

# 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?

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

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

$\rho$  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

$\Lambda$  La **CONSTANTE COSMOLOGIQUE** quelque chose de bien mystérieux

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

les équations des cosmologies deviennent:

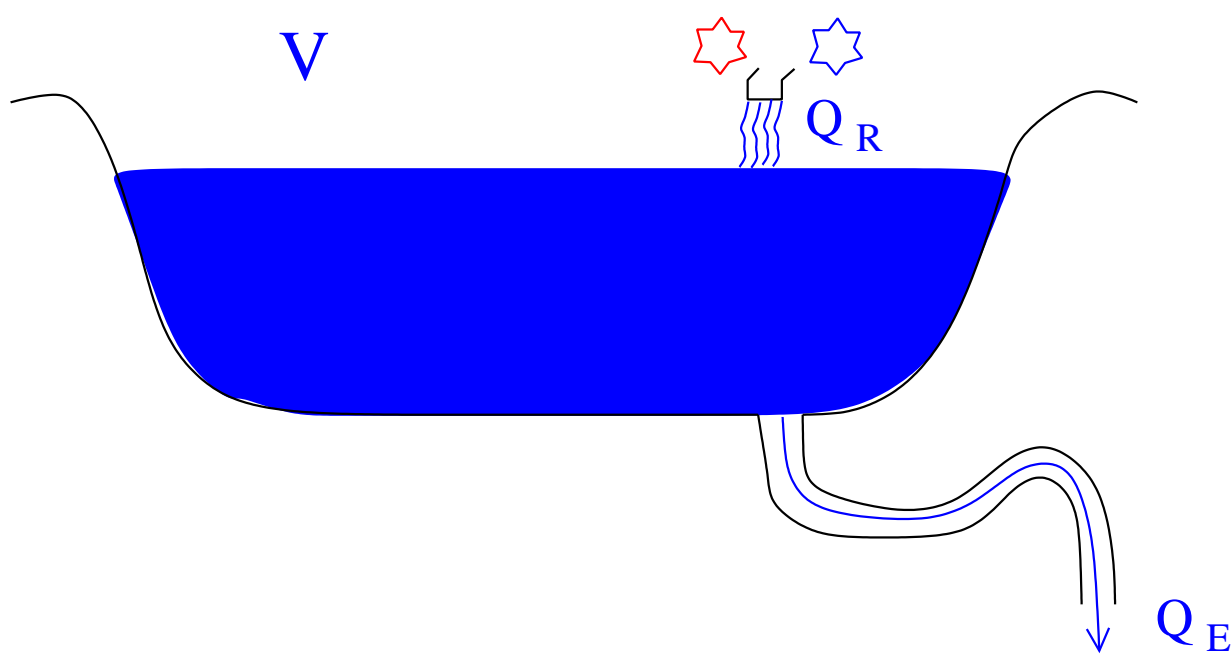
$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 - \frac{c^2}{3}\Lambda = \frac{8\pi G}{3}\rho$$

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

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

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

Que signifient  $R$  et les points au-dessus?



