

La nuit n'est pas noire:  
le rayonnement  
extragalactique et  
l'évolution des galaxies  
infrarouges

HDR – 21 septembre 2010

Hervé Dole

Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay  
Université Paris Sud 11 & CNRS & IUF  
<http://www.ias.u-psud.fr/irgalaxies> - <http://www.ias.u-psud.fr/dole>





Montage: CMB, LSS, galaxies: SPACE

pourquoi la nuit est-elle noire ?



21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

D. Officer, P. Welch, U of Arizona

2

## pourquoi la nuit est-elle noire ?

- Digges (16è), **Chéseaux** (17è), Halley (18è), **Olbers** (19è)
  - Herschel, Kant, Proctor, Fournier d'Albe, Charlier
  - **Poe** (19è), **Kelvin** (19è)
  - Wesson (1987, 1991)
  
  - finitude c
  - âge fini des objets
  - expansion
- horizon cosmologique → **oui**
- existence d'émissions reliques
    - recombinaison: fond cosmologique
    - formation et évolution des galaxies: fond extragalactique
  - expansion, et prise en compte de tout le spectre e. m.
- **non**

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

3

## « voir » le CMB en plein jour



observations du CMB à la Penzias & Wilson à l'APC (Paris) par Michel Piat, à 10 GHz (~3cm) avec les étudiants du M2 Pro OSAE.

les émission reliques (le CMB en tout cas) peuvent être intenses !

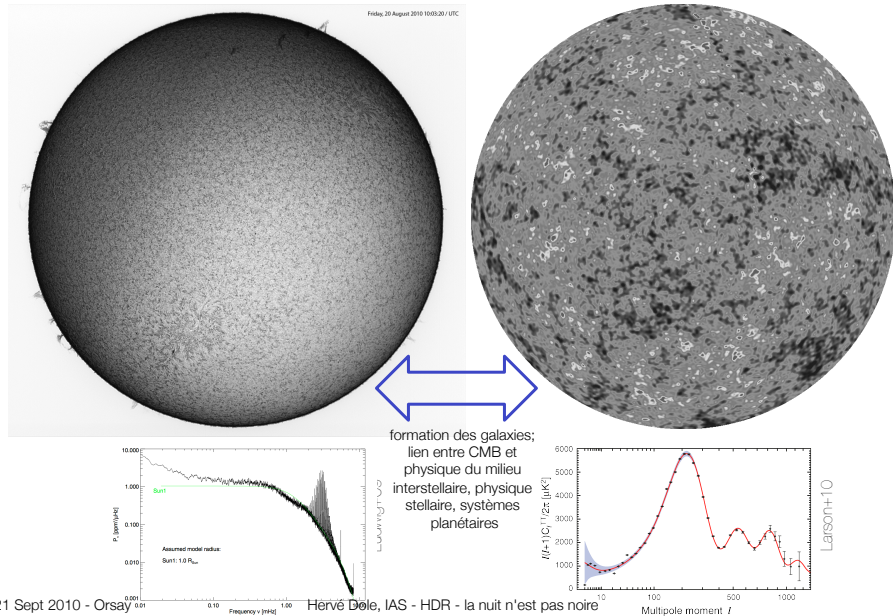
photos: H. Dole

21 Sept 2010 - Orsay

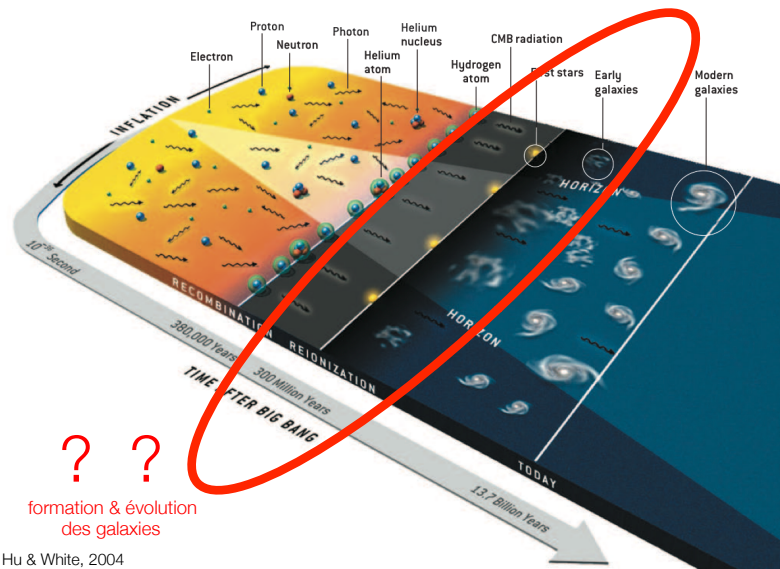
Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

4

## surface de dernière diffusion



## petite histoire de l'Univers



21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

6

## pourquoi étudier le rayonnement extragalactique ?

---

Le **rayonnement extragalactique** (EBL) nous renseigne sur les processus physiques intervenant dans la formation et l'évolution des galaxies (budget d'émission de radiation de la nucléosynthèse, de la gravitation, présence de poussières, ...).

*L'intensité et la structure du fond extragalactique dépendent directement de l'histoire de la production d'énergie dans l'Univers post-recombinaison.* [Kashlinsky, 2005]

## 4 motivations

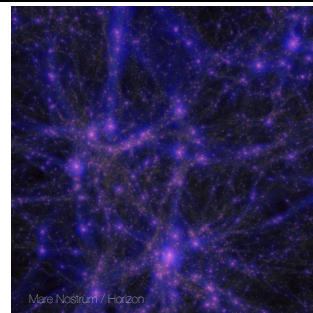
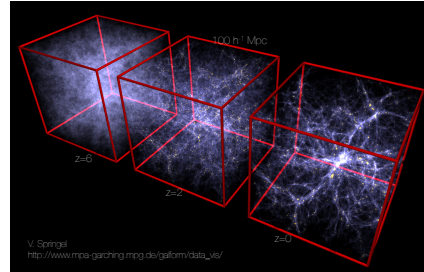
---

- formation des structures
- contenu énergétique
- populations de galaxies
- cosmologie



## motivation 1: formation des structures

- formation hiérarchique des structures
  - matière noire « bien » décrite
  - quid de la « matière visible »?
  - en général, les simulations reproduisent bien les données visibles (comptages, fonctions de luminosités, distributions en redshift, fonction de corrélation angulaire)
  - en général, elles ne reproduisent **pas** les données dans l'infrarouge
    - Est-ce si important ?
  - incompréhension de la physique du gaz



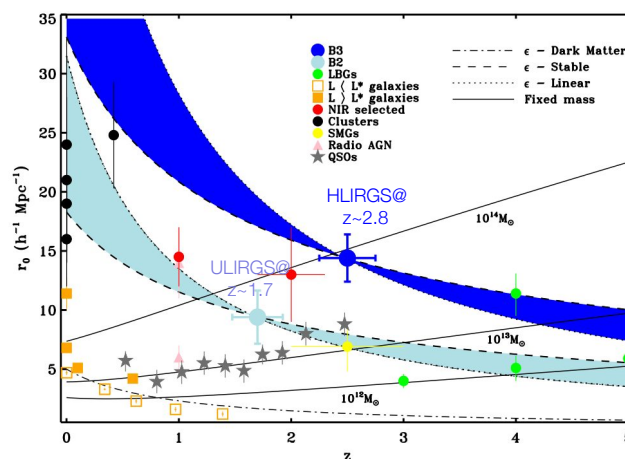
21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

