

SOUTENANCE DE THESE

Extraction des paramètres cosmologiques et des propriétés de l'énergie noire

Sebastian Linden

Centre de Physique Théorique (CPT)
Université de Provence

19 avril 2010

Structure

- 1 Motivation
- 2 Cosmographie
- 3 Paramétrage de l'énergie noire
- 4 Evolution des magnitudes des SNe Ia
- 5 Conclusions

Structure

- 1 **Motivation**
- 2 Cosmographie
- 3 Paramétrage de l'énergie noire
- 4 Evolution des magnitudes des SNe Ia
- 5 Conclusions

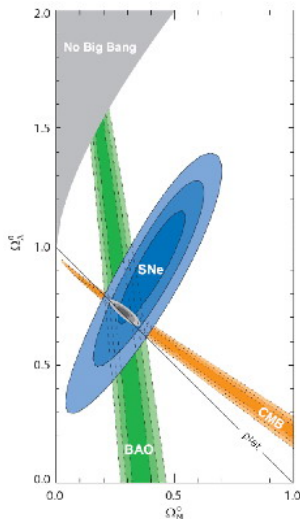
Le modèle standard cosmologique

- Convergence de plusieurs observables (SNe, CMB, BAO, WL,...)

- $\Omega_b^0 = 0.046 \pm 0.002$,
- $\Omega_{\text{cdm}}^0 = 0.227 \pm 0.014$,
- $\Omega_{\Lambda}^0 = 0.728 \pm 0.015$

(Komatsu et al. (WMAP7) arXiv:1001.4538, 2010).

- Modèle standard cosmologique: Λ CDM
 \leadsto High precision cosmology.
- $q_0 < 0 \Leftrightarrow$ fluide à $w = \frac{p}{\rho c^2} < -1/3$.
- Taux d'expansion: accéléré!



Kowalski et al., ApJ 686 (749) 2008.

L'Univers sur une page

- **Principe Cosmologique + Relativité Générale:**

→ Equation de Friedmann: $(H = \dot{a}/a)$

- $$E^2(z; p_i) = \frac{H^2(z; p_i)}{H_0^2} = \Omega_k^0 (1+z)^2 + \Omega_M^0 (1+z)^3 + \Omega_R^0 (1+z)^4 + \Omega_\Lambda^0.$$

- Distances des objets données par:

$$d(z, p_i) = \frac{c}{H_0} \sqrt{|\Omega_k^0|^{-1}} \left\{ \begin{array}{c} \sin(x) \\ x \\ \sinh(x) \end{array} \right\} \left(\sqrt{|\Omega_k^0|} \int_0^z \frac{d\tilde{z}}{E(\tilde{z}, p_i)} \right) \cdot \left\{ \begin{array}{l} k = +1, (\Omega_k < 0) \\ k = 0, (\Omega_k = 0) \\ k = -1, (\Omega_k > 0) \end{array} \right\}$$

- Distance lumineuse: $\mathcal{F} = \frac{\text{Luminosité}}{4\pi d_L}$ ('chandelle standard').

- Distance angulaire: $\Theta = \frac{\text{Diamètre}}{d_A}$ ('règle étalon').

Sondes et Observables

SNe

- Observable:

- ★ $\mu = m - M = M_s + 5 \log \frac{H_0}{c} d_L(z; p_i)$

- ★ 307 SNe (Union Set), Kowalski et al., ApJ 686 (749) 2008.

CMB

- Observable:

- ★ $\mathcal{R}(z_{\text{CMB}}; p_i) = \left(\sqrt{\Omega_M^0} H_0 / c \right) d(z_{\text{CMB}}; p_i)$

$$z_{\text{CMB}} = 1089$$

- ★ WMAP5: $\mathcal{R} = 1.710 \pm 0.019$.

BAO

- Observable:

- ★ $A(z_{\text{BAO}}; p_i) := [z_{\text{BAO}}^2 E(z_{\text{BAO}}; p_i)]^{-1/3} [(H_0/c) d(z_{\text{BAO}}; p_i)]^{2/3}$

$$z_{\text{BAO}} = 0.35$$

- ★ SDSS: $A = 0.469 \pm 0.017$.

- Encore d'autres sondes existent (comptages d'amas, mesures du spectre de puissance, autres mesures de distances...)

Constante Cosmologique?

- Λ n'est qu'une constante naturelle supplémentaire dont la valeur doit être donnée par l'expérience.
 - ▶ \Rightarrow Fin de la présentation, merci de votre attention.
- Problèmes:
 - ① "Problème de coïncidence:"
 - ★ Pour des valeurs différentes de Λ , l'univers se serait déjà effondré, ou les structures n'auraient pas pu se former.
 - ② L'expansion n'accélère pas pour la première fois:
 - ★ Arrêt phase d'inflation \rightarrow pas de Λ
 - ★ \rightarrow 'pourquoi donc aujourd'hui Λ ' ?
 - ③ Λ est la contribution du vide quantique.
 - ★ $\Rightarrow \Lambda \sim 10^{68} \text{m}^{-2}$. Mais nous avons mesuré $\Lambda \sim 10^{-52} \text{m}^{-2}$!
 - ★ "Problème de la Constante Cosmologique".
- Si ce n'est pas une Constante Cosmologique, c'est quelque chose d'autre.

Constante Cosmologique?

- Λ n'est qu'une constante naturelle supplémentaire dont la valeur doit être donnée par l'expérience.
 - ▶ \Rightarrow Fin de la présentation, merci de votre attention.
- Problèmes:
 - ① "Problème de coïncidence:"
 - ★ Pour des valeurs différentes de Λ , l'univers se serait déjà effondré, ou les structures n'auraient pas pu se former.
 - ② L'expansion n'accélère pas pour la première fois:
 - ★ Arrêt phase d'inflation \rightarrow pas de Λ
 - ★ \rightarrow 'pourquoi donc aujourd'hui Λ '?
 - ③ Λ est la contribution du vide quantique.
 - ★ $\Rightarrow \Lambda \sim 10^{68} \text{m}^{-2}$. Mais nous avons mesuré $\Lambda \sim 10^{-52} \text{m}^{-2}$!
 - ★ "Problème de la Constante Cosmologique".
- Si ce n'est pas une Constante Cosmologique, c'est quelque chose d'autre.

Constante Cosmologique?

- Λ n'est qu'une constante naturelle supplémentaire dont la valeur doit être donnée par l'expérience.
 - ▶ \Rightarrow Fin de la présentation, merci de votre attention.
- Problèmes:
 - ① "Problème de coïncidence:"
 - ★ Pour des valeurs différentes de Λ , l'univers se serait déjà effondré, ou les structures n'auraient pas pu se former.
 - ② L'expansion n'accélère pas pour la première fois:
 - ★ Arrêt phase d'inflation \rightarrow pas de Λ
 - ★ \rightarrow 'pourquoi donc aujourd'hui Λ ' ?
 - ③ Λ est la contribution du vide quantique.
 - ★ $\Rightarrow \Lambda \sim 10^{68} \text{m}^{-2}$. Mais nous avons mesuré $\Lambda \sim 10^{-52} \text{m}^{-2}$!
 - ★ **"Problème de la Constante Cosmologique"**.
- Si ce n'est pas une Constante Cosmologique, c'est quelque chose d'autre.

