

Qu'arrivera-t-il à l'expansion de l'Univers?

2007 mars 16

Bernard Nicolet

Equations des cosmologies

Einstein 1916

$$\begin{aligned} \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 - \frac{c^2}{3}\Lambda &= \frac{c^4}{3A}\rho \\ 2\frac{\ddot{R}}{R} + \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 - c^2\Lambda &= -\frac{c^2}{A}P \end{aligned}$$

Equations des cosmologies

Einstein 1916

$$\begin{aligned} \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 - \frac{c^2}{3}\Lambda &= \frac{c^4}{3A}\rho \\ 2\frac{\ddot{R}}{R} + \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 - c^2\Lambda &= -\frac{c^2}{A}P \end{aligned}$$

Qu'est-ce que ce charabia?

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 - \frac{c^2}{3}\Lambda = \frac{c^4}{3A}\rho$$

$$2\frac{\ddot{R}}{R} + \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 - c^2\Lambda = -\frac{c^2}{A}P$$

ρ densité de l'Univers. Simple à comprendre

P Pression de l'Univers (galaxies + rayonnement)

R Distance entre 2 galaxies (par exemple)

$\frac{1}{A} = \frac{8\pi G}{c^4}$ quelque chose de bien classique

Λ La **CONSTANTE COSMOLOGIQUE** quelque chose de bien mystérieux

$$\text{Avec } \frac{1}{A} = \frac{8\pi G}{c^4}$$

les équations des cosmologies deviennent:

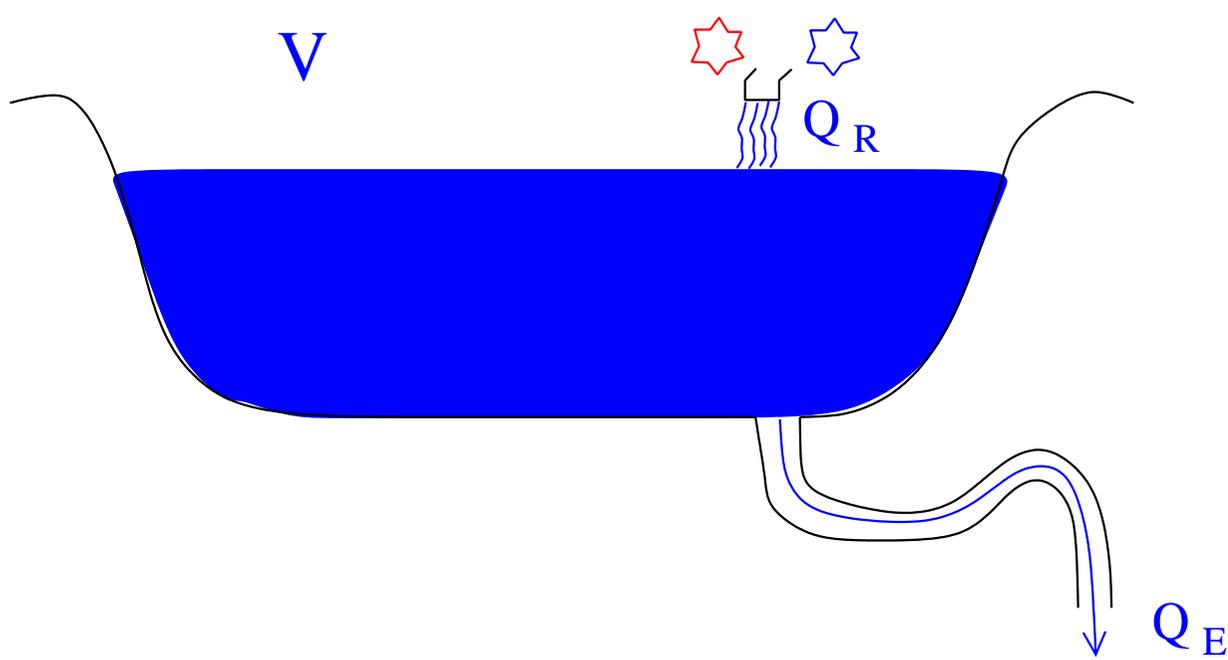
$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 - \frac{c^2}{3}\Lambda = \frac{8\pi G}{3}\rho$$

$$2\frac{\ddot{R}}{R} + \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 - c^2\Lambda = -\frac{8\pi G}{c^2}P$$

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 - \frac{c^2}{3} \Lambda = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

$$2\frac{\ddot{R}}{R} + \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 - c^2 \Lambda = -\frac{8\pi G}{c^2} P$$

Que signifient R et les points au-dessus?



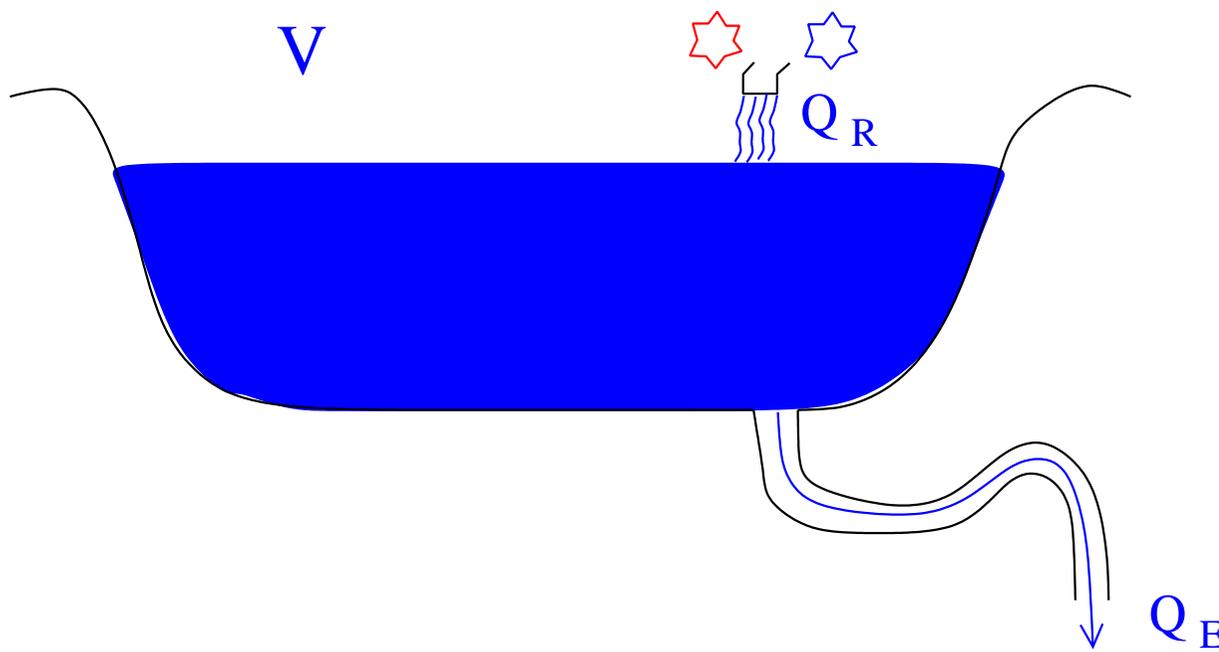
V volume

\dot{V} variation de volume
par unité de temps

Q_R débit des robinets

Q_E débit d'écoulement

$$\dot{V} = Q_R - Q_E$$



V volume

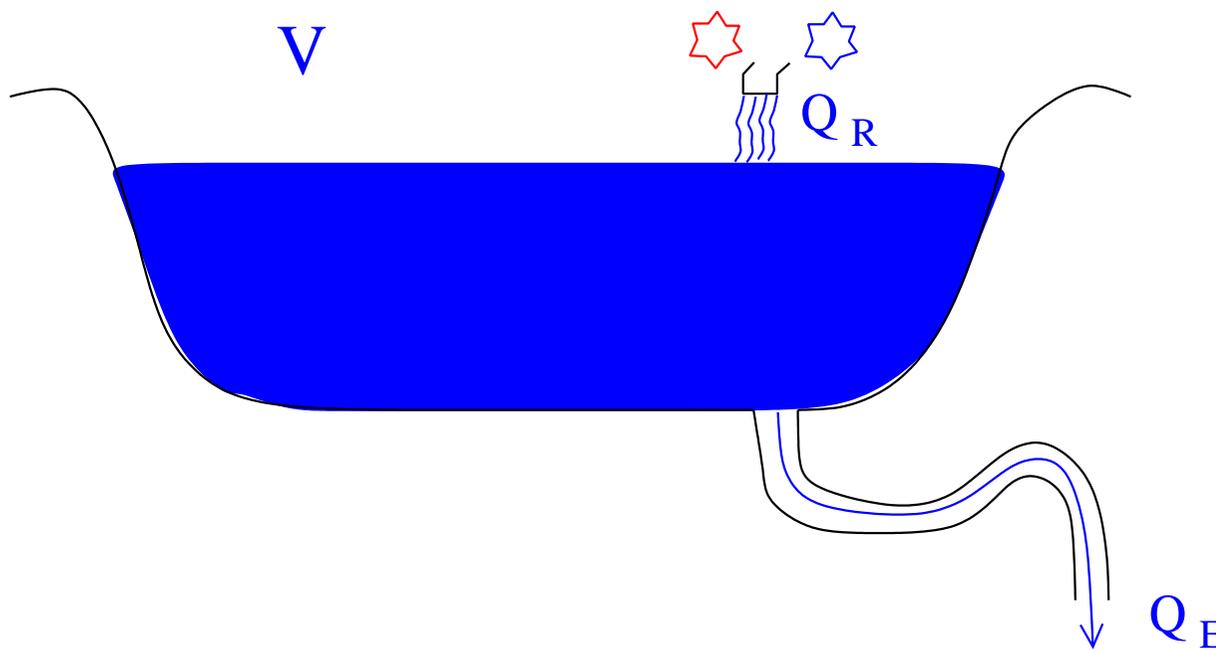
\dot{V} variation de volume
par unité de temps