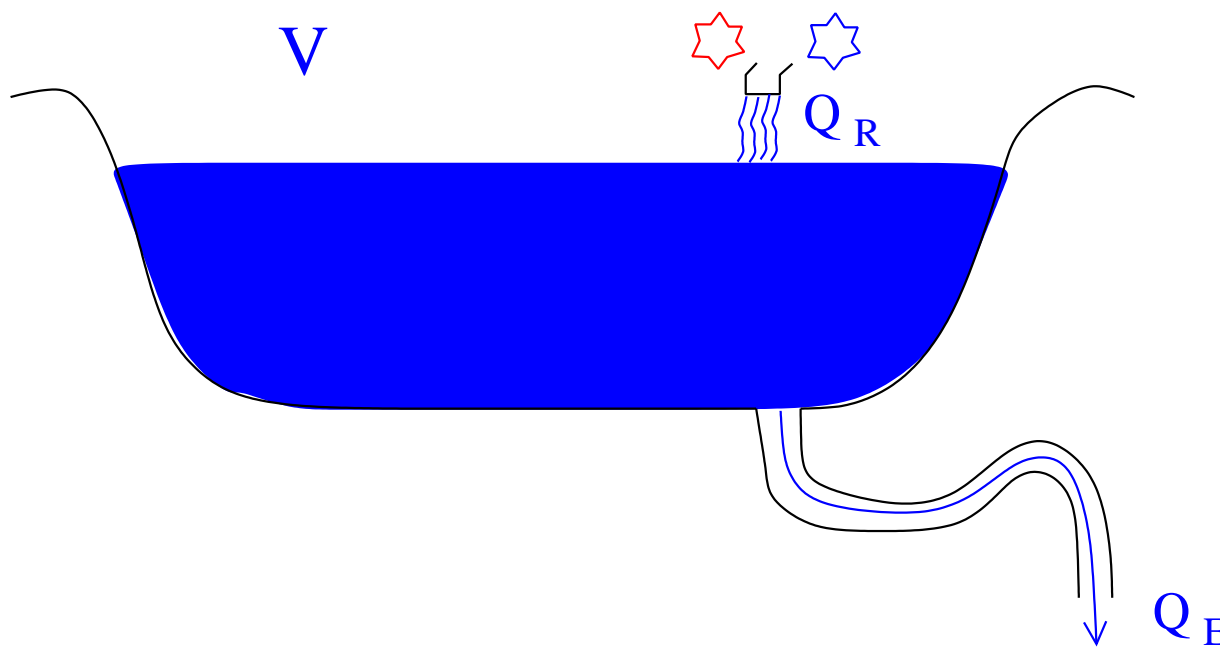
$V$  volume

$\dot{V}$  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

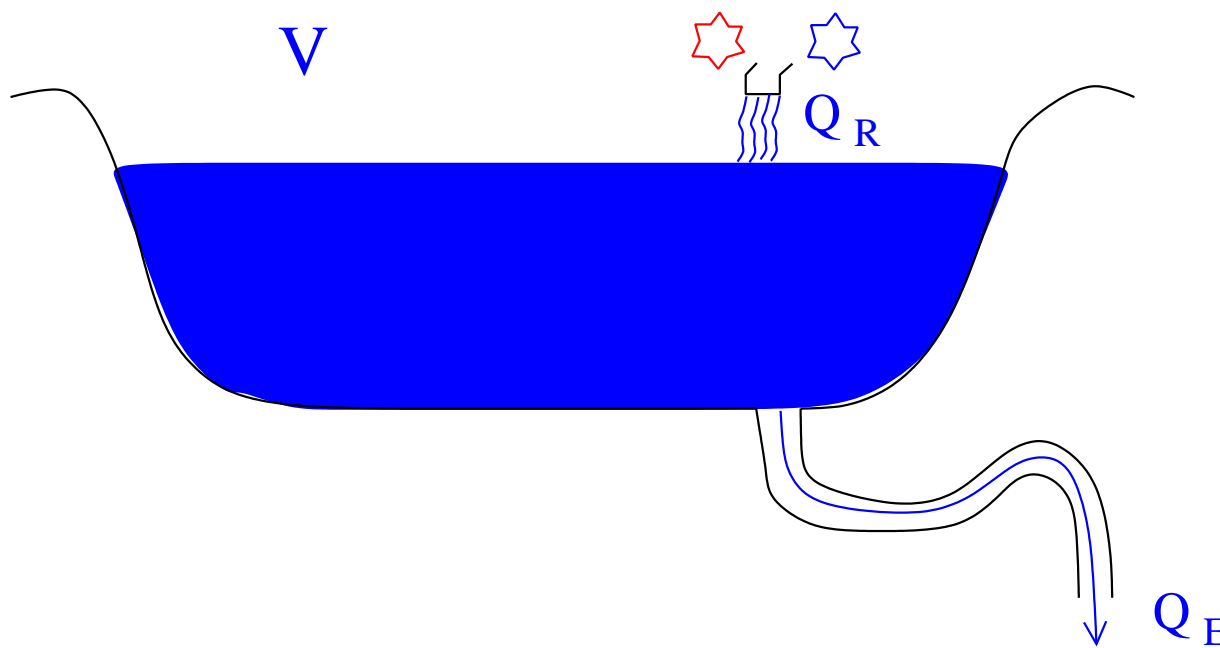
$Q_R$  débit des robinets

$Q_E$  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

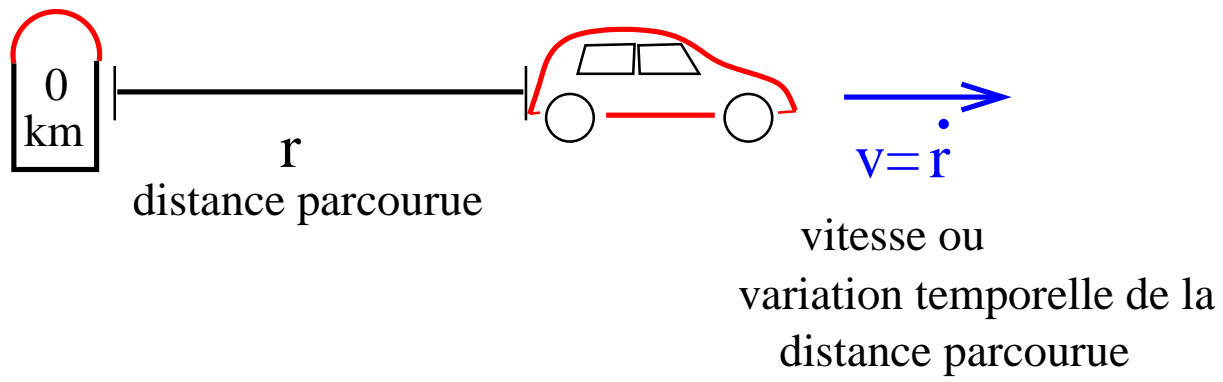
$Q_E$  débit d'écoulement

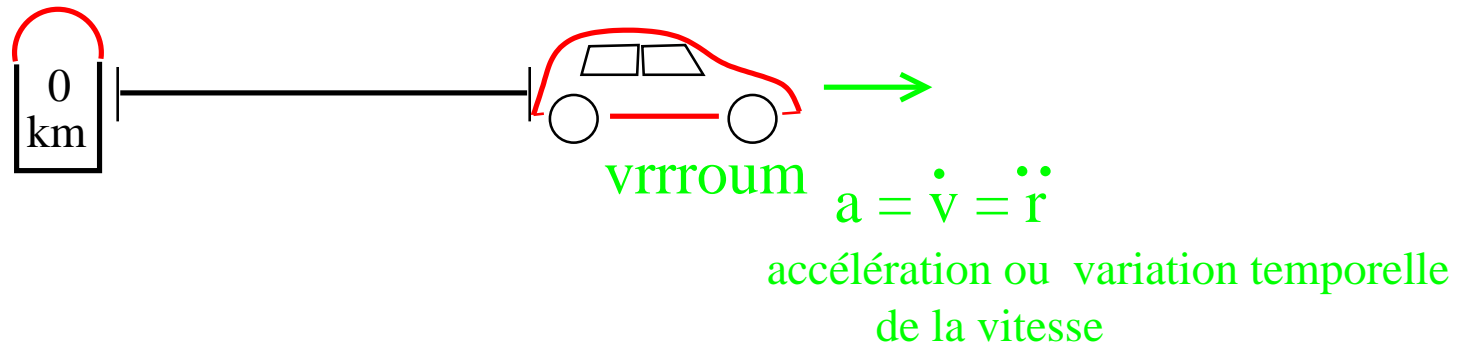
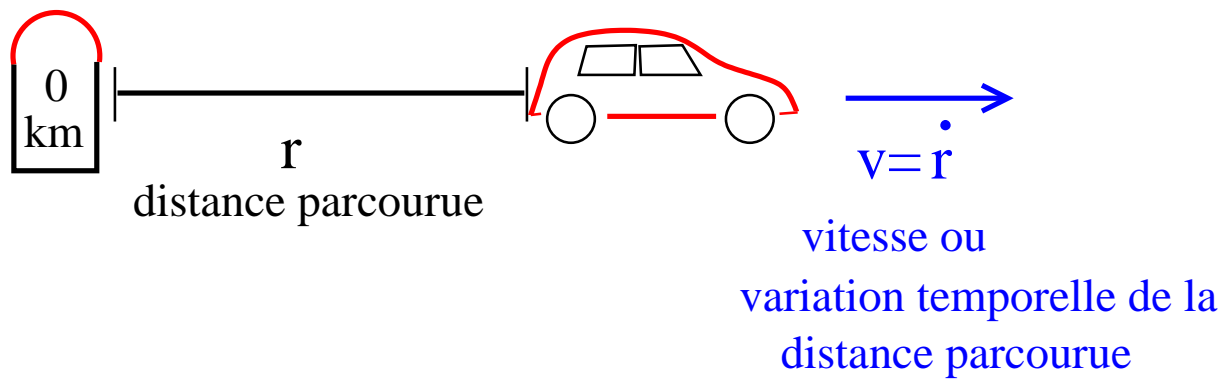
$$\dot{V} = Q_R - Q_E$$

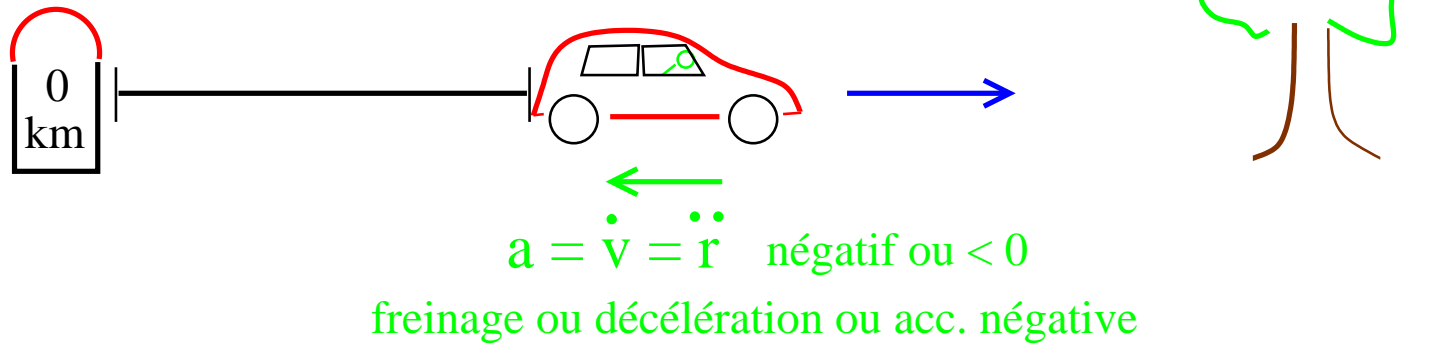
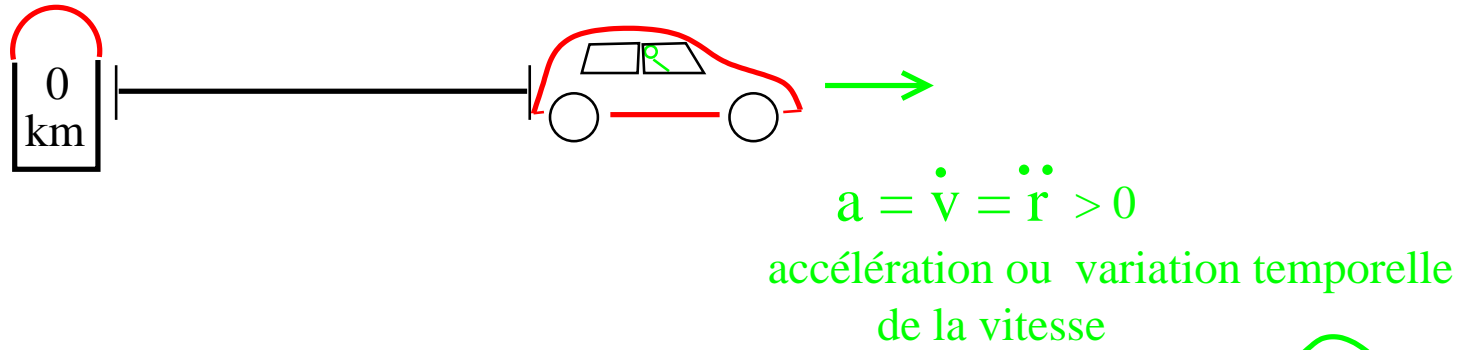
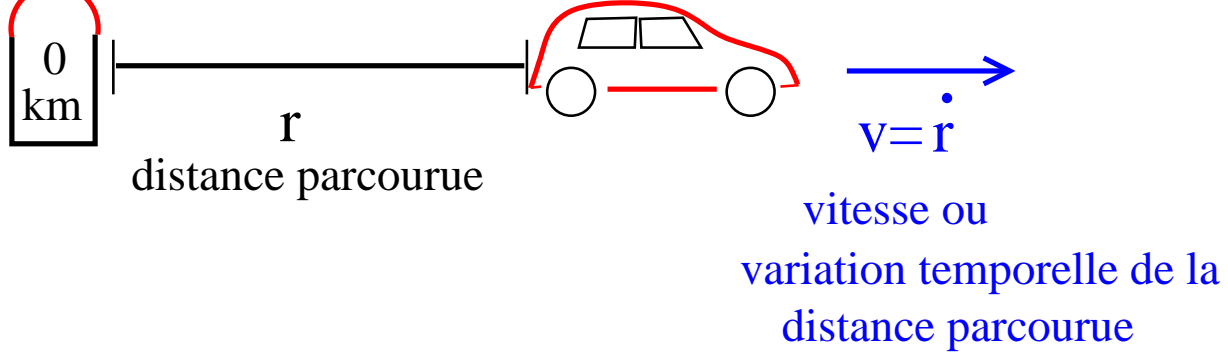
$\ddot{V}$  variation de la variation du volume  
du débit net

$\ddot{V}$  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?