Constante Cosmologique?

- Λ n'est qu'une constante naturelle supplémentaire dont la valeur doit être donnée par l'expérience.
 - ▶ \Rightarrow Fin de la présentation, merci de votre attention.
- Problèmes:
 - ① "Problème de coïncidence:"
 - ★ Pour des valeurs différentes de Λ , l'univers se serait déjà effondré, ou les structures n'auraient pas pu se former.
 - ② L'expansion n'accélère pas pour la première fois:
 - ★ Arrêt phase d'inflation \rightarrow pas de Λ
 - ★ \rightarrow 'pourquoi donc aujourd'hui Λ ' ?
 - ③ Λ est la contribution du vide quantique.
 - ★ $\Rightarrow \Lambda \sim 10^{68} \text{m}^{-2}$. Mais nous avons mesuré $\Lambda \sim 10^{-52} \text{m}^{-2}$!
 - ★ **"Problème de la Constante Cosmologique"**.
- Si ce n'est pas une Constante Cosmologique, c'est quelque chose d'autre.

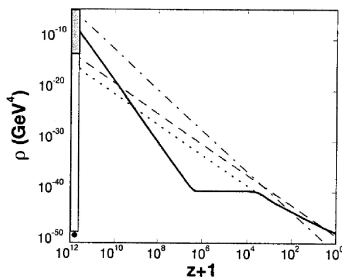
Modèles

- Energie Noire: Nouveau fluide, champ scalaire:

- ▶ Quintessence, dont les modèles trackers:

$$w = \frac{w_{\text{fond}} - 2(\Gamma - 1)}{1 + 2(\Gamma - 1)}$$

- ▶ k-essence, fantôme, DE \leftrightarrow DM,
- ▶ ...



Steinhardt et al. Phys. Rev. D 59 (123504) 1999.

- \mathcal{PC} :

- ▶ Modèles anisotropes (LTB...).
- ▶ Modèles inhomogènes ('backreaction')

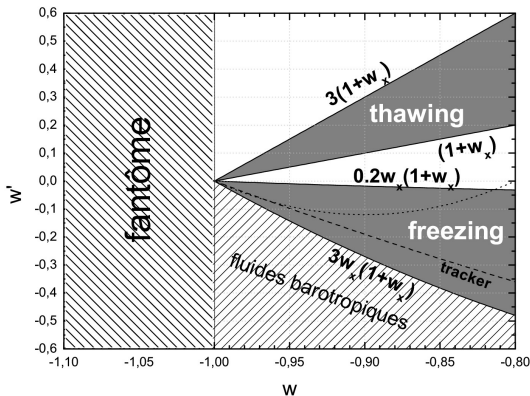
- \mathcal{RG}

- ▶ Modifications de la Relativité Générale:
modèles $f(R)$, Dimensions supplémentaires (théories des cordes)

$$w_{\text{eff}}(z) = -1 + \frac{1}{3} \frac{d \ln [E^2(z) - \Omega_M^0 (1+z)^3]}{d \ln [1+z]}$$

Classification des modèles: espace de phase (w' , w)

- $w' = dw/d \log a$.



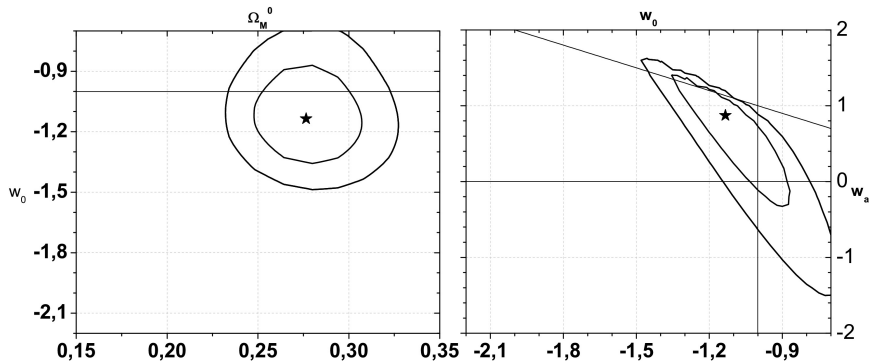
- Paramétrage de l'équation d'état:

- $w(z) = w_0 + w_a \frac{z}{1+z}$, Chevallier, Polarski, Linder (**CPL**).

- $\Rightarrow \{p_i\} = \{\Omega_i^0, w_0, w_a\}$.

Ajustement des données ($w_x = w_0 + w_a z / (1 + z)$)

- Ajustement des données SNe et \mathcal{R} et A , $\Omega_T = 1$:
- On montre les contours à 68% et 95%:



Linden et al., A&A 506 (1095-1105) 2009.

- Consistence avec Λ CDM.

Problème de biais

- Diverses hypothèses sont réalisées afin de réduire le nombre de paramètre.
- Dégénérescences \Rightarrow ces hypothèses ne sont pas sans effet.
- \Rightarrow Les résultats peuvent être dangereusement biaisés.
- Les hypothèses couramment effectuées sont:
 - 1 $\Omega_T = 1$,
 - 2 $w = \text{cste.}, w = -1$
 - 3 M bien standardisé,
- SNe Ia: on néglige souvent tout effet d'évolution.
- Paramétrages de la physique risque d'introduire des biais.
- \Rightarrow High precision cosmology: "Mesurer à haute précision qc. qui n'est peut-être pas là".

Structure

- 1 Motivation
- 2 **Cosmographie**
- 3 Paramétrage de l'énergie noire
- 4 Evolution des magnitudes des SNe Ia
- 5 Conclusions

Cosmographie

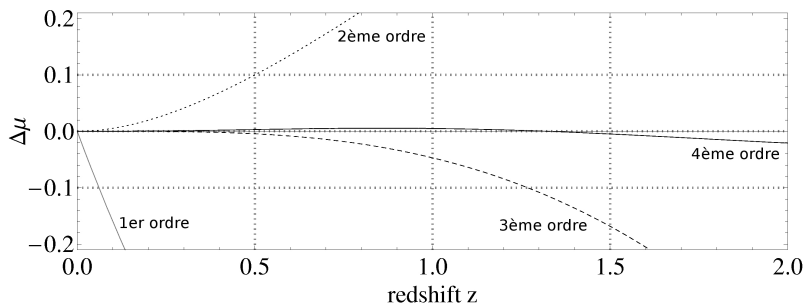
- Par exemple, nombre d'auteurs suivent cette approche cinématique à la cosmologie:
- Développer la distance cosmologique en terme de redshift:

$$d_L^{\text{dv}}(z) = \frac{c}{H_0} \left(z + \frac{1}{2} [1 - q_0] z^2 - \frac{1}{6} [1 - q_0 - 3q_0^2 + j_0] z^3 + \right. \\ \left. + \frac{1}{24} \left[2 - 2q_0 - 15q_0^2 - 15q_0^3 + 5j_0 + 10q_0j_0 + s_0 + \frac{2kc^2(1+3q_0)}{H_0^2 a_0^2} \right] z^4 + \right. \\ \left. + \mathcal{O}(z^5) \right).$$

- Ainsi: Pas de supposition sur la dynamique.
- \Rightarrow Extraction des paramètres cosmographiques $\{H_0, q_0, j_0, s_0\}$ au lieu des paramètres dynamiques $\{\Omega_i^0, w_0, w_a\}$.