Q_R débit des robinets

Q_E débit d'écoulement

$$\dot{V} = Q_R - Q_E$$

\ddot{V} variation de la variation du volume
du débit net



V volume

\dot{V} variation de volume
par unité de temps

Q_R débit des robinets

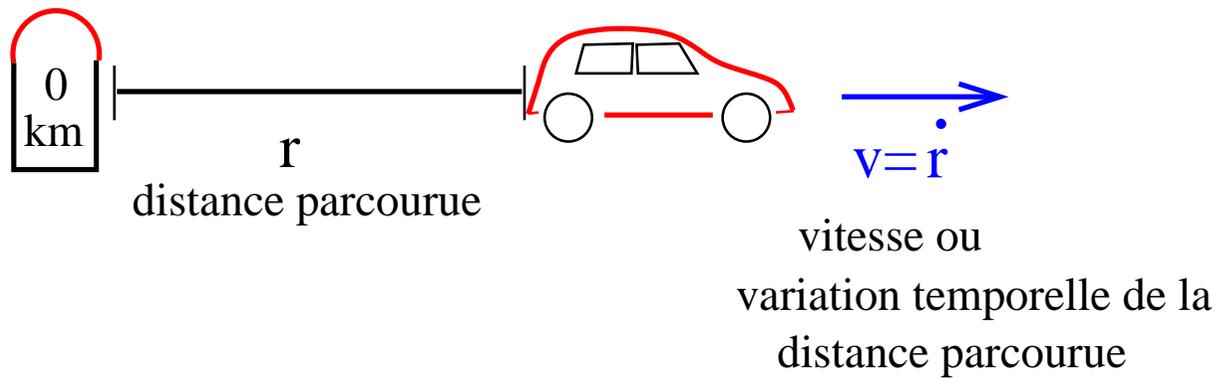
Q_E débit d'écoulement

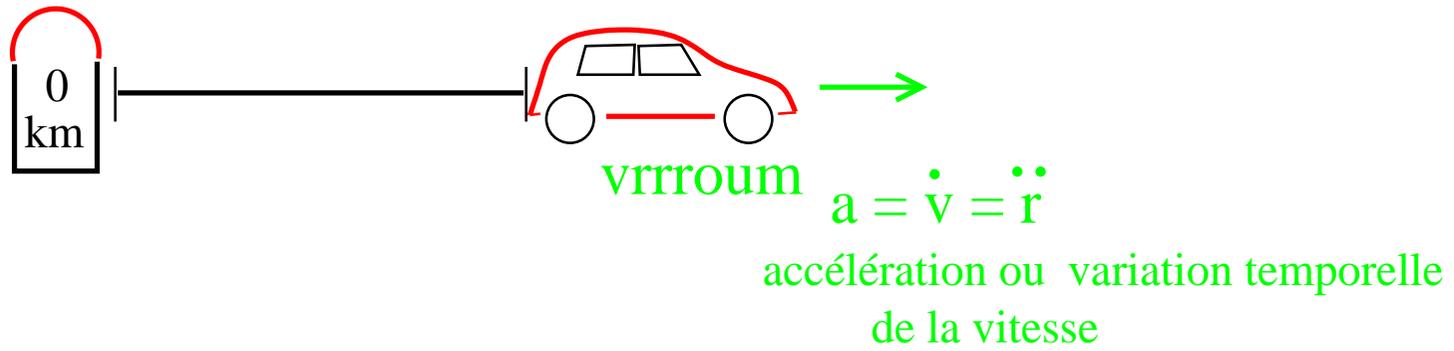
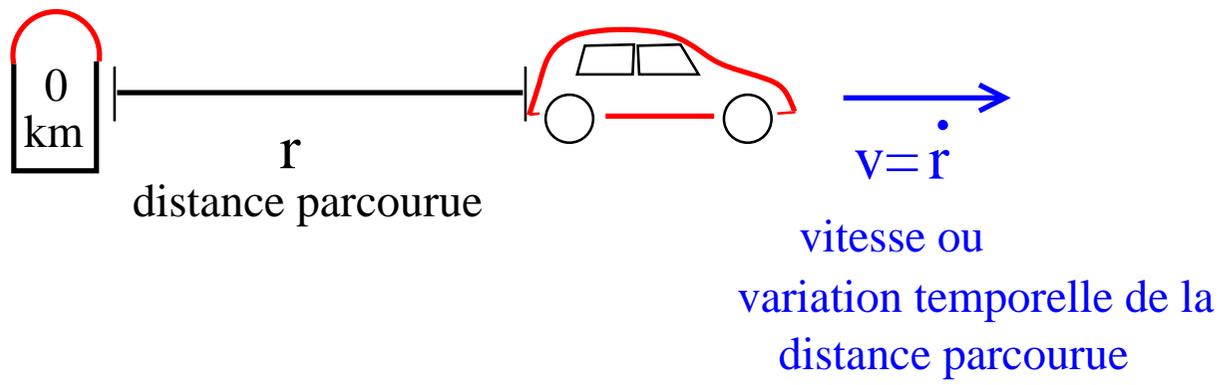
$$\dot{V} = Q_R - Q_E$$

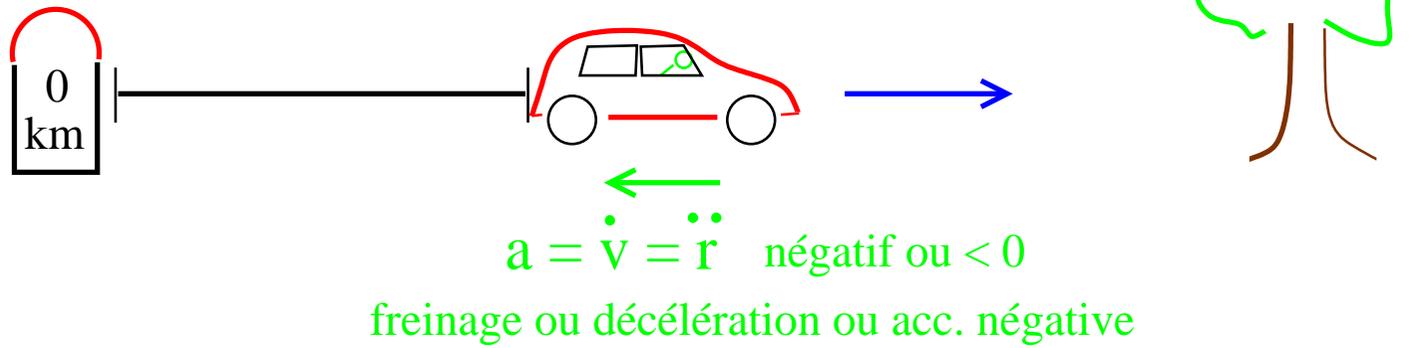
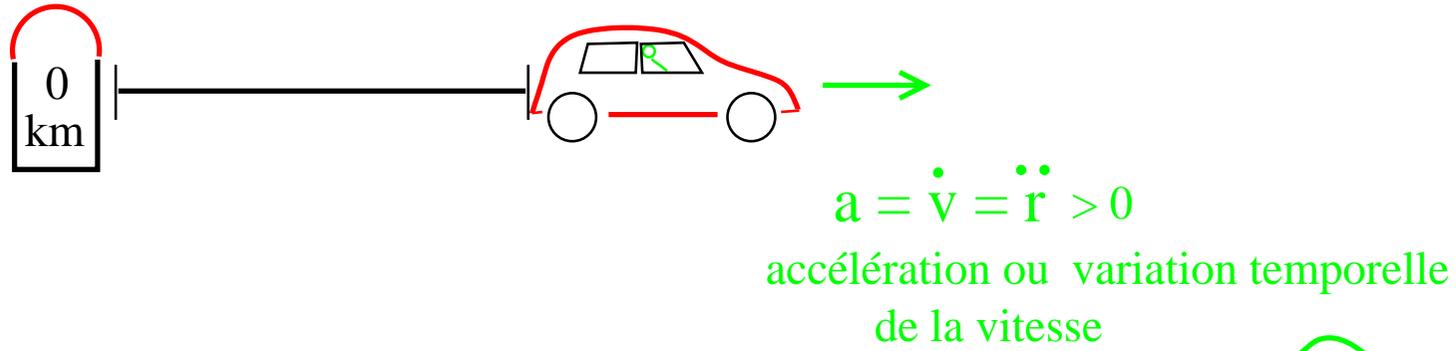
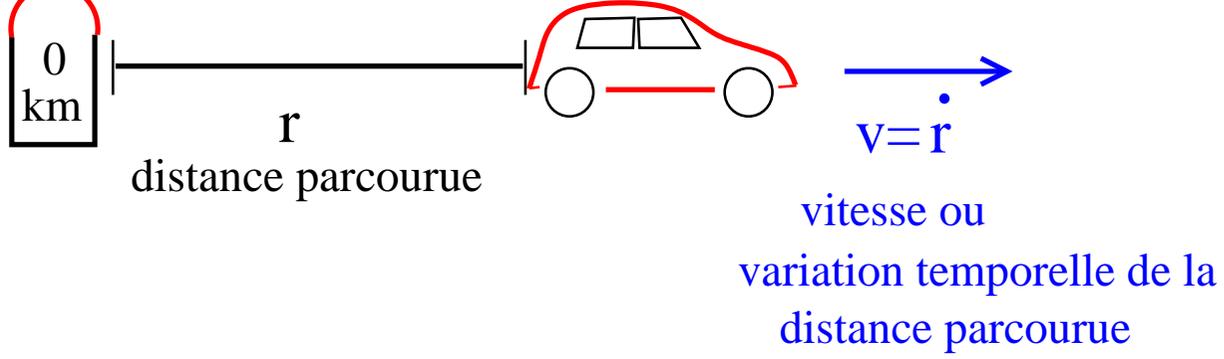
\ddot{V} variation de la variation du volume
du débit net

