



Géorressources,
énergies et
transitions

R. Thiéry

Géoressources, énergies et transitions

L'énergie



Beaucoup de questions depuis la vidéo précédente !



Le 1er principe de la
thermodynamique

L'énergie se
conserve

- pas de création d'énergie
- pas de destruction d'énergie
- l'énergie se transforme

Et voilà le Big Bang !

Un formidable
dégagement
d'énergie !

Oui, mais à
partir de quoi ?

À partir d'une
singularité
quantique !

Puisqu'il n'y a
pas de création !

???



Un univers en
expansion et
en évolution
permanente



Le moteur de l'évolution
de l'univers est l'entropie

2e principe de la
thermodynamique

Le désordre
s'accroît!

L'entropie de
l'univers augmente

À cause du 2e principe, les choses
ne peuvent pas revenir en arrière !

Impossible de recoller les
morceaux après l'impact !

**Les transformations
sont irréversibles**





en d'autres termes, que
dit le 2e principe de la
thermodynamique ?



l'énergie
se dissipe !

l'énergie doit devenir de
plus en plus désordonnée et
se transformer en **chaleur** !

La chaleur, c'est l'énergie
impliquée dans les
mouvements chaotiques et
désordonnés de la matière
à l'échelle atomique

Image infra-rouge de l'espace vue par
le télescope spatial James Webb



Saturne et ses anneaux



ce que nous percevons de
l'univers en semble pas être en
cohérence avec le 2e principe
de la thermodynamique !

↑
La Terre

Nous sommes dans un
univers
de plus en plus froid et
de plus en plus vaste !

où est
l'augmentation
d'entropie ??





L'univers se refroidit parce
qu'il est en expansion

La densité de la matière et de
l'énergie dans l'univers diminue

c'est comme l'air d'un
pneu qui se dégonfle !

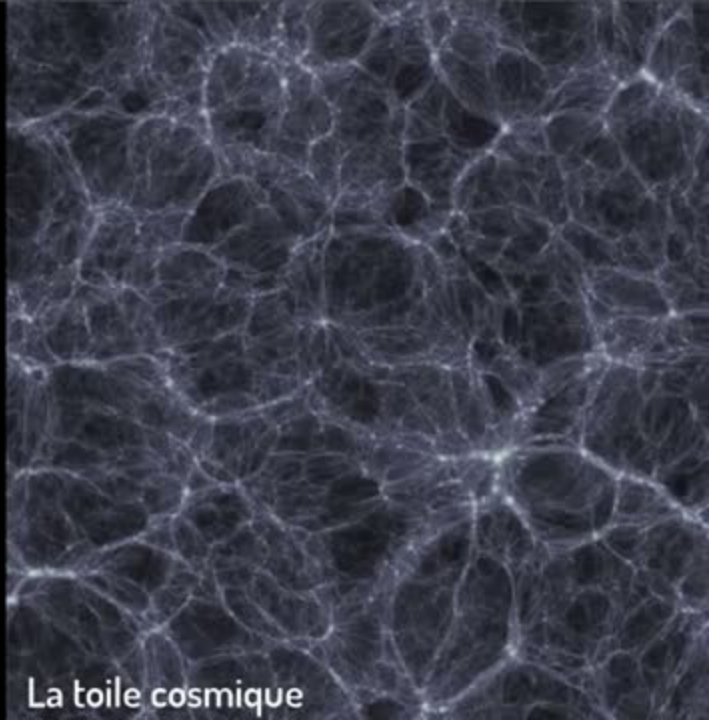
un univers en
pleine expansion

entropie +++

un univers qui
se refroidit

entropie --

La toile cosmique



un univers en
pleine expansion

entropie +++

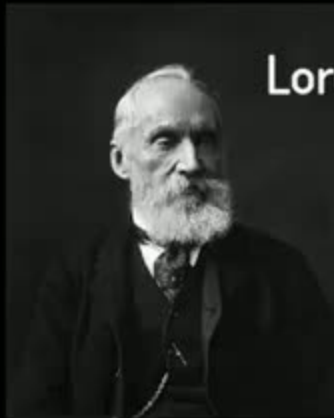
un univers qui
se refroidit

entropie --

*L'entropie
augmente*

La toile cosmique

La fin de l'univers ?

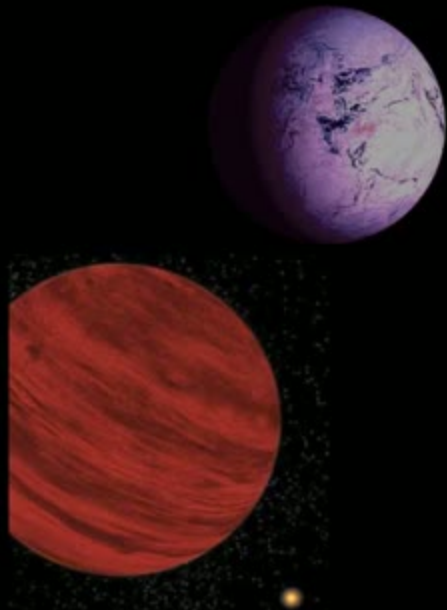


Lord Kelvin



La fin de l'univers ?

Le scénario d'une mort
thermique de l'univers !



La fin de l'univers ?