9

## motivation 1 bis: biais avec matière noire

- longueur de corrélation  $r_0$  en fonction du redshift



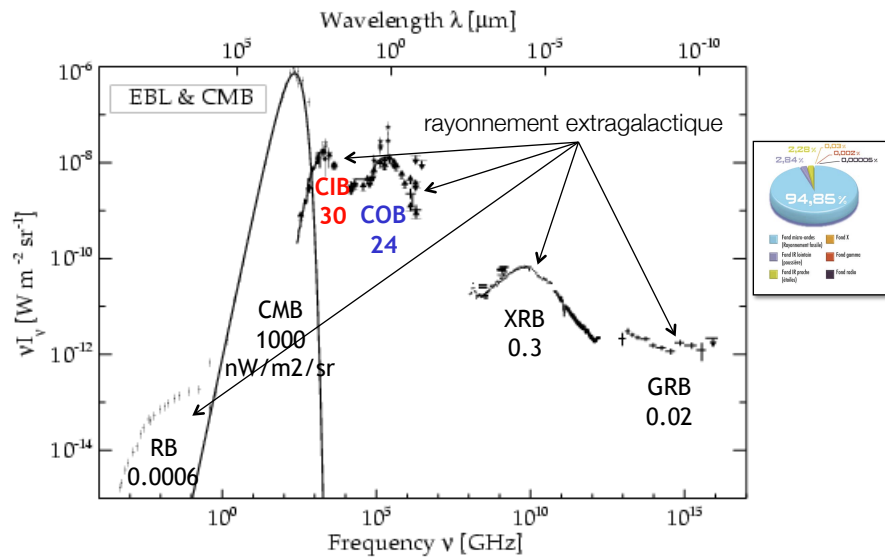
Overzier et al., 2003, A&A; Farrah et al., 2006

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

10

## motivation 2: contenu énergétique



21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

11

## motivation 3: populations de galaxies

- galaxies
  - processus physiques dominant leur évolution ?
  - gravitation: trou noir et **noyau actif** de Galaxie
  - forte, faible, électromagnétique: nucléosynthèse: **formation stellaire**
  - importance relative ? Evolution en redshift ?
- emission gamma (TeV) des AGN
  - pic de l'interaction photon-photon
    - $\lambda_{\text{IR}}(\mu\text{m}) \sim E_\gamma(\text{TeV})$
  - contraintes sur le spectre intrinsèque des blazars ?

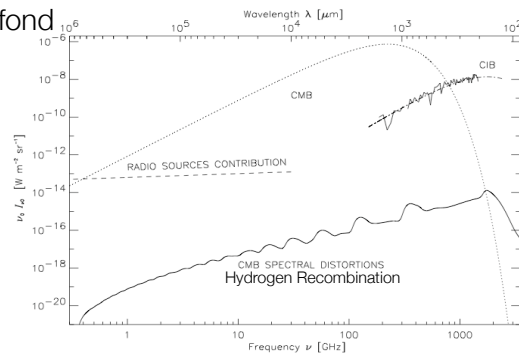
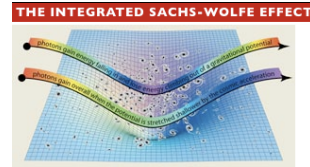
21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

12

## motivation 4: cosmologie et premiers objets

- équation d'état de l'énergie noire
  - effet ISW: corrélations EBL - CMB ?
- réionisation de l'Univers à  $z > 6$ 
  - structure angulaire du fond
- recombinaisons: H, He
  - CIB contaminant



Rubino-Martin et al., 2006  
see also e.g. Chiuba & Sunyaev, 2007

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

13

## plan

- mesures du fond extragalactique
- informations encodées dans le fond extragalactique
- (quelques) propriétés statistiques des galaxies
- apport de Planck et d'Herschel
- conclusions, perspectives

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

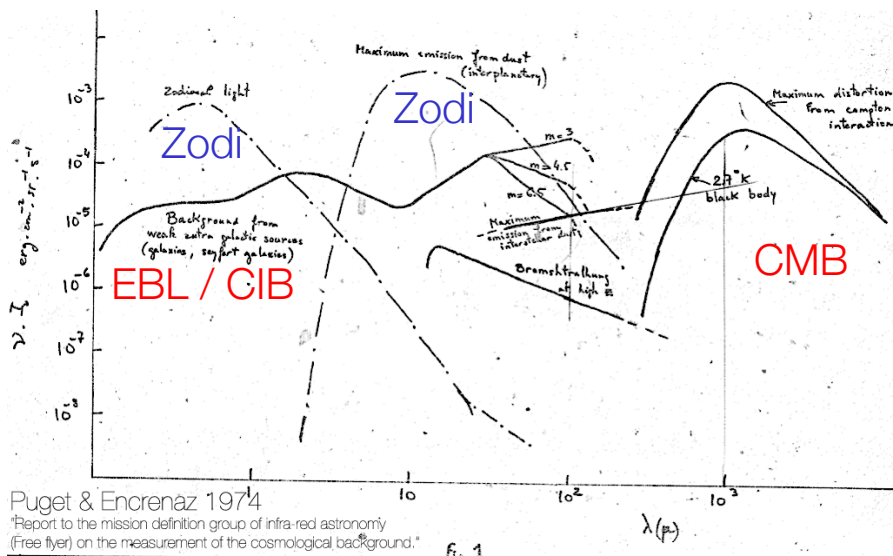
14

# mesures du fond extragalactique

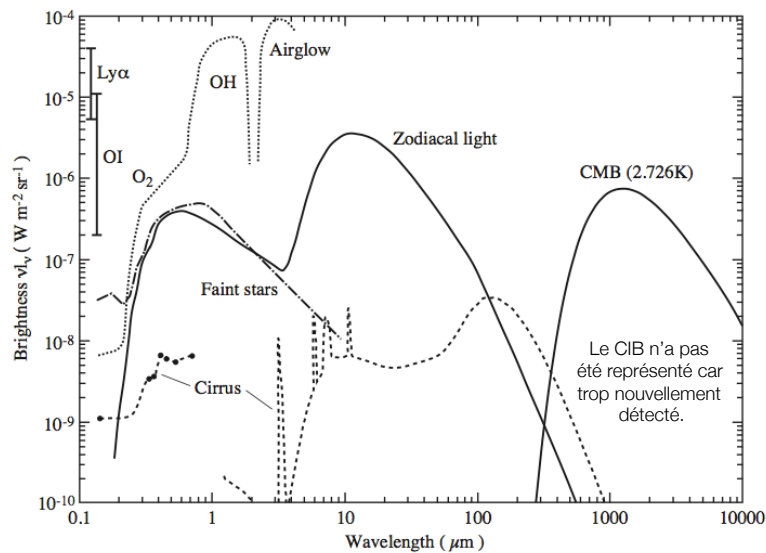
une longue quête pour tracer l'histoire des galaxies

première prédiction du rayonnement extragalactique:  
Partridge & Peebles, 1967

# un long chemin...



## émission du ciel à haute latitude en 1997



21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

Leinert et al., 1997, A&ASS

17

## découverte du CIB en 1996

Astron. Astrophys. 308, L5-L8 (1996)

ASTRONOMY  
AND  
ASTROPHYSICS

Letter to the Editor

### Tentative detection of a cosmic far-infrared background with COBE

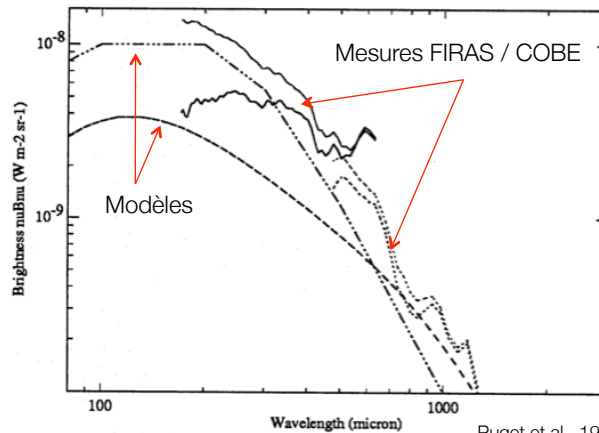
J.-L. Puget<sup>1</sup>, A. Abergel<sup>1</sup>, J.-P. Bernard<sup>1</sup>, F. Boulanger<sup>2</sup>, W.R. Burton<sup>3</sup>, F.-X. Désert<sup>1</sup>, and D. Hartmann<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Institut d'Astrophysique Spatiale, Bât. 121, Université Paris XI, F-91405 Or

<sup>2</sup> Sterrewacht Leiden, Postbox 9503, 2300 RA Leiden, The Netherlands

<sup>3</sup> Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 60 Garden St., Cambridge, MA