\ddot{V} positif ou > 0
on ouvre les robinets
on freine l'écoulement

négatif ou < 0
on ferme les robinets
on augmente l'écoulement







Qu'est-ce que R?

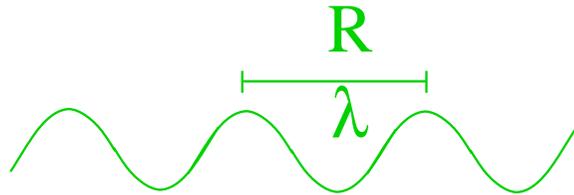


distance typique entre 2 galaxies

Qu'est-ce que R?



distance typique entre 2 galaxies

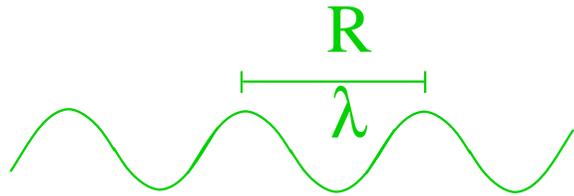


longueur d'onde d'un rayonnement

Qu'est-ce que R ?



distance typique entre 2 galaxies



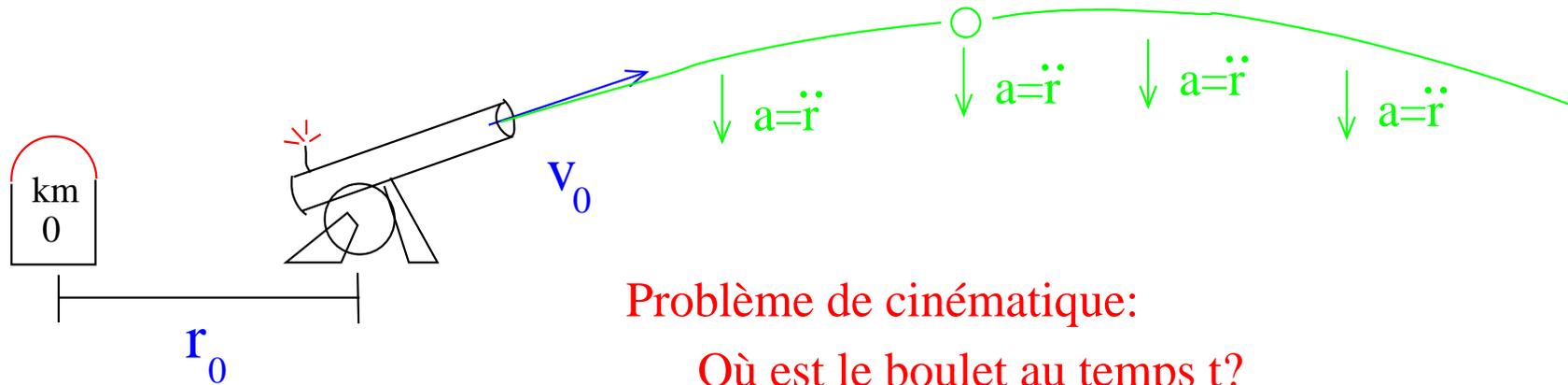
longueur d'onde d'un rayonnement

\dot{R} Variation $\begin{matrix} \text{accroissement} \\ \text{diminution} \end{matrix}$ de R

$\frac{\dot{R}}{R}$ Variation RELATIVE de R (en %)

Peu importe si R est $\begin{matrix} \text{grand} & \text{expansion de l'Univers} \\ \text{petit} & \text{décalage vers le rouge} \end{matrix}$

ARTILLERIE: Horaire d'un boulet de canon



Problème de cinématique:

Où est le boulet au temps t ?

Données nécessaires au départ:

- | | | |
|----------|-------------------|----------------|
| 1) r_0 | Position du canon | } 2 constantes |
| 2) v_0 | vitesse initiale | |

Equations des cosmologies

Einstein 1916

$$\begin{aligned} \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 - \frac{c^2}{3}\Lambda &= \frac{c^4}{3A}\rho \\ 2\frac{\ddot{R}}{R} + \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 - c^2\Lambda &= -\frac{c^2}{A}P \end{aligned}$$