La chaleur des étoiles
perdue dans
l'immensité cosmique

= un état d'équilibre thermodynamique
d'entropie maximale

La mort
thermique

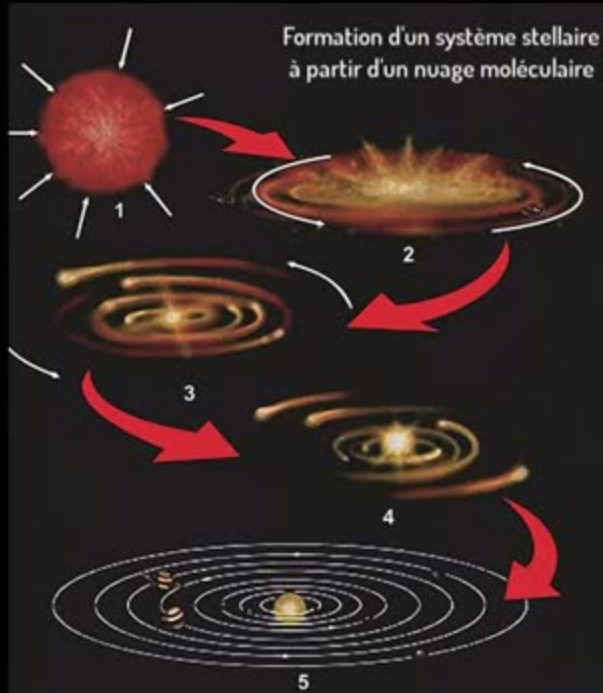
l'évolution
s'arrête



Le plus gros
problème est que ...

notre univers semble
être de plus en plus
ordonné

et cela ne cadre pas avec le
second principe de la
thermodynamique !



Émergence
d'entités et de
structures de plus
en plus complexes

Disque et ceintures d'astéroïdes et de
débris autour de la jeune étoile Fomalhaut.
Image du télescope James Webb



Des structures ordonnées dans l'univers



Des structures ordonnées dans l'univers



Des structures ordonnées dans l'univers



Des structures ordonnées dans l'univers



et des structures encore plus complexes avec le vivant



et des structures encore plus complexes avec le vivant



et des structures encore plus complexes avec le vivant



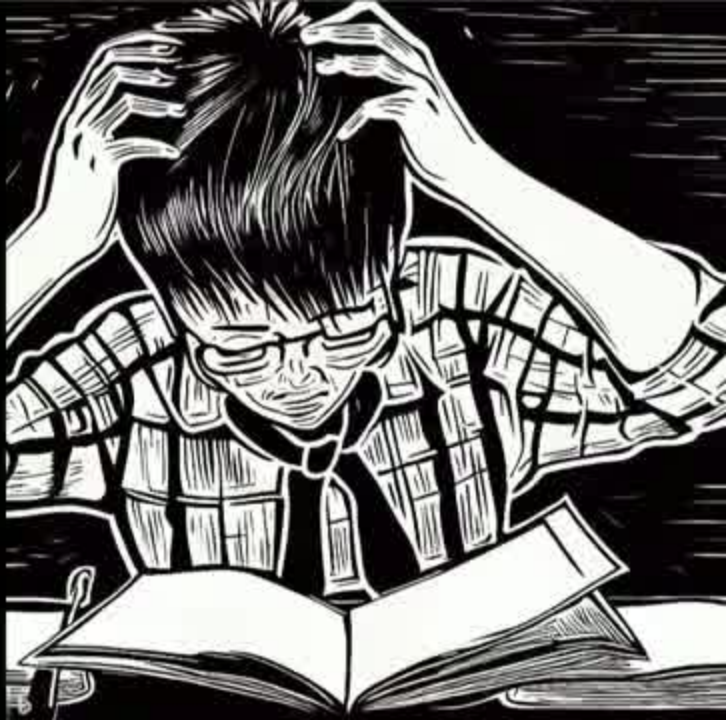


Notre monde devrait être de plus en plus désordonné ?



Comment expliquer ces structures bien ordonnées ?

Comment résoudre
ce paradoxe ?





le paradoxe n'est
qu'apparent !

A composite image of two nebulae, one blue and one red, set against a starry background. The blue nebula on the left has a central bright spot and a wispy, elongated shape. The red nebula on the right is larger, more rounded, and has a complex, multi-lobed structure with a bright central region. The background is a dark space filled with numerous small, bright stars of varying colors.

L'univers va bien vers le désordre



Point de
vue
inattendu !



Ces structures
ordonnées participent
à la création du
désordre !

