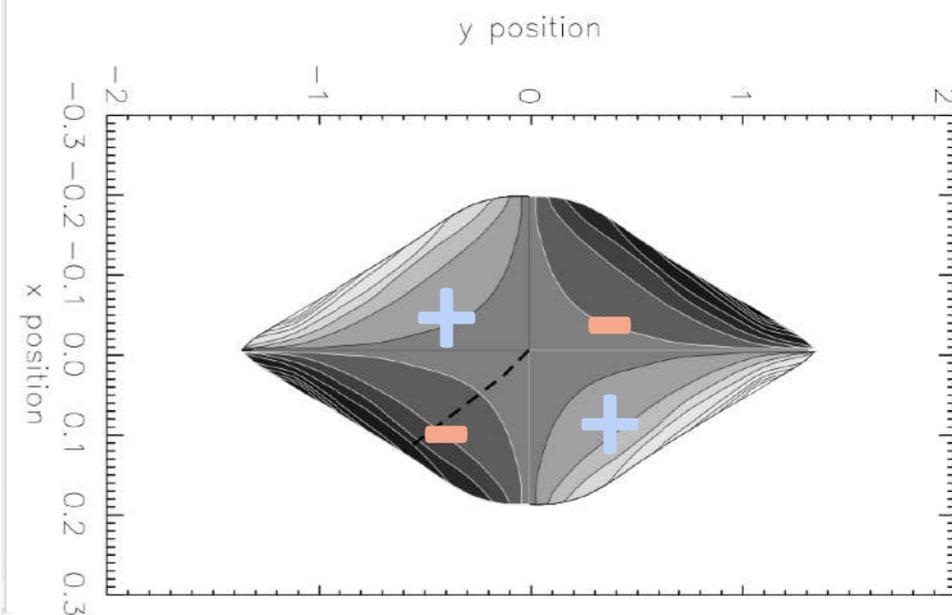
vorticité = rotationnel de la vitesse

# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique



Prediction de la vorticité dans une caustique 2D

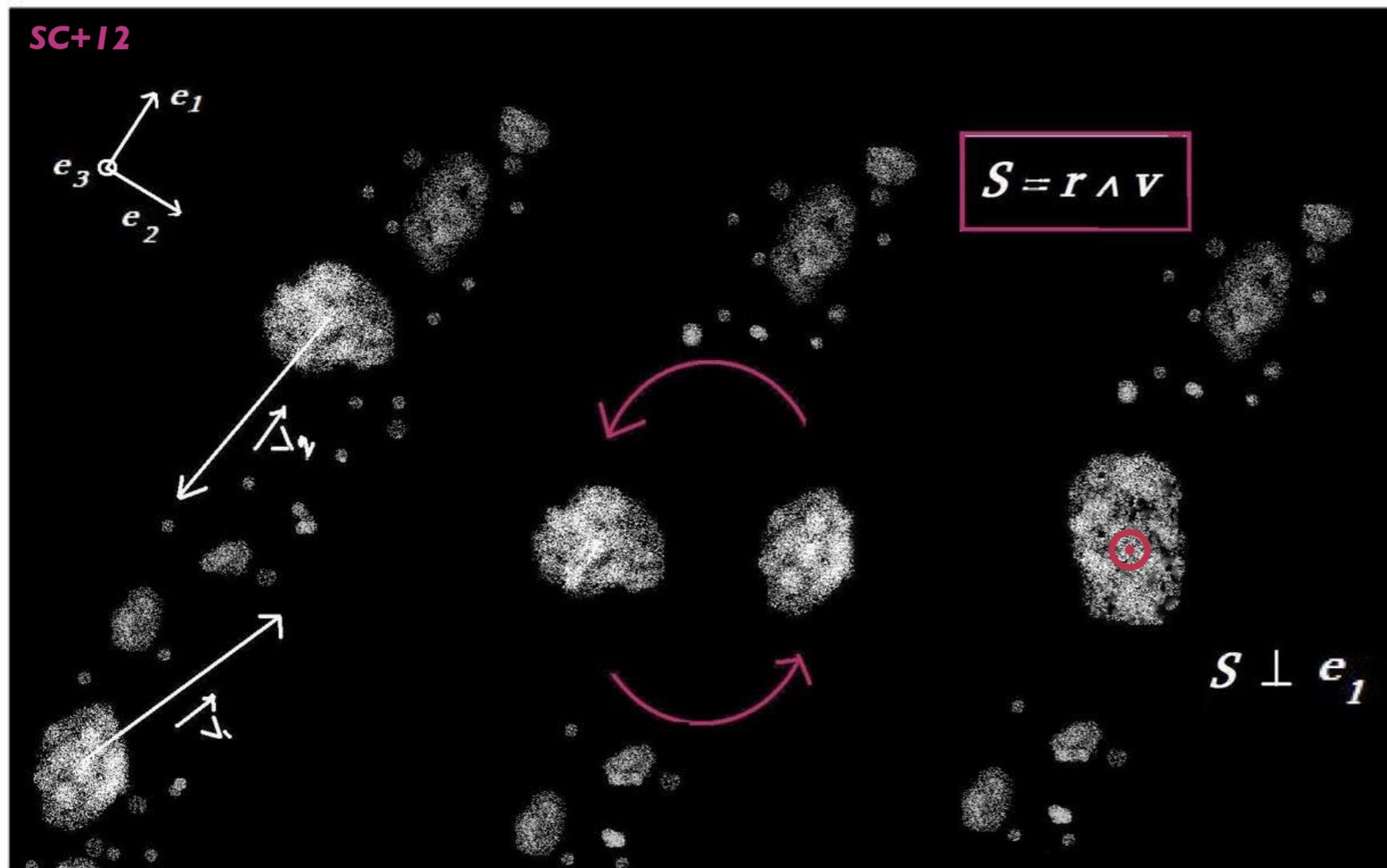