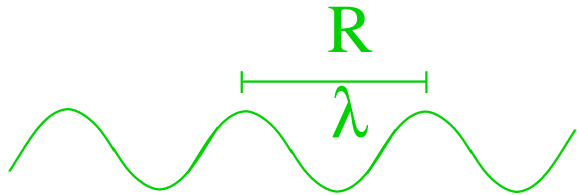


distance typique entre 2 galaxies

# Qu'est-ce que R?



distance typique entre 2 galaxies

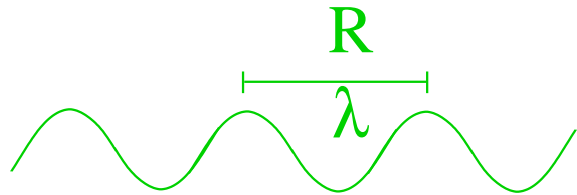


longueur d'onde d'un rayonnement

Qu'est-ce que  $R$ ?



distance typique entre 2 galaxies



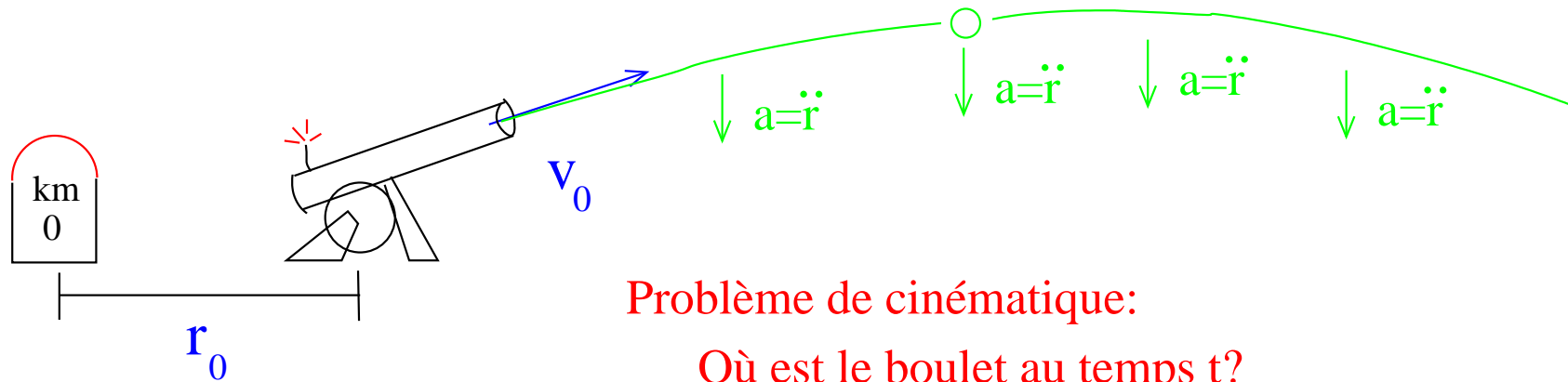
longueur d'onde d'un rayonnement