Des structures dissipatives

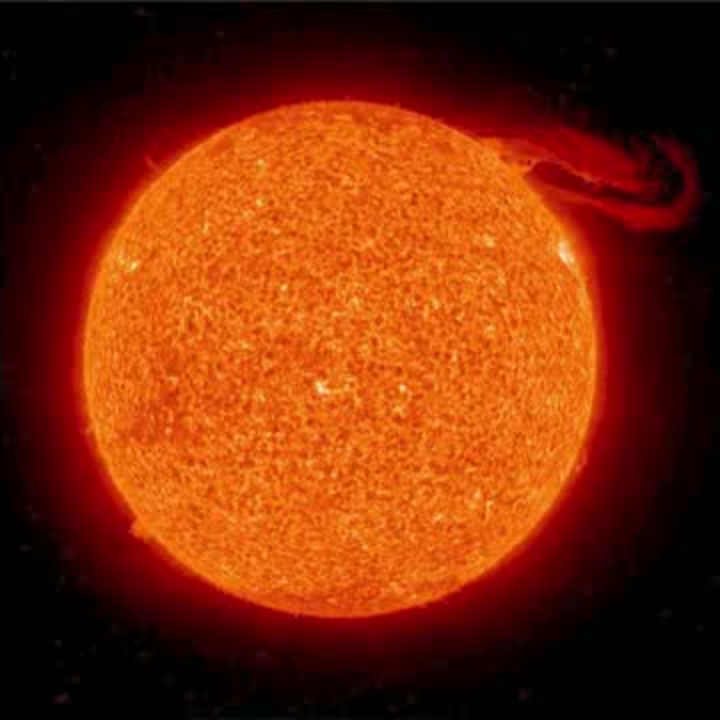
- = des structures hors équilibre
- = des structures en équilibre dynamique
- = capables de s'auto-organiser et de s'auto-réguler



**ces structures dépensent de
l'énergie pour leur maintien au
prix d'une augmentation de
l'entropie de leur environnement**

Ces structures dissipatives
portent bien leur nom:
elles dissipent de l'énergie

Elles contribuent à
augmenter, encore plus,
et encore plus vite, le
désordre autour d'elles



Un 3e principe de la thermodynamique



Un 3e principe de la
thermodynamique

le principe de la production
maximale d'entropie



Un 3e principe de la thermodynamique

le principe de la production maximale d'entropie



4 Maximum Entropy Production and Non-equilibrium Statistical Mechanics

Roderick C. Dewar

Unité de Bioclimatologie, INRA Centre de Bordeaux-Aquitaine, B.P. 81, 33883 Villenave d'Ornon CEDEX, France.

The second law, maximum entropy production and Liouville's theorem

Roderick C Dewar¹ and Amos Maritan²

¹Research School of Biology, The Australian National University, Canberra ACT 0200, Australia

²Department of Physics G. Galilei, University of Padova, INFN, Via Marzolo 8, 35131 Padova, Italy

E-mail: roderick.dewar@anu.edu.au and amos.maritan@pd.unipd.it



Emeritus Professor Roderick Dewar

ANU College of Science

E: Roderick.Dewar@anu.edu.au

[Flag this profile](#)

QUICK LINKS

Areas of expertise

- Other Physical Sciences
- Environmental Management
- Biological Mathematics
- Plant Developmental And Reproductive Biology
- Mathematical Physics
- Thermodynamics And Statistical Physics
- Plant Physiology
- Ecological Applications
- Global Change Biology

Un 3e principe de la
thermodynamique

le principe de la production
maximale d'entropie

l'énergie se dissipe le plus
vite possible, compte tenu
des contraintes

et les structures
dissipatives sont
faites pour cela !

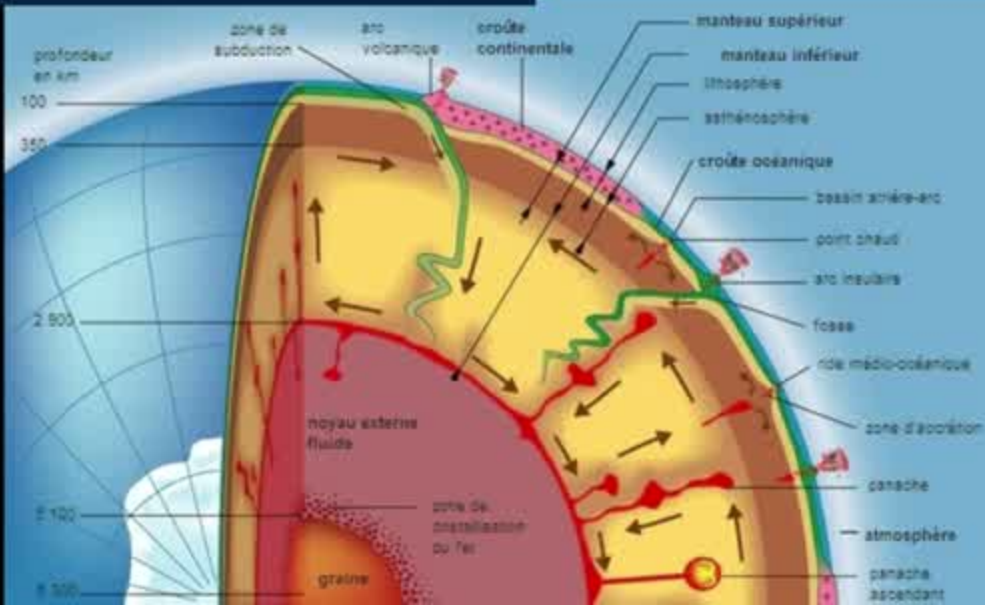
Le principe de production maximale d'entropie



Supernova

Dans un environnement riche en énergie, cet environnement va réagir et s'adapter de manière à dissiper au plus vite cette énergie !