*Pichon&Bernardeau99*



vorticité alignée avec les filaments

# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique

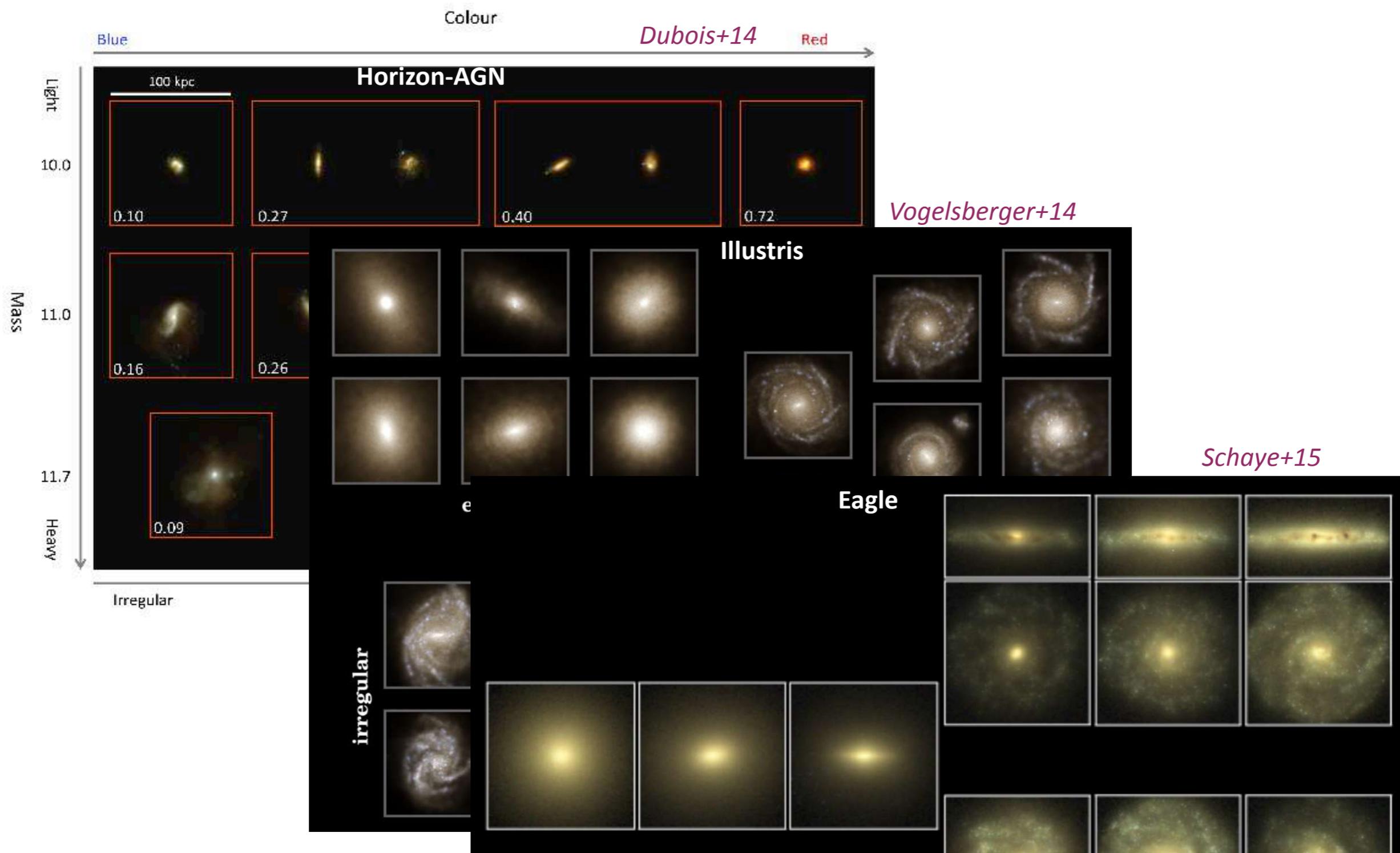
## Les fusions engendrent du spin perpendiculaire