$\dot{R}$  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  $\Lambda$

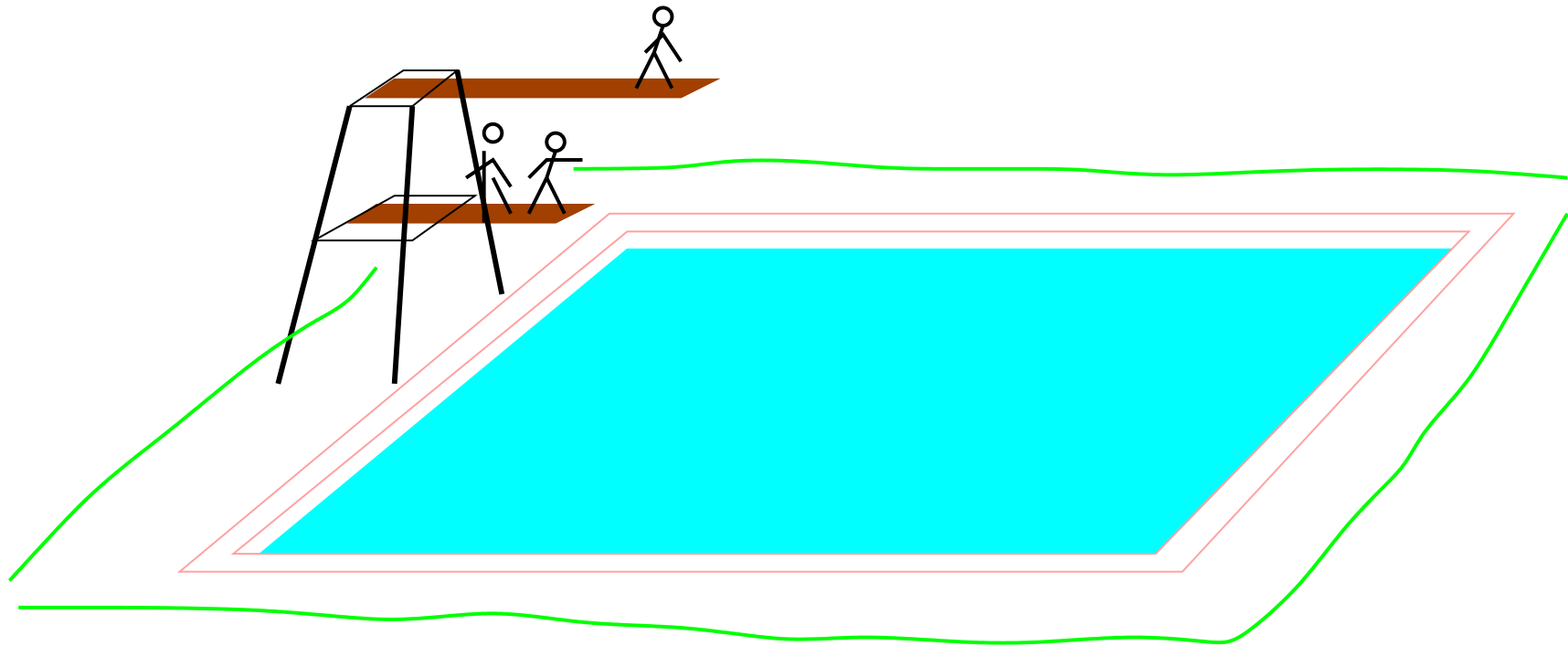
1916-1929

Univers statique

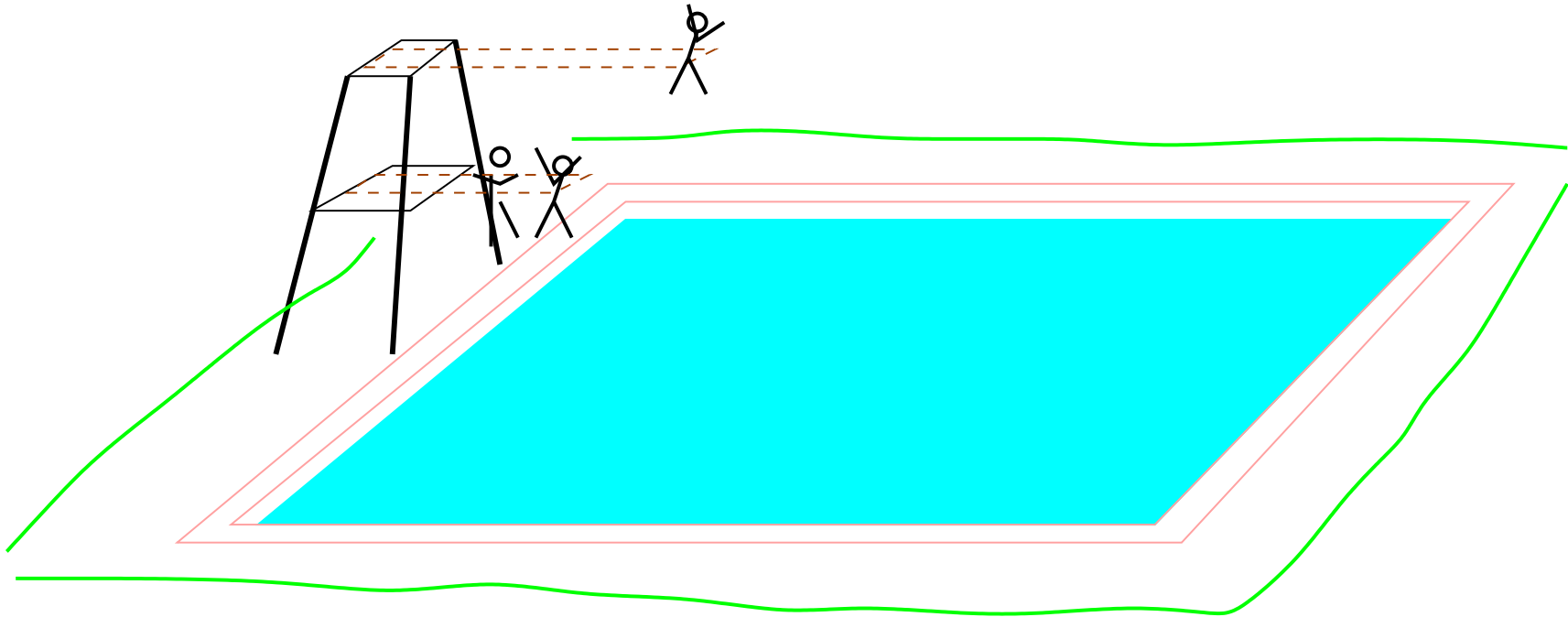
$R$  constant ou  $\dot{R} = 0$

Est-ce possible?

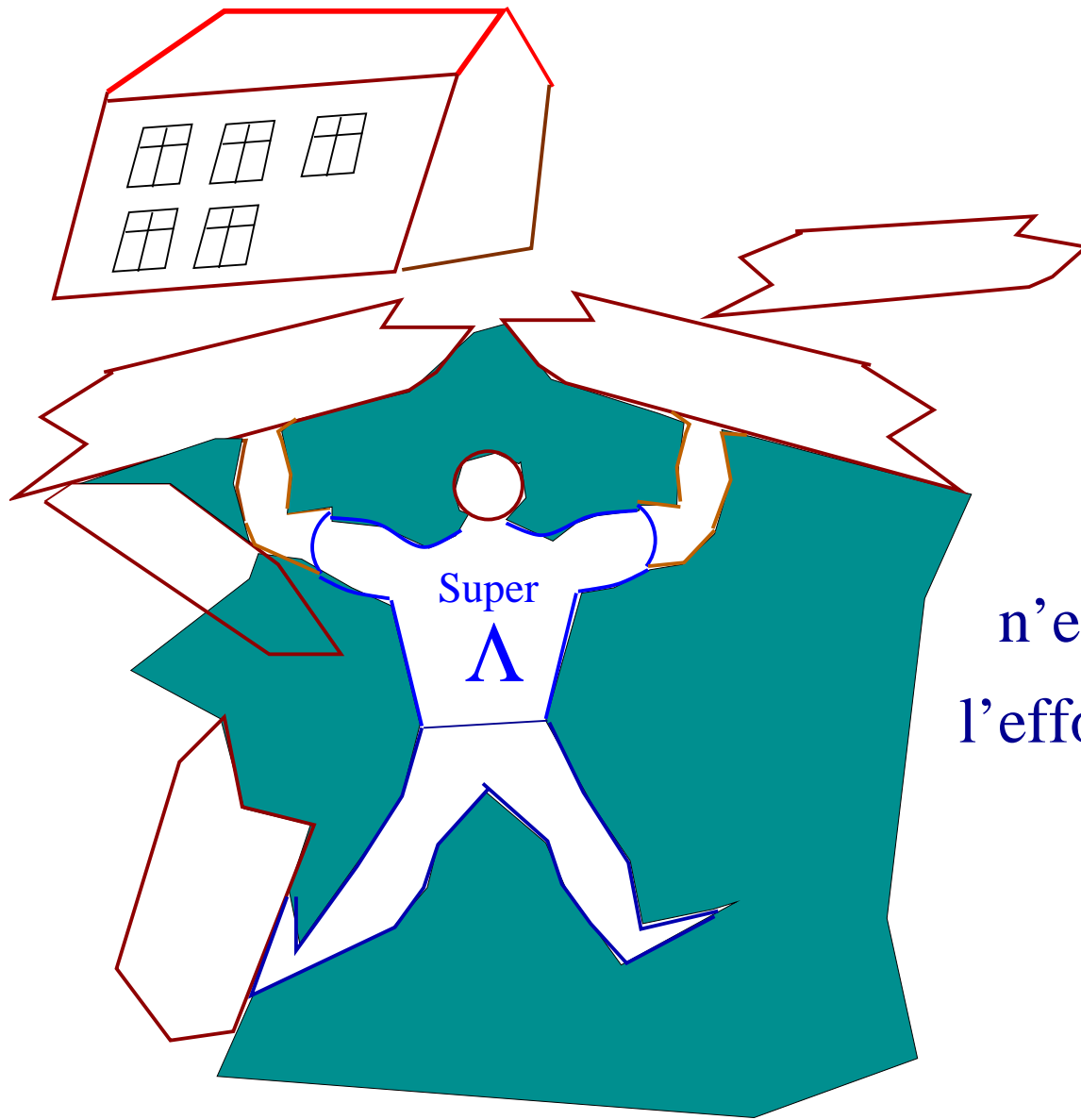
# Stabilité



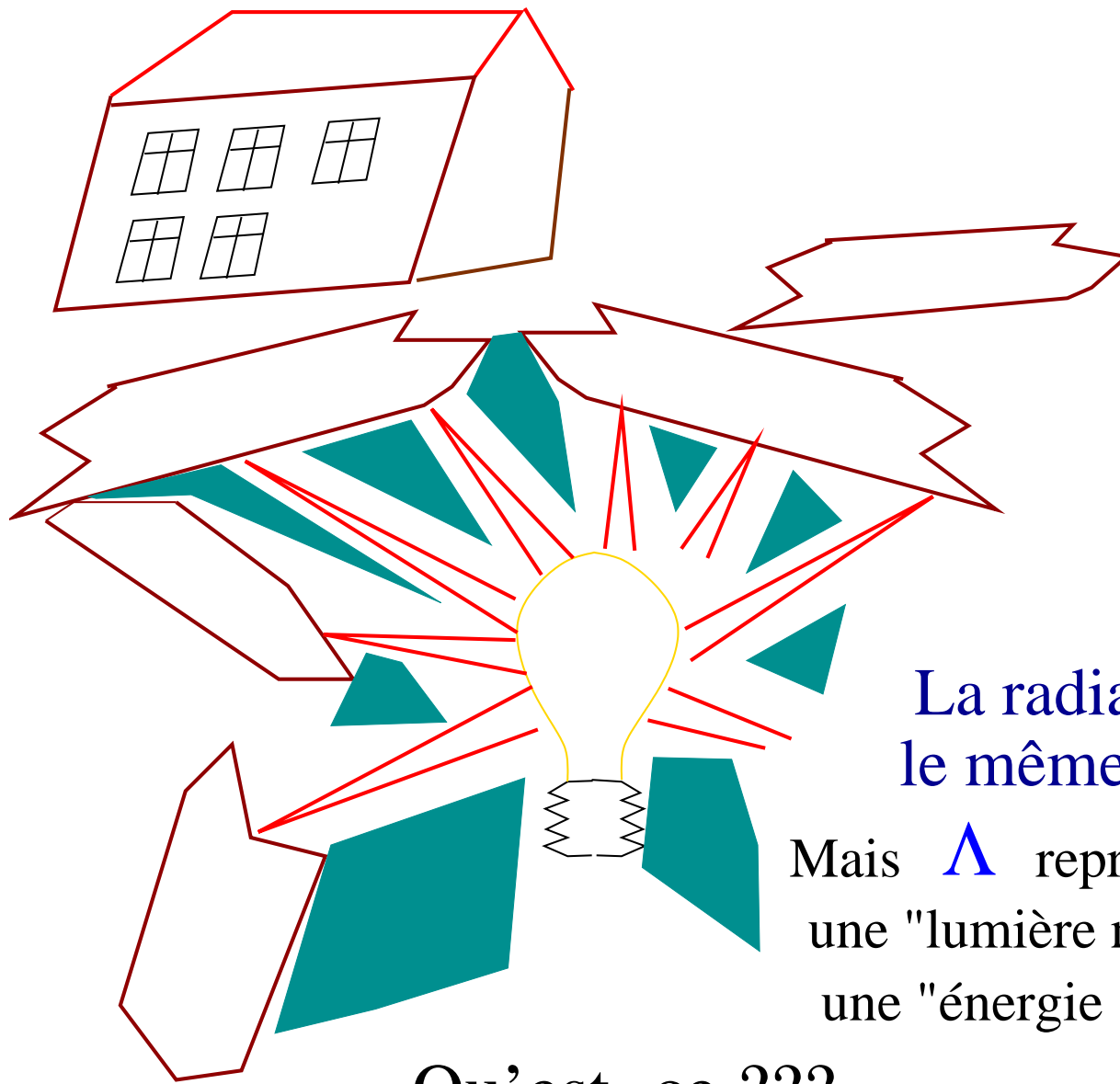
Stabilité seulement provisoire !!