Approximation vs. Exacte

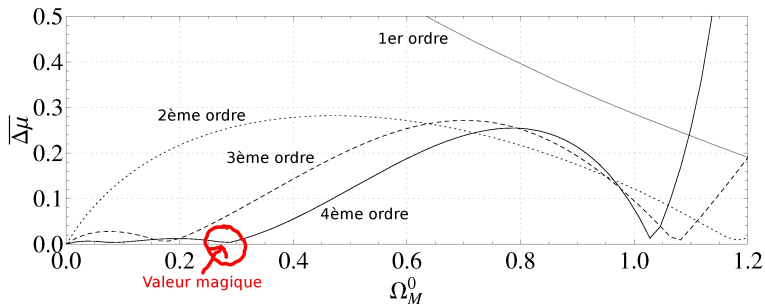
$$\begin{array}{l} \nearrow \text{ approx. : } d_L(z; H_0, q_0, j_0, s_0) \\ \searrow \text{ exacte : } d_L = \frac{c(1+z)}{H_0 \sqrt{|\Omega_k^0|}} \mathcal{S} \left(\sqrt{|\Omega_k^0|} \int \frac{1}{E(z; \Omega_i)} \right) \end{array} \quad \Delta\mu(z)$$



- 4ème ordre < 0.02 jusqu'à $z = 2 \Rightarrow$ Paraît assez bien.

Approximation vs. Exacte

$$\Omega_M^0, w \equiv w_\Lambda \begin{cases} \nearrow \text{approx. : } d_L(z; H_0, q_0, j_0, s_0) \\ \searrow \text{exacte : } d_L = \frac{2.7c}{H_0 \sqrt{|\Omega_k^0|}} \mathcal{S} \left(\sqrt{|\Omega_k^0|} \int \frac{1}{E(z; \Omega_i)} \right) \end{cases} \nearrow \overline{\Delta\mu}(0..z..1.7)$$



- Forte dépendance du modèle!

Résumé

- Cette approche cinématique \Rightarrow de grandes dépendances de modèle et des imprécision considérable!
- Une étude du biais: $\mathcal{B}_i = |\rho_i^{\text{fit}} - \rho_i^{\text{Fid}}|$ montre:
 - ▶ Pour le modèle Λ CDM les données actuelles et futures ne risquent pas d'introduire des biais.
 - ▶ Cependant, la précision de l'approche dépend fortement de la cosmologie.
 - ▶ \rightarrow possibles biais sur le paramètre de décélération.
- \Rightarrow Ne plus utiliser l'approche cinématique basée sur un développement en z des distances.
- \Rightarrow Utilise relation intégrale.

• Observable $\overset{\int \dots \int}{\iff}$ Paramètres

Dégénérescences entre paramètres!

Résumé

- Cette approche cinématique \Rightarrow de grandes dépendances de modèle et des imprécision considérable!
- Une étude du biais: $\mathcal{B}_i = |p_i^{\text{fit}} - p_i^{\text{Fid}}|$ montre:
 - ▶ Pour le modèle Λ CDM les données actuelles et futures ne risquent pas d'introduire des biais.
 - ▶ Cependant, la précision de l'approche dépend fortement de la cosmologie.
 - ▶ \rightarrow possibles biais sur le paramètre de décélération.
- \Rightarrow Ne plus utiliser l'approche cinématique basée sur un développement en z des distances.
- \Rightarrow Utilise relation intégrale.

$$\bullet \text{ Observable } \overset{\int \dots \int}{\longleftrightarrow} \text{ Paramètres}$$

Dégénérescences entre paramètres!

Résumé

- Cette approche cinématique \Rightarrow de grandes dépendances de modèle et des imprécision considérable!
- Une étude du biais: $\mathcal{B}_i = |p_i^{\text{fit}} - p_i^{\text{Fid}}|$ montre:
 - ▶ Pour le modèle Λ CDM les données actuelles et futures ne risquent pas d'introduire des biais.
 - ▶ Cependant, la précision de l'approche dépend fortement de la cosmologie.
 - ▶ \rightarrow possibles biais sur le paramètre de décélération.
- \Rightarrow Ne plus utiliser l'approche cinématique basée sur un développement en z des distances.
- \Rightarrow Utilise relation intégrale.

$$\bullet \text{ Observable } \overset{\int \dots \int}{\longleftrightarrow} \text{ Paramètres}$$

Dégénérescences entre paramètres!

Structure

- 1 Motivation
- 2 Cosmographie
- 3 **Paramétrage de l'énergie noire**
- 4 Evolution des magnitudes des SNe Ia
- 5 Conclusions

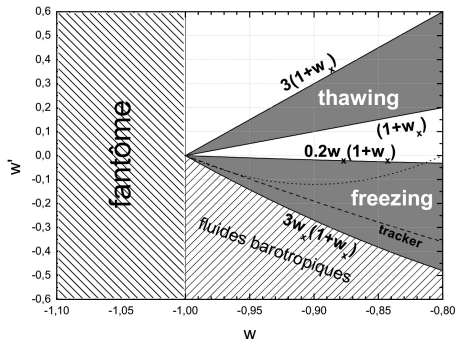
Paramétrage CPL de l'énergie noire

- CPL: $w(z) = w_0 + w_a \frac{z}{1+z}$.
- Linéaire dans l'espace de phase:

$$w' = (w_0 + w_a) + w(z).$$

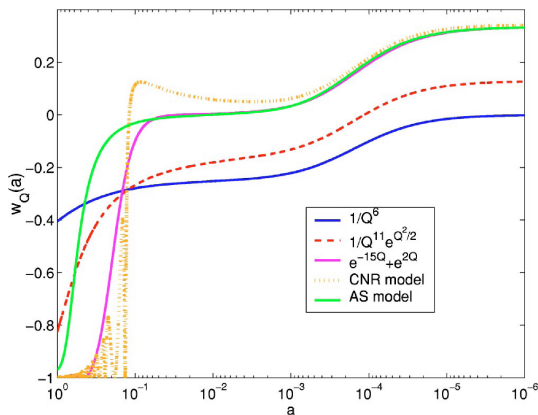
- Notamment:

$$w_a = -2w'(z=1).$$



Transitions dans l'équation d'état

- Si la dynamique n'est pas comme CPL?
- Transition rapide?