Received 4 August 1995 / Accepted 12 December 1995



21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

Puget et al., 1996

18

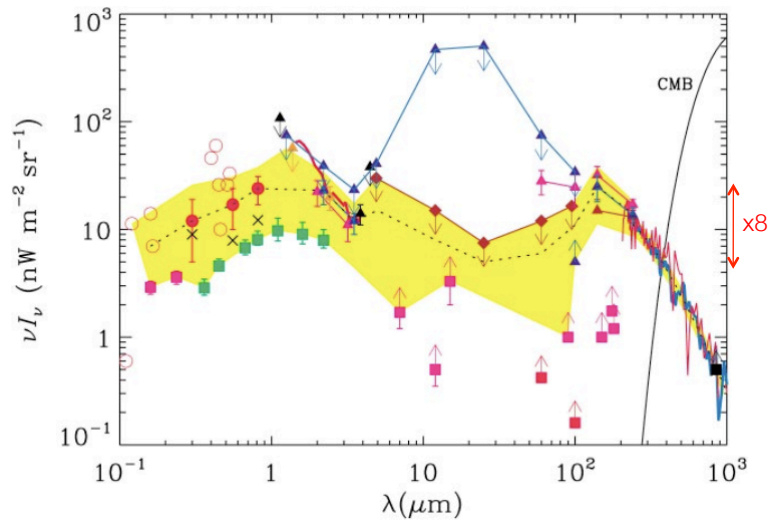


## mesures à la fin des années 90 ...

la lumière zodiacale est le principal contaminant.

a 60 $\mu\text{m}$ , zodi  
~50°CIB

une erreur de 1% sur la soustraction du zodi peut faire changer de moitié la valeur du CIB



21 Sept 2010 - Orsay

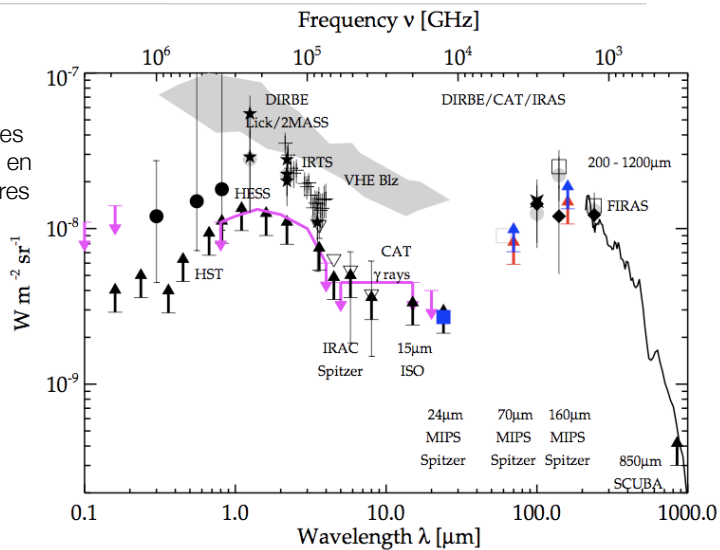
Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

Hauser & Dwek, 2001, ARAA

19

## ... et aujourd'hui ...

apparition de limites inférieures et supérieures, en plus des mesures absolues



Dole et al., 2006; Béthermin, Dole et al., 2010

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

20

... grâce au « stacking »

nombre de  
galaxies empilées

## The Cosmic Infrared Background resolved by Spitzer

H. Dole et al. (2006)

Institut d'Astrophysique Spatiale, Université Paris-Sud 11, CNRS

<http://www.ias.u-psud.fr/irgalaxies>

Credit: H. Dole/IAS/Arizona/NASA/JPL-Caltech

vidéo disponible sur:

<http://www.ias.u-psud.fr/irgalaxies/>

<http://insu.cnrs.fr/web/article/art.php?art=1747>

<http://www.spitzer.caltech.edu/Media/happenings/20060420/>

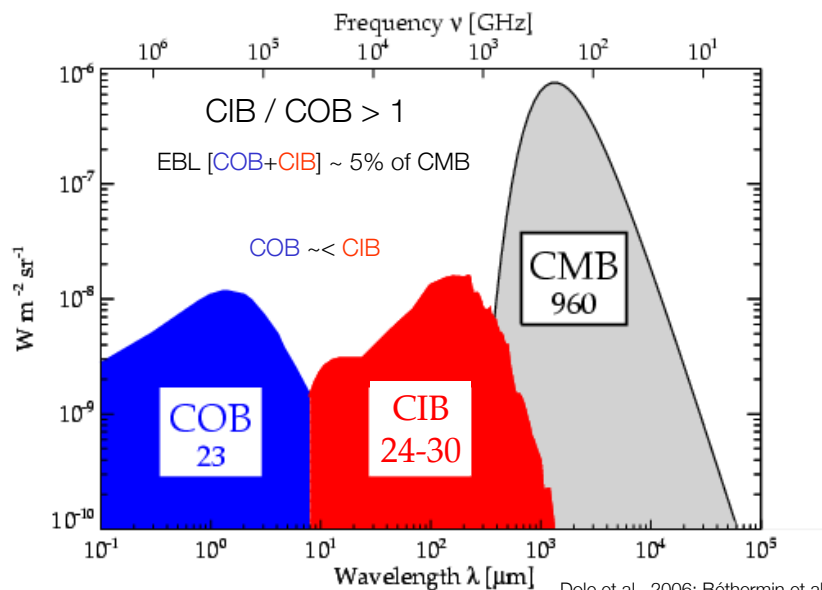
Dole et al., 2006

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

21

## résumé des mesures [1]

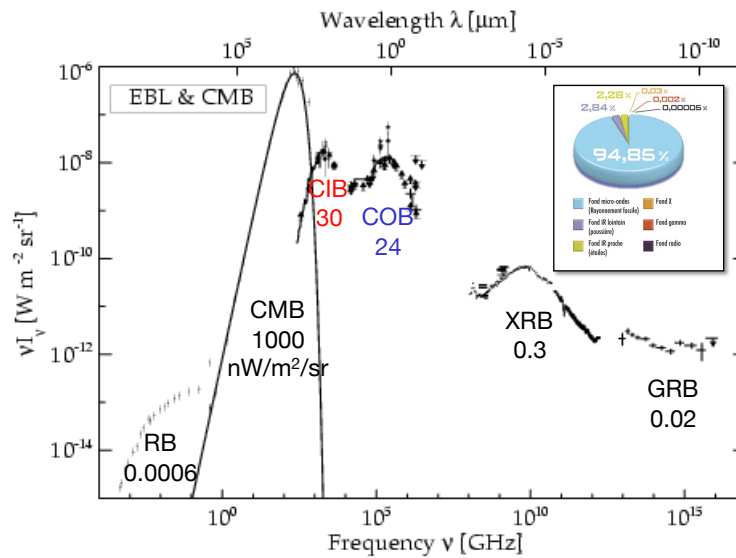


21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

Dole et al., 2006; Béthermin et al., 2010  
22

## résumé des mesures [2]



21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

Dole et al., 2006 ; Dole 2010 HDR

23

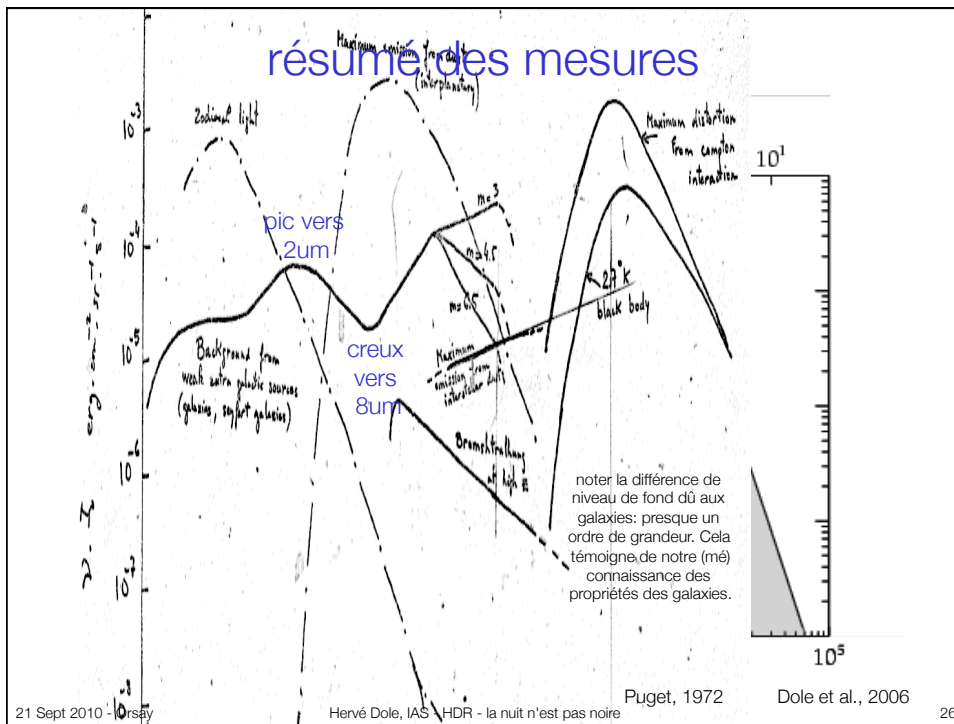
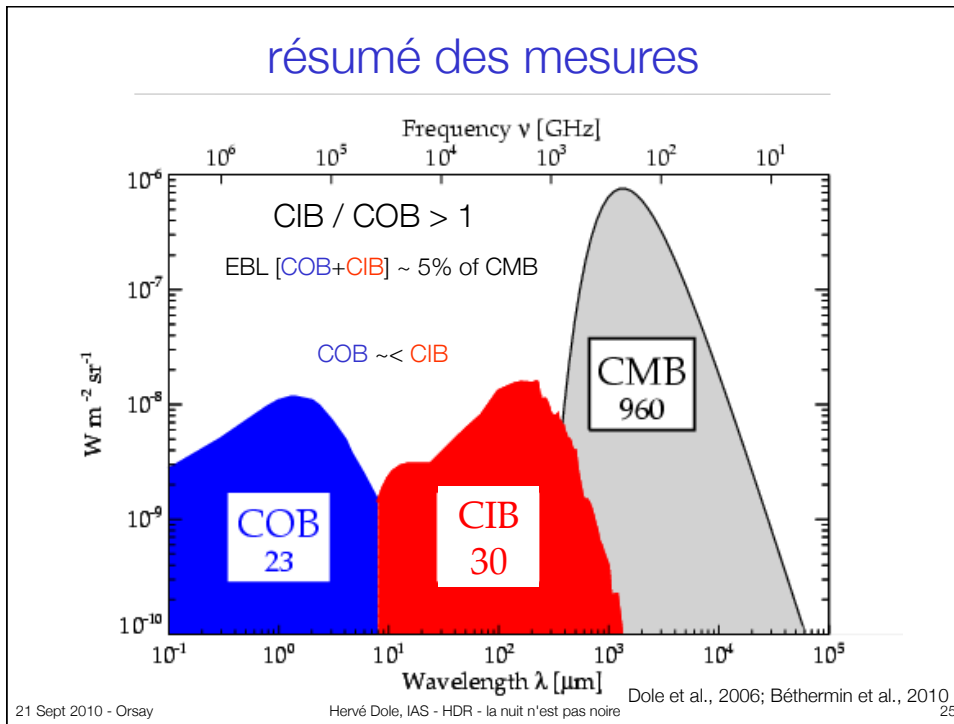
## informations encodées dans le fond extragalactique

le rôle – assez mal compris – des galaxies

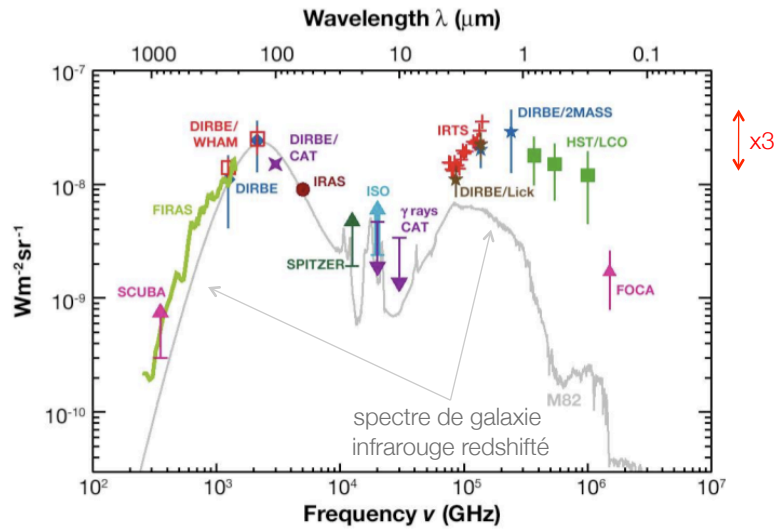
21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

24



## quelles galaxies contribuent à l'EBL ?



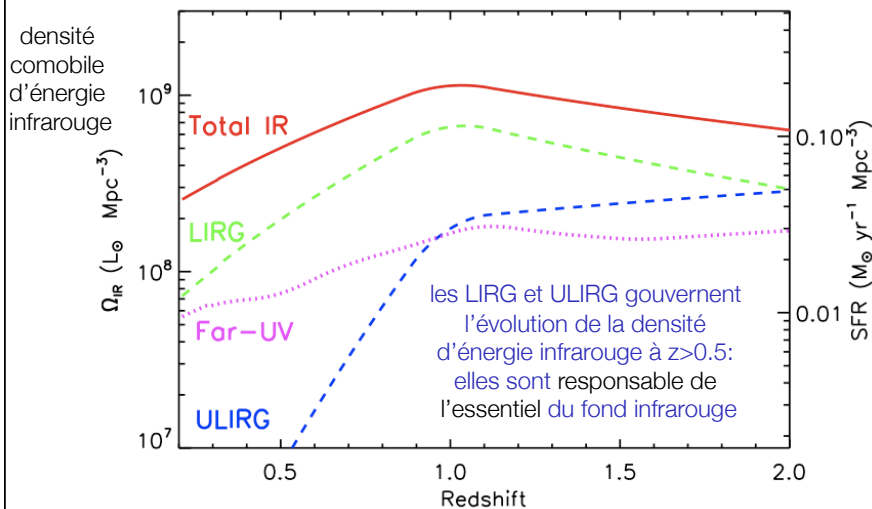
Lagache, Puget, Dole, 2005, ARAA

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

27

## l'apport de Spitzer



courtoisie de G. Lagache, adapté de Caputi et al. (2007), Tresse et al. (2007), Le Floc'h (2005)

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

28



## résumé de l'information encodée

- donne le **budget énergétique** (photons) pour la formation et l'évolution des galaxies; utile pour:
  - contraindre les modèles
  - quantifier les contributions nucléosynthèse vs accrétion
- nécessite **plus d'énergie dans l'infrarouge à plus grand z**
  - témoigne du rôle important des LIRG
    - que sont ces LIRGs ? pourquoi ?
- donne une information **dégénérée**: nécessité d'autres observations et de modèles
- nous renseigne sur la transparence aux photons TeV

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

29

## ce que nous apprend aussi l'EBL

- au delà de l'intensité du fond extragalactique: sa **structure angulaire: les fluctuations du fond extragalactique**
  - nous renseignent sur les sources d'émission
- en infrarouge lointain ( $> 70\mu\text{m}$ )
  - CIB pas complètement résolu en galaxies
  - les fluctuations sondent **les populations de galaxies responsables du fond**
- en infrarouge proche et moyen ( $< 30\mu\text{m}$ )
  - CIB quasiment résolu en galaxies
  - fluctuations sondent **les populations faibles**:
    - **popIII ? zodi ou cirrus ? galaxies à très grand z ? galaxies faibles ?**