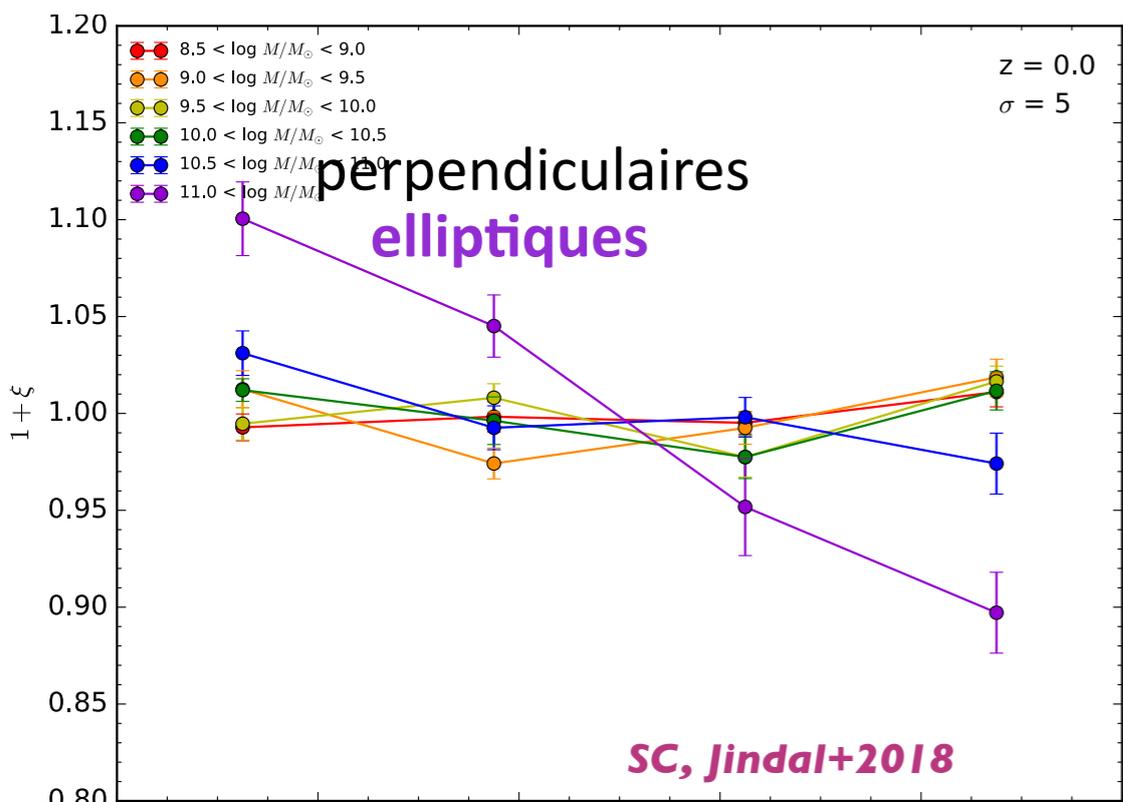
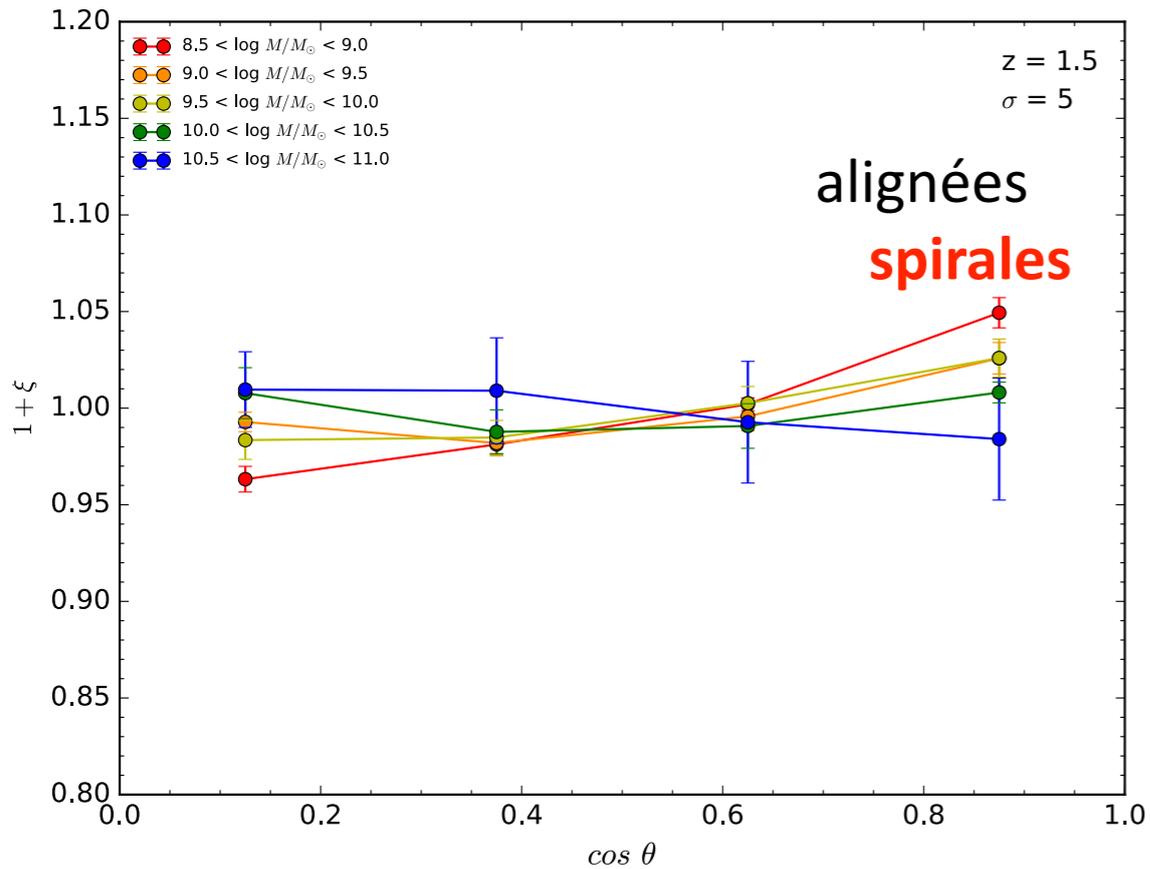
- ◎ Première génération de petits halos avec du spin //
- ◎ **Fusions** le long des filaments pour créer des halos plus massifs avec du spin perpendiculaire *Welker+14*

# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique

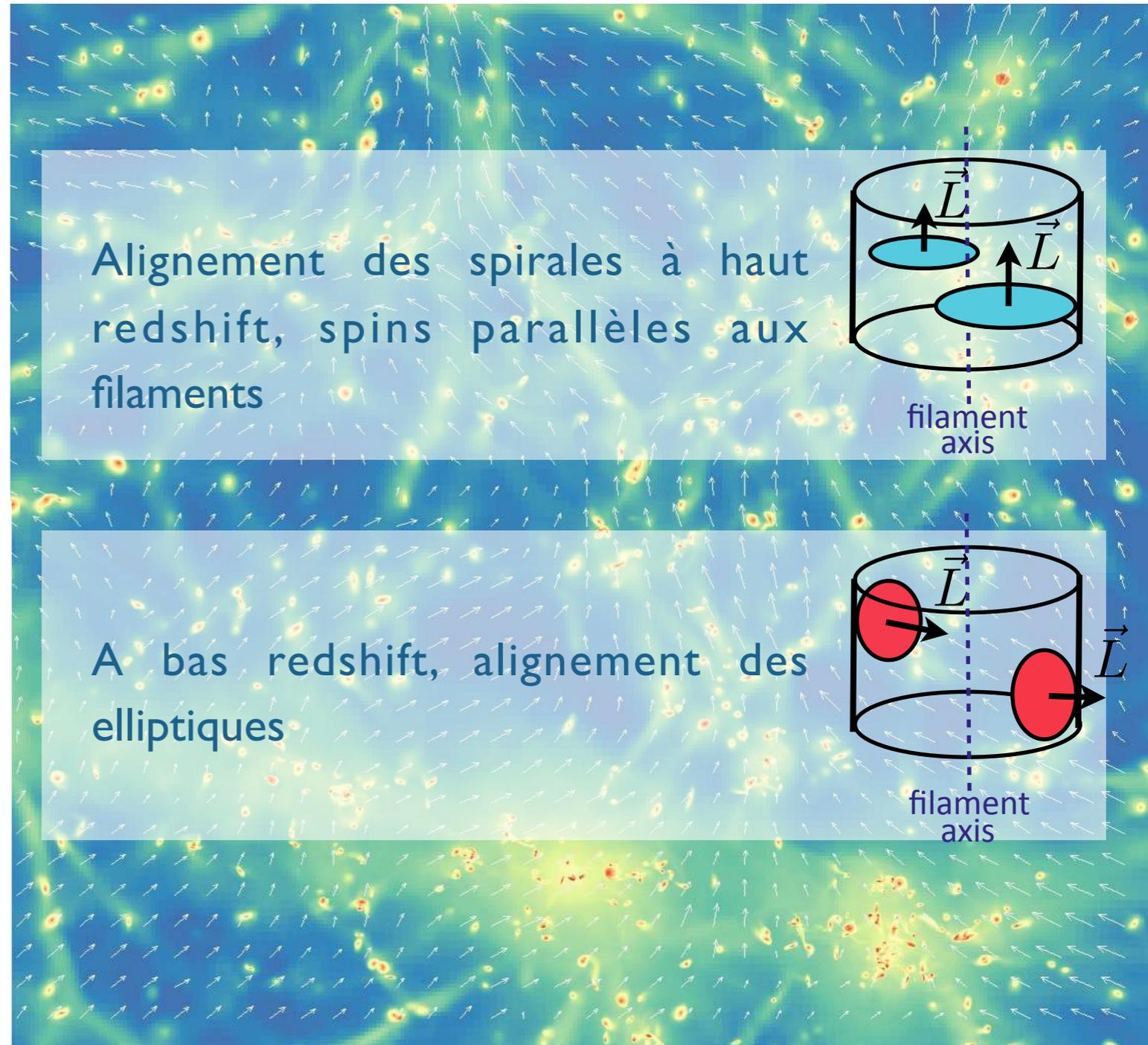