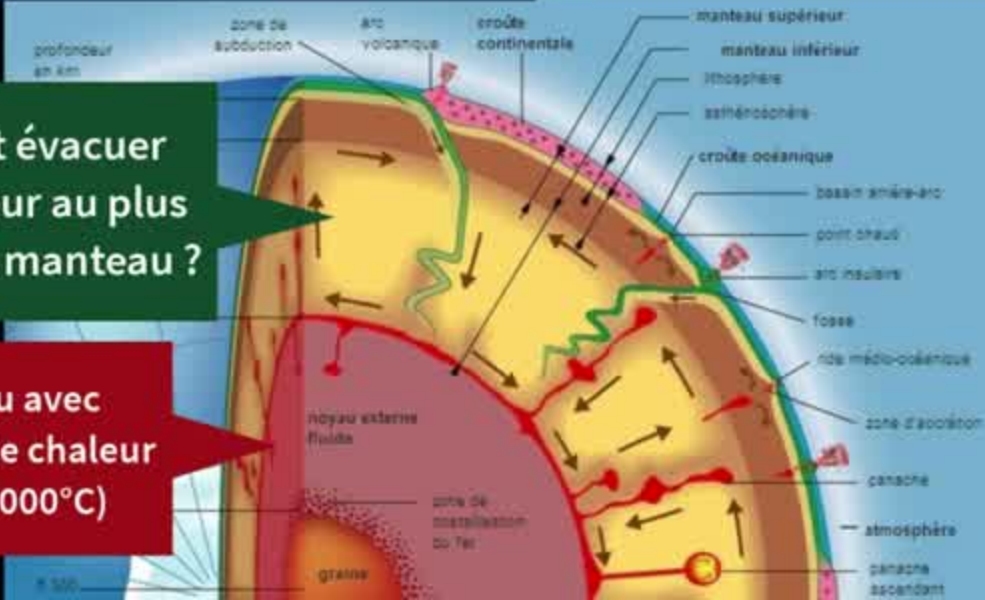
L'exemple du manteau terrestre



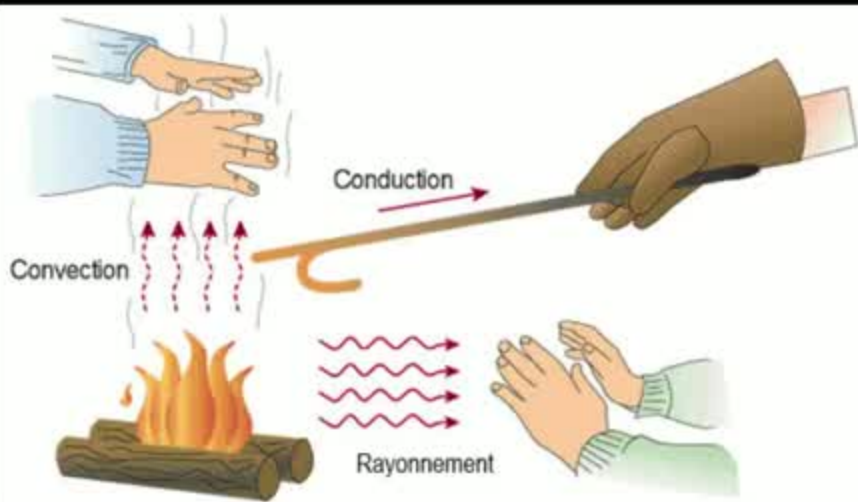
L'exemple du manteau terrestre

Comment évacuer
cette chaleur au plus
vite pour le manteau ?

Un noyau avec
beaucoup de chaleur
(4000 à 6000°C)

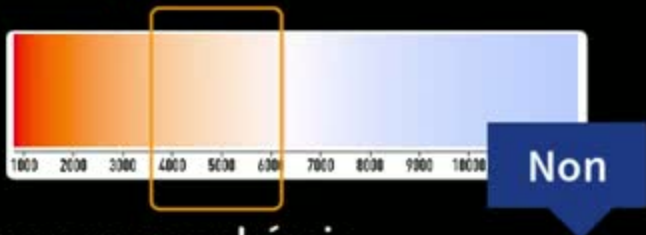


Le manteau a trois manières différentes pour évacuer la chaleur du noyau



Le manteau a trois manières différentes pour évacuer la chaleur du noyau

1) le rayonnement thermique

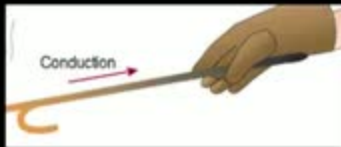


Les roches sont opaques au rayonnement émis



Le manteau a trois manières différentes pour évacuer la chaleur du noyau

2) La conduction thermique



Non

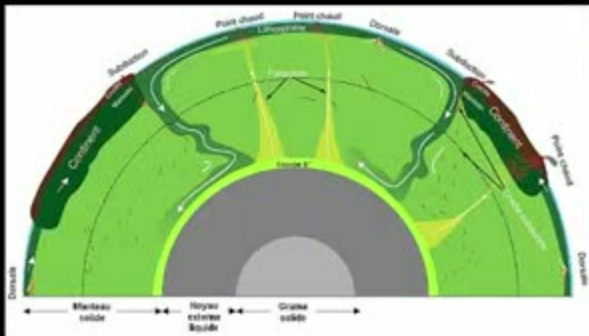
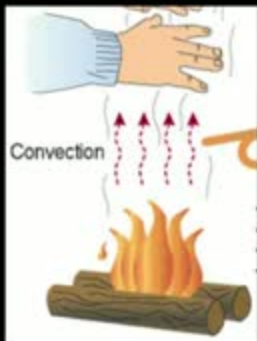