Corasaniti & Copeland, Phys. Rev. D 67 (063521) 2003.

- Pour décrire ce cas → quatre paramètres! (w_i, w_f, z_t, Γ)

Paramétrage 'step' de l'énergie noire

- On motive:

$$w_x^{\text{step}}(z) = \frac{1}{2}(w_i + w_f) - \frac{1}{2}(w_i - w_f) \tanh \left[\Gamma \ln \left(\frac{1 + z_t}{1 + z} \right) \right].$$

- Largeur de transition $\Delta z(z_t, \Gamma) = 2(1 + z_t) \sinh(2/\Gamma)$
- Avantages:
 - Decouplage entre w_i et w_f .
 - Intégrable:

$$E(z)^2 = \Omega_k^0 (1+z)^2 + \Omega_M^0 (1+z)^3 + \Omega_R^0 (1+z)^4 + \Omega_x^0 (1+z)^{3(1+\frac{1}{2}(w_i+w_f))} \left[\frac{\left(\frac{1+z_t}{1+z}\right)^\Gamma + \left(\frac{1+z_t}{1+z}\right)^{-\Gamma}}{(1+z_t)^\Gamma + (1+z_t)^{-\Gamma}} \right]^{3(w_i-w_f)/2\Gamma}.$$

- Pendant: 4 paramètres ne peuvent pas être contraintes par les données (Linder & Huterer 2005).

Illustration du problème

- Etudier les données simulées SNe+ \mathcal{R} +A ($\Omega_T = 1$):

CPL



cosmologie fiducielle
 $(\{\Omega_M^0, w_i, w_f, z_t, \Gamma\})$



minimisation du χ^2



cosmologie ajustée
 $(\{\Omega_M^0, w_0, w_a\})$

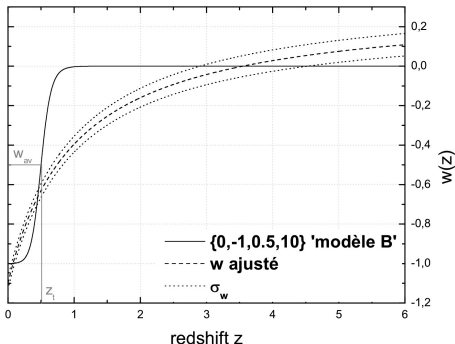
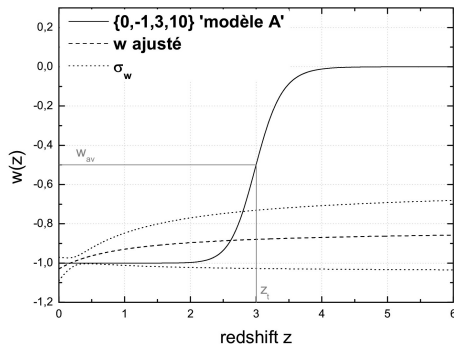
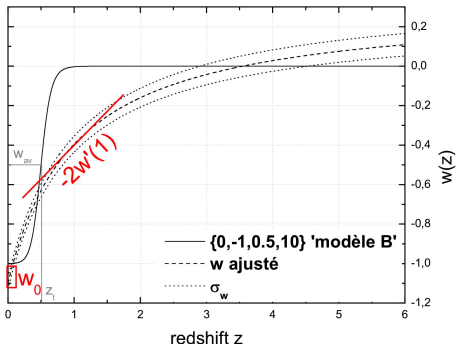
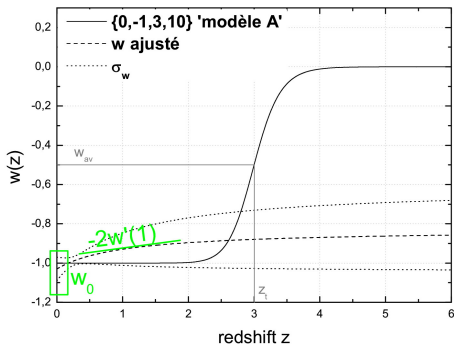
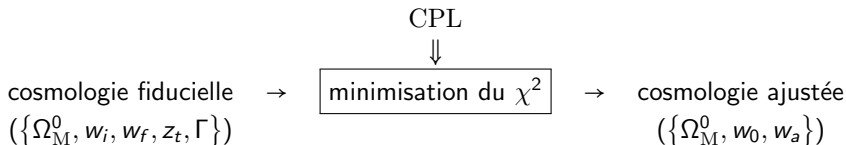


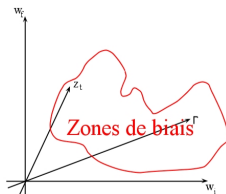
Illustration du problème

- Etudier les données simulées SNe+ \mathcal{R} +A ($\Omega_T = 1$):



Etudes de biais

- Varier les 4 paramètres → Etudier l'espace des paramètres de la cosmologie fiducielle.
- Nous obtenons des *zones de biais* dans l'espace des paramètres:



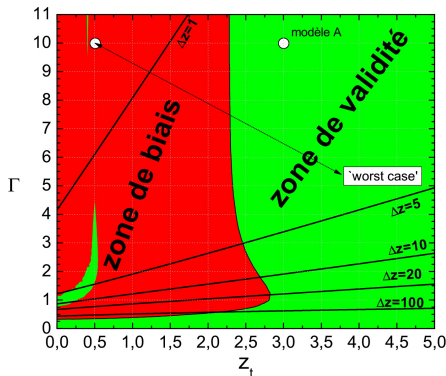
- Zones de biais:

$$\mathcal{B}_i = |p_i^{\text{fit}} - p_i^{\text{Fid}}| > 1\sigma_{p_i}.$$

Zones de biais de w_0

- Fixe $w_i = 0$ et $w_f = -1$:

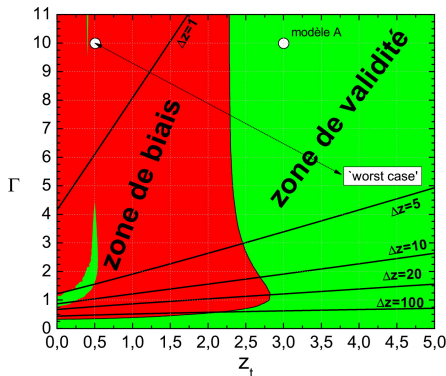
- Fixe $z_t = 0.5$ et $\Gamma = 10$ ('worst case'):



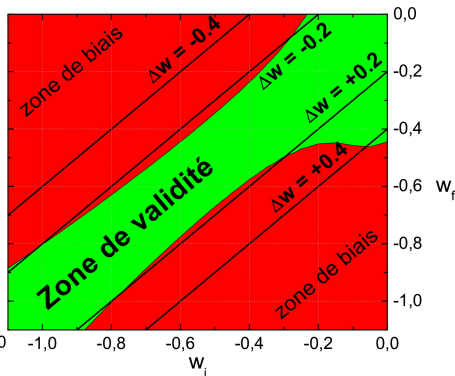
- Transitions $z_t \lesssim 2.5$ et $\Gamma \gtrsim 0.3$ posent problèmes.
- 'Worst case' \rightarrow transitions $|\Delta w| \lesssim 0.2$ posent pas problèmes.