## Baryons?



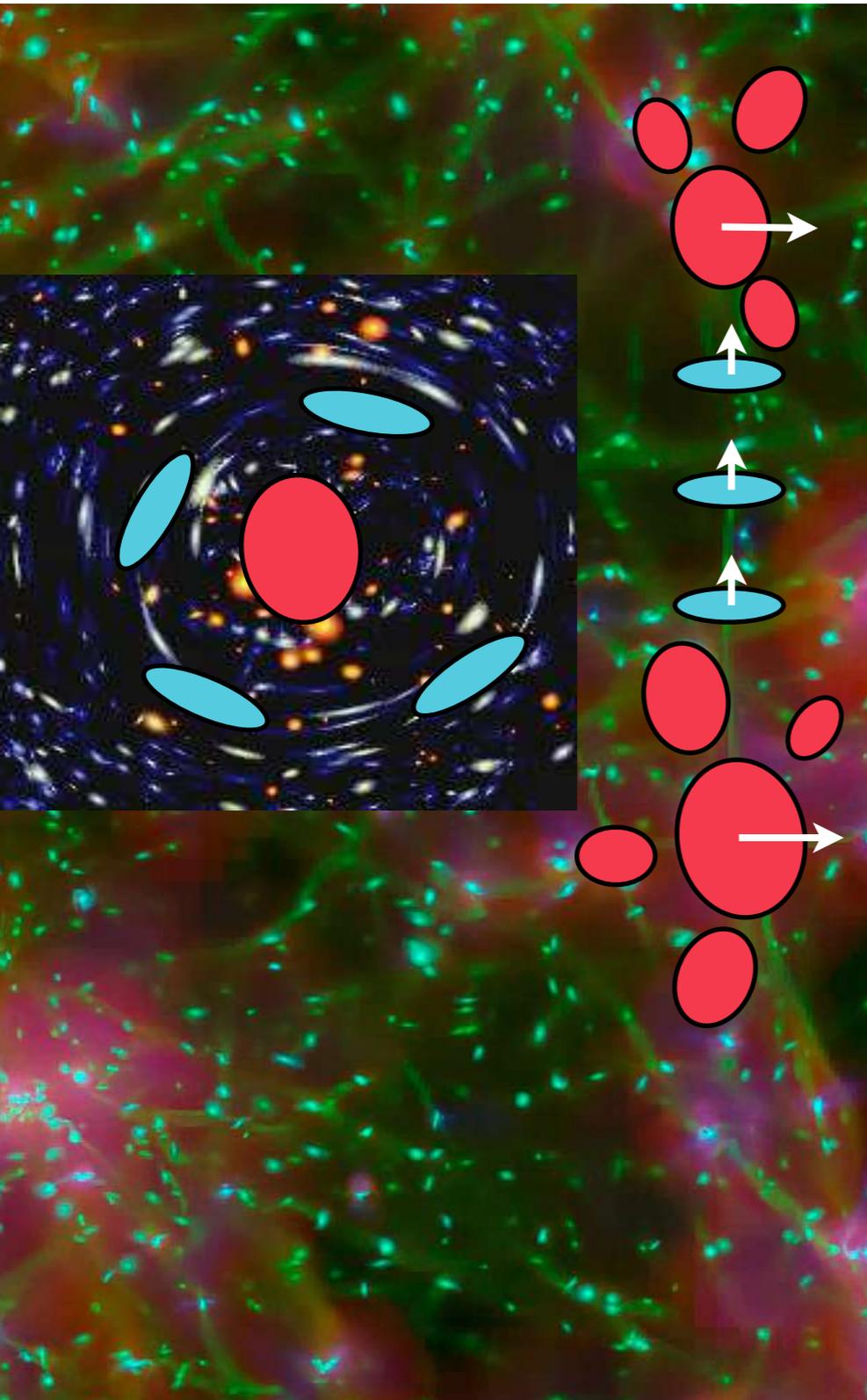
# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique



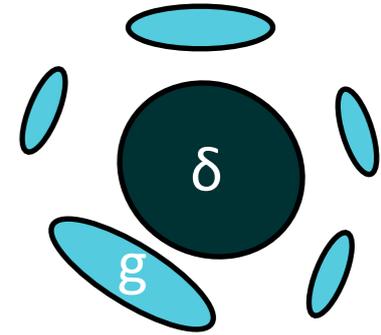
## Baryons?



# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique



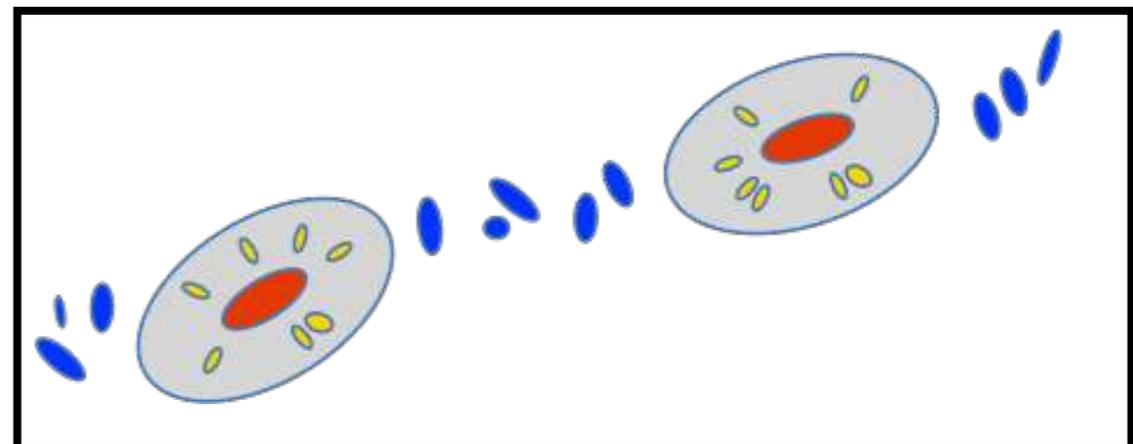
Ces alignements de galaxies biaisent les expériences basées sur l'astigmatisme cosmique.



