



HAL
open science

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

Herve Dole

► **To cite this version:**

Herve Dole. La nuit n'est pas noire: le rayonnement de fond extragalactique et l'évolution des galaxies infrarouges. Astrophysique [astro-ph]. Université Paris Sud - Paris XI, 2010. tel-00529539

HAL Id: tel-00529539

<https://theses.hal.science/tel-00529539>

Submitted on 25 Oct 2010

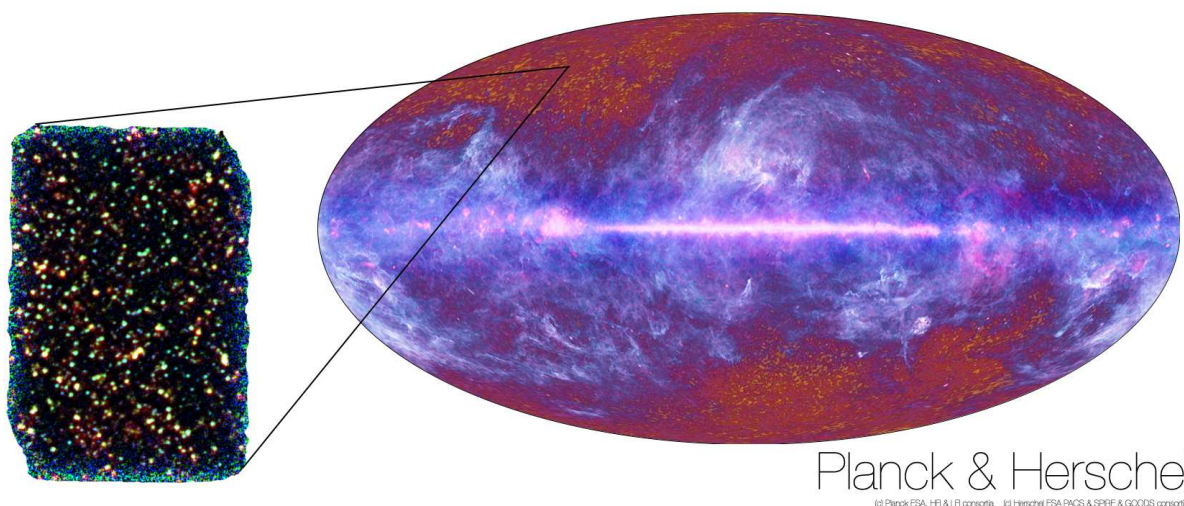
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mémoire présenté pour obtenir le
Diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches
spécialité : Astrophysique et techniques spatiales

par
Hervé DOLE

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



Le ciel observé par Planck (à droite) et Herschel (à gauche) à des fréquences similaires, mais à des échelles et résolutions angulaires différentes et complémentaires.

Soutenance le **mardi 21 septembre 2010** à l'Institut d'Astrophysique Spatiale,
Université Paris Sud 11, Orsay, devant le jury composé de :

Président :	Dr. Jean-Loup	PUGET
Rapporteurs :	Dr. F.-Xavier	DÉSERT
	Dr. Martin	GIARD
	Dr. Bruno	GUIDERDONI
Examineurs :	Dr. Pierre	COX
	Dr. David	ELBAZ

A Aline

Remerciements

L'habilitation à diriger les recherches est un exercice particulier, pas complètement inutile ni chronophage, qui met en lumière le travail de recherche d'une personne. Comme je le soulignais le jour de la soutenance, mon travail s'inscrit dans celui d'une équipe très dynamique permettant à l'enseignant-chercheur que je suis de m'épanouir dans la recherche et dans l'enseignement. Merci donc à Jean-Loup Puget et Guilaine Lagache, avec qui de longues années de complicité, notamment scientifique, marquent positivement une existence, et permettent de mener des projets scientifiques excitants.

Le groupe MIC (matière interstellaire et cosmologie), et sa composante cosmologie, permettent de travailler efficacement avec des collaborations fructueuses et amicales, tout en permettant aux stagiaires, doctorants et post-doc de former un groupe cohérent et attractif. Merci donc à vous tous. La proximité de certains d'entre vous, scientifiquement et/ou universitairement et/ou humainement (Nabila Aghanim, Alexandre Beelen, Marian Douspis, Mathieu Langer, Nicolas Ponthieu, Alain Abergel notamment) est un atout dans l'aventure quotidienne qu'est la vie d'un laboratoire et d'une université pour faire de la science et de l'enseignement.

Merci à mes deux premiers thésards, Nicolas Bavouzet et Matthieu Béthermin, d'avoir si bien travaillé (!) dans la bonne humeur, et à qui je souhaite bonne continuation. Merci aussi à mes (nombreux...) stagiaires, dont en Master 2 Mathilde Jauzac et Jean-Pierre Treuil, et aux post-docs (principalement Karina Caputi, Alexandre Beelen à l'époque, et récemment Elizabeth Fernandez, et bientôt Niraj Welikala). Une grande partie des travaux présentés ici est le fruit de leur travail.

De nombreuses collaborations se sont tissées avec des collègues (impossible de les citer tous) de l'IAP, CEA Saclay, APC, LAL, CESR, LAM, et un peu plus loin à Tucson, Pasadena, Hambourg, et de nombreuses autres villes universitaires européennes et nord-américaines dans le cadre de ou en marge de projets comme MIPS sur Spitzer ou HFI sur Planck.

Enfin, merci aux personnels des services de l'IAS qui permettent de maintenir notre niveau d'excellence, dans la bonne humeur (mention spéciale pour le service info et l'équipe Planck).

Je remercie les éminents membres de mon jury de HDR, qui ont dégagé du temps pour la lecture du manuscrit et la soutenance, et qui ont suscité une discussion intéressante lors des questions : F.-Xavier Désert, Pierre Cox, Martin Giard, Bruno Guiderdoni, David Elbaz, Jean-Loup Puget.

Un mot de remerciement à ceux qui m'ont soufflé l'idée, puis soutenu pour obtenir une chaire junior à l'Institut Universitaire de France pour 5 ans : Alain Omont, George Rieke, George Helou, Jean-Loup Puget, David Elbaz, Patrick Boissé, Bruno Guiderdoni. Cela va changer ma vie d'enseignant-chercheur.

Un grand merci à ma Maman, Maryse Dole, pour sa présence et pour son aide comme chef d'orchestre pour le pot. Une pensée à ceux qui n'étaient pas présents, ou qui ne sont plus, dont Richard Gispert et Bernard Dole.

Table des matières

1	Introduction	7
1.1	Préambule, ou pourquoi la nuit n'est pas noire	7
1.2	Contexte cosmologique	8
1.3	Le fond extragalactique, le fond extragalactique infrarouge, et les grandes questions	10
1.4	Planck & Herschel	12
1.5	Quelques aspects historiques : une longue quête	13
1.6	Résumé de mes principaux travaux, faits marquants	15
2	Rayonnement extragalactique et implications cosmologiques	17
2.1	Distribution spectrale d'énergie	17
2.1.1	Distribution spectrale d'énergie du fond extragalactique : les mesures	17
2.1.2	Quel degré de confiance des mesures de SED de l'EBL ?	20
2.1.3	Forme spectrale de l'EBL : ajustements et contributions	21
2.2	Histoire du fond infrarouge	23
2.3	Transparence de l'Univers	25
2.3.1	L'émission TeV et le CIB	25
2.3.2	Projet : opacité de l'Univers aux rayons gamma	26
2.4	Modèles	27
3	Propriétés statistiques des galaxies infrarouges	29
3.1	Propriétés photométriques	29
3.2	Propriétés spatiales : distribution angulaire	30
3.3	Modèles	31
3.3.1	Le modèle	31
3.3.2	Son évolution	31
3.4	Projet : sonder la formation des premières structures	33
3.4.1	Les galaxies infrarouges	33
3.4.2	Les amas de galaxies	34
3.4.3	Les proto-amas de galaxies.	34
3.4.4	Les sources de réionisation	34
4	Conclusions & Perspectives	37
4.1	Le fond extragalactique	37
4.2	Planck et Herschel	38
4.2.1	Planck	38
4.2.2	Herschel	38
4.3	Au-delà : les futurs observatoires pour la cosmologie	39
4.4	Un soupçon d'enseignement	40
	Bibliographie	42

Annexes	51
A Liste des publications	55
B Curriculum Vitae	61
C Présentation orale : copie des diapositives	65
D Une sélection d'articles publiés (disponible en ligne)	97