Zones de biais de w_0

- Fixe $w_i = 0$ et $w_f = -1$:



- Fixe $z_t = 0.5$ et $\Gamma = 10$ ('worst case'):



- Transitions $z_t \lesssim 2.5$ et $\Gamma \gtrsim 0.3$ posent problèmes.
- 'Worst case' \rightarrow transitions $|\Delta w| \lesssim 0.2$ posent pas problèmes.

Résumé

- Transitions $z_t \gtrsim 2.5$ et $\Gamma \lesssim 0.3 \leadsto$ CPL marche bien.
- Transitions plus récentes et/ou plus rapides:
 - 1 Existence de zones de biais.
 - 2 Existence de zones de confusion (avec $w_x = \text{cste.}$ ou ΛCDM).

\leadsto Conclusions:

- Restreindre l'application de CPL aux zones de validité.
- Complémenter les analyses cosmologiques par une analyse des données avec une équation d'état du type 'step' (tant que les transitions rapides et récentes ne sont pas exclues).

Structure

- 1 Motivation
- 2 Cosmographie
- 3 Paramétrage de l'énergie noire
- 4 **Evolution des magnitudes des SNe Ia**
- 5 Conclusions

Motivation de l'étude

Diagramme de Hubble

$$\mu = m - M = M_s + 5 \log D_L(z; \Omega_i, w)$$

- $$D_L(z; \Omega_i, w) = \frac{(1+z)}{\sqrt{|\Omega_k^0|}} \mathcal{S} \left[\sqrt{|\Omega_k^0|} \int_0^z \frac{d\tilde{z}}{E(\tilde{z}; \Omega_i, w)} \right]$$
- Très puissant pour extraire les paramètres $\{\Omega_i, w\}$ **si** $M_s = \text{cste.}$ → **si** les magnitudes sont standardisées.

Motivation de l'étude

Diagramme de Hubble

$$\mu = m - M = M_s + 5 \log D_L(z; \Omega_i, w) + \Delta m^{\text{evo}}(z)$$

- $$D_L(z; \Omega_i, w) = \frac{(1+z)}{\sqrt{|\Omega_k^0|}} \mathcal{S} \left[\sqrt{|\Omega_k^0|} \int_0^z \frac{d\tilde{z}}{E(\tilde{z}; \Omega_i, w)} \right]$$
- Très puissant pour extraire les paramètres $\{\Omega_i, w\}$ **si** $M_s = \text{cste.}$ → **si** les magnitudes sont standardisées.
- Cependant:
Les magnitudes ne le sont peut-être pas.
 - 1 Pogéniteur: composition, âge → variation de la luminosité intrinsèque.
 - 2 Sous-populations à différentes luminosités.
 - 3 Milieu interstellaire \leadsto variation magnitude apparante (lentille gravitationnelles, poussière)

Paramétrage

- Plusieurs paramétrages de Δm^{evo} :

- **Modèle 1:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta \log(1+z)$.

C'est en même temps $\mathcal{L} \rightarrow \frac{\mathcal{L}}{(1+z)^\beta}$, et

$\Delta m^{\text{evo}} \propto t(z)$ dans l'époque de domination de l'énergie noire.

- **Modèle 2a:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta \sqrt{z}$.

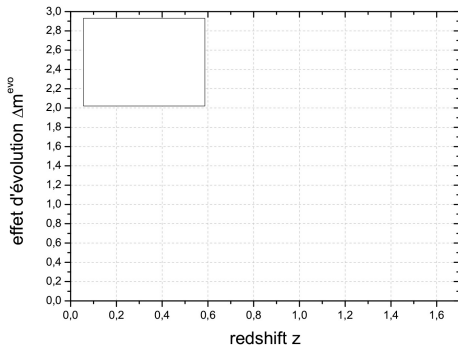
Evolution 'tardive'.

- **Modèle 2b:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta z$.

Evolution lineaire.

- **Modèle 2c:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta z^2$.

Evolution 'précoce'.



Paramétrage

- Plusieurs paramétrages de Δm^{evo} :

- **Modèle 1:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta \log(1+z)$.

C'est en même temps $\mathcal{L} \rightarrow \frac{\mathcal{L}}{(1+z)^\beta}$, et

$\Delta m^{\text{evo}} \propto t(z)$ dans l'époque de domination de l'énergie noire.

- **Modèle 2a:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta \sqrt{z}$.

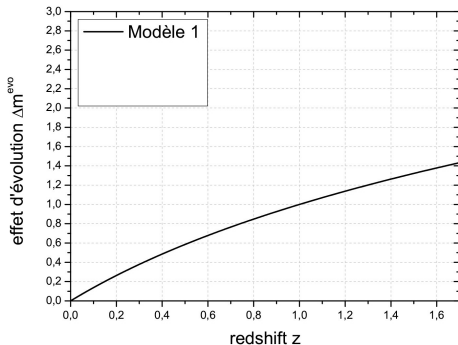
Evolution 'tardive'.

- **Modèle 2b:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta z$.

Evolution lineaire.

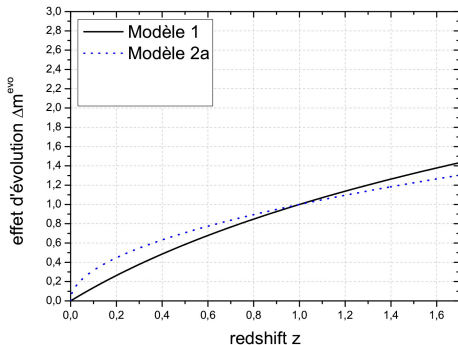
- **Modèle 2c:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta z^2$.

Evolution 'précoce'.



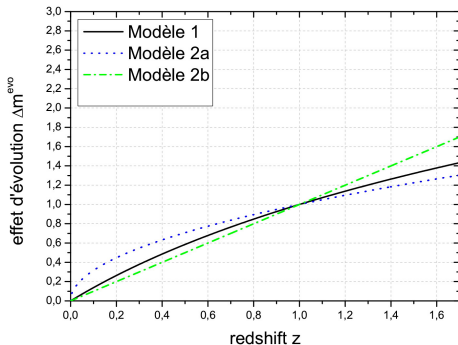
Paramétrage

- Plusieurs paramétrages de Δm^{evo} :
- **Modèle 1:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta \log(1+z)$.
C'est en même temps $\mathcal{L} \rightarrow \frac{\mathcal{L}}{(1+z)^\beta}$, et
 $\Delta m^{\text{evo}} \propto t(z)$ dans l'époque de domination de l'énergie noire.
- **Modèle 2a:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta\sqrt{z}$.
Evolution 'tardive'.
- **Modèle 2b:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta z$.
Evolution lineaire.
- **Modèle 2c:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta z^2$.
Evolution 'précoce'.