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  $\Lambda$



Sans  $\Lambda$

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

$\lambda_1$  longueur d'onde à l'émission

$\lambda_0$  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<sup>e</sup> 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  $\mu$ s



Après 100  $\mu$ s



Après 200  $\mu$ s



Après 300  $\mu$ s



3000 K

Fond cosmique à  
2,728K

Micro-ondes à 1 mm

Fossile d'un Univers opaque

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

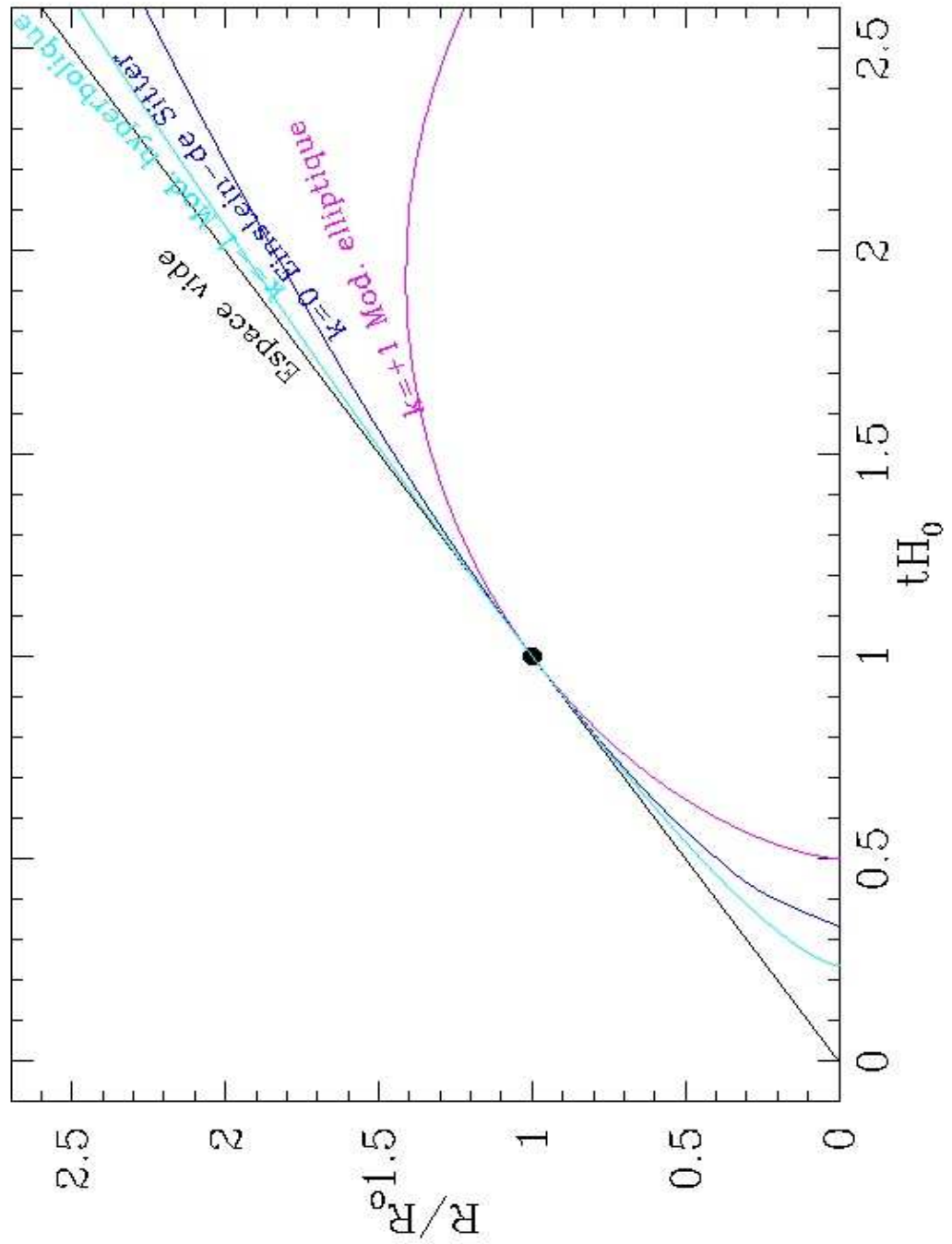
$$2\frac{\ddot{R}}{R} + \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 + k \left(\frac{c}{R}\right)^2 = -\frac{8\pi G}{c^2} P \Rightarrow$$

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

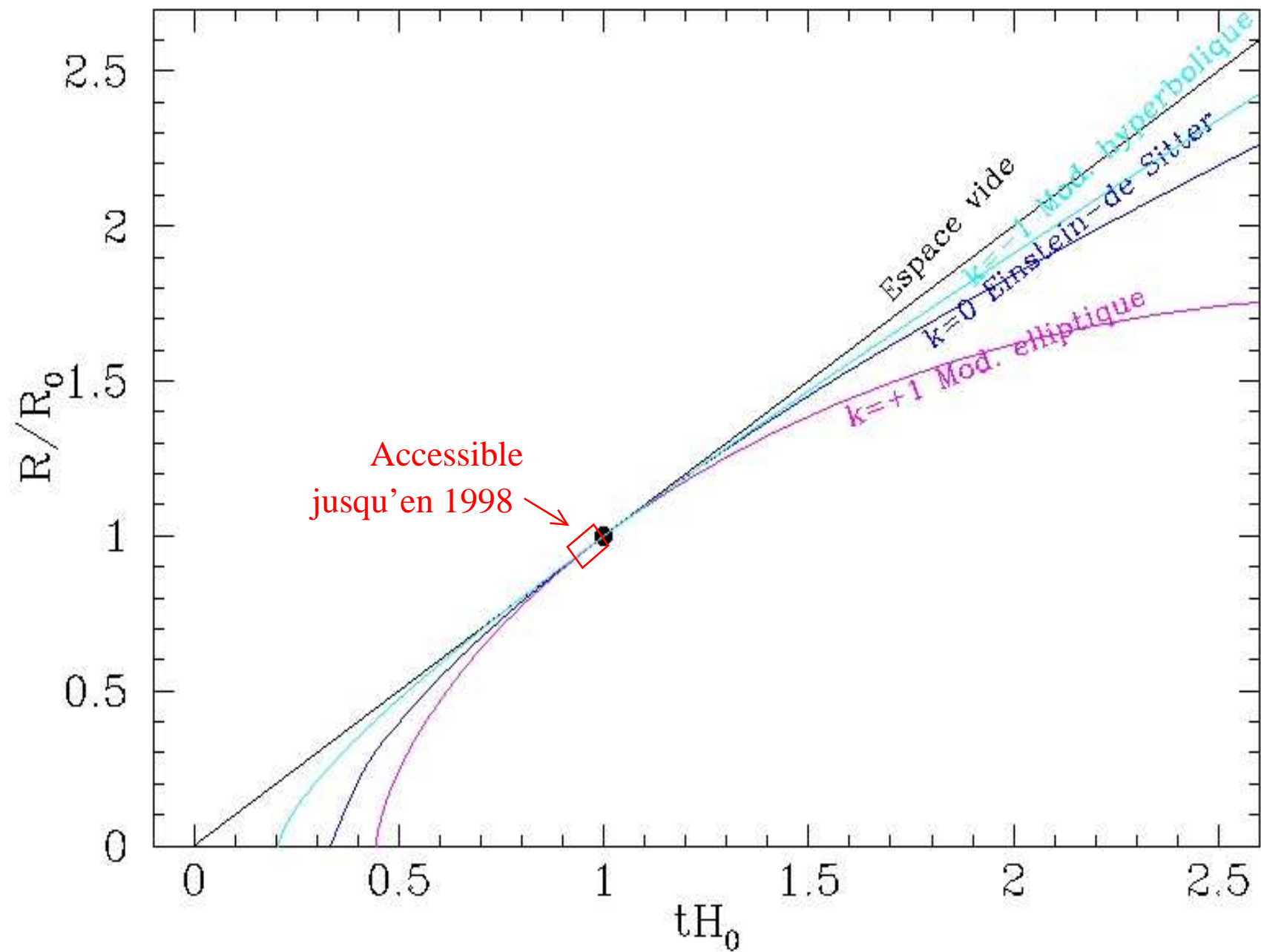
$\ddot{R}$  négatif  $\Rightarrow$  décélération