21 Sept 2010 - Orsay

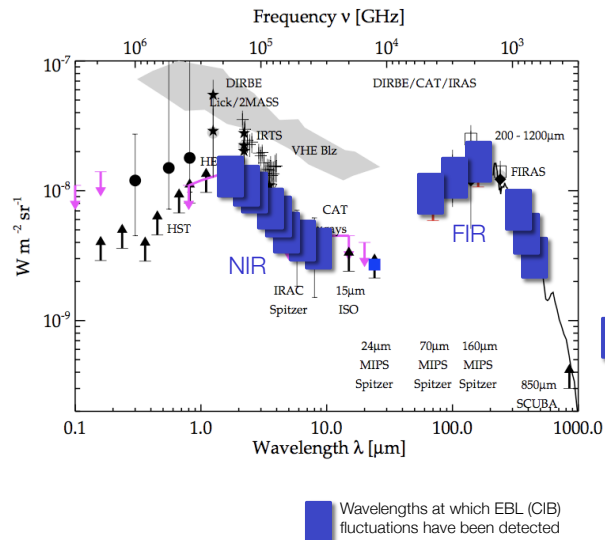
Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

30

## fluctuations du fond infrarouge

### Detections:

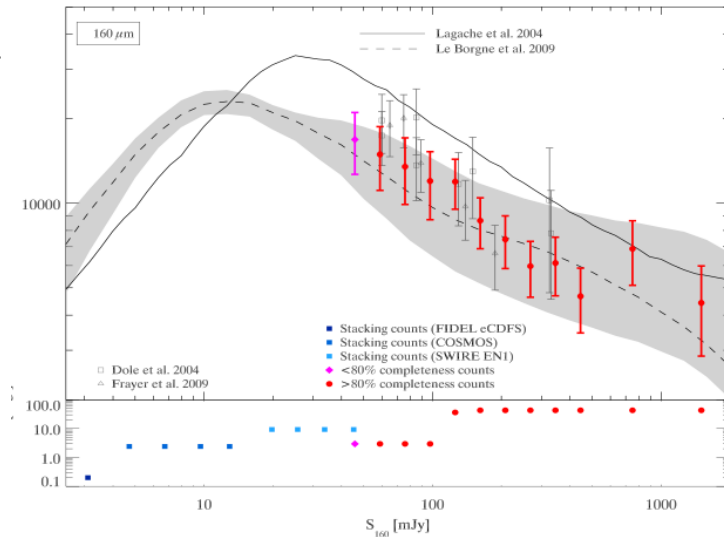
- mm: Hall et al., 2010 SPT
- 250, 350, 500 $\mu$ m: Marsden et al., 2009, BLAST; Herschel;
- 170 $\mu$ m: Lagache & Puget, 2000, ISOPHOT
- 160 $\mu$ m: Lagache et al., 2007, Spitzer
- 100 $\mu$ m & 60 $\mu$ m: Miville-Deschênes, Lagache, Puget, 2002, IRAS
- 3.6, 4.5, 5.8, 8.0 $\mu$ m: IRAC Kashlinsky et al
- 1.25, 2.2, 3.5, 5 $\mu$ m: Kashlinsky & Odenwald, 2000, DIRBE
- 1.6 $\mu$ m: Thompson et al. 2007, NICMOS
- 1.4-2.4 $\mu$ m: Matsumoto et al., 2004, IRTS
- J, H, K (1.25, 1.65, 2.17 $\mu$ m): Kashlinsky et al. 2002 & Odenwald et al., 2003, 2MASS



## (quelques) propriétés statistiques des galaxies

# Sonder les populations [1]

Spitzer  
160um



Béthermin et al., 2010, 2010b, A&A

21 Sept 2010 - Orsay

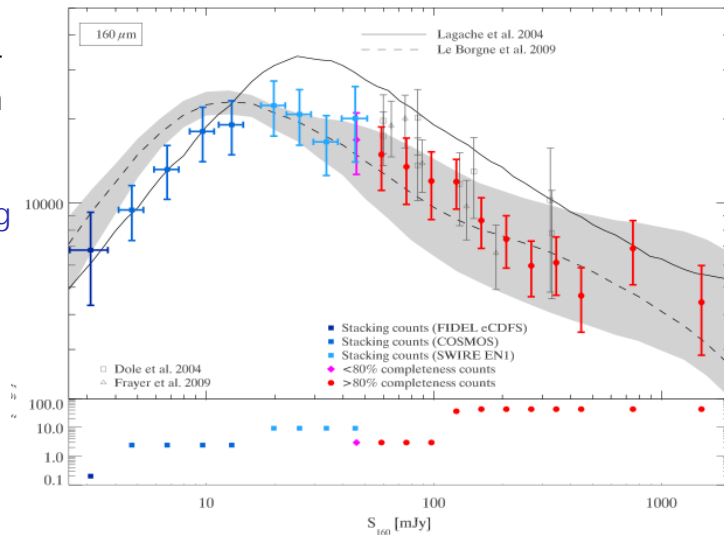
Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

33

# Sonder les populations [1]

Spitzer  
160um

avec  
stacking



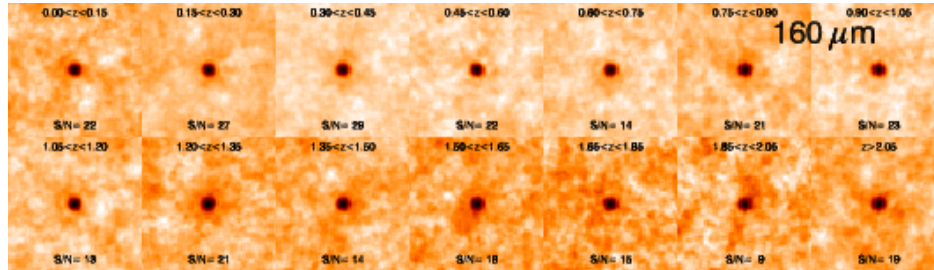
Béthermin et al., 2010, 2010b, A&A

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

34

## Sonder les populations [2]



environ 31000 sources identifiées à 24μm  
(entre 2000 et 3000 sources par tranche de redshift)  
dans le champ COSMOS et empilées à 70 et 160μm.

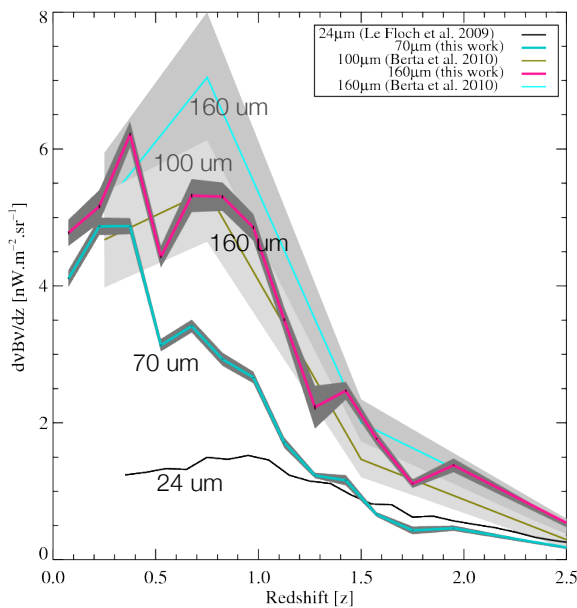
Jauzac et al., 2010, A&A, in press

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

35

## histoire du CIB depuis z~2...



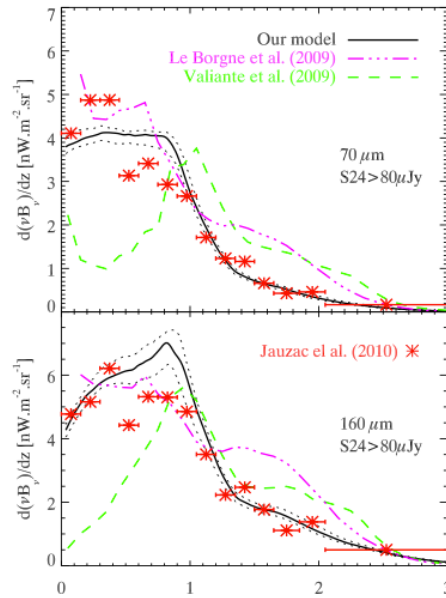
Jauzac et al., 2010, A&A, in press

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

36

## ... très discriminante pour les modèles



Jauzac et al., 2010, A&A, in press  
Béthermin et al, 2011, to be submitted

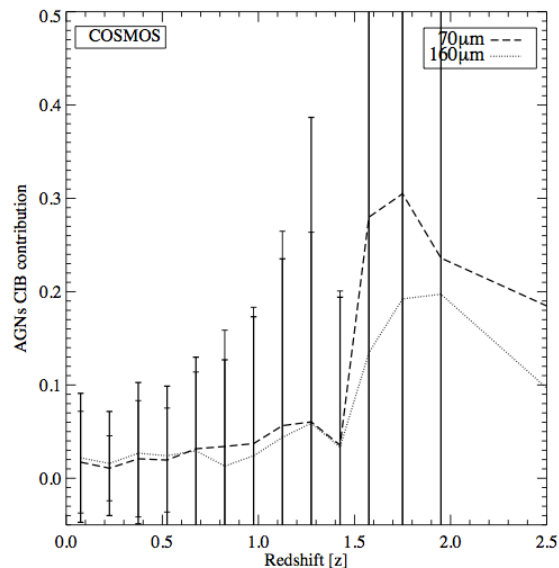
21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