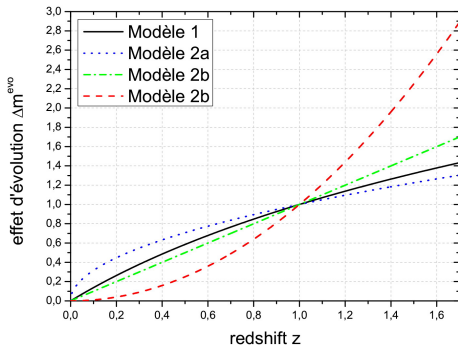
Paramétrage

- Plusieurs paramétrages de Δm^{evo} :
- **Modèle 1:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta \log(1+z)$.
C'est en même temps $\mathcal{L} \rightarrow \frac{\mathcal{L}}{(1+z)^\beta}$, et
 $\Delta m^{\text{evo}} \propto t(z)$ dans l'époque de domination de l'énergie noire.
- **Modèle 2a:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta \sqrt{z}$.
Evolution 'tardive'.
- **Modèle 2b:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta z$.
Evolution linéaire.
- **Modèle 2c:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta z^2$.
Evolution 'précoce'.



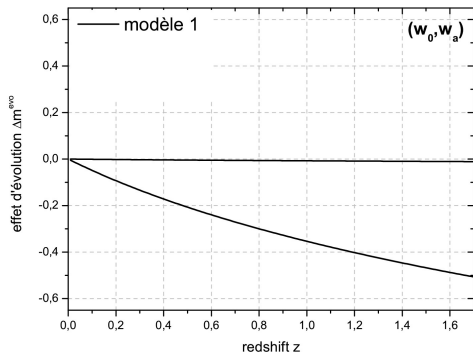
Paramétrage

- Plusieurs paramétrages de Δm^{evo} :
- **Modèle 1:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta \log(1+z)$.
C'est en même temps $\mathcal{L} \rightarrow \frac{\mathcal{L}}{(1+z)^\beta}$, et
 $\Delta m^{\text{evo}} \propto t(z)$ dans l'époque de domination de l'énergie noire.
- **Modèle 2a:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta\sqrt{z}$.
Evolution 'tardive'.
- **Modèle 2b:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta z$.
Evolution lineaire.
- **Modèle 2c:** $\Delta m^{\text{evo}} = \beta z^2$.
Evolution 'précoce'.



Données réelles SN + \mathcal{R} + A

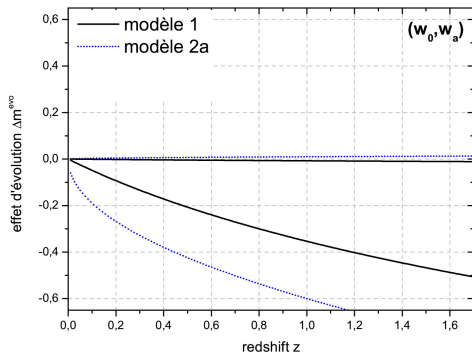
- Meilleur fit, où 'w dynamique'. Contraintes $1\sigma_\beta$:



- Pas d'indication d'évolution.
- Tendance luminosités plus élevées.
- Luminosités moins élevées à haut redshift: exclues.

Données réelles SN + \mathcal{R} + A

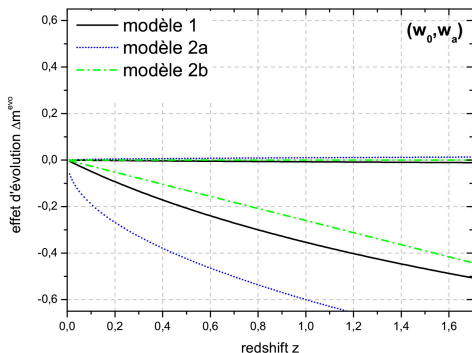
- Meilleur fit, où 'w dynamique'. Contraintes $1\sigma_\beta$:



- Pas d'indication d'évolution.
- Tendance luminosités plus élevées.
- Luminosités moins élevées à haut redshift: exclues.

Données réelles SN + \mathcal{R} + A

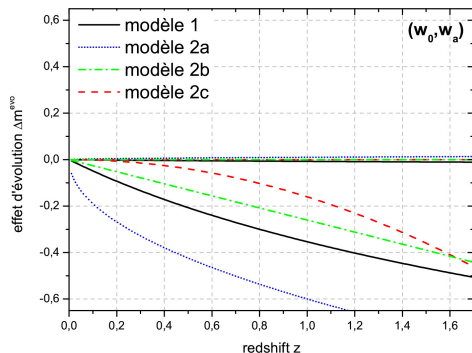
- Meilleur fit, où 'w dynamique'. Contraintes $1\sigma_{\beta}$:



- Pas d'indication d'évolution.
- Tendance luminosités plus élevées.
- Luminosités moins élevées à haut redshift: exclues.

Données réelles SN + \mathcal{R} + A

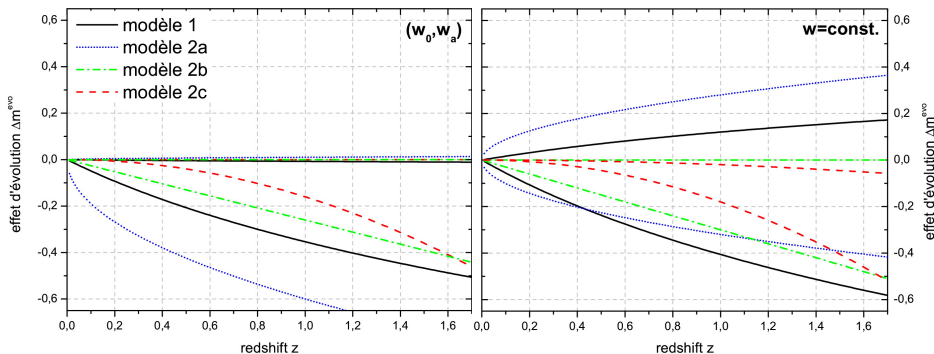
- Meilleur fit, où 'w dynamique'. Contraintes $1\sigma_{\beta}$:



- Pas d'indication d'évolution.
- Tendance luminosités plus élevées.
- Luminosités moins élevées à haut redshift: exclues.