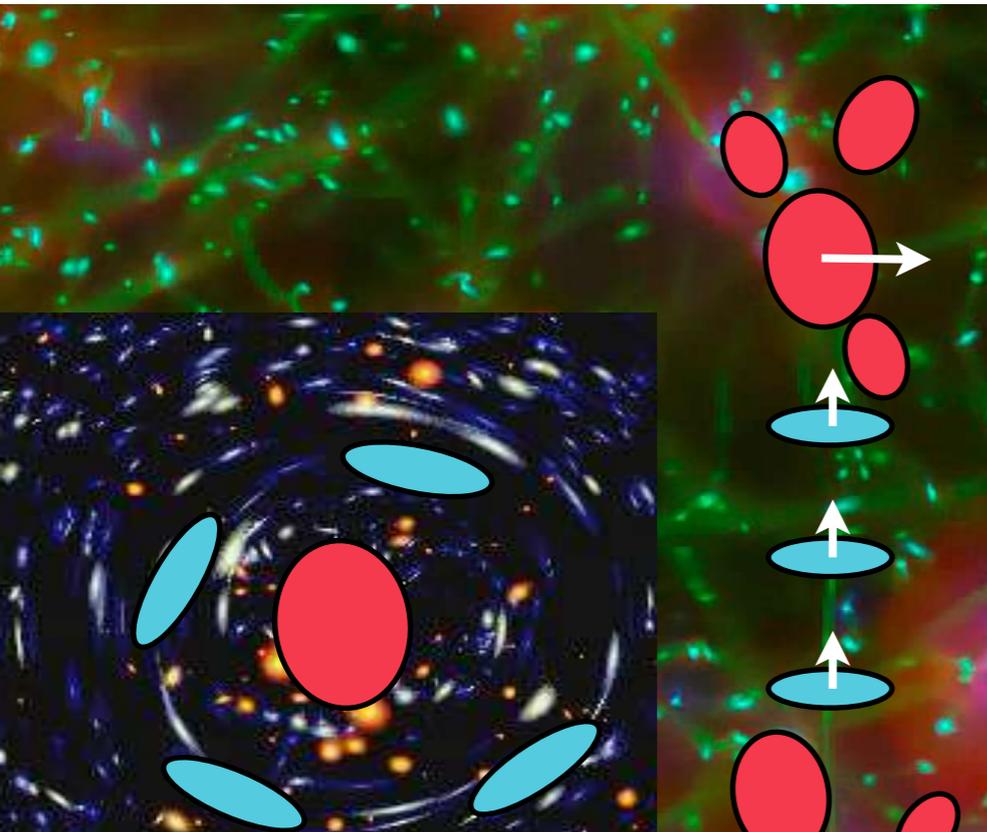
$$\epsilon = \underbrace{\gamma}_{\text{ellipticité apparente}} + \underbrace{\epsilon^s}_{\text{ellipticité intrinsèque}} \quad \text{shear}$$

On cherche à mesurer des déformations cohérentes des galaxies:

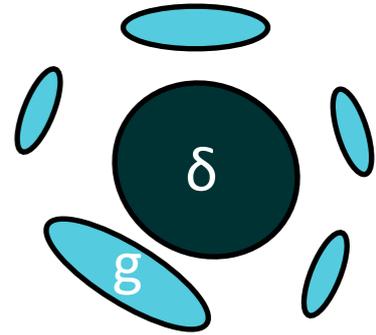
$$\langle \epsilon_i \epsilon_j \rangle = \underbrace{\langle \gamma_i \gamma_j \rangle}_{\text{signal cosmologique}} + \underbrace{\langle \epsilon_i^s \epsilon_j^s \rangle + \langle \epsilon_i^s \gamma_j \rangle + \langle \gamma_i \epsilon_j^s \rangle}_{\text{contamination par les alignements de galaxies } \sim 10\%}$$