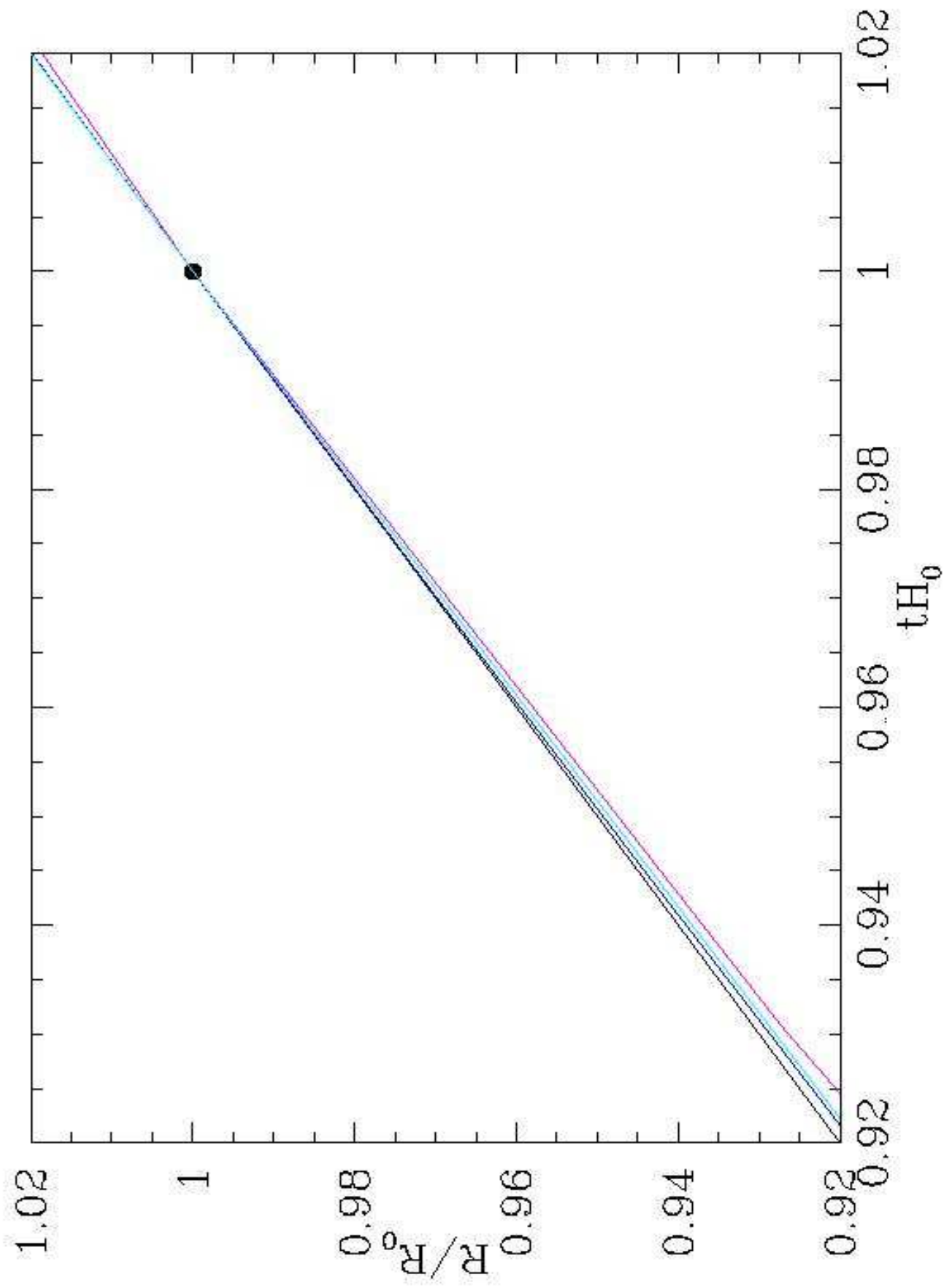
De plus l'Univers a été plus chaud qu'aujourd'hui