Données réelles SN + \mathcal{R} + A

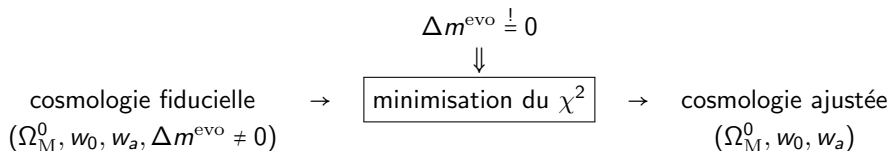
- Meilleur fit, où 'w dynamique'. Comparé à $w = \text{cste.}$:



- Pas d'indication d'évolution.
- Tendance luminosités plus élevées.
- Luminosités moins élevées à haut redshift: exclues, **si** $w \neq \text{cste.}$

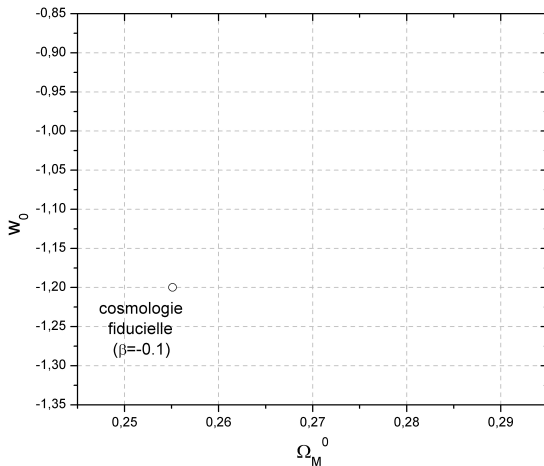
Selection du modèle le plus dangereux

- Etudier les données simulées:



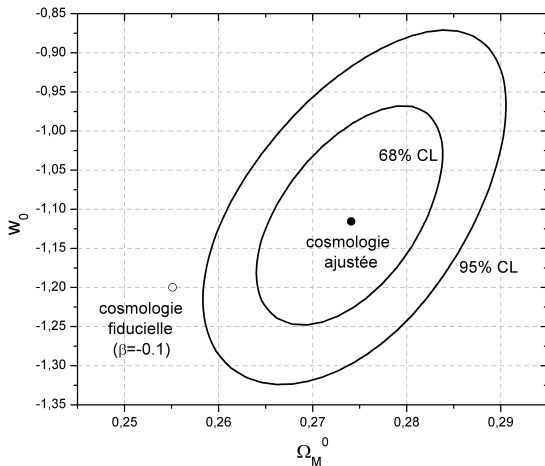
- Recherche des critères pour détecter la mauvaise hypothèse.
- La mauvaise hypothèse est-elle dangereuse?
- Les paramètres sont-ils biaisés?

Illustration du problème



- L'ajustement est de bonne qualité: $\chi_{\min}^2/n = 0.2!$
- On réfute la vraie cosmologie à plus de 95% CL.

Illustration du problème



- L'ajustement est de bonne qualité: $\chi_{\min}^2/n = 0.2!$
- On réfute la vraie cosmologie à plus de 95% CL.

Détectabilité du problème

- Comment on peut savoir que quelque chose ne va pas dans l'analyse?

DéTECTABILITÉ DU PROBLÈME

1 Critère statistique

- ▶ Valeur du χ_{\min}^2 comparée à la p-valeur:

$$p(\chi_{\min}^2, n_{\text{dof}}) = \int_{\chi_{\min}^2}^{\infty} \frac{x^{n_{\text{dof}}/2-1} e^{-x/2}}{2^{n_{\text{dof}}/2} \Gamma(n_{\text{dof}}/2)} dx.$$

2 Critère physique

- ▶ Impose $\Omega_M^0 > 0$ et $w_0 + w_a < 0$.
- ▶ Pas puissant, malheureusement.

3 Critère de consistance

- ▶ Analyse les SNe à haut et à bas redshift séparément:

$$C = |p_i^{\text{low redshift}} - p_i^{\text{high redshift}}| < \sigma_{p_i}.$$

- ▶ Décompose tel que:

$$\sigma_{p_i}^{\text{low redshift}} = \sigma_{p_i}^{\text{high redshift}}.$$

DéTECTABILITÉ DU PROBLÈME

1 Critère statistique

- ▶ Valeur du χ_{\min}^2 comparée à la p-valeur:

$$p(\chi_{\min}^2, n_{\text{dof}}) = \int_{\chi_{\min}^2}^{\infty} \frac{x^{n_{\text{dof}}/2-1} e^{-x/2}}{2^{n_{\text{dof}}/2} \Gamma(n_{\text{dof}}/2)} dx.$$

2 Critère physique

- ▶ Impose $\Omega_M^0 > 0$ et $w_0 + w_a < 0$.
- ▶ Pas puissant, malheureusement.

3 Critère de consistance

- ▶ Analyse les SNe à haut et à bas redshift séparément:

$$C = |\rho_i^{\text{low redshift}} - \rho_i^{\text{high redshift}}| < \sigma_{\rho_i}.$$

- ▶ Décompose tel que:

$$\sigma_{\rho_i}^{\text{low redshift}} = \sigma_{\rho_i}^{\text{high redshift}}.$$

DéTECTABILITÉ DU PROBLÈME

1 Critère statistique

- ▶ Valeur du χ_{\min}^2 comparée à la p-valeur:

$$p(\chi_{\min}^2, n_{\text{dof}}) = \int_{\chi_{\min}^2}^{\infty} \frac{x^{n_{\text{dof}}/2-1} e^{-x/2}}{2^{n_{\text{dof}}/2} \Gamma(n_{\text{dof}}/2)} dx.$$

2 Critère physique

- ▶ Impose $\Omega_M^0 > 0$ et $w_0 + w_a < 0$.
- ▶ Pas puissant, malheureusement.

3 Critère de consistance

- ▶ Analyse les SNe à haut et à bas redshift séparément:

$$C = |p_i^{\text{low redshift}} - p_i^{\text{high redshift}}| < \sigma_{p_i}.$$

- ▶ Décompose tel que:

$$\sigma_{p_i}^{\text{low redshift}} = \sigma_{p_i}^{\text{high redshift}}.$$

DéTECTABILITÉ DU PROBLÈME

- And the winner is...

- ① A 68% degré de confiance:

Le test de consistance.

- ② A 95% degré de confiance:

Le test du χ^2 pour $\Delta m^{\text{evo}} < 0$,

Le test de consistance pour $\Delta m^{\text{evo}} > 0$ (quasiment exlut).

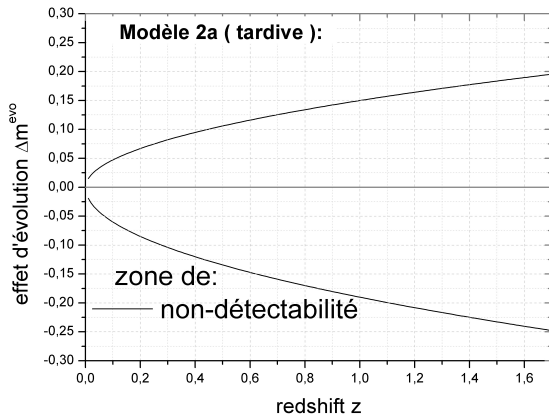
Détectabilité du problème

- And the winner is...
- 1 A 68% degré de confiance:
Le test de consistance.
 - 2 A 95% degré de confiance:
Le test du χ^2 pour $\Delta m^{\text{evo}} < 0$,
Le test de consistance pour $\Delta m^{\text{evo}} > 0$ (quasiment exlut).