Or les roches sont de très bons isolants
Le manteau est épais

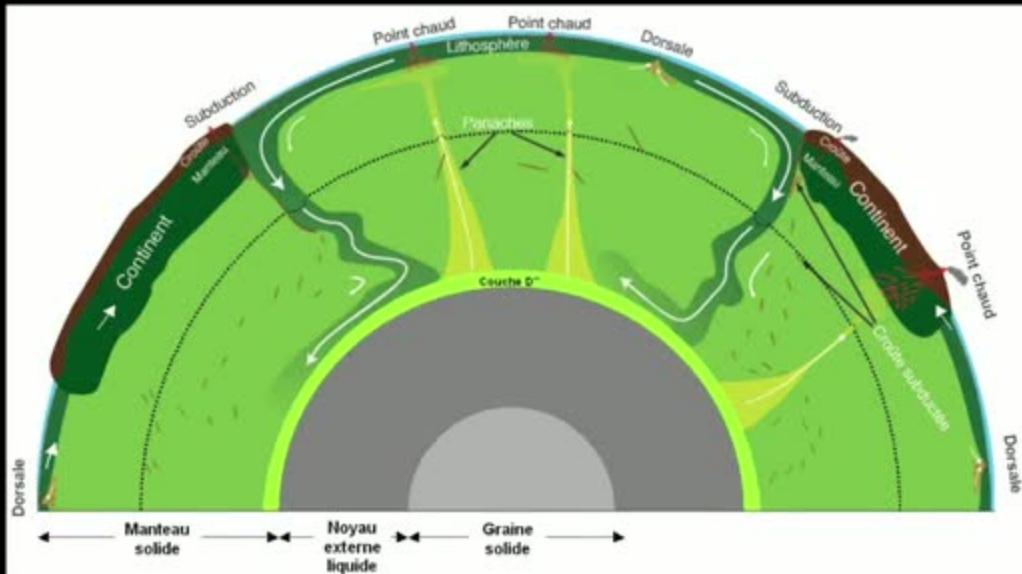
Le manteau a trois manières différentes pour évacuer la chaleur du noyau

3) La convection

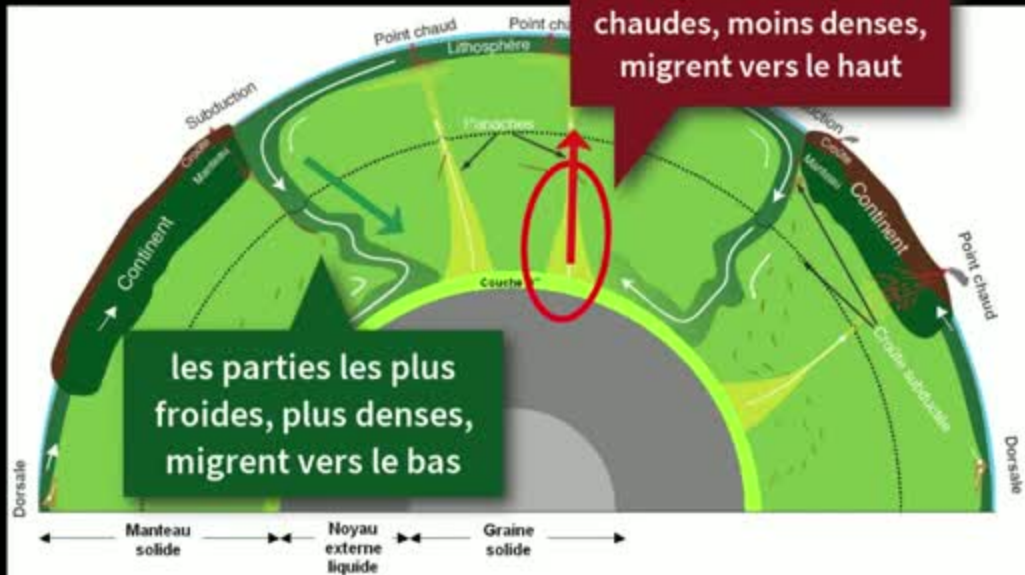
La chaleur est transférée par de la matière en mouvement



La convection dans le manteau



La convection dans le manteau



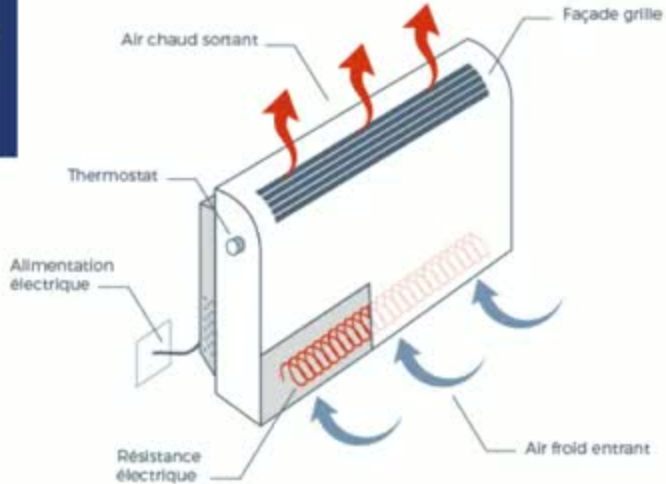
Une casserole
d'eau qui bout ...