Pas étonnant qu'il y ait 2 constantes: A et Λ

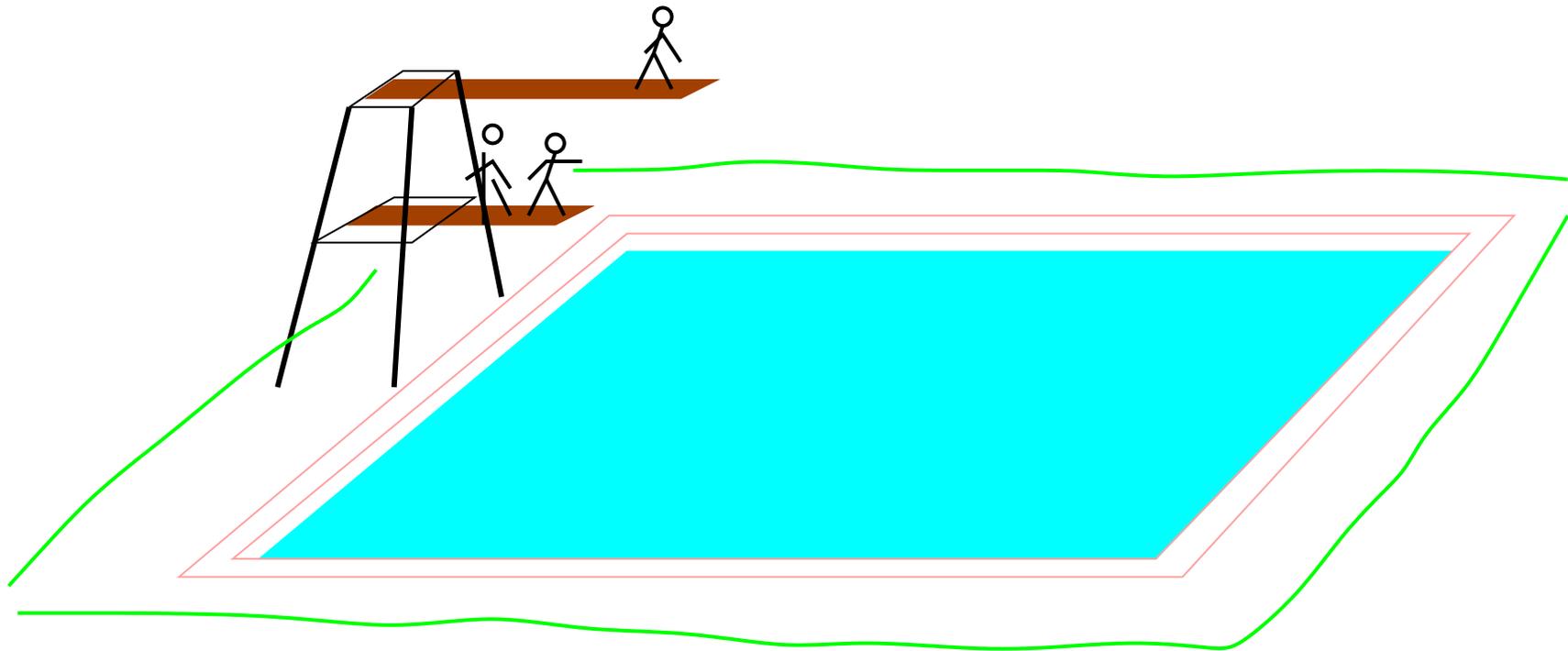
1916-1929

Univers statique

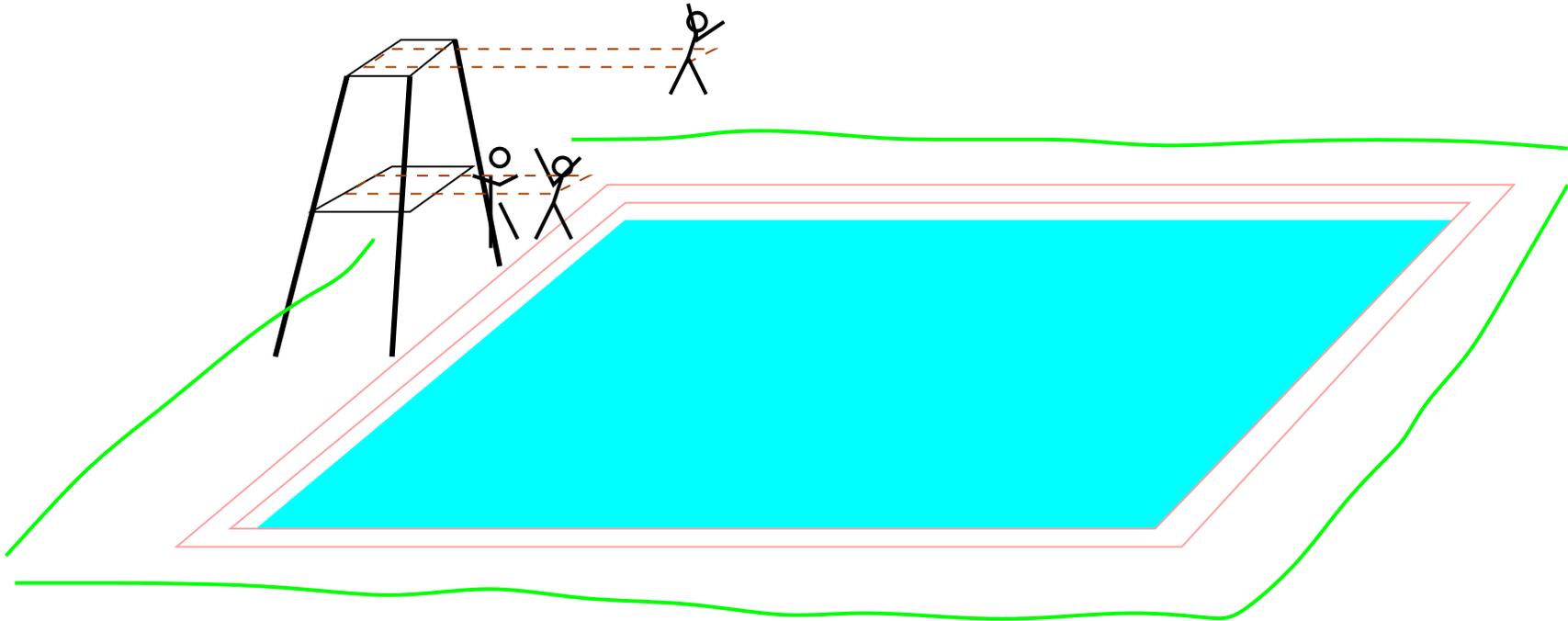
R constant ou $\dot{R} = 0$

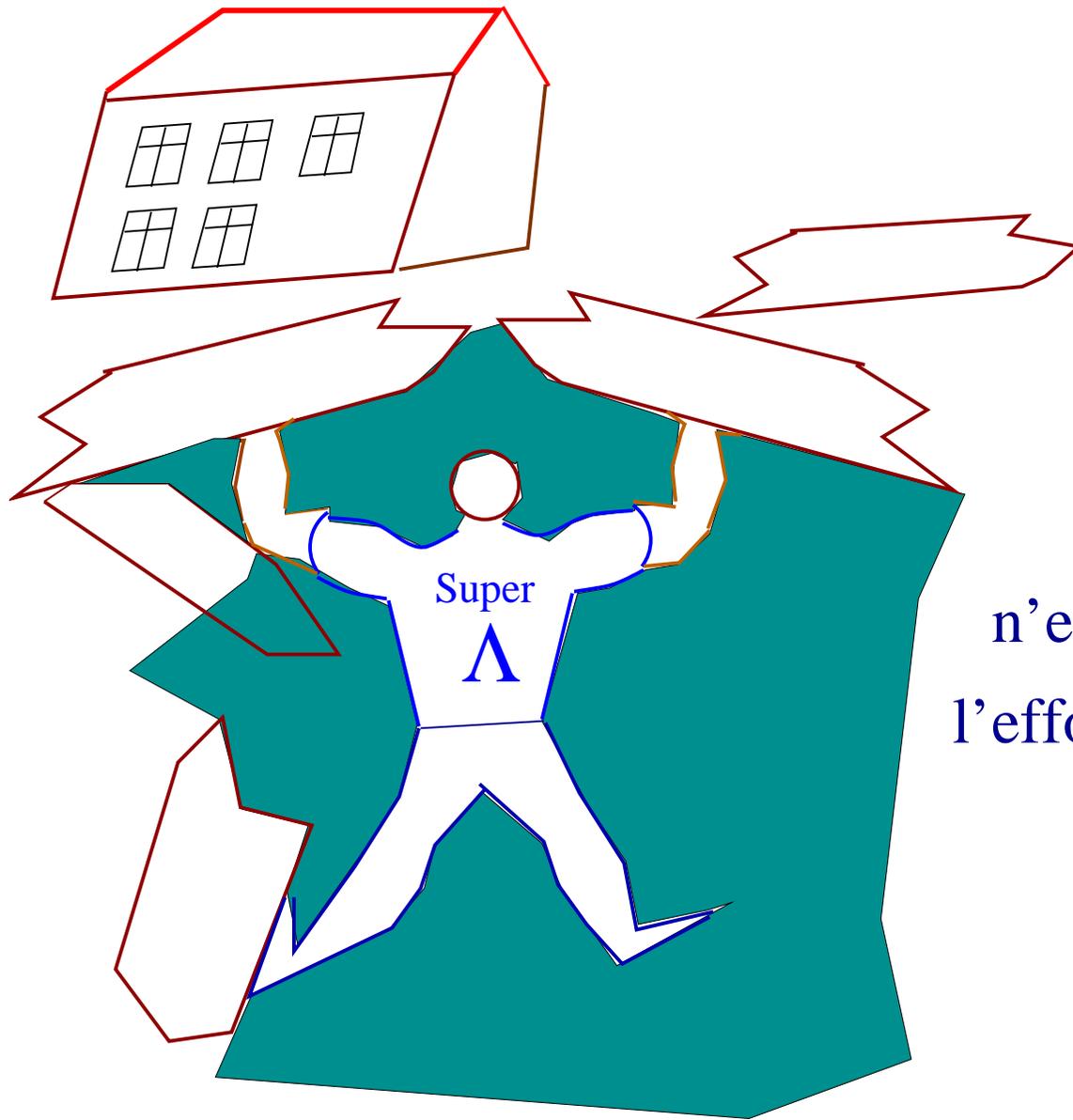
Est-ce possible?

Stabilité

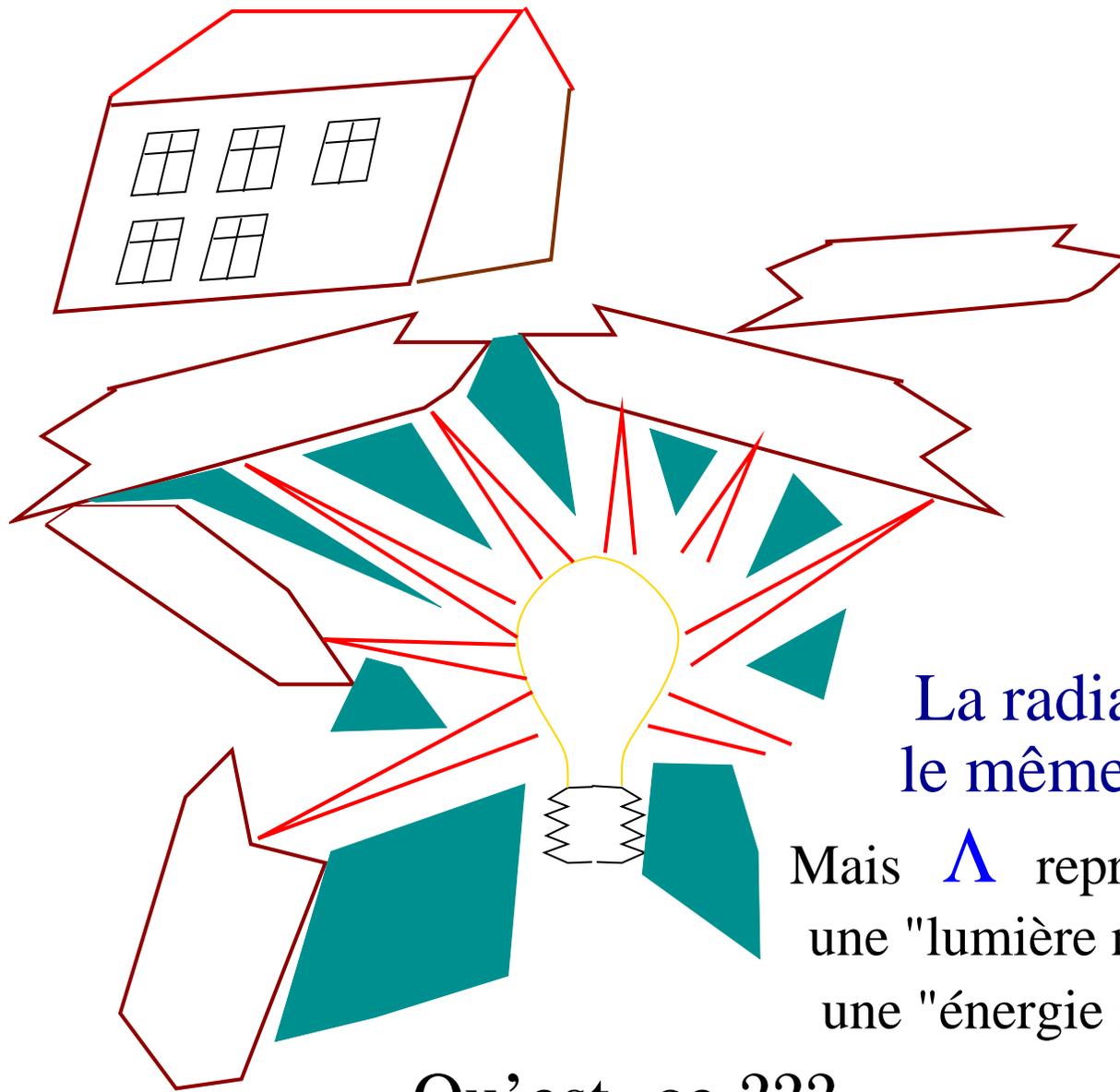


Stabilité seulement provisoire !!