Danger du problème

- Modèle 2a non-déTECTABLE à 68% CL si $-0.25 < \Delta m^{\text{evo}}|_{1.7} < 0.20$.

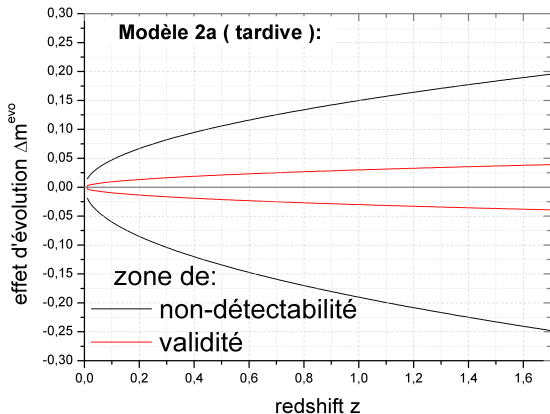
modèle	zones de validité		
	Ω_M^0	w_0	w_a
2a	[-0.04, 0.04]	[-0.08, 0.13]	[-0.27, 0.27]



Danger du problème

- Modèle 2a non-déTECTABLE à 68% CL si $-0.25 < \Delta m^{\text{evo}}|_{1.7} < 0.20$.

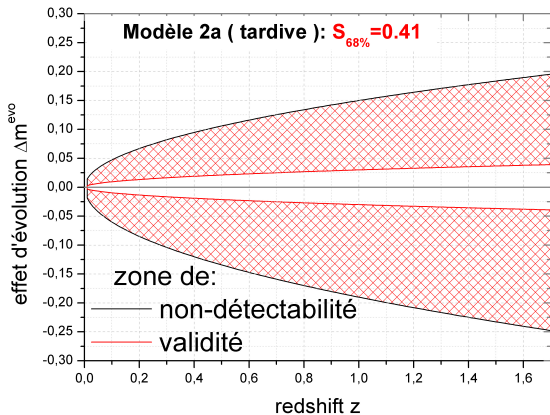
modèle	zones de validité		
	Ω_M^0	w_0	w_a
2a	[-0.04, 0.04]	[-0.08, 0.13]	[-0.27, 0.27]



Danger du problème

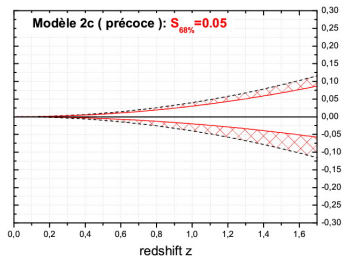
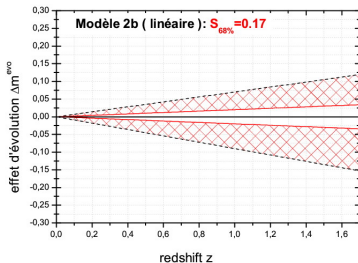
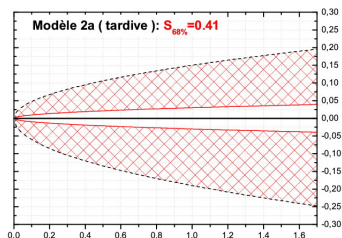
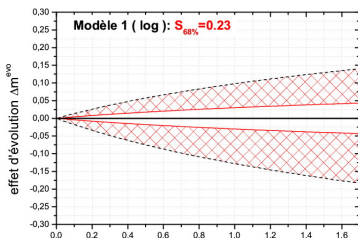
- Modèle 2a non-délectable à 68% CL si $-0.25 < \Delta m^{\text{evo}}|_{1.7} < 0.20$.

modèle	zones de validité		
	Ω_M^0	w_0	w_a
2a	[-0.04, 0.04]	[-0.08, 0.13]	[-0.27, 0.27]



Danger des 4 modèles

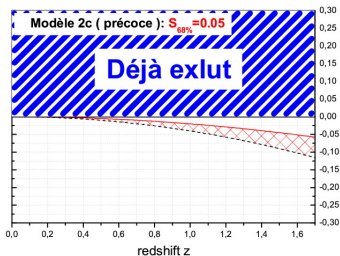
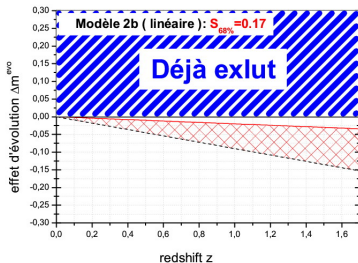
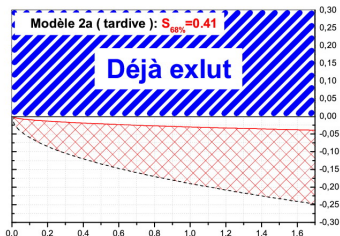
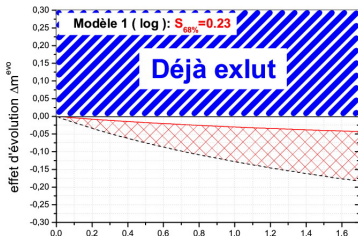
- La zone de détectabilité et la zone de biais dans un diagramme de Hubble:



- Modèle d'évolution tardive ($\sim \sqrt{z}$) le plus dangereux.

Danger des 4 modèles

- La zone de détectabilité et la zone de biais dans un diagramme de Hubble:



- Modèle d'évolution tardive ($\sim \sqrt{z}$) le plus dangereux.

Résumé

① DONNÉES RÉELLES

- ▶ Pas d'indication définitive d'une évolution des magnitudes.
- ▶ $\Delta m^{\text{evo}}(z) > 0$ déjà exclu à 1σ .

② DONNÉES SIMULÉES

- ▶ Modèle d'évolution tardive $\Delta m^{\text{evo}}(z) \sim \sqrt{z}$ le plus dangereux.

Structure

- 1 Motivation
- 2 Cosmographie
- 3 Paramétrage de l'énergie noire
- 4 Evolution des magnitudes des SNe Ia
- 5 **Conclusions**

Conclusions

- Modèle standard cosmologique.
 - Convergence de plusieurs sondes.
 - Haute précision.
- Nombre d'interprétations physiques:
 - Dépendance de modèle $\xrightarrow{\text{paramétrage}}$ dépendance de paramétrage
 \leadsto biais.
 - Par exemple: d_L^{dv} , CPL, ...
 - Par exemple: évolution des propriétés de SNe Ia...