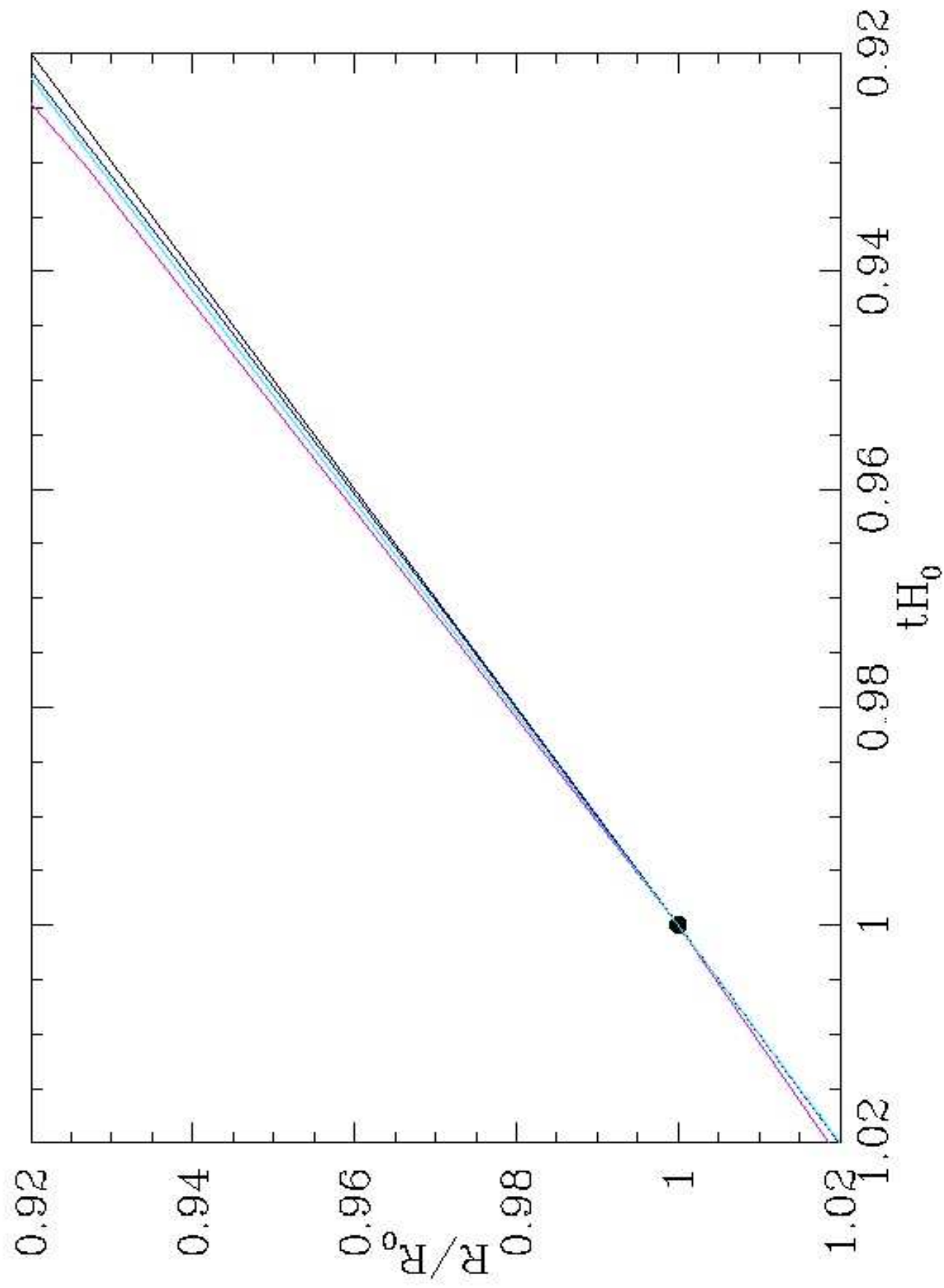












Détermination de

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

Pas de problème

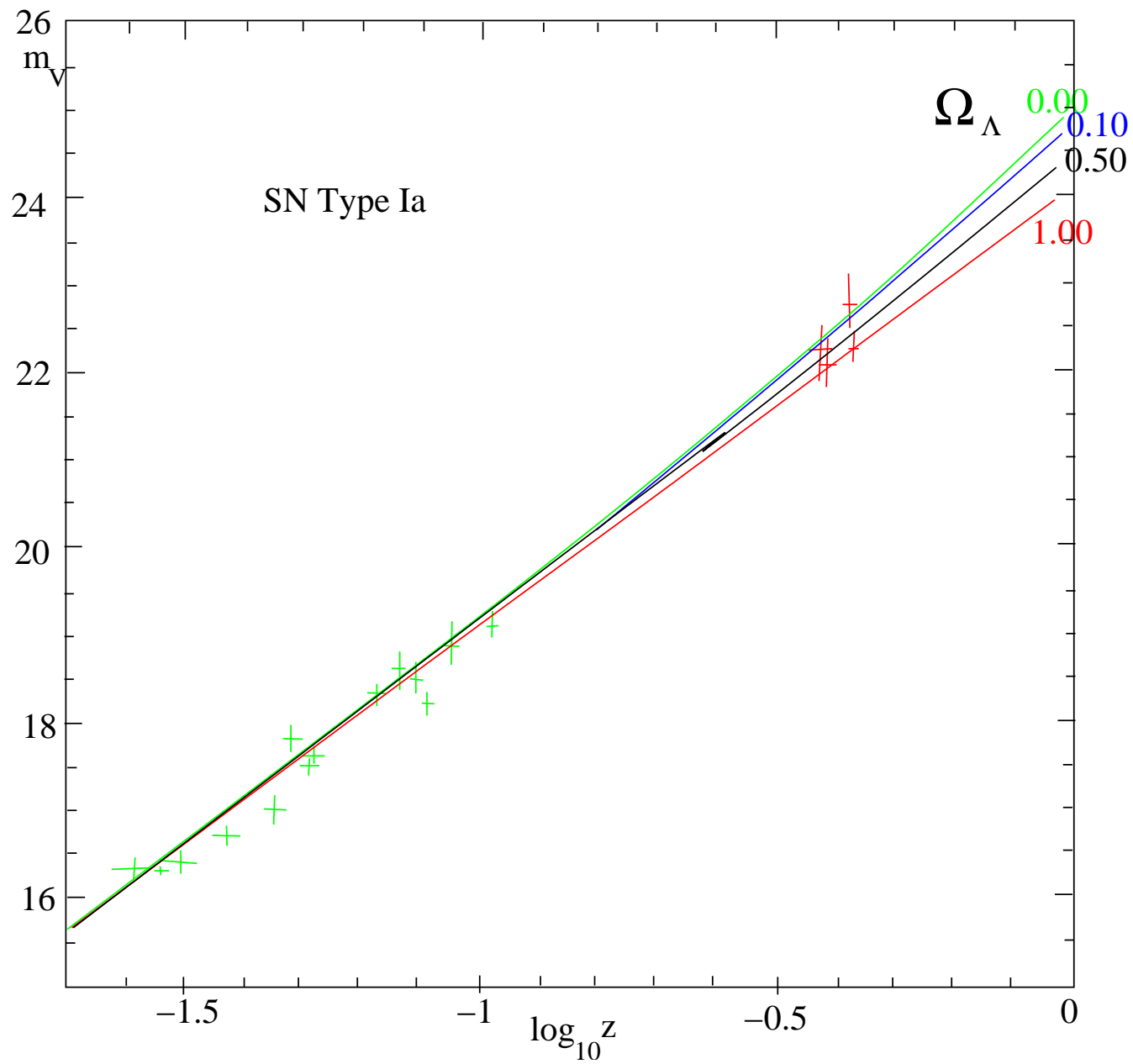
Détermination de

$$d = c \cdot t$$

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

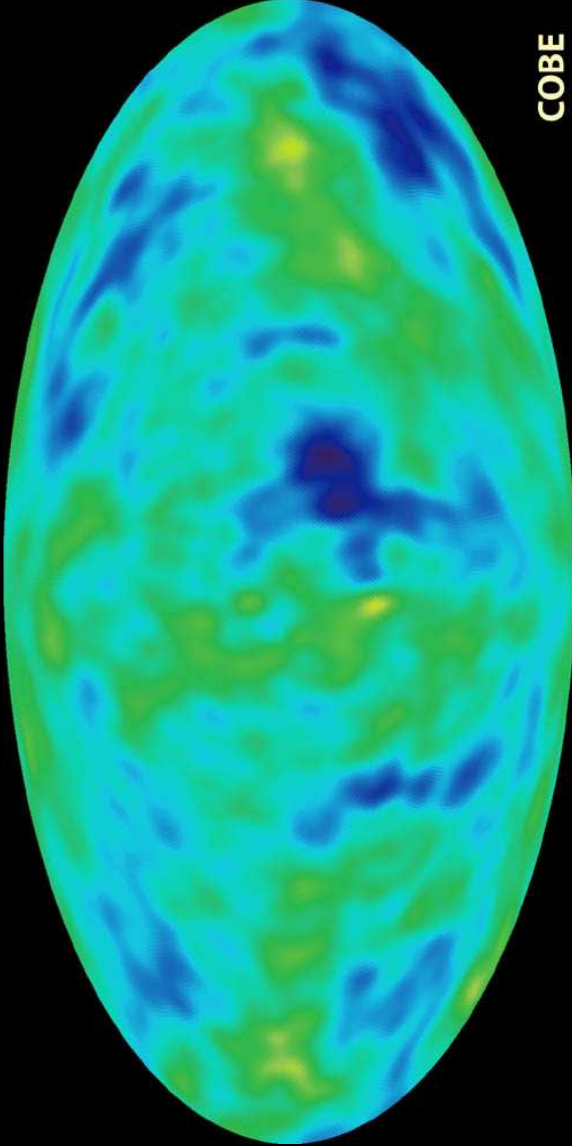
Affaiblissement supplémentaire dû à:

- 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:  $(1 + z)$

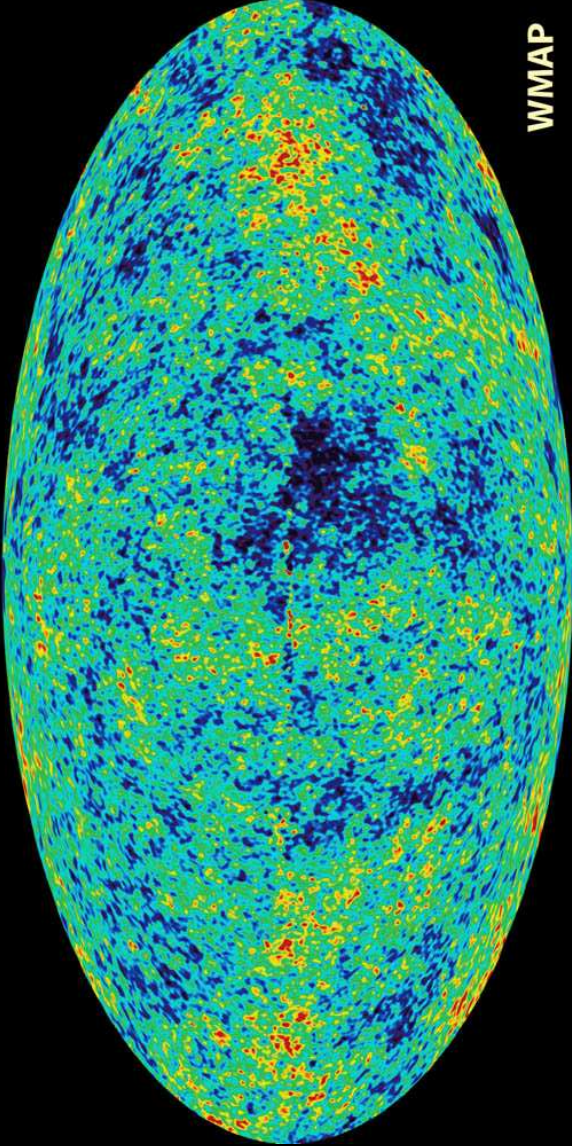
Perlemutter et al., 1998, Nature 391,51 n'y sont pas tombés