c'est de la convection

et c'est très efficace



Un convecteur électrique

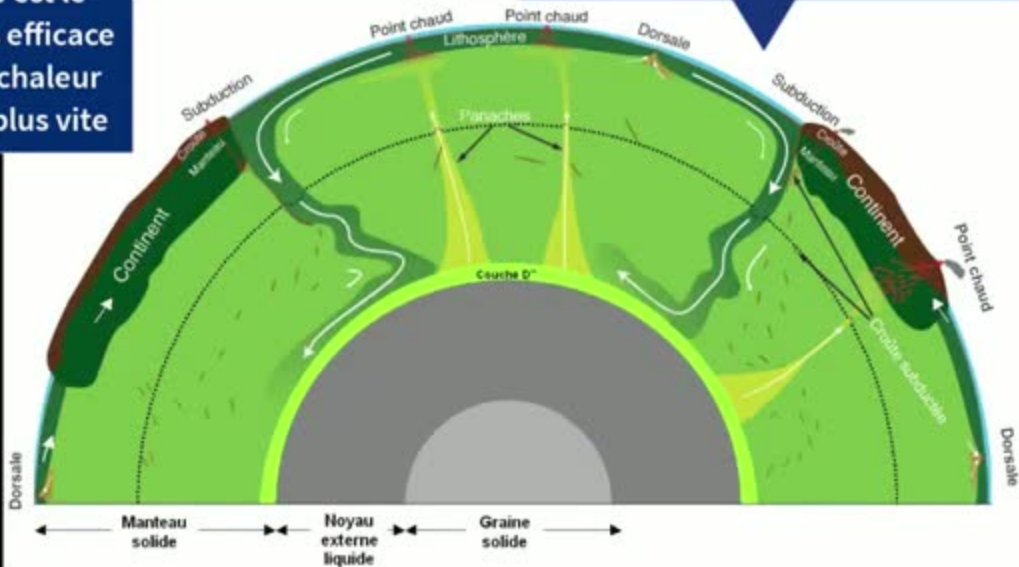


Le radiateur convecteur



La convection mantellique est le moyen le plus efficace d'évacuer la chaleur du noyau au plus vite

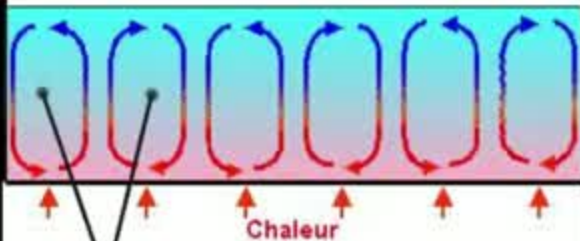
en accord avec le 3e principe de production maximale d'entropie