n'empêche
l'effondrement



Univers statique

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 - \frac{c^2}{3} \wedge = \frac{c^4}{3A} \rho \quad \cdot (+1) \\
 +2\frac{\ddot{R}}{R} + & \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 - c^2 \wedge = -\frac{c^2}{A} P \quad \cdot (-1) \\
 -2\frac{\ddot{R}}{R} & + \frac{2}{3}c^2 \wedge = \frac{c^2}{3A} (\rho c^2 + 3P)
 \end{aligned}$$

avec $\dot{R} = 0$ et $\ddot{R} = 0$

$$\wedge = \frac{1}{2A} (\rho c^2 + 3P) \neq 0$$

En 1929 Edwin Hubble découvre

- le décalage vers le rouge ou "redshift" \Rightarrow

- l'expansion de l'Univers \Leftrightarrow

- $\dot{R} = 0 \Rightarrow$

on n'a plus besoin de l'encombrant Λ

Sans Λ

les équations des cosmologies deviennent:

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

$$2\frac{\ddot{R}}{R} + \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 = -\frac{8\pi G}{c^2} P \Rightarrow$$

$$\frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi G}{3c^2} (\rho c^2 + 3P) \Rightarrow$$

\ddot{R} négatif \Rightarrow décélération

Question: Le décalage vers le rouge est-il:

- Un effet Doppler $z = \frac{v}{c} = \frac{\lambda_0 - \lambda_1}{\lambda_1}$?

λ_1 longueur d'onde à l'émission

λ_0 longueur d'onde mesurée aujourd'hui

ou bien

- un effet de la dilatation de l'Univers

$$\frac{R_0}{R_1} = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} = 1 + z?$$

Réponse: 2^e possibilité (dilatation) correcte,

mais

A moins de 1 Mpc (3milliards d'années de lumière)

Doppler juste aussi

suivent

de 1929 à 1979

70 années paisibles

à peine troublées par

En 1965 La découverte par

Penzias et Wilson

du rayonnement à 2,728K

du fond cosmique



Après 30 μ s



Après 100 μ s



Après 200 μ s



Après 300 μ s



3000 K

Fond cosmique à
2,728K

Micro-ondes à 1 mm

Fossile d'un Univers opaque

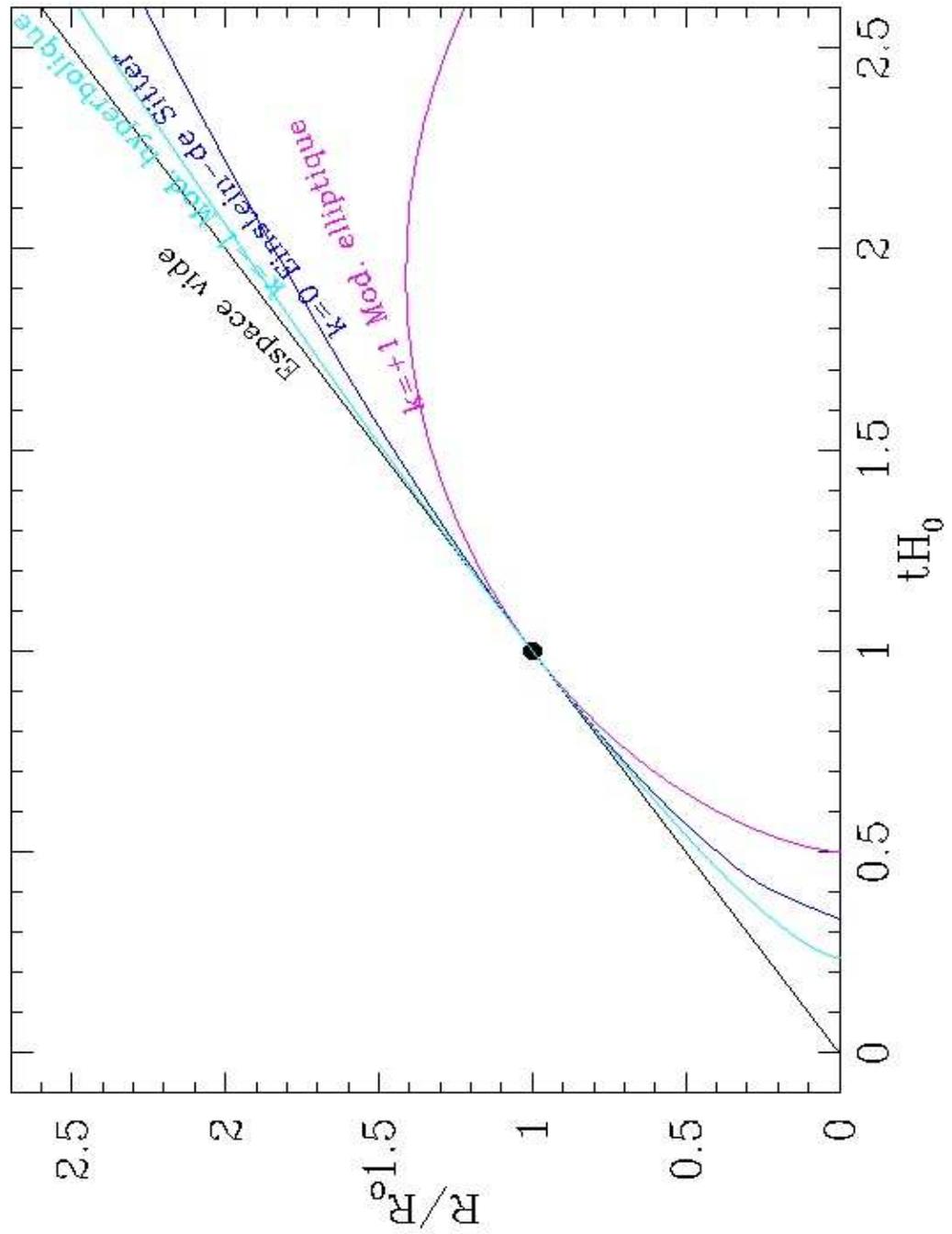
$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

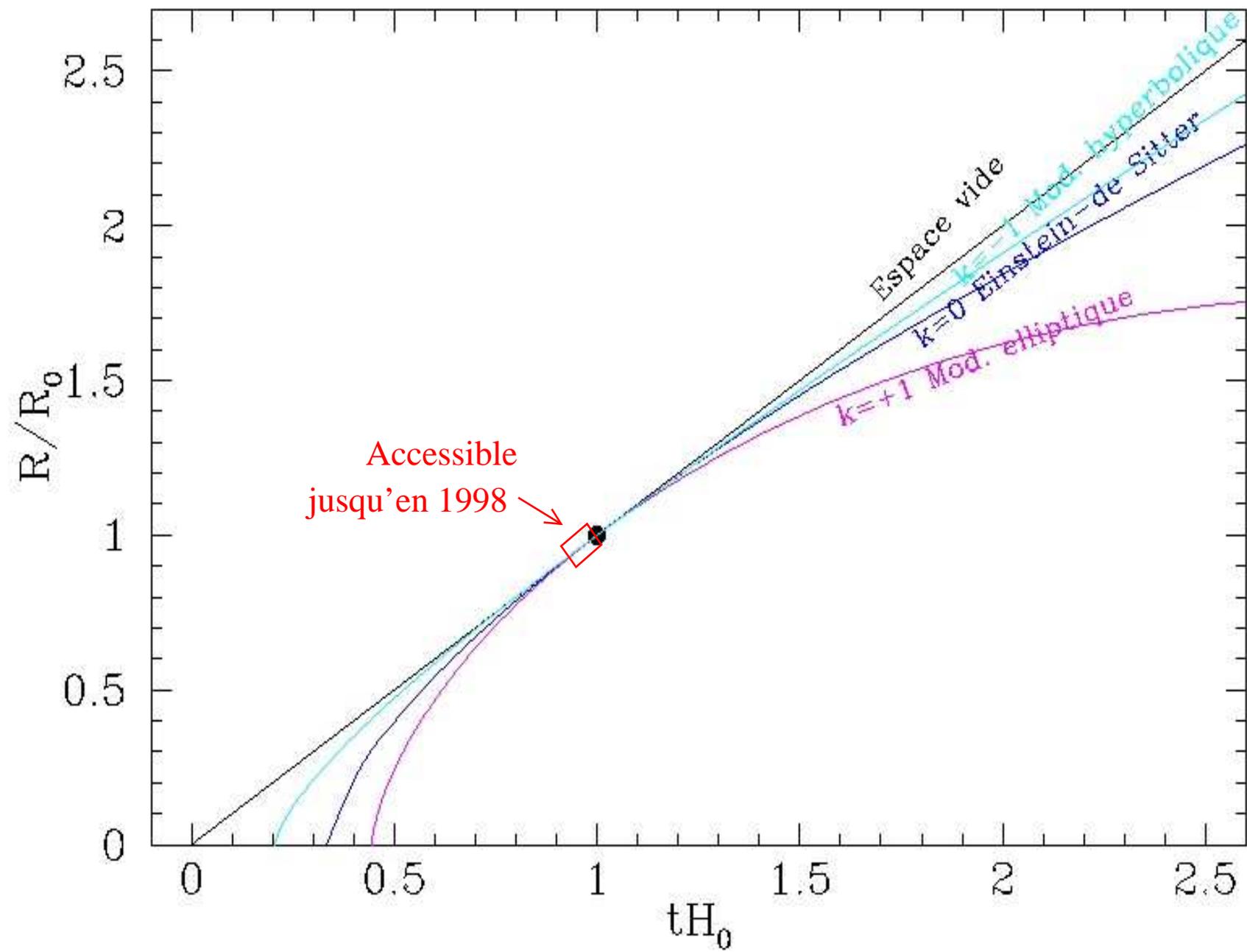
$$2\frac{\ddot{R}}{R} + \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 = -\frac{8\pi G}{c^2} P \Rightarrow$$