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  $X$

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

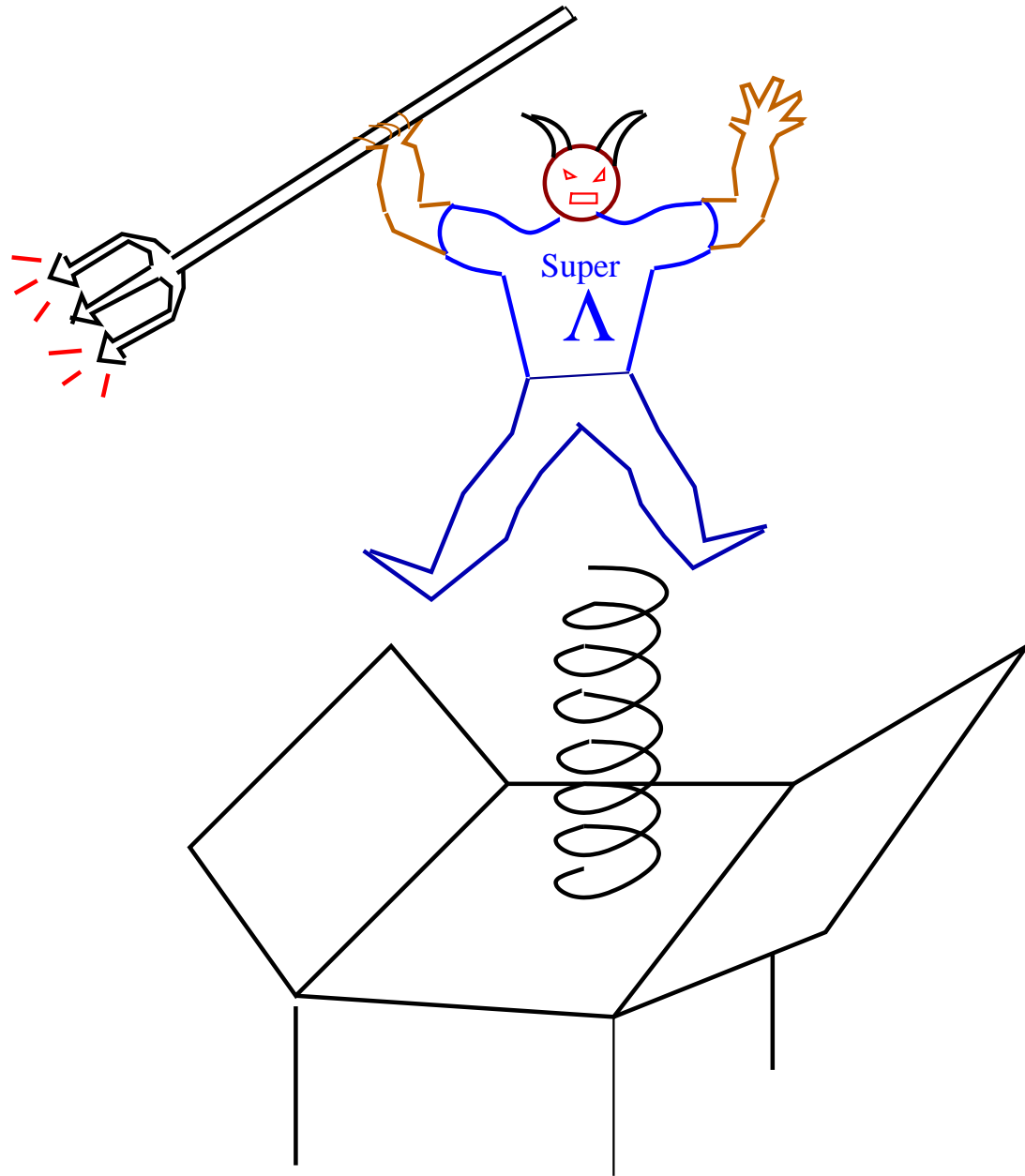
Effet Sunyaev-Zel'dovitch

Micro réchauffement du fonds cosmique

Effet Compton détectable par WMAP

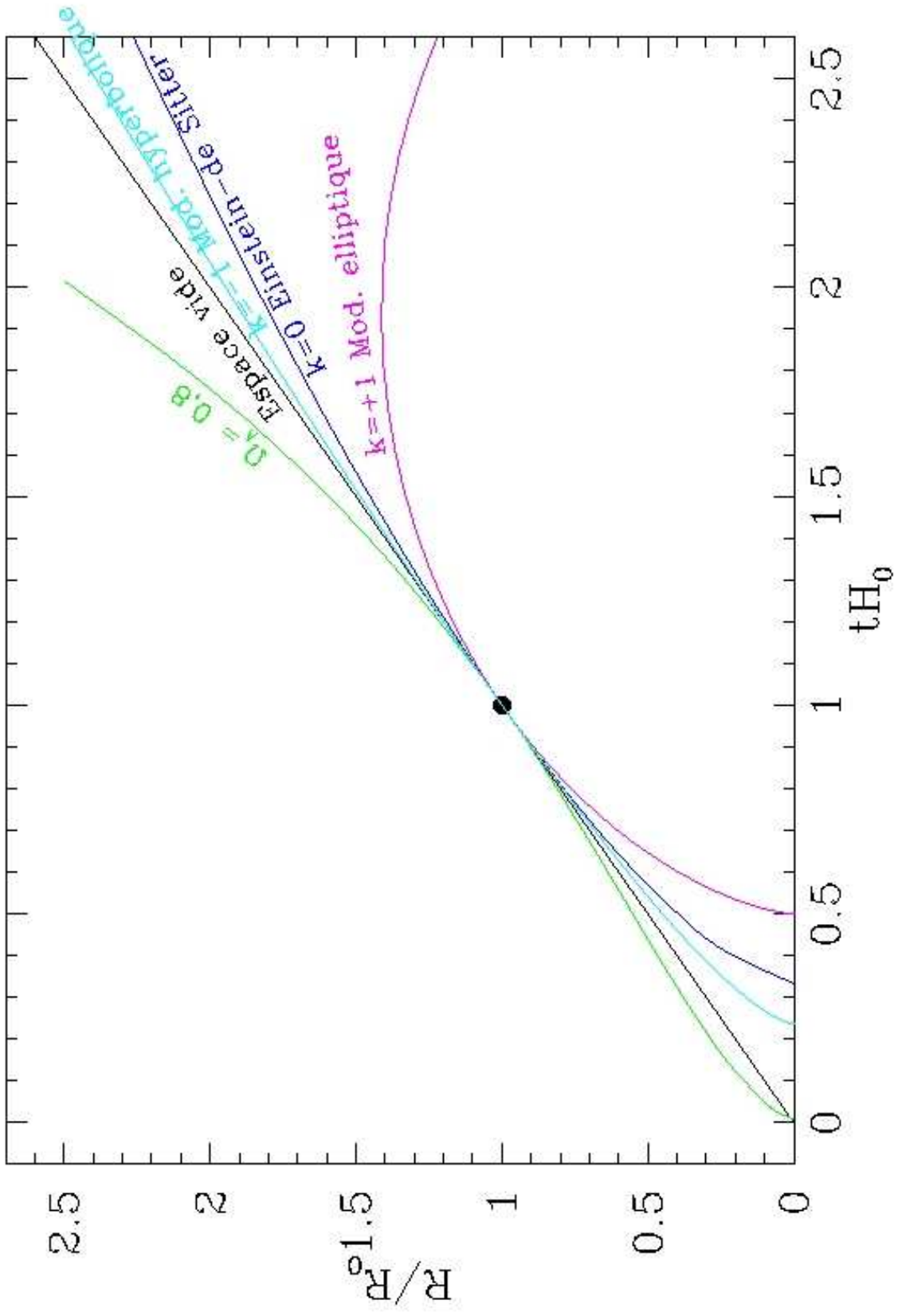
$$\Delta_{SZ} \propto T \cdot \rho$$

Indépendant de la distance  $d$



# Wilconsin Microwave Anisotropy Probe

$H_0$	Valeur actuelle de $H = \frac{\dot{R}}{R}$	71	$^{+4}_{-3} \text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$
$\Omega_\rho$	Densité baryonique/ $\rho_{\text{crit}}$	0,044	$\pm 0,004$
$\Omega_m$	Densité matérielle totale/ $\rho_{\text{crit}}$	0,27	$\pm 0.04$
$\Omega_\Lambda$	Densité énergie cachée/ $\rho_{\text{crit}}$	0,73	$\pm 0,04$
$\Omega_0$	Densité totale/ $\rho_{\text{crit}}$	1,02	$\pm 0,02$
$t_0$	Age de l'Univers	13,7	$\pm 0,2 \cdot 10^9$ ans
$t_\gamma$	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	$\pm 1$



Fin

Fin

...

provisoire