# Les galaxies se forment au sein de la toile cosmique



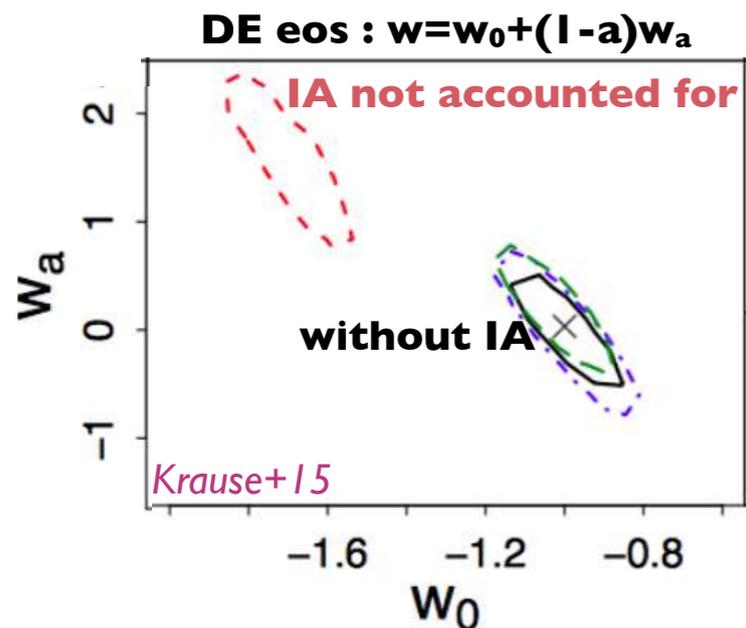
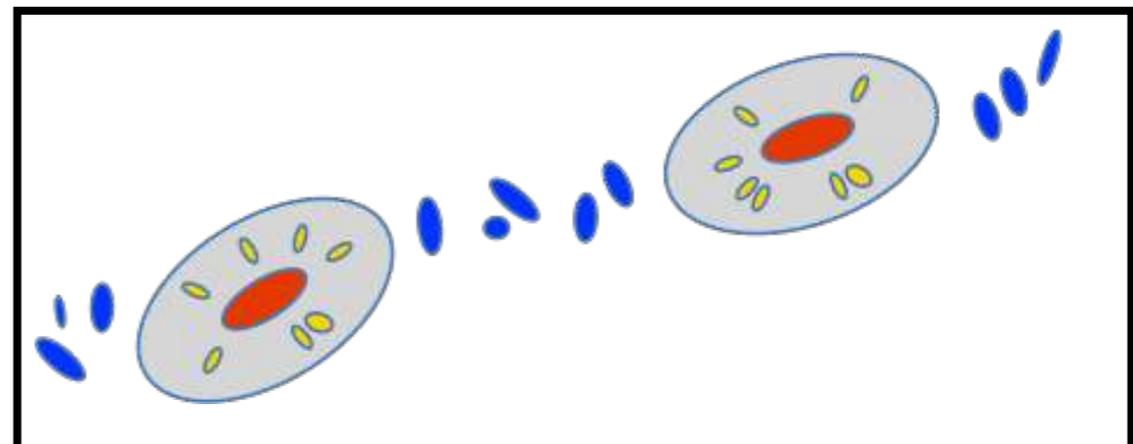
Ces alignements de galaxies biaisent les expériences basées sur l'astigmatisme cosmique.



$$\epsilon = \underbrace{\gamma}_{\text{ellipticité apparente}} + \underbrace{\epsilon^s}_{\text{ellipticité intrinsèque}}$$

On cherche à mesurer des déformations cohérentes des galaxies:

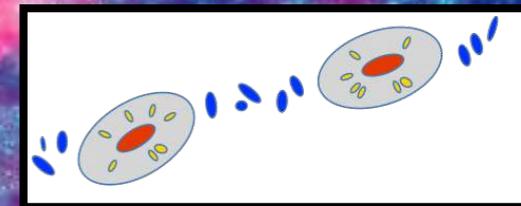
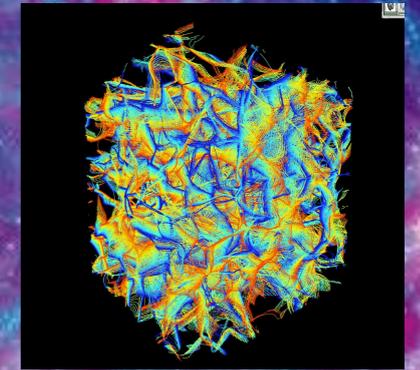
$$\langle \epsilon_i \epsilon_j \rangle = \underbrace{\langle \gamma_i \gamma_j \rangle}_{\text{signal cosmologique}} + \underbrace{\langle \epsilon_i^s \epsilon_j^s \rangle + \langle \epsilon_i^s \gamma_j \rangle + \langle \gamma_i \epsilon_j^s \rangle}_{\text{contamination par les alignements de galaxies } \sim 10\%}$$



Contraintes attendues sur l'énergie noire pour un relevé de type Euclid.

# Conclusion

- ▶ Les galaxies sont distribuées le long de la toile cosmique.
- ▶ Cette toile cosmique est prédite par le modèle concordant de la cosmologie.
- ▶ Les galaxies naissent et évoluent au sein de ce grand ballet cosmique, ce qui laisse une empreinte sur leur masse, leur morphologie et leur orientation.
- ▶ La toile cosmique est et sera une sonde cosmologique majeure avec l'arrivée de projets comme Euclid.



Merci de votre attention !