37

## éternel débat: formation stellaire vs accrétion

en dépit de l'importance des AGN pour l'évolution des galaxies, les AGN ne représentent que < 10% de la brillance du CIB à  $z < 2$ .



Jauzac et al., 2010, A&A, in press

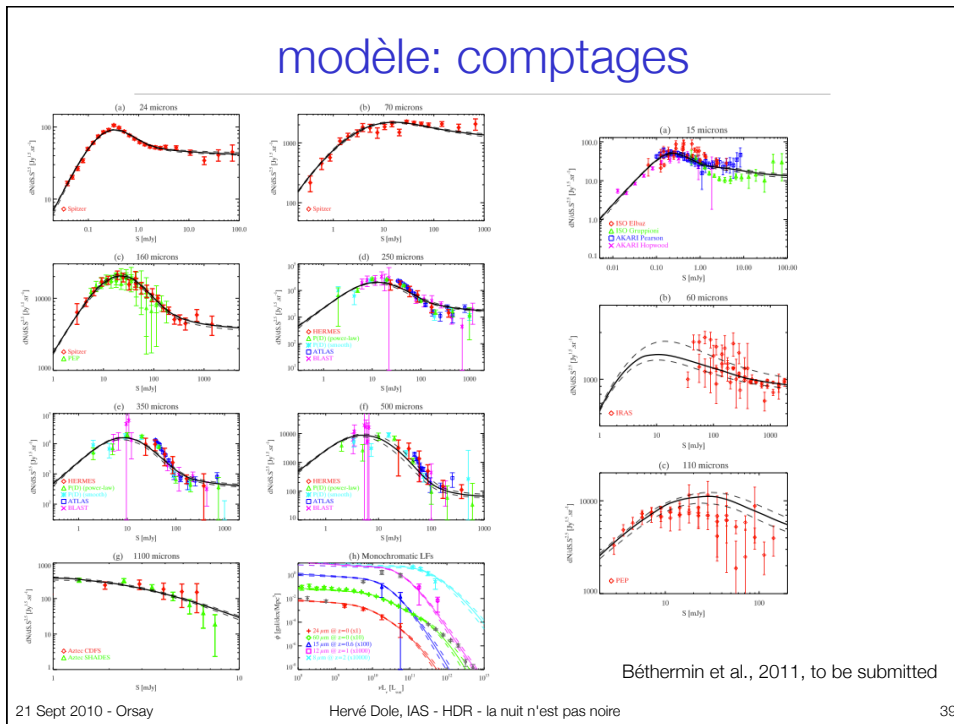
21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

38

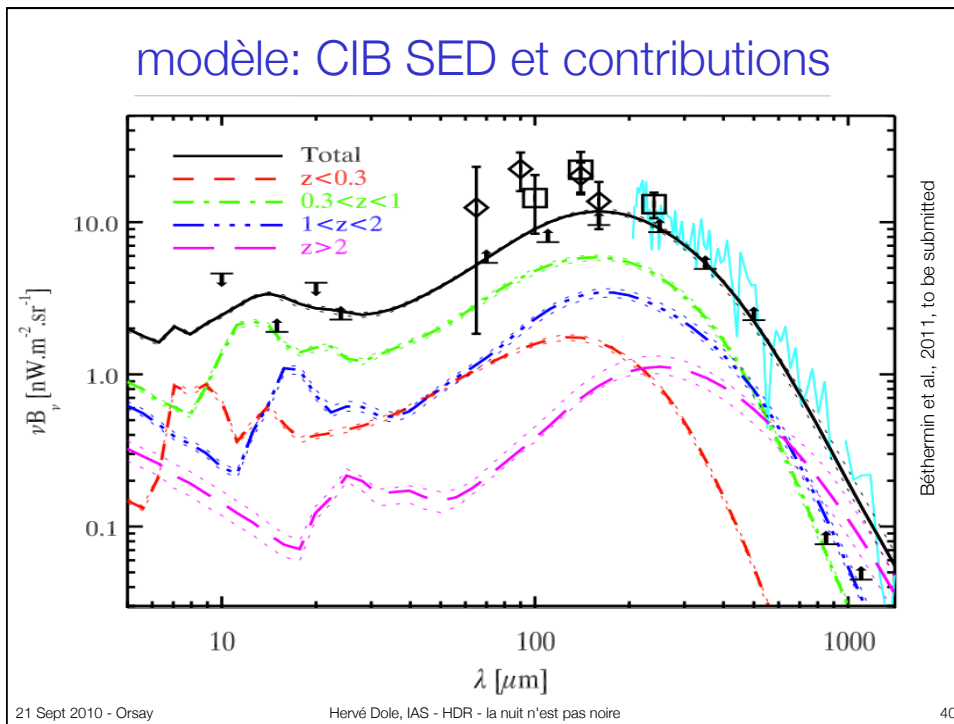


## modèle: comptages



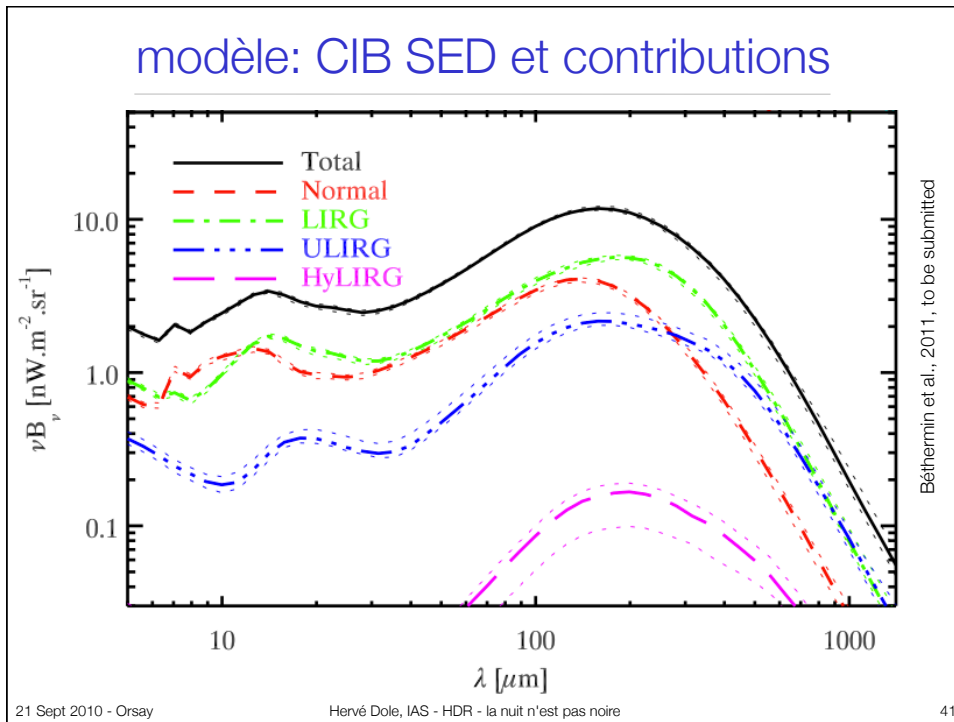
Béthermin et al., 2011, to be submitted

## modèle: CIB SED et contributions

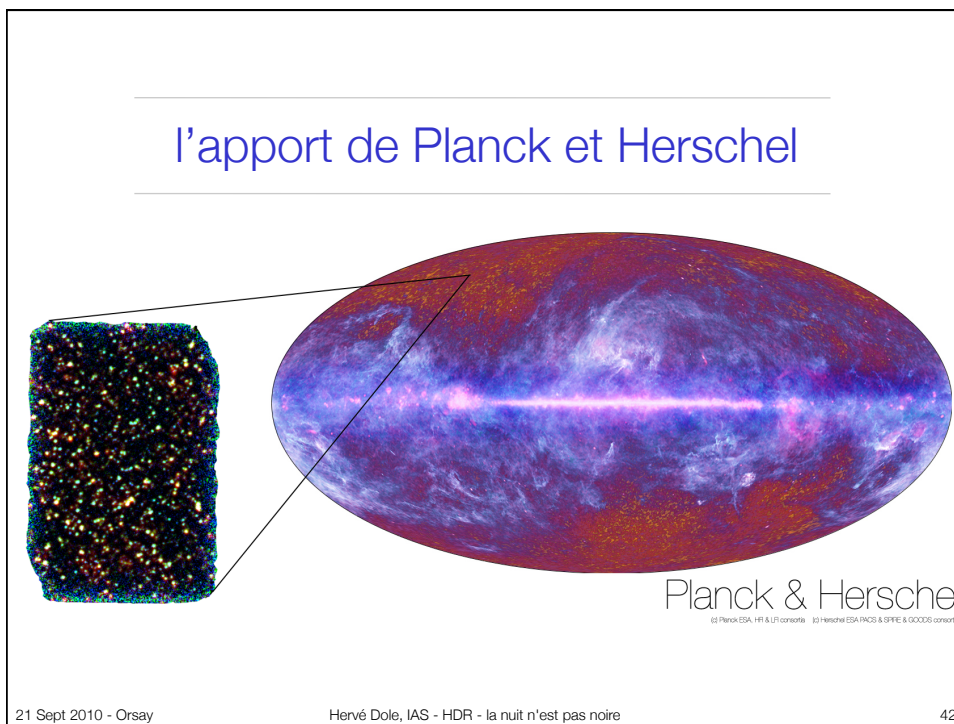


Béthermin et al., 2011, to be submitted

## modèle: CIB SED et contributions

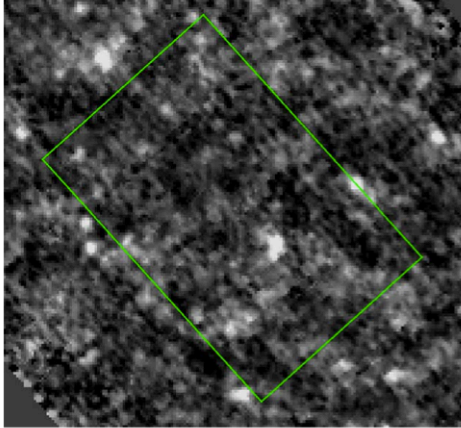


## l'apport de Planck et Herschel



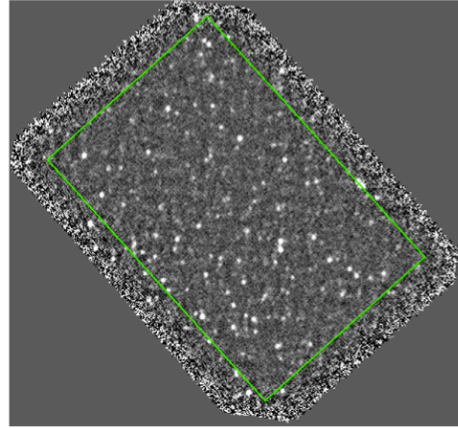
## résolution du CIB en galaxies

GOODS-N 160 $\mu$ m



Spitzer MIPS 160um  
FIDEL

GOODS-N 160 $\mu$ m



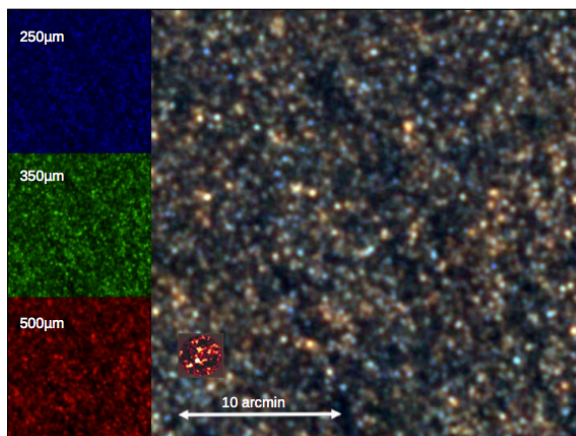
Herschel PACS 160um  
PEP

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

43

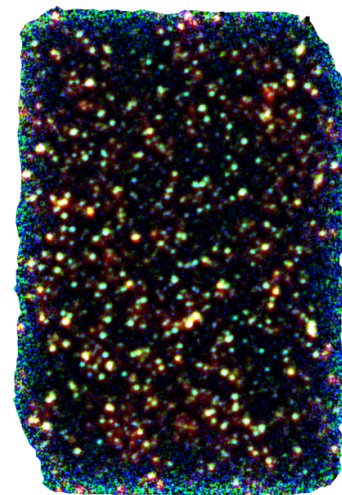
## résolution du CIB en galaxies



Herschel SPIRE 250, 350 & 500um – HERMES

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

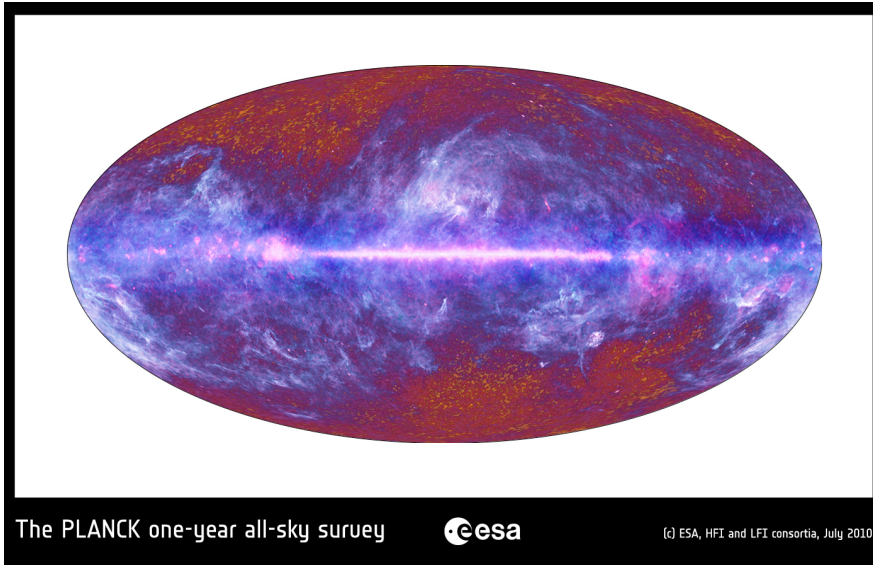


courtoise D. Elbaz et GOODS-H team

PACS 100, 160 & SPIRE 250um – GOODS-H

44

## statistique sur tout le ciel



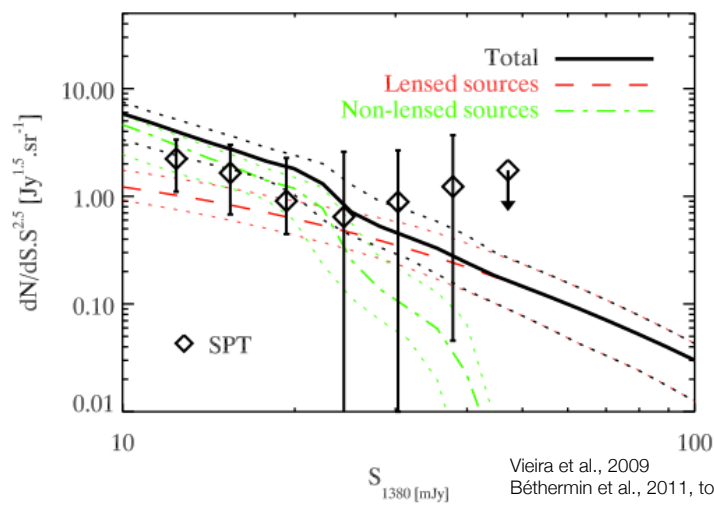
21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