Les cellules de convection sont des structures dissipatives

Très efficace pour dissiper la chaleur au plus vite

Le fluide se refroidit à la surface



Les cellules alternent le sens de circulation du fluide

Le fluide chaud et de faible densité monte

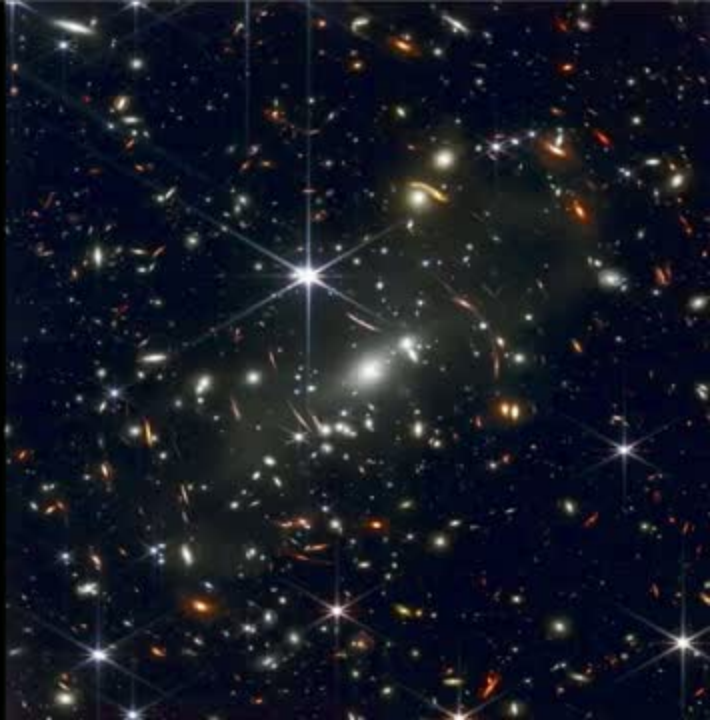
Le fluide froid et dense redescend

Structures auto-organisées et auto-régulées

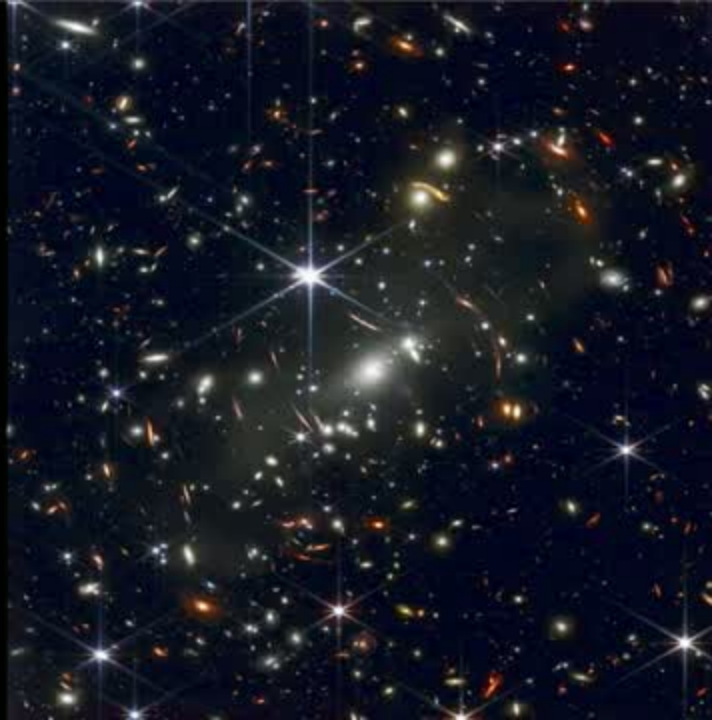


Cellules de Bénard

Pourquoi y a-t-il
des galaxies et
des étoiles ?



Ces galaxies et ces
étoiles jouent un rôle
fondamental dans la
dissipation de
l'énergie de l'univers



Durant l'âge sombre (380
000 ans à 150 Ma),
l'univers primitif, c'est ça !

Un nuage moléculaire
d'hydrogène (H_2) et
d'hélium

Un univers très
riche en énergie

Un univers très
riche en énergie

Les galaxies et les étoiles
n'existent pas encore !

C'est l'étape suivante !

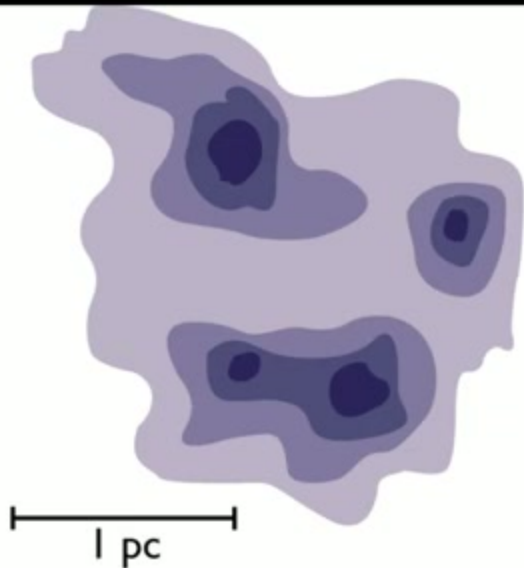
Quelles sont ces énergies
mobilisables dans cet
univers archaïque ?

Quelles sont ces énergies
mobilisables dans cet
univers archaïque ?

- de l'énergie
potentielle
de gravitation

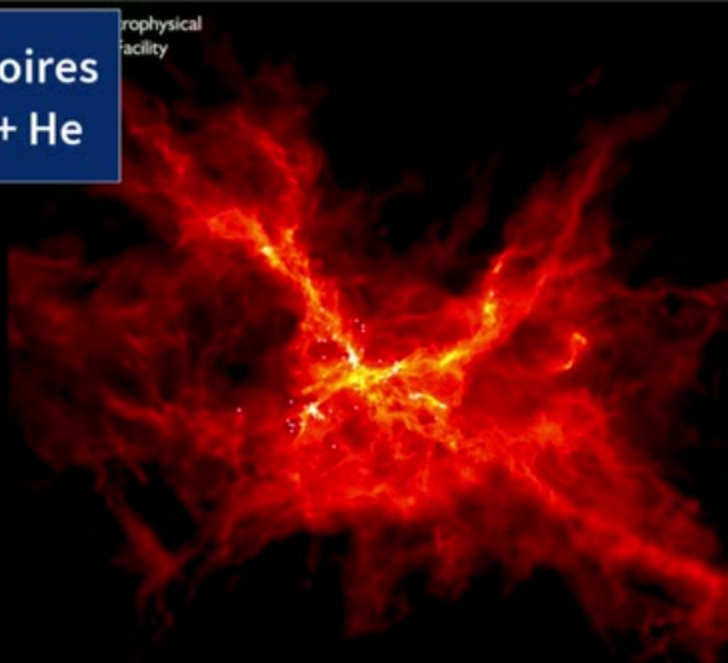
des fluctuations aléatoires dans des nuages $\text{H}_2 + \text{He}$

Etat initial : nuage de gaz initial
avec plusieurs surdensités locales.



des fluctuations aléatoires
dans des nuages $\text{H}_2 + \text{He}$

entraînant des
effondrements
locaux de matière



**Le nuage s'effondre
sur lui-même et il
se forme une proto-
étoile**

$t=0$: effondrement gravitationnel
et fragmentation du Nuage.
Au centre de chaque surdensité
se forme un coeur dense.