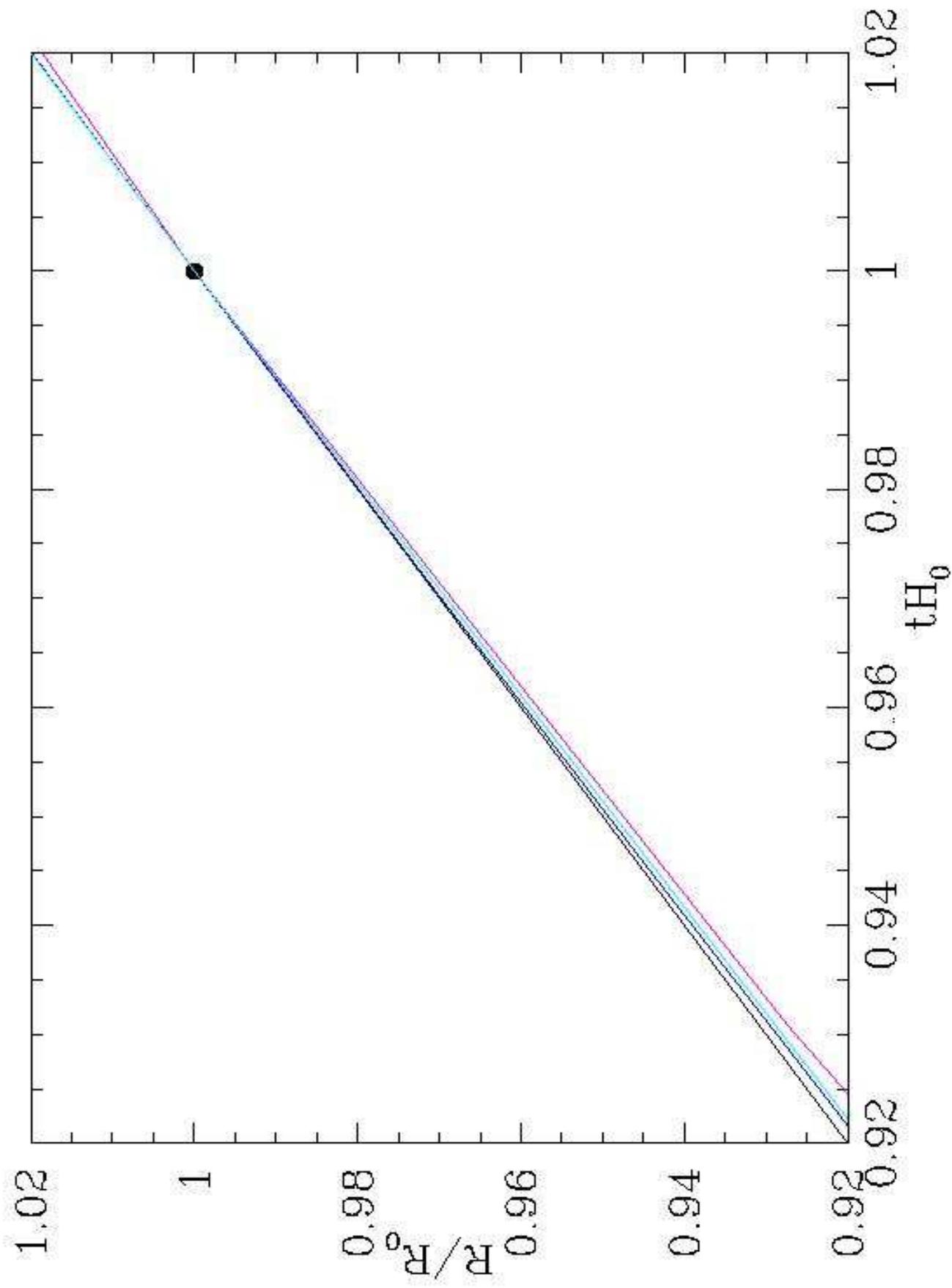
$$\frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi G}{3c^2} (\rho c^2 + 3P) \Rightarrow$$

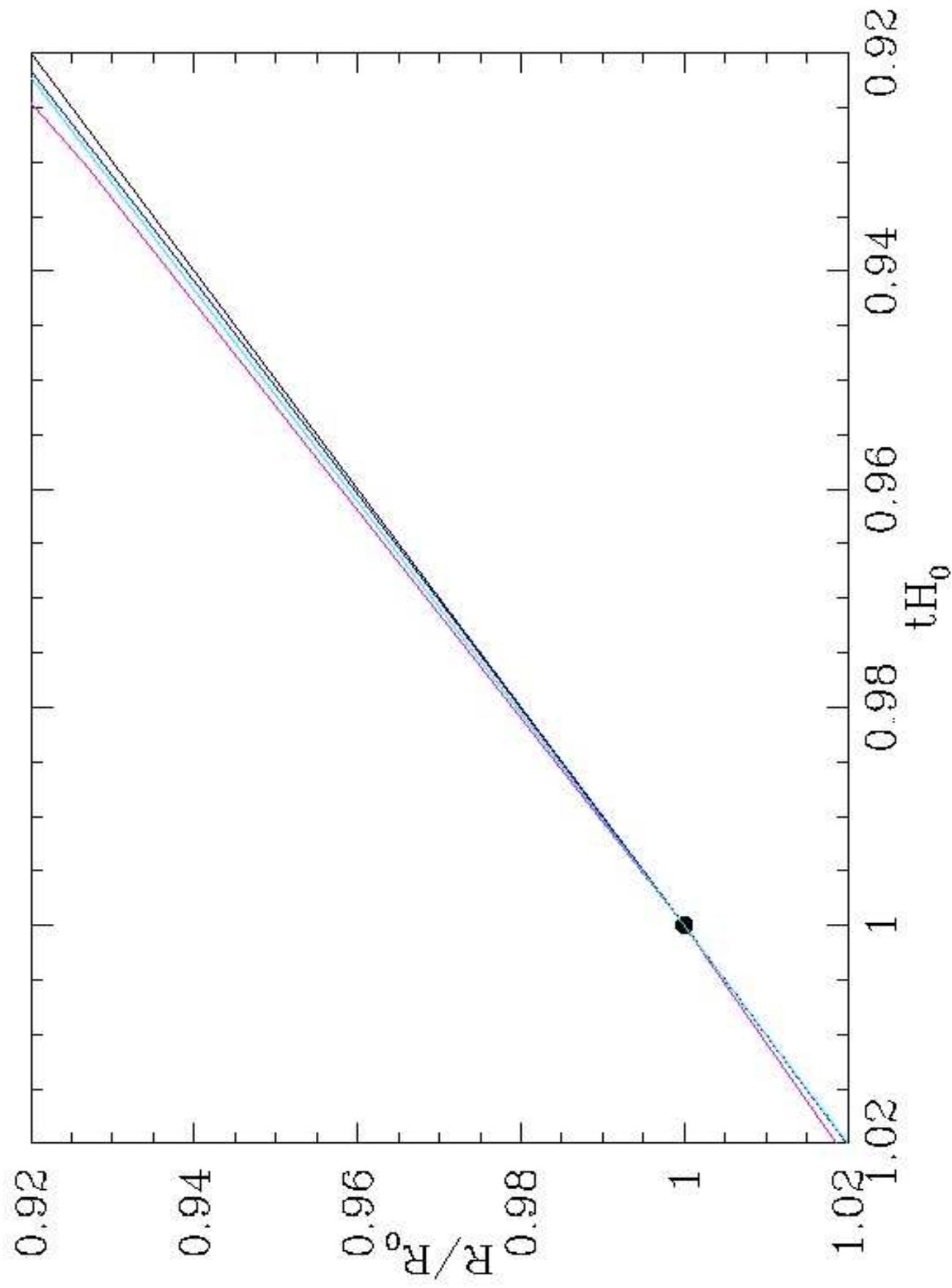
\ddot{R} négatif \Rightarrow décélération