45

## statistique dans le mm

Les comptages à 220 GHz sont dominés par les sources lentillées pour  $S > \sim 30$  mJy



21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

46

## opérations quotidiennes Planck à Orsay



Planck HFI – Instrument Operation Room – Institut d'Astrophysique Spatiale

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

47

## Transparence de l'Univers à haute énergie

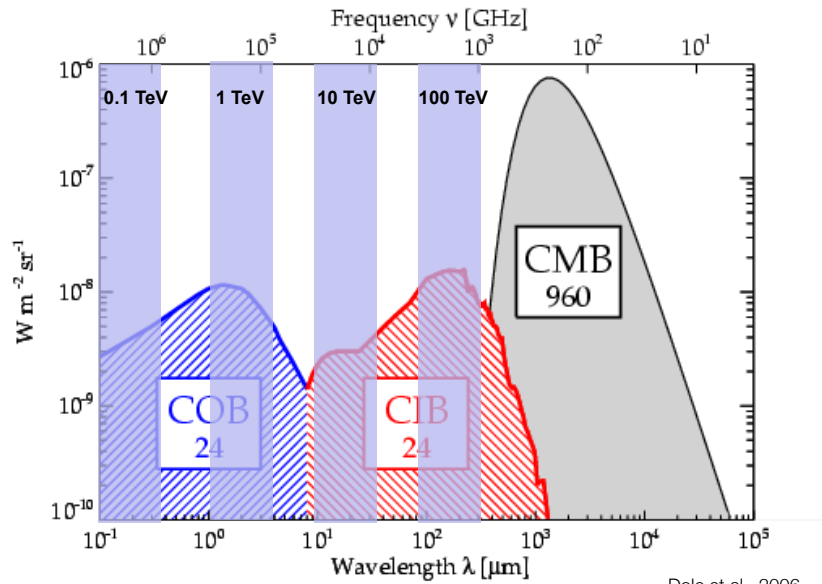
21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

48



## implications for TeV opacity



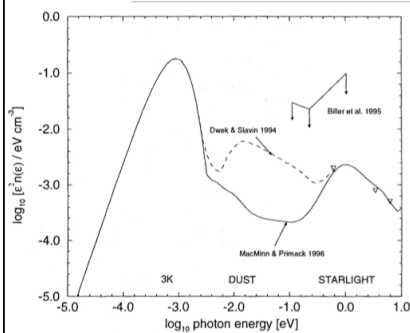
21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

Dole et al., 2006

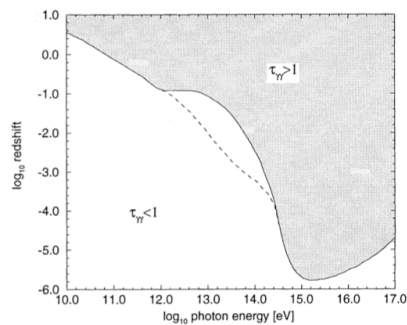
49

## implications for TeV opacity



**Fig. 2.** Solid line: the infrared-to-ultraviolet diffuse background radiation field adopted in the present work. Dashed line: a diffuse background assuming that the  $\gamma$ -ray spectrum of Mrk421 cuts off at TeV due to cosmic absorption. Triangles denote estimates by Madau & Phinney (1996) of the optical-to-ultraviolet diffuse background based on deep galaxy surveys

Different EBL (level and history)  
create different gamma-ray horizon



**Fig. 1.** The  $\gamma$ -ray horizons  $\tau_{\gamma\gamma}(E, z) = 1$  corresponding to the two different diffuse background models shown in Fig. 2. The horizons were calculated assuming  $\Omega = 1$ ,  $q_0 = 0.5$ ,  $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  and a photon number density evolving with redshift as  $n'de' = (1+z)^3 n de$  (conserved number of photons)

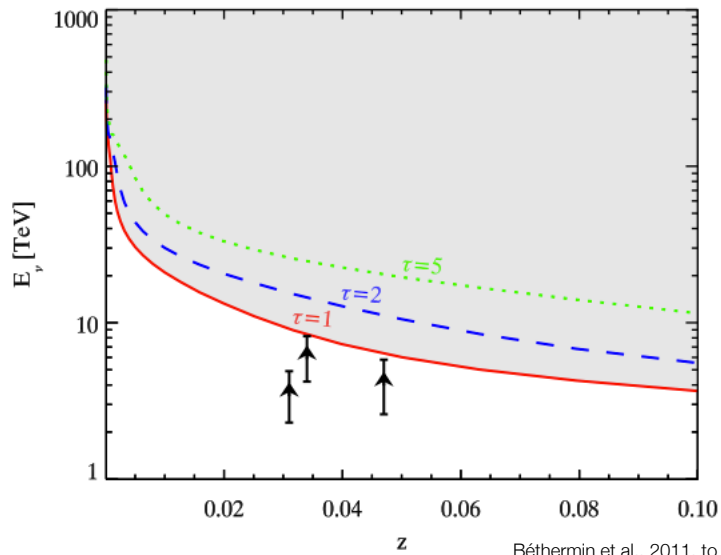
Mannheim et al., 1996

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

50

## horizon gamma



21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

51

## conclusions, perspectives

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

52

## fond extragalactique

- encode l'**histoire** du rayonnement des galaxies
- est mesuré sur plus de 20 ordres de grandeur en fréquence
  - avec de nouvelles contraintes (limites **inf.** et sup.)
  - est maximum en infrarouge lointain (vers 160 $\mu$ m)
  - CIB > COB: importance des phases infrarouge des galaxies
  - EBL  $\sim 50$  nW/m<sup>2</sup>/sr, à comparer à  $\sim 1000$  pour le CMB
- l'histoire du CIB avec le redshift
  - montre l'importance des galaxies infrarouges (LIRG) à  $z > 0.5$
  - est très discriminante pour les modèles (CIB pique à  $z \sim 1$ )
- sa structure angulaire nous renseigne sur les sources faibles
  - galaxies  $z < 2$  ou popIII ? galaxies massives vers  $z \sim 1$

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

53

## parmi les perspectives

- histoire des galaxies avec **Herschel**
  - évolution en fonction du redshift
  - accumulation du fond extragalactique en fonction du redshift
  - structure du fond: sondage des objets très faibles
- structure du fond avec **Planck**
  - fluctuations, et évolution en redshift: vers une mesure du biais ?
  - fond: premiers objets avec Planck ?
    - réionisation ?
    - premières galaxies, ou proto-amas de galaxies ou lentilles ?
    - objets rares, extrêmes ?
  - autre: amas de galaxies, BAO, absorption TeV, fond  $\gamma$ , Cosmic Vision

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

54

---

merci

---

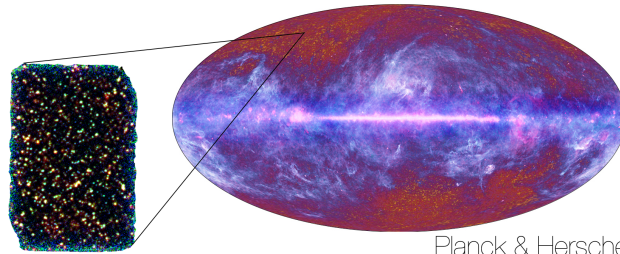
à l'IAS:

Guilaine Lagache, Jean-Loup Puget, Alexandre Beelen, Nabila  
Aghanim, Marian Douspis, Mathieu Langer, Nicolas Ponthieu

étudiants et post-docs:

Matthieu Béthermin, Nicolas Bavouzet, Karina Caputi

groupe MIC, tous les « planckien(ne)s », les joggueurs, etc.



Planck & Herschel

21 Sept 2010 - Orsay

Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

55