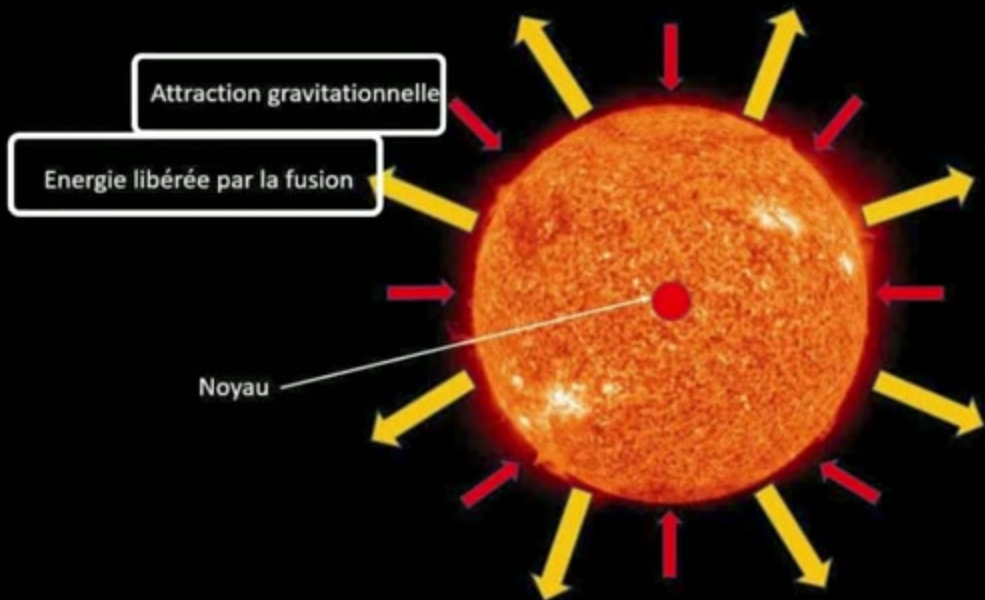
Le nuage s'effondre
sur lui-même et il
se forme une proto-
étoile



L'étoile HL Tauri et
son disque d'accrétion

Fusion nucléaire
de H en He





Et les galaxies dans tout cela ?

La Voie Lactée

Et les galaxies dans tout cela ?

200 à 400 milliards d'étoiles

La Voie Lactée

À quoi servent ces galaxies ?



À fabriquer de
nouvelles étoiles !



Dans les galaxies se trouvent des zones particulièrement actives pour la formation de nouvelles étoiles

De véritables pouponnières d'étoiles !



Nébuleuse de la Carène

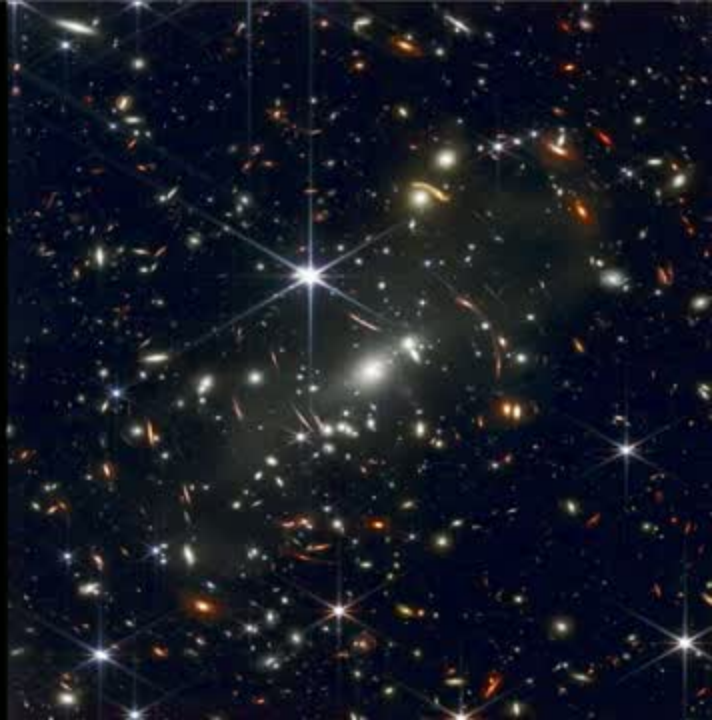
Les étoiles
ont besoin
des galaxies

Sans étoiles,
pas de
galaxies



Les galaxies sont des structures dissipatives

En favorisant la formation des étoiles, elles participent à la mobilisation de l'énergie de l'univers et sa conversion en chaleur



Les structures dissipatives
= un concept fondamental
et très général

*Un amphithéâtre, autre
exemple de structures
dissipatives*



Sans le 2e principe et le 3e principe de production maximale d'entropie, voilà comment se présenterait l'univers actuellement : **du vide** (ou presque) !

Pas de
Terre

Sans le 2e principe et le 3e principe de production maximale d'entropie, voilà comment se présenterait l'univers actuellement : **du vide** (ou presque) !

Pas de
géoréssources



**Les structures dissipatives, un
concept très riche pour comprendre
notre environnement**