De plus l'Univers a été plus chaud qu'aujourd'hui









Détermination de

$$\frac{R_0}{R_1} = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} = 1 + z$$

Pas de problème

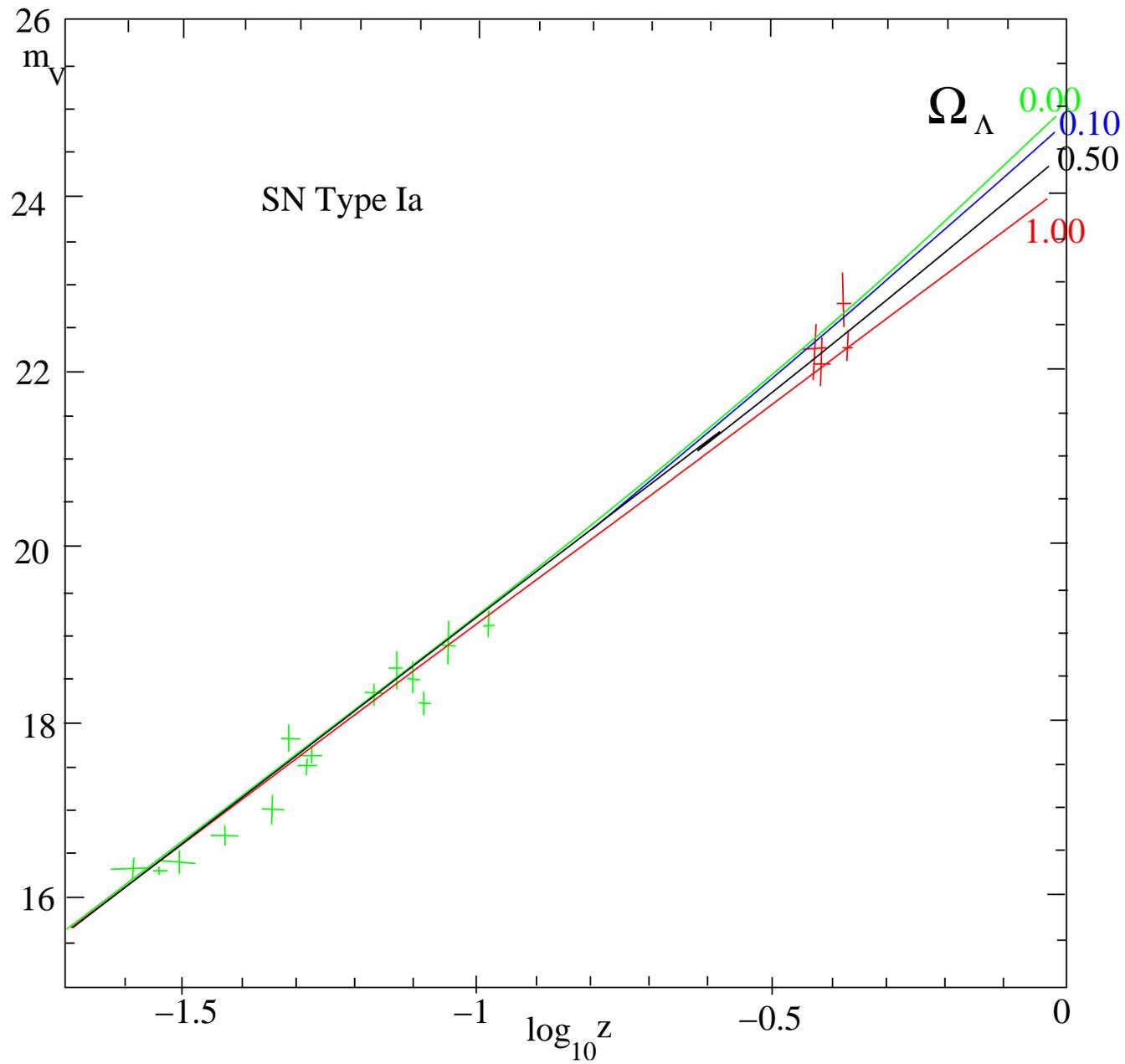
Détermination de

$$d = c \cdot t$$

Beaucoup plus délicate!

Mais ...

Les supernovæ lointaines mesurées par HST
et les nouveaux télescopes
viennent à notre secours



Mais gare aux pièges!

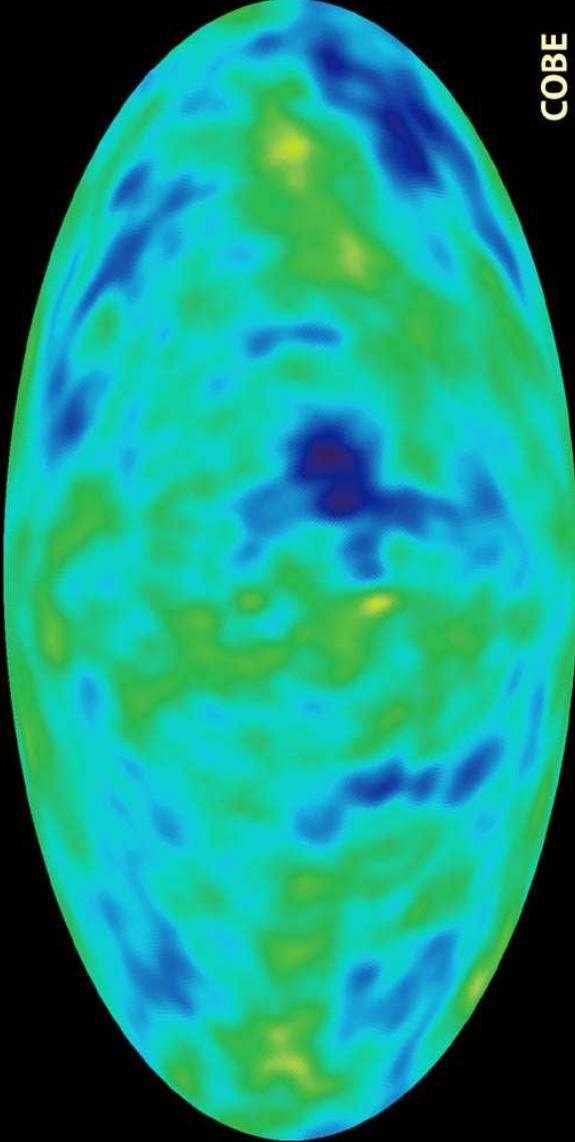
L'éclat apparent est en $\frac{1}{d^2}$... APPAREMMENT

Affaiblissement supplémentaire dû à:

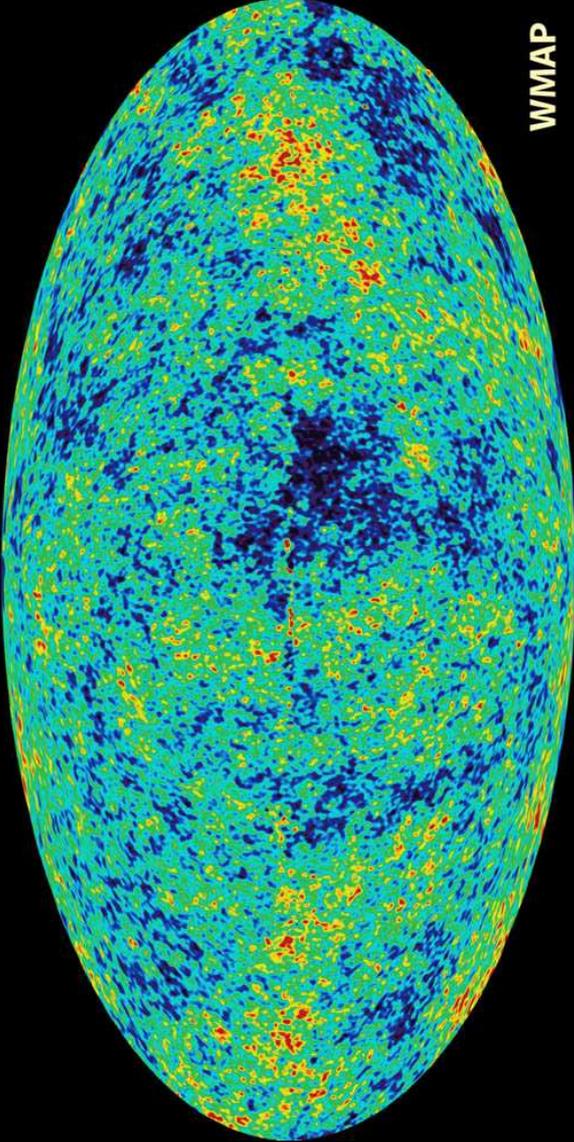
- la surface d'émission plus petite $(1+z)^2$
- le décalage vers le rouge: photons plus faibles: $(1+z)$
- temps réception plus long que temps émission: $(1+z)$

Perlemutter et al., 1998, Nature 391,51 n'y sont pas tombés

De plus est-ce que les supernovæ d'"alors"
sont comparables à celles de notre époque?