Table des figures

1.1	évolution schématique (et simpliste) temporelle de l'Univers (en bas) avec les principaux rayonnements de fond (en haut). Ce schéma a été conçu dans un cadre de vulgarisation. Tiré de Dole et al. (2009) d'après Kashlinsky et al. (2007c).	8
1.2	Distribution spectrale d'énergie des rayonnements extragalactiques , avec leur brillance en $\text{nW m}^{-2} \text{sr}^{-1}$. De droite à gauche : CMB (fond diffus cosmologique ou <i>Cosmic Microwave Background</i>), CIB (fond infrarouge ou <i>Cosmic Infrared Background</i>), COB (fond optique ou <i>Cosmic Optical Background</i>). Le fond infrarouge domine le rayonnement provenant de la formation et de l'évolution des galaxies. Notre mesure permet de contraindre bien plus précisément le pic du CIB, vers $160 \mu\text{m}$ de longueur d'onde. Il est intéressant de noter que seulement 5% (i.e. $\sim 50 \text{nW m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ par rapport à ~ 1000) de la brillance du ciel extragalactique provient des processus de formation et d'évolution des galaxies, le reste étant dominé par la lumière fossile de la recombinaison (CMB). Tiré de Dole et al. (2006). Cf aussi Puget et al. (1996); Hauser & Dwek (2001).	10
1.3	Distribution spectrale d'énergie totale des rayonnements extragalactiques , sur plus de 20 ordres de grandeur en fréquence d'observation, du domaine radio aux rayons gamma. Les chiffres indiquent la brillance arrondie de chaque fond en $\text{nW m}^{-2} \text{sr}^{-1}$. De nouvelles contraintes en infrarouge amènent à réhausser le niveau du CIB par rapport à 2006. Le CMB à $T=2.72548 \pm 0.00057 \text{ K}$ (Fixsen, 2009) est aussi représenté, avec des données plus anciennes pour illustration (Ressell & Turner, 1990; Mather et al., 1994; Mather et al., 1999; Fixsen & Mather, 2002).	11
1.4	La totalité du ciel couverte par Planck lors de son premier relevé . Image diffusée le 5 juillet 2010. ESA, HFI & LFI consortia.	12
1.5	Synthèse des contraintes observationnelles et des prédictions pour la distribution spectrale d'énergie des rayonnements extragalactiques , de $0.1 \mu\text{m}$ à 10 mm effectuée par Puget en 1972 (FPP/4 ESRO Panel on Fundamental Physics), et tirée ici du rapport Puget & Encrenaz, 1974.	13
1.6	Synthèse des contraintes observationnelles et des prédictions pour la distribution spectrale d'énergie des rayonnements extragalactiques , de $0.1 \mu\text{m}$ à 10 mm effectuée par Puget en 1985 dans le cadre de la préparation à ISO. Le document étant une copie de piètre qualité (original pas encore retrouvé), de l'indulgence de la part du lecteur est demandée.	14
1.7	Synthèse des contraintes observationnelles fin 2000 , de Hauser & Dwek (2001).	15
2.1	Mesures du fond extragalactique radio , et ajustement (cf. sections 2.1.1 et 2.1.3).	18
2.2	Mesures du fond extragalactique UV, visible, infrarouge et submillimétrique , et ajustement (cf. sections 2.1.1 et 2.1.3).	18
2.3	Mesures du fond extragalactique X , et ajustement (cf. sections 2.1.1 et 2.1.3).	19
2.4	Mesures du fond extragalactique γ , et ajustement (cf. sections 2.1.1 et 2.1.3).	19

2.5	Images du signal empilé à 70 et 160 μm dans le champs COSMOS, par tranche de redshift. Chaque image à 70 μm couvre 244×244 arcsecondes carrées (avec 4 arcsec par pixel), la largeur de la PSF valant environ 18 arcsec, soit environ 4.5 pixels. Chaque image à 160 μm couvre 488×488 arcsecondes carrées (avec 8 arcsec par pixel), la largeur de la PSF valant environ 40 arcsec, soit environ 5 pixels. Tiré de Jauzac et al. (2010).	23
2.6	Brillance différentielle $\frac{d(\nu B_\nu)}{dz}$ du fond infrarouge à 24, 70, 100, et 160 μm, en fonction du redshift. Les données proviennent de : Spitzer à 24 μm (Le Floc'h et al., 2009), Spitzer à 70 et 160 μm (Jauzac et al., 2010) dans le champ COSMOS, et Herschel/PACS à 100 et 160 μm dans GOODS-N (Berta et al., 2010). Tiré de Jauzac et al. (2010).	24
2.7	Brillance différentielle $\frac{d(\nu B_\nu)}{dz}$ du fond infrarouge à 160 μm en fonction du redshift, dans le champs COSMOS (à gauche) et GOODS (à droite) : contribution totale au CIB (pour une sélection de galaxies à 24 μm $S_{24} > 80 \mu\text{Jy}$) en grisé, sources résolues en grisé (bas redshift) et AGN (grisé en bas), avec zoom dans le panel inférieur pour plus de lisibilité. Trois modèles sont représentés : Lagache et al. (2004) (tiret), Le Borgne et al. (2009) (pointillé), Bethermin et al. (2011) (trait 3 points). Ces observables sont très discriminantes pour les modèles. Tiré de Jauzac et al. (2010).	25
2.8	Horizon des rayons γ (ou relation Fazio-Stecker) selon le modèle de Kneiske & Dole (2010), qui représente l'opacité en fonction de l'énergie des photons et du redshift de la source de rayons γ . $\tau > 1$ indique que l'opacité devient forte. Les points représentent les données, et les lignes continues en bas représentent d'autres modèles (de bas en haut) : Stecker et al. (2006), Albert & Magic Collaboration (2008) et Primack et al. (2005).	26
3.1	Détection des fluctuations du CIB (rectangles bleu sombre) tracés sur la SED du CIB.	30
3.2	Données et modèle de Bethermin et al. (2011) : a-g : comptages à 24, 70, 160, 250, 350, 500 μm et 1.1 mm. h : fonctions de luminosités de 8 à 60 μm , de $z=0$ à $z=2$. Tiré de Bethermin et al. (2011).	32
4.1	Résumé schématique des perspectives.	39

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1	Préambule, ou pourquoi la nuit n'est pas noire	7
1.2	Contexte cosmologique	8
1.3	Le fond extragalactique, le fond extragalactique infrarouge, et les grandes questions	10
1.4	Planck & Herschel	12
1.5	Quelques aspects historiques : une longue quête	13
1.6	Résumé de mes principaux travaux, faits marquants	15

1.1 Préambule, ou pourquoi la nuit n'est pas noire

L'Univers, en dehors de notre Galaxie, est baigné de nombreux rayonnements, le principal étant observable dans le domaine des ondes radio centimétriques et millimétriques : le fond cosmologique (ou CMB pour *Cosmic Microwave Background*), corps noir de température actuelle 2.7 Kelvin. Découvert dans les années soixante, et largement étudié depuis pour ses infimes fluctuations de température et de polarisation, il se propage librement depuis une époque située environ 400000 ans après le big-bang. Il nous renseigne sur l'état de l'Univers primordial, sur son contenu, ainsi que sur certains processus physiques ayant eu lieu ultérieurement, comme la réionisation ou la formation des amas de galaxie. Un autre rayonnement d'importance cosmologique a été découvert il y a seulement quatorze ans¹ dans les données du satellite COBE, mais ici dans le domaine de l'infrarouge lointain, vers 200 microns de longueur d'onde : le **rayonnement fossile des galaxies**, ou fond diffus extragalactique infrarouge. Il est environ 50 fois moins intense que le fond cosmologique (pic à pic, ou de 20 à 40 fois moins en intégrale). Cette détection a constitué une grande surprise vu la grande intensité relative de l'infrarouge lointain par rapport à la partie visible provenant directement des étoiles. Ce fond diffus a pour origine l'émission de toutes les galaxies depuis leur formation, et résume ainsi toute leur histoire.

Il est donc permis d'écrire, presque sans ironie, que **la nuit n'est pas noire**, dans la mesure où, si nos yeux (avec le concours d'une hypothétique fenêtre atmosphérique) étaient sensibles aux rayonnements infrarouge lointain, millimétrique et centimétrique, ils verraient une nuit brillante de rayonnements cosmologiques.

Notons que la question de la nuit noire - connue sous le nom de paradoxe d'Olbers Chéseaux - est ancienne, fertile, et touche aux fondements de la description et la compréhension de notre Univers physique, de son origine et de son évolution. Une littérature abondante et passionnante est disponible à ce sujet (Wesson et al., 1987; Wesson, 1991; Alimi, 2002; Riazuelo, 2005; Levy-Leblond, 2008; Nitschelm, 2008, et références citées dans ces documents).

Mesurer précisément ce rayonnement de fond infrarouge et comprendre la nature des galaxies qui en sont à l'origine et leur évolution, constituent l'une des thématiques importantes de la cos-

1. Puget et al. (1996); Hauser et al. (1998); Hauser & Dwek (2001)

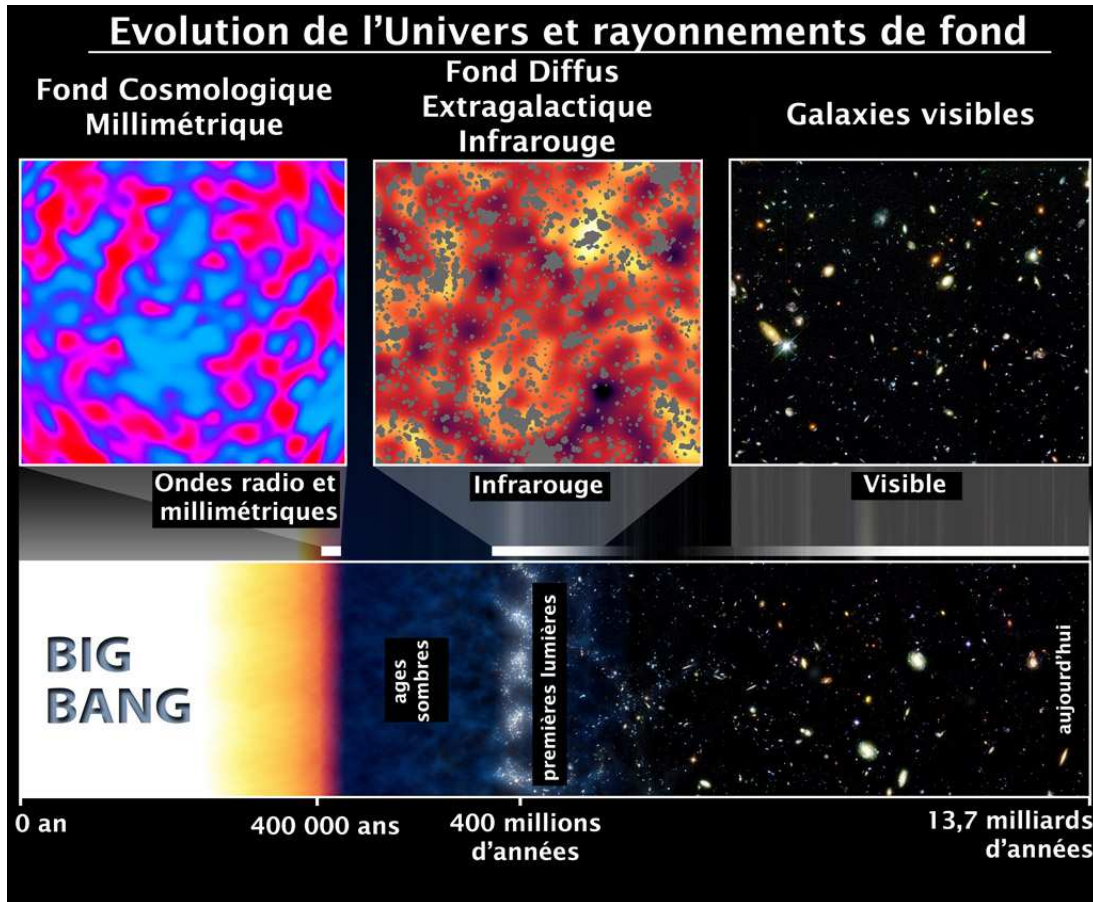


FIGURE 1.1: évolution schématique (et simpliste) temporelle de l'Univers (en bas) avec les principaux rayonnements de fond (en haut). Ce schéma a été conçu dans un cadre de vulgarisation. Tiré de Dole et al. (2009) d'après Kashlinsky et al. (2007c).

mologie observationnelle d'aujourd'hui. Ainsi, de grands relevés de galaxies sont menés, tant au sol que depuis l'espace, pour que ce rayonnement des galaxies nous livre ses secrets. La différence entre le fond cosmologique et le fond extragalactique infrarouge lointain réside dans l'époque de l'Univers concernée : jeune (environ 400 000 ans), diffus et très homogène dans le premier cas, plus vieux (d'environ 0,4 à 13 milliards d'années) et déjà composé de structures, comme des amas et galaxies non séparées par les moyens d'observation, dans le second cas (figure 1.1). L'ensemble de ces fonds constitue le contenu électromagnétique de l'Univers aujourd'hui. Il est largement dominé par le CMB (environ 95% de l'énergie, figure 1.2).

1.2 Contexte cosmologique

Avant le découplage matière-rayonnement intervenant vers 400 000 ans après le big-bang et qui a engendré le fond cosmologique, l'Univers était un plasma de matière et photons principalement. Ce plasma oscillait selon des modes dont les caractéristiques dépendent de son contenu, et ces oscillations acoustiques (matière ionisée et photons) ont été le vecteur transportant l'information depuis les phases primordiales. (Des oscillations du même type se produisent actuellement au cœur des étoiles et du Soleil : elles transportent l'information sur la physique du cœur jusqu'à la surface, où elles peuvent être détectées en observant le rayonnement électromagnétique émis à la surface, dont la densité change légèrement au gré des oscillations acoustiques.) Après le découplage, ces oscillations acoustiques se sont arrêtées ; leurs effets sont observés aujourd'hui dans les fluctuations de

température du fond cosmologique. Les surdensités de matière, initiées par ces oscillations stoppées, ont ensuite pu croître en s'effondrant gravitationnellement malgré l'expansion de l'Univers, pour former de grandes concentrations de matière (appelées halos) qui, plus tard, deviendront les structures de l'Univers : amas de galaxies et galaxies. Les halos sont dominés par la matière noire, dans lesquels la matière ordinaire (un gaz de baryons), s'effondre, se condense et se refroidit, pour former des étoiles. Les halos et galaxies, relativement petits au début, fusionnent puis forment des systèmes de plus en plus massifs avec le temps. C'est, en substance, ce que prévoit la plupart des modèles de formation des structures en cosmologie, dits de formation hiérarchique².

Ces modèles (sous forme analytique ou semi-analytique, avec l'appui de gros outils de simulation, comme par exemple Horizon) réussissent non seulement à reproduire de nombreuses observables (comme les fluctuations de température du CMB (Dunkley et al., 2009, e.g.), et les fluctuations de densité de matière (Tegmark et al., 2004; Percival et al., 2007, e.g.)), mais aussi à prédire des phénomènes observés ensuite (comme les oscillations dans la distribution spatiale des galaxies, dites BAO (Eisenstein et al., 2005, e.g.)). Malgré les succès, ces modèles butent sur une limitation fondamentale : la physique fine des baryons, en particulier leur lien avec la matière noire, et les processus physiques de formation stellaire et d'accrétion. En effet, les modèles ne prédisent avec précision que le comportement de la matière noire. Or, l'information obtenue par l'observation des galaxies provient essentiellement du rayonnement issu du refroidissement des baryons conduisant à la formation des nuages interstellaires et des étoiles, mais pas de la matière noire. **Comparer modèles et observations pour comprendre la formation des structures** requiert donc l'utilisation de modèles physiques complexes pour décrire l'effondrement de gaz en galaxies et étoiles : là réside l'une des plus grandes difficultés.

Afin de motiver physiquement l'utilisation de ces modèles, les astrophysiciens et cosmologistes s'intéressant à la formation des galaxies doivent rechercher des signatures observationnelles, indépendantes entre elles, afin de mieux cerner le lien entre physique des baryons et matière noire. De nombreuses approches existent et, concernant les baryons, elles utilisent les galaxies comme "particules tests" traçant naturellement les baryons formant ensuite des étoiles, ce traceur étant très certainement non linéaire. Des échantillons de galaxies massives sont par exemple utilisés pour mesurer leurs corrélations spatiales et leur évolution, indiquant comment les halos ont fusionné. D'autres traceurs sont utilisés, comme la formation stellaire via les **galaxies infrarouges**.

Une autre méthode pour étudier la physique du gaz de baryons se structurant consiste mesurer l'émission des galaxies permettant de quantifier l'énergie rayonnée et d'identifier les familles de processus physiques dominants, responsables des émissions. Ces contraintes permettent ainsi de fournir le budget énergétique aux modèles. L'émission de rayonnement des galaxies, quand elle est analysée sur une large portion du spectre électromagnétique, permet de déterminer si la formation stellaire (i.e. la nucléosynthèse, formation des éléments chimiques au coeur des étoiles) et/ou l'accrétion (i.e. la gravitation) sont dominants, ainsi que de mesurer la masse stellaire et de poussière, le taux de formation d'étoile, et la masse éventuelle d'un trou noir central. Il est cependant souvent très coûteux en temps et en technologie d'accéder à toute l'étendue du spectre des galaxies (du domaine radio aux rayons gamma), et, quand c'est possible, cela concerne un nombre très restreint de galaxies, souvent proches ou très lumineuses. Il est alors difficile dans ces conditions de sonder la formation des structures de manière fiable et peu biaisée. S'il est compliqué d'étudier les galaxies individuelles en détail, il est possible de les étudier en grand nombre dans un domaine spectral restreint, soit en menant une étude statistique sur les galaxies détectées, soit via le **rayonnement de fond extragalactique diffus**. Prédit il y a plus de 50 ans (Partridge & Peebles, 1967; Stecker et al., 1977), ce rayonnement est la somme de toutes les émissions des galaxies de toutes les générations : c'est une **émission fossile** de la formation des galaxies. Dès lors a commencé la recherche de la détection de ce rayonnement, qui est intervenue à la fin des années 1990 (Puget et al., 1996; Hauser et al., 1998; Fixsen et al., 1998).

2. et cela dans le cadre cosmologique (de concordance) impliquant la présence de matière noire et une constante cosmologique non nulle, Λ CDM.

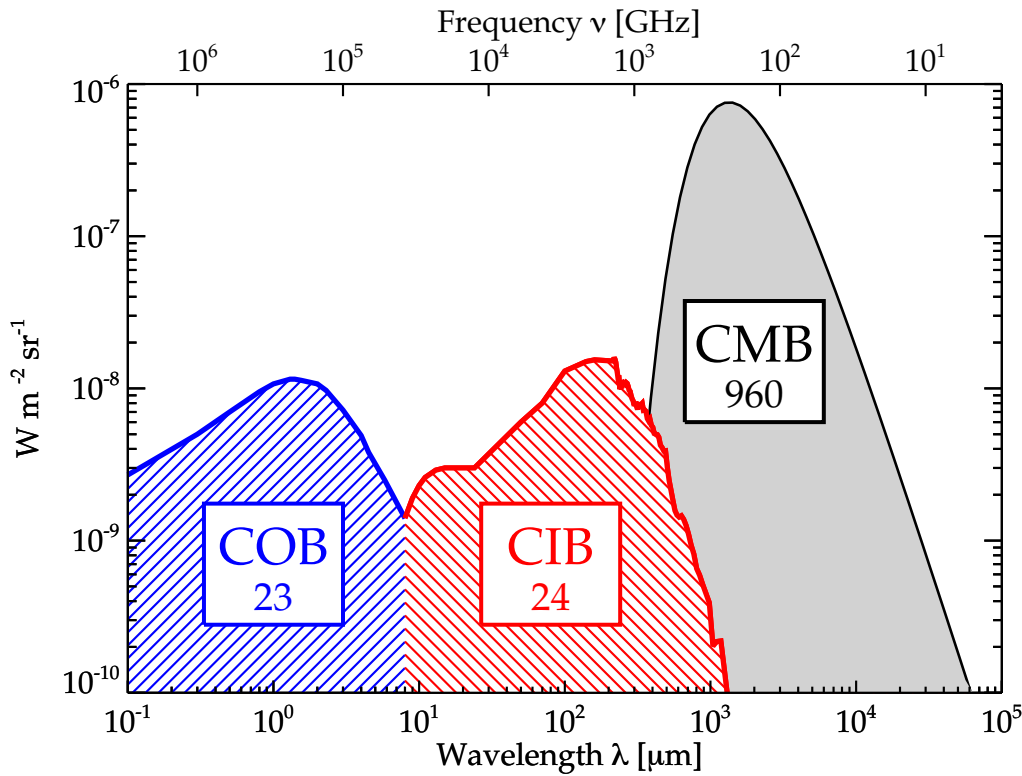


FIGURE 1.2: **Distribution spectrale d'énergie des rayonnements extragalactiques**, avec leur brillance en $nW m^{-2} sr^{-1}$. De droite à gauche : CMB (fond diffus cosmologique ou Cosmic Microwave Background), CIB (fond infrarouge ou Cosmic Infrared Background), COB (fond optique ou Cosmic Optical Background). Le fond infrarouge domine le rayonnement provenant de la formation et de l'évolution des galaxies. Notre mesure permet de contraindre bien plus précisément le pic du CIB, vers $160 \mu m$ de longueur d'onde. Il est intéressant de noter que seulement 5% (i.e. $\sim 50 nW m^{-2} sr^{-1}$ par rapport à ~ 1000) de la brillance du ciel extragalactique provient des processus de formation et d'évolution des galaxies, le reste étant dominé par la lumière fossile de la recombinaison (CMB). Tiré de Dole et al. (2006). Cf aussi Puget et al. (1996); Hauser & Dwek (2001).

1.3 Le fond extragalactique, le fond extragalactique infrarouge, et les grandes questions

Le rayonnement de fond extragalactique (figures 1.2 et 1.3), hors fond cosmologique à $T=2.72548 \pm 0.00057 K$ (Fixsen, 2009) est le rayonnement fossile des galaxies. **L'intensité et la structure angulaire de ce rayonnement dépendent de l'histoire de la production d'énergie dans l'Univers post-recombinaison** (Kashlinsky, 2005, e.g.). Ce rayonnement encode donc l'histoire des structures de l'Univers, des premières sources (réionisation) jusqu'aux galaxies proches.

Ce fond extragalactique est de nature différente selon les longueurs d'onde, ou, plus précisément, selon le type de technologie utilisée pour le mesurer. Dans le domaine radio, UV et visible, le fond diffus en tant que tel n'est pas détecté, dans la mesure où l'essentiel des galaxies est détecté individuellement. Dans ce cas, le fond extragalactique est la somme des rayonnements discrets de ces sources. En revanche, dans l'infrarouge lointain, le domaine submillimétrique, tout comme en rayons X et gamma, le fond de galaxies apparaît diffus, du fait de la résolution angulaire relativement faible des télescopes par rapport à la densité surfacique de galaxies (phénomène appelé confusion, (Dole et al., 2003, 2004b, e.g.)) qui a pour effet de "noyer" les sources discrètes en un fond diffus. Il existe probablement une composante réellement diffuse dans le rayonnement extragalactique, par exemple due à l'émission relique des premières étoiles de population III (Santos et al., 2002; Fernandez & Komatsu, 2006; Fernandez et al., 2010, e.g.).

Le fond extragalactique couvre tout le domaine spectral, et présente un maximum d'intensité

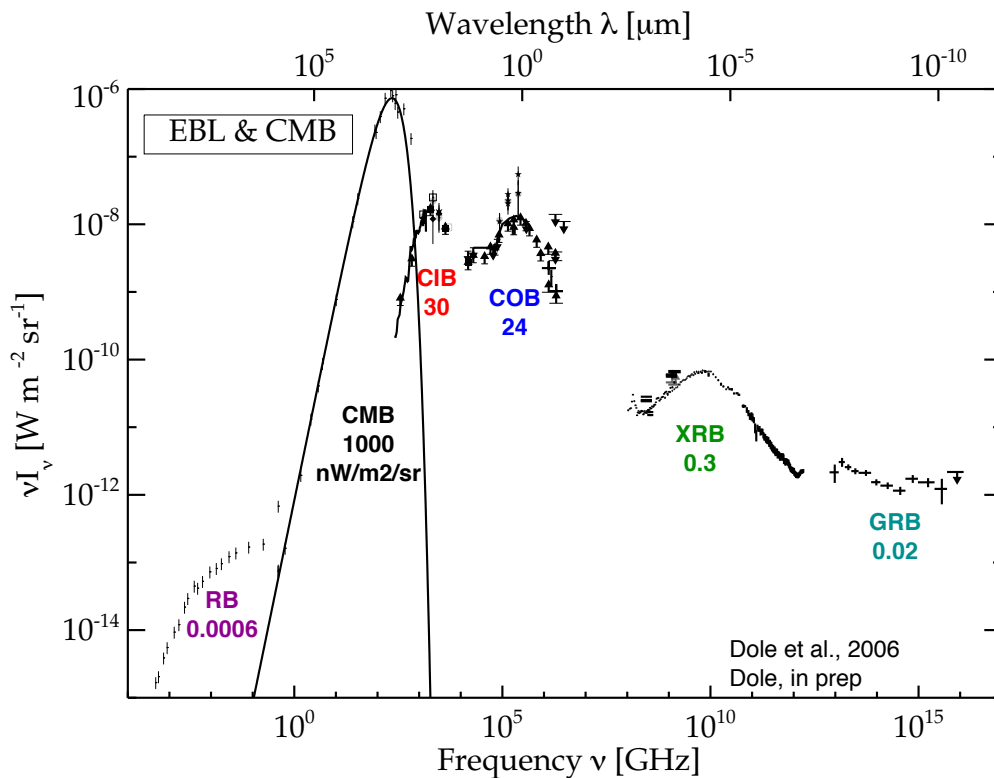


FIGURE 1.3: **Distribution spectrale d'énergie totale des rayonnements extragalactiques**, sur plus de 20 ordres de grandeur en fréquence d'observation, du domaine radio aux rayons gamma. Les chiffres indiquent la brillance arrondie de chaque fond en $\text{nW m}^{-2} \text{sr}^{-1}$. De nouvelles contraintes en infrarouge amènent à réhausser le niveau du CIB par rapport à 2006. Le CMB à $T=2.72548 \pm 0.00057 \text{ K}$ (Fixsen, 2009) est aussi représenté, avec des données plus anciennes pour illustration (Ressell & Turner, 1990; Mather et al., 1994; Mather et al., 1999; Fixsen & Mather, 2002).

dans l'infrarouge lointain (Puget et al., 1996; Hauser et al., 1998; Fixsen et al., 1998; Hauser & Dwek, 2001; Dole et al., 2006; Bethermin et al., 2010a), et un deuxième pic dans le visible (figure 1.2). On appelle le fond extragalactique infrarouge la composante infrarouge ($5 \leq \lambda \leq 1000 \mu\text{m}$) du rayonnement fossile des galaxies. Contrairement aux galaxies locales rayonnant l'essentiel de leur énergie dans le domaine visible et pas dans l'infrarouge (Soifer & Neugebauer, 1991), le fond extragalactique est plus intense dans l'infrarouge que dans le visible, et présente un maximum de brillance vers $160 \mu\text{m}$ de longueur d'onde. Cette différence fondamentale témoigne de **l'évolution des propriétés d'émission des galaxies** : l'émission s'accroît fortement dans l'infrarouge avec le redshift (ou l'époque cosmique³). Parmi les grandes questions qui se posent se trouvent celles-ci : pourquoi la majorité des galaxies émettent plus dans l'infrarouge avec le redshift ? Quelle est la nature de ces galaxies qui ont une contribution dominante au rayonnement extragalactique ? S'agit-t-il d'une population spéciale de galaxies, ou d'une phase transitoire dans l'histoire des galaxies ? Quelle est la distribution en luminosité, masse, redshift de ces galaxies ? J'ai contribué à répondre à ces questions, notamment dans les articles suivants : Dole et al. (2001, 2004a); Egami et al. (2004); Papovich et al. (2004); Elbaz (2005); Lagache et al. (2005); Le Floc'h et al. (2005); Caputi et al. (2006a); Takeuchi et al. (2006); Sajina et al. (2006); Caputi et al. (2006b); Dole et al. (2006); Caputi et al. (2007); Zheng et al. (2007); Bavouzet et al. (2008); Bethermin et al. (2010a,b).

3. les cosmologistes utilisent rarement la notion de distance, mais plutôt la notion de décalage Doppler spectral vers le rouge, ou redshift, dû à l'expansion de l'Univers. Pour fixer les idées : redshift=0 correspond à aujourd'hui et ici. Redshift=1 correspond environ à la moitié de l'âge de l'Univers, soit il y a 8 milliards d'années, ce qui correspond à une distance d'environ 21 milliards d'années-lumière ; Redshift=2 correspond à un quart de l'âge de l'Univers (soit il y a environ 10,3 milliards d'années), et une distance de 51 milliards d'années-lumière.

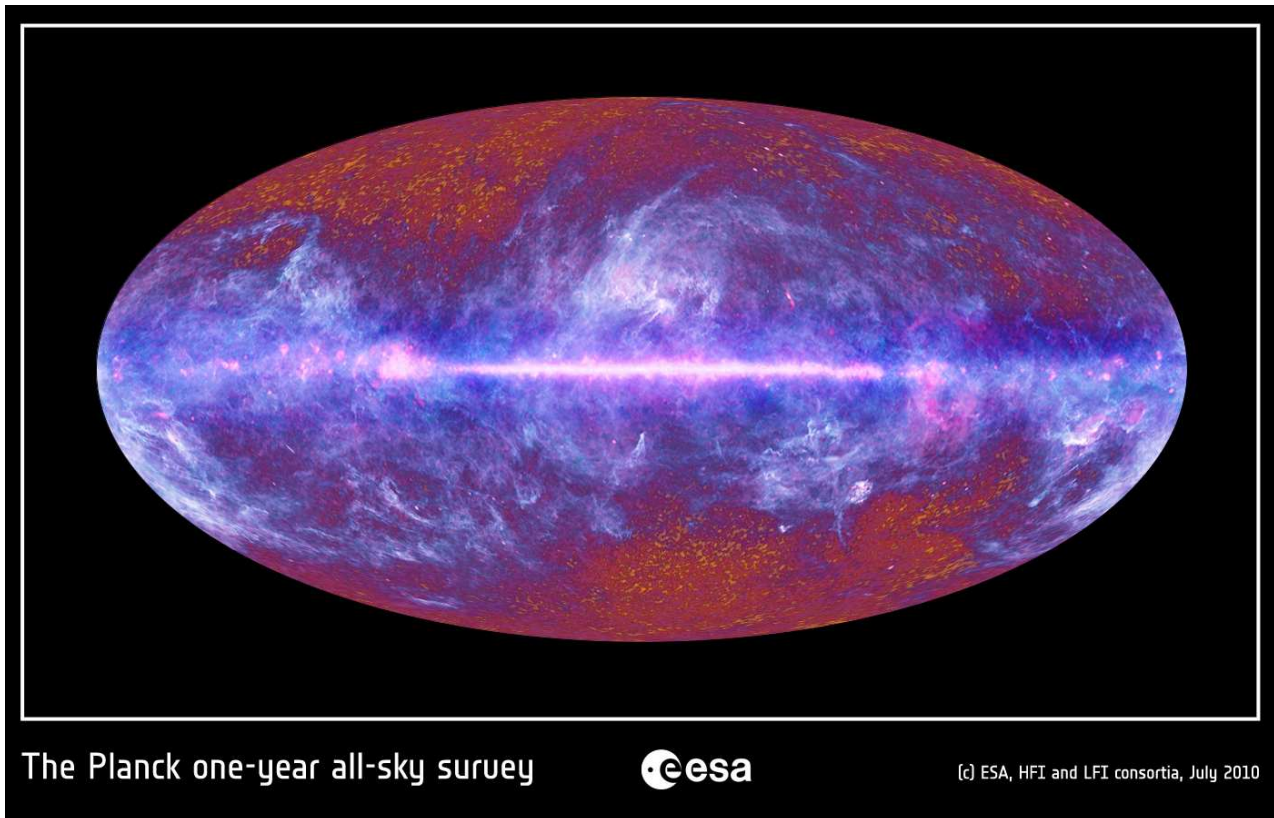


FIGURE 1.4: La totalité du ciel couverte par Planck lors de son premier relevé. Image diffusée le 5 juillet 2010. ESA, HFI & LFI consortia.

L'étude du rayonnement extragalactique apporte des informations essentielles sur l'évolution des galaxies ; néanmoins, cette information est dégénérée, puisque ce rayonnement intègre l'émission en fonction du redshift. A un niveau de fond infrarouge peuvent correspondre une multitude d'évolutions. Il est donc essentiel, outre une **mesure du fond infrarouge** (intensité et structure) encore plus fine, d'obtenir des informations plus précises sur les **propriétés statistiques des galaxies** (au travers de relevés cosmologiques) qui permettent de lever les dégénérescences, tout en développant des **modèles** reproduisant ces observables et permettant d'interpréter les évolutions observées.

1.4 Planck & Herschel

Les satellites Planck et Herschel, de l'Agence Spatiale Européenne, ont été lancés avec succès par une Ariane 5 en mai 2009, et constituent le coeur du programme astrophysique de l'agence, et de nos laboratoires et universités impliquées dans les moyens spatiaux d'étude de l'Univers.

Planck a pour principal but d'observer le fond cosmologique micro-ondes, mais nous permettra aussi d'étudier les avant-plans, en particulier les galaxies, les amas de galaxies, et le rayonnement extragalactique (figure 1.4). Son instrument emblématique, HFI, a pour P.I. J.-L. Puget (IAS), et notre laboratoire a la maîtrise d'oeuvre de l'instrument. Par ailleurs, nous sommes chaque soir en opération pour recevoir les données en direct à Orsay, afin de monitorer l'état de l'instrument. Planck observe la totalité du ciel en environ 6 mois, à 9 fréquences (de 30 à 857 GHz, soit de 350 μm à 1cm), pendant environ 2 ans et demi, en mode balayage. Après des phases réussies de commissioning et de premier relevé, Planck est entré en mode d'observation de routine depuis septembre 2009. Nous analysons les données qui arrivent, et leur qualité est nominale. Il n'est malheureusement pas possible de communiquer sur les premiers résultats que nous sommes en train d'obtenir, mais ils nous

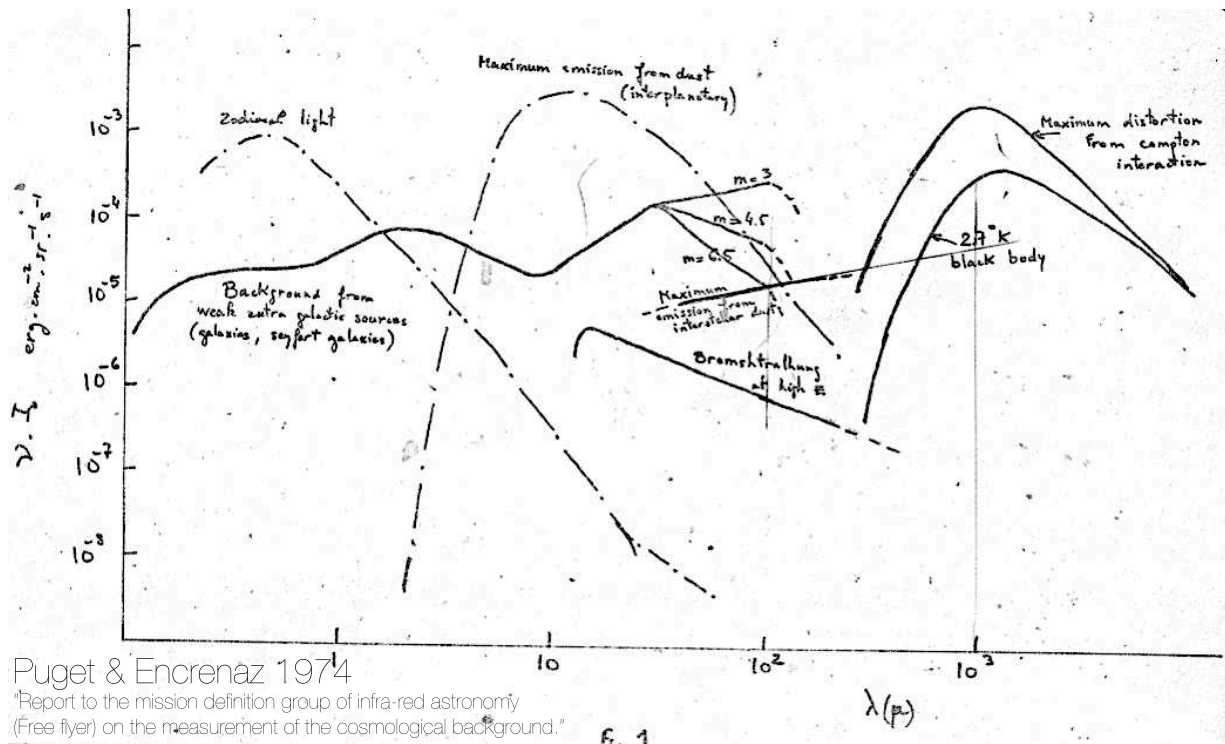


FIGURE 1.5: Synthèse des contraintes observationnelles et des prédictions pour la distribution spectrale d'énergie des rayonnements extragalactiques, de $0.1 \mu\text{m}$ à 10 mm effectuée par Puget en 1972 (FPP/4 ESRO Panel on Fundamental Physics), et tirée ici du rapport Puget & Encrenaz, 1974.

ravissent ! L'analyse fine des données est amorcée, et Planck nous apportera des informations essentielles sur la statistique des galaxies infrarouges et submillimétriques brillantes (puisqu'observées sur tout le ciel), sur la structure du fond extragalactique infrarouge, sur les amas de galaxies (avec l'effet Sunyaev-Zeldovich), et, via l'analyse des paramètres cosmologiques à partir des cartes du CMB, sur la réionisation.

Herschel, le plus grand observatoire jamais lancé (télescope de 3.5m), dispose de trois instruments focaux : le spectromètre HIFI, et les spectro-imageurs PACS (70 à $160 \mu\text{m}$) et SPIRE (250 à $500 \mu\text{m}$). Avec une résolution angulaire et une sensibilité sans précédents, PACS et SPIRE détectent déjà des galaxies infrarouges et submillimétriques lointaines. Les performances de SPIRE sont bien meilleures qu'attendues. Les données des grands relevés cosmologiques sont déjà arrivées, et l'analyse a commencé, en particulier pour les programmes de temps garanti (Hermes SAG1 et PEP) et les programmes clefs de temps ouvert ATLAS (le plus grand relevé, environ 700 degrés carrés, P.I : S. Eales) et GOODS (le plus profond relevé, P.I : D. Elbaz).

L'apport des deux missions, au vu de la qualité des données délivrées et des premiers résultats, sera, à n'en pas douter, majeur pour la compréhension de la structuration de notre Univers (sans mentionner les autres aspects, tels que le CMB ou la formation stellaire locale par exemple). Les principales perspectives s'articuleront à moyen terme autour de l'analyse et de l'interprétation des données Planck et Herschel.

1.5 Quelques aspects historiques : une longue quête

La mesure de l'émission diffuse extragalactique est une longue histoire scientifique, qui ne sera qu'esquissée ici, de manière partielle. Le rayonnement extragalactique a été prédit par Partridge & Peebles (1967). Puget (1972) effectue l'une des premières synthèses, en grande partie basée sur des prédictions, pour l'ESRO dans le cadre d'une réflexion scientifique sur les rayonnement diffus extra-

galactique (figure 1.5).

En 1985, lors des travaux préparatoires à la mission européenne ISO, Puget réactualise l'état des connaissances (figure 1.6) et indique que les deux fenêtres cosmologiques pour l'étude du rayonnement extragalactique se situent autour de $3 \mu\text{m}$ (minimum d'émission zodiacale) et au delà de 100 microns.

En 2001, Hauser & Dwek (2001) font la synthèse des nombreuses observations et détections confirmées du rayonnement extragalactique et de ses fluctuations (figure 1.7), obtenues depuis 1996, par notamment Puget et al. (1996); Hauser et al. (1998); Fixsen et al. (1998); Lagache et al. (1999, 2000); Kashlinsky & Odenwald (2000); Kashlinsky et al. (2002); Wright (2001).

Les revues et articles incontournables sur le sujet sont probablement Puget et al. (1996); Hauser & Dwek (2001); Lagache et al. (2005); Kashlinsky (2005); Dole et al. (2006).

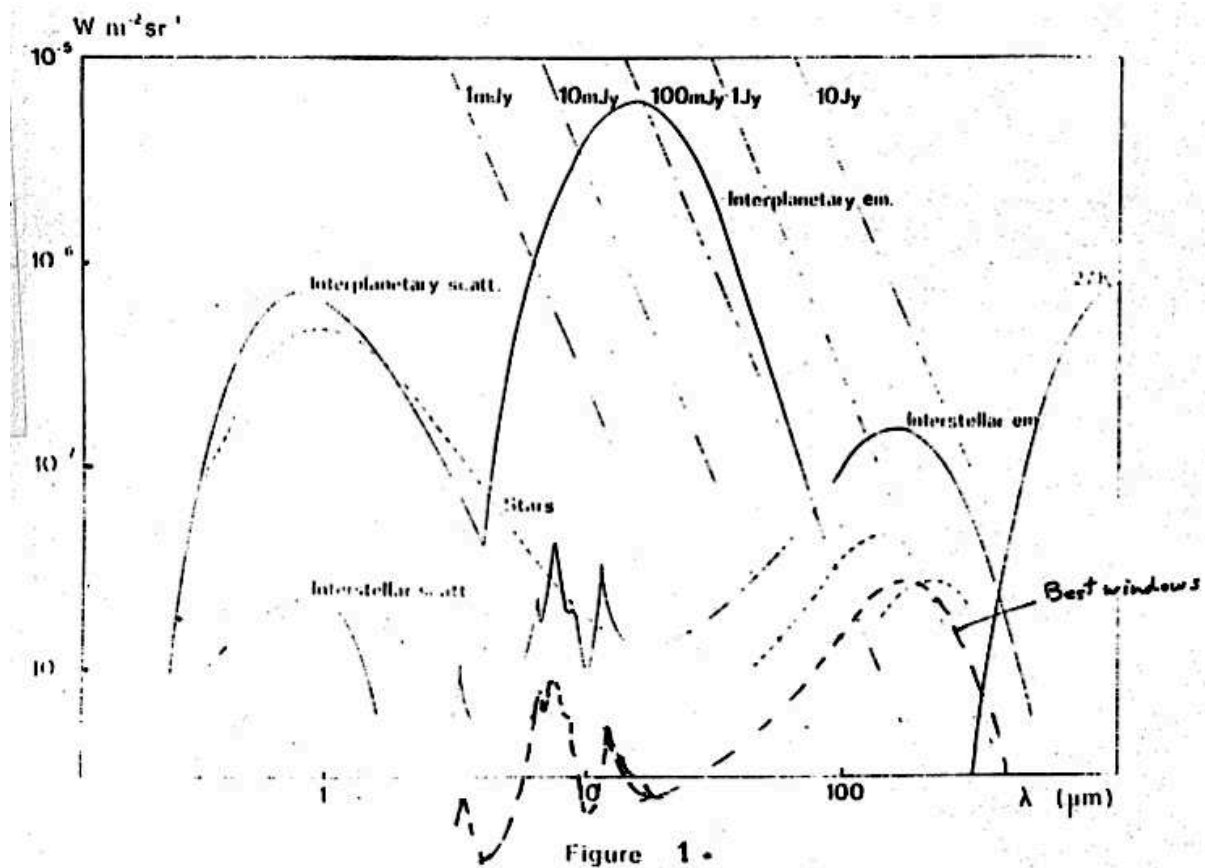


Figure 1.6: Synthèse des contraintes observationnelles et des prédictions pour la distribution spectrale d'énergie des rayonnements extragalactiques, de $0.1 \mu\text{m}$ à 10 mm effectuée par Puget en 1985 dans le cadre de la préparation à ISO. Le document étant une copie de piètre qualité (original pas encore retrouvé), de l'indulgence de la part du lecteur est demandée.

FIGURE 1.6: Synthèse des contraintes observationnelles et des prédictions pour la distribution spectrale d'énergie des rayonnements extragalactiques, de $0.1 \mu\text{m}$ à 10 mm effectuée par Puget en 1985 dans le cadre de la préparation à ISO. Le document étant une copie de piètre qualité (original pas encore retrouvé), de l'indulgence de la part du lecteur est demandée.

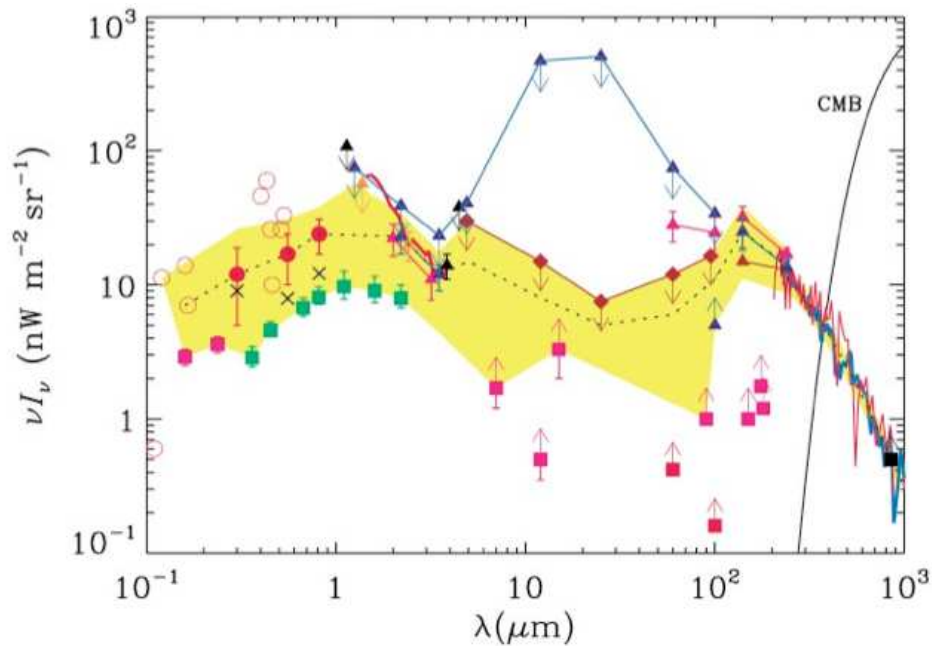


Figure 5 Summary of extragalactic background light measurements and limits. Error bars for detections are 1σ . (Squares) Lower limits obtained by integrating the light of detected sources; (\times) 2σ lower limits on integrated resolved sources from Bernstein (1999); (diamonds) upper limits from fluctuation measurements; (remaining symbols) absolute background measurements (1σ error bars) or limits (2σ). (Shaded region) Current observational limits for the EBL spectrum; (dotted line) the nominal measurement where detections are reported, or a somewhat arbitrary intermediate value between upper and lower limits where there is no claimed detection (for a discussion, see Section 3.10). The black line (CMB) shows the cosmic microwave background radiation.

FIGURE 1.7: Synthèse des contraintes observationnelles fin 2000, de Hauser & Dwek (2001).

1.6 Résumé de mes principaux travaux, faits marquants

Voici le résumé de mes principaux travaux depuis 2001, avec les faits marquants. La suite du document propose une synthèse thématique de certains travaux, en commençant par le fond extragalactique (chapitre 2), et en poursuivant par les aspects statistiques des propriétés des galaxies infrarouges (chapitre 3).

- l'établissement de limites inférieures au fond extragalactique infrarouge (CIB) à 70 et 160 μm les plus contraignantes à ce jour (Dole et al., 2006; Bethermin et al., 2010a), permettant de mesurer avec fiabilité la brillance totale du CIB. Cette mesure n'est pas aisée, car ne pouvant s'effectuer que depuis l'espace, et étant affectée de nombreuses contaminations d'avant-plan et de signatures instrumentales. Grâce à ces mesures, il est possible de déterminer la quantité d'énergie totale moyenne utilisée pour la formation des galaxies ;
- le rayonnement extragalactique infrarouge ainsi mesuré permet de mieux corriger les spectres des blazars à très haute énergie, observés au TeV avec HESS par exemple (Kneiske & Dole, 2010) ;
- les galaxies responsables du CIB au pic à 160 μm sont très bien tracées par leur émission en infrarouge moyen (Dole et al., 2006; Bethermin et al., 2010a) ;
- le développement d'une nouvelle méthode (empilement) pour l'analyse du signal faible de galaxies (Dole et al., 2006; Bavouzet et al., 2008; Bavouzet, 2008; Bethermin et al., 2010a), et mise en ligne du

code complet⁴ ;

- la caractérisation physique des galaxies ultralumineuses dans l'infrarouge Alonso-Herrero et al. (2004); Egami et al. (2004); Elbaz (2005); Lagache et al. (2005); Le Floc'h et al. (2005); Caputi et al. (2006a); Takeuchi et al. (2006); Sajina et al. (2006); Caputi et al. (2006b); Dole et al. (2006); Caputi et al. (2007); Zheng et al. (2007); Bavouzet et al. (2008) ;
- la caractérisation de propriétés statistiques de galaxies, comme les fonctions de luminosités et les distributions spectrales d'énergie Lagache et al. (2005); Le Floc'h et al. (2005); Pérez-González et al. (2005); Caputi et al. (2006a); Takeuchi et al. (2006); Sajina et al. (2006); Caputi et al. (2006b); Caputi et al. (2007); Zheng et al. (2007); Bavouzet et al. (2008) ;
- la qualité de l'étalonnage en vol de MIPS sur Spitzer, à 70 et 160 microns (Gordon et al., 2005; Gordon et al., 2007) ;
- modélisation de l'évolution des galaxies (Lagache et al., 2003; Dole et al., 2003; Bethermin et al., 2011), et mise en ligne des produits⁴ ;
- traitement de la confusion (Dole et al., 2003, 2004b)
- mesures des comptages dans l'infrarouge et le submillimétrique afin de mieux contraindre les modèles (Dole et al., 2004a; Papovich et al., 2004; Frayer et al., 2006a; Bethermin et al., 2010a,b)

4. sur <http://www.ias.u-psud.fr/irgalaxies/> et bientôt sur le centre IDOC

Chapitre 2

Rayonnement extragalactique et implications cosmologiques

Sommaire

2.1	Distribution spectrale d'énergie	17
2.1.1	Distribution spectrale d'énergie du fond extragalactique : les mesures	17
2.1.2	Quel degré de confiance des mesures de SED de l'EBL ?	20
2.1.3	Forme spectrale de l'EBL : ajustements et contributions	21
2.2	Histoire du fond infrarouge	23
2.3	Transparence de l'Univers	25
2.3.1	L'émission TeV et le CIB	25
2.3.2	Projet : opacité de l'Univers aux rayons gamma	26
2.4	Modèles	27

2.1 Distribution spectrale d'énergie

Dans cette partie, je propose une revue des mesures du fond extragalactique (EBL) sur presque 20 ordres de grandeur (cf figure 1.2) et propose un ajustement de la distribution spectrale d'énergie (SED) afin de quantifier l'intensité intégrée du fond dans chaque grand domaine spectral. En résumé, je montre que : 1) la SED de l'EBL est désormais connue avec une relativement bonne précision, et discute du degré de confiance des mesures ; 2) le CIB domine l'intensité totale de l'EBL (environ 55%), suivi du fond optique (environ 45%) ; les fonds γ , X et radio ne contribuant que pour moins de 0.5% ; 3) L'EBL est dans certains cas résolu en sources discrètes (visible, infrarouge, radio), alors qu'il reste non résolu directement dans d'autres (γ , X, submillimétrique).

2.1.1 Distribution spectrale d'énergie du fond extragalactique : les mesures

Fond radio

Les données proviennent de Bridle (1967), Clark et al. (1970), citées par Ressell & Turner (1990), et qui ont été prises à haute latitude Galactique. Elles peuvent être considérées comme des limites supérieures. Par comparaison, Fomalont et al. (2002) ont intégré les comptages de galaxies profonds à 8.4 GHz jusqu'à $7.5 \mu\text{Jy}$, et ont obtenu 2×10^{-4} K pour le fond ; En extrapolant leurs comptages, ils estiment que le fond ne peut pas dépasser 10^{-3} K. Windhorst et al. (1993) résument les comptages radio à 1.4 et 4.86 GHz. Récemment, Sirothia et al. (2009) ont obtenu une limite inférieure à 325 MHz dans un relevé profond, et trouvent $4.04 \times 10^{-5} \text{ nW.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$.

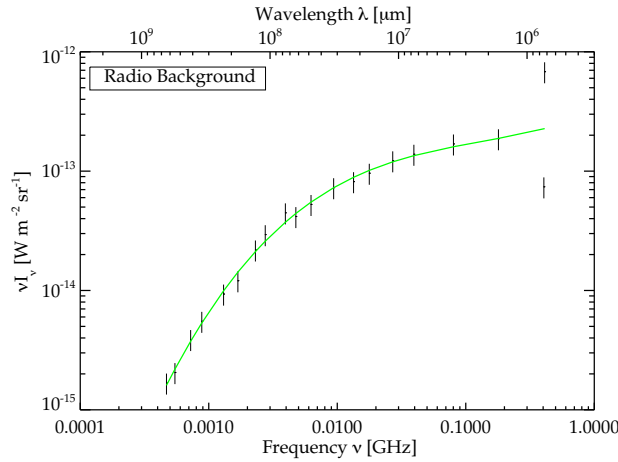


FIGURE 2.1: Mesures du fond extragalactique radio, et ajustement (cf. sections 2.1.1 et 2.1.3).

Fond infrarouge lointain et submillimétrique

Dans le domaine de l'infrarouge lointain ($\lambda \geq 50 \mu\text{m}$), les données suivantes sont utilisées : évaluation indirecte de Miville-Deschênes et al. (2002) à $60 \mu\text{m}$ en utilisant les fluctuations des données IRAS ; limites inférieures à 70 et $160 \mu\text{m}$ de Dole et al. (2006) en empilant les données à $24 \mu\text{m}$ $S_{24 \mu\text{m}} > 60 \mu\text{Jy}$ de *Spitzer/MIPS* ; (nouvelles estimations à $24, 70$ et $160 \mu\text{m}$ de Bethermin et al. (2010a) utilisant de l'empilement pour les comptages, puis intégration desdits comptages pas encore prises en compte, mais cohérentes avec Dole et al. (2006)) ; estimations à $60\text{-}100 \mu\text{m}$ avec *CAT* et *DIRBE* de Renault et al. (2001) ; mesures de Lagache et al. (2000) à $100, 140$ et $240 \mu\text{m}$ avec *COBE/DIRBE* et *WHAM*, mis à jour dans Dole et al. (2006) ; mesures avec *COBE/DIRBE* de Hauser et al. (1998) à 140 et $240 \mu\text{m}$; mesure à $240 \mu\text{m}$ de Wright (2004). Le degré de confiance de ces mesures sera discuté en section 2.1.2.

Dans le domaine submillimétrique, les limites inférieures *SCUBA* à 450 et $850 \mu\text{m}$ proviennent

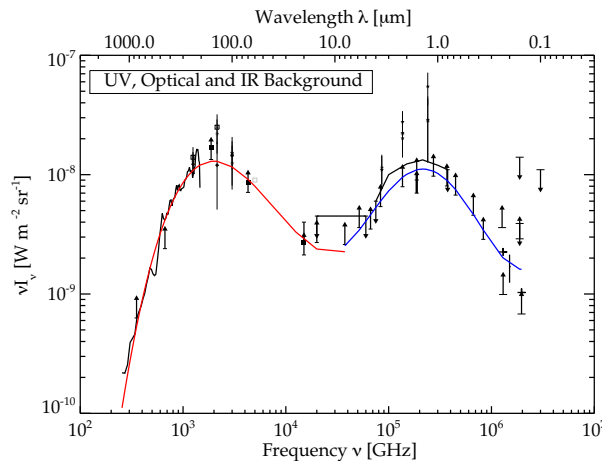


FIGURE 2.2: Mesures du fond extragalactique UV, visible, infrarouge et submillimétrique, et ajustement (cf. sections 2.1.1 et 2.1.3).

de Serjeant et al. (2004) et Knudsen et al. (2007) (en intégrant jusqu'à 0.1 mJy à 850 μm). Le spectre de la détection directe dans le Lockman Hole entre 200 μm et 1.2mm avec *FIRAS* est pris en compte, suivant les travaux de Puget et al. (1996), Fixsen et al. (1998) et Lagache et al. (1999). Les estimations récentes (limites inférieures) de Marsden et al. (2009) et Bethermin et al. (2010b) avec *BLAST*, Vieira et al. (2009) avec *SPT*, et de Berta et al. (2010); Oliver et al. (2010) avec *Herschel* ne sont pas incluses, mais sont cohérentes avec le fond *FIRAS* ou *Spitzer*.

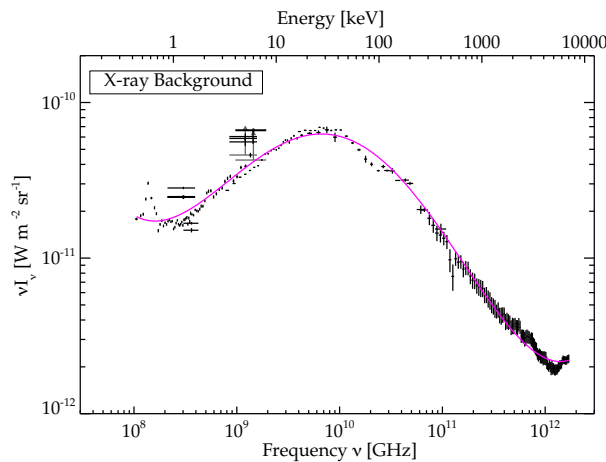


FIGURE 2.3: Mesures du fond extragalactique X, et ajustement (cf. sections 2.1.1 et 2.1.3).

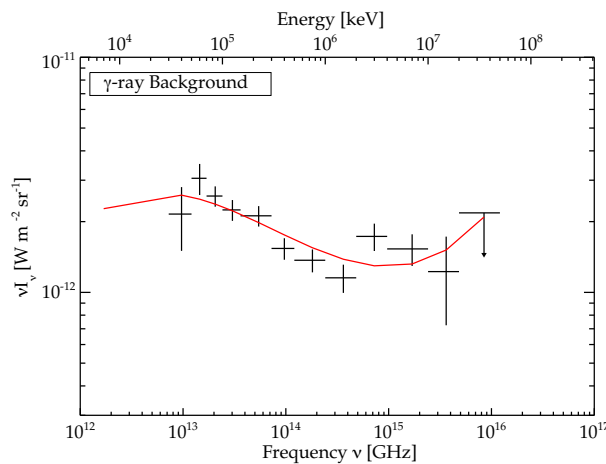


FIGURE 2.4: Mesures du fond extragalactique γ , et ajustement (cf. sections 2.1.1 et 2.1.3).

Fond infrarouge proche et moyen

De nombreuses données existent : Madau & Pozzetti (2000) et Thompson (2003) avec *NICMOS* ; Gorjian et al. (2000) à 2.2 et 3.3 μm avec *DIRBE* et *Lick* ; Wright (2001) et Cambresy et al. (2001) à 1.25 et 2.2 μm avec *DIRBE* et *2MASS* ; estimations *DIRBE* de Wright (2004) de 1.25 à 240 μm ; Limites inférieures *Spitzer/IRAC* 3.6, 4.5, 5.8 et 8.0 μm à partir de comptages (discutables) de Fazio et al.

(2004) ; Limites supérieures *H.E.S.S* de Aharonian et al. (2006) entre 0.8 and 4 μm (modèle dépendant, avec P0.55), et Aharonian et al. (2007) ; Limites supérieures de Renault et al. (2001) de 5 à 15 μm avec *CAT* vers la source γ -rays Mkn501 ; Limites inférieures de Elbaz et al. (2002) à 15 μm avec les comptages de galaxies avec using *ISOCAM* ; Limites supérieures à 20 μm de Stecker & Jager (1997) sur Mkn421 ; Limites inférieures obtenues par des comptages de sources counts à 24 μm avec *Spitzer/MIPS* par Papovich et al. (2004) (Le Floch et al. (2009) et Bethermin et al. (2010a) pas encore pris en compte).

Fond ultraviolet et visible

Les données utilisées dans la compilation proviennent de : Edelstein et al. (2000) à 0.1 μm avec *Voyager UVS* ; Xu et al. (2005) avec *GALEX* ; Brown et al. (2000) et Gardner et al. (2000) avec *HST/STIS* ; Madau & Pozzetti (2000) avec *HST/WFPC2*.

fond X et γ

Dans les rayons X : Kim et al. (2007), Hickox & Markevitch (2006), Bauer et al. (2004), Moretti et al. (2003), Cowie et al. (2002), Mushotzky et al. (2000). Données plus anciennes également utilisées : Gruber et al. (1999), Gendreau et al. (1995), Miyaji et al. (1998), Watanabe et al. (1997), Fukada et al. (1975).

Dans les rayons γ : Strong et al. (2004) with *EGRET*. Les nombreuses contraintes de FERMI ne sont pas encore prises en compte.

Autres mesures

D'autres mesures du fond extragalactique existent, et qui ont, en leur temps, amélioré la qualité des contraintes tout en apportant des estimations indépendantes. Elles ne sont cependant pas reprises ici, car ayant été améliorées depuis ou souffrant de grandes incertitudes. Parmi elles, citons : Armand et al. (1994), Barcons et al. (2000), Bernstein et al. (2002), Bernstein (2007), Dole et al. (2001), Dole et al. (2004a), Elbaz et al. (1999), Frayer et al. (2006a), Mattila (2003), Matsumoto et al. (2005), Shupe et al. (2008), Schroedter (2005), Smail et al. (2002), Vecchi et al. (1999).

2.1.2 Quel degré de confiance des mesures de SED de l'EBL ?

Les mesures directes du fond extragalactique sont très difficiles à mener elles nécessitent de la photométrie absolue, une séparation des composantes précise, et une quantification des incertitudes systématiques réaliste.

Infrarouge moyen et lointain

Dans l'infrarouge moyen et lointain, entre typiquement 5 et 60 μm , l'émission d'avant plan zodiacale domine le signal astrophysique, en étant typiquement 50 fois plus intense que le CIB (cf figure 1.6 par exemple). L'émission zodiacale reste un contaminant dominant jusqu'à environ 100 μm (Hauser et al., 1984; Kelsall et al., 1998). Jusqu'à récemment