COBE



WMAP

John Matter et George Smoot

Maîtres d'œuvre de COBE

Prix Nobel 2006

Emission de rayons X

$$S_X \propto T^{1/2} \cdot \rho^2 \cdot d^{-2}$$

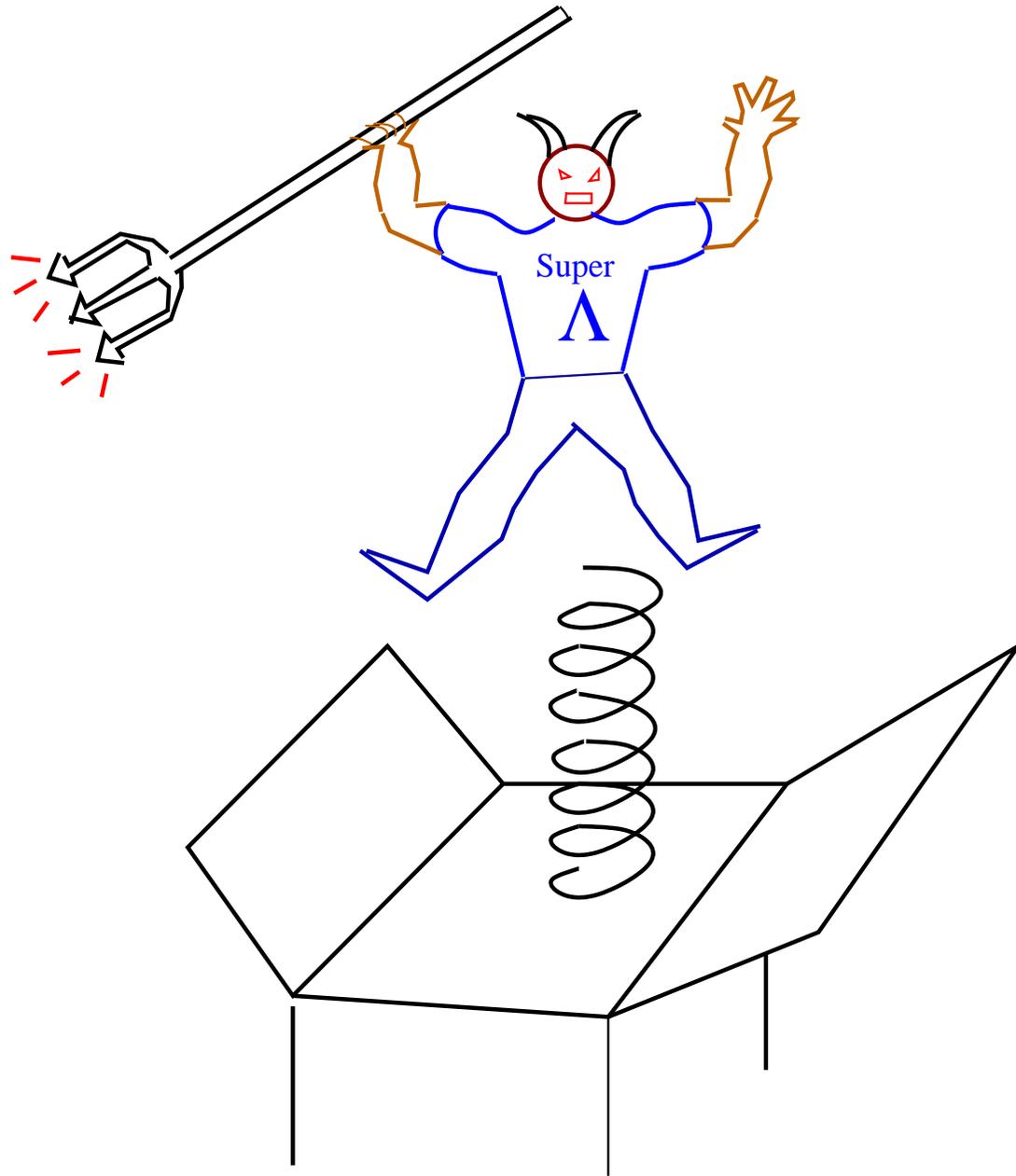
Effet Sunyaev-Zel'dovitch

Micro réchauffement du fonds cosmique

Effet Compton détectable par WMAP

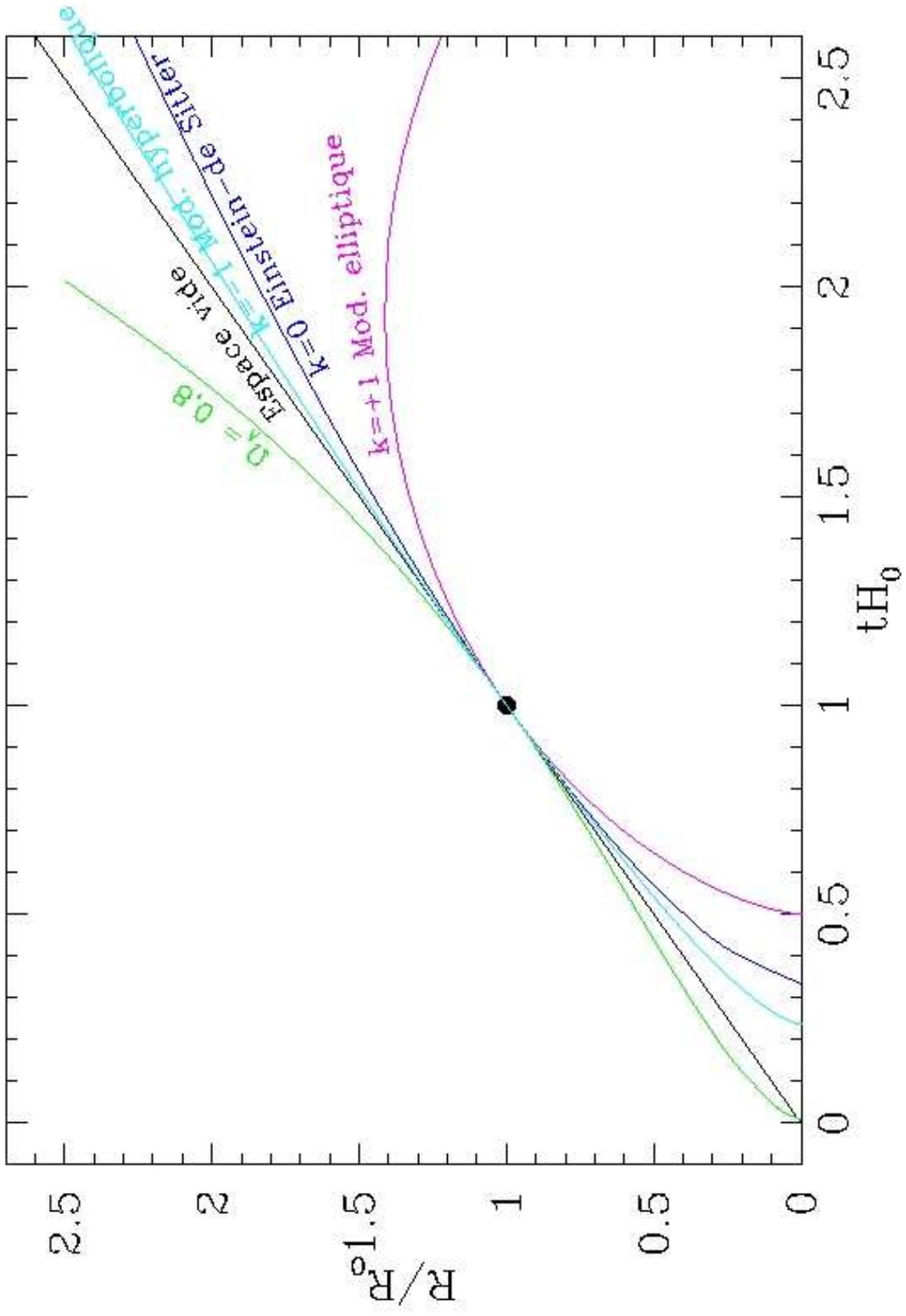
$$\Delta_{SZ} \propto T \cdot \rho$$

Indépendant de la distance d



Wilconsin Microwave Anisotropy Probe

H_0	Valeur actuelle de $H = \frac{\dot{R}}{R}$	71	$^{+4}_{-3} \text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$
Ω_ρ	Densité baryonique/ ρ_{crit}	0,044	$\pm 0,004$
Ω_m	Densité matérielle totale/ ρ_{crit}	0,27	± 0.04
Ω_Λ	Densité énergie cachée/ ρ_{crit}	0,73	$\pm 0,04$
Ω_0	Densité totale/ ρ_{crit}	1,02	$\pm 0,02$
t_0	Age de l'Univers	13,7	$\pm 0,2 \cdot 10^9$ ans
t_γ	Age de l'Univers à l'époque du découplage	379	$^{+8}_{-7} \cdot 10^3$ ans
$1 + z_\gamma$	Redshift à l'époque du découplage	1090	± 1



Fin

Fin

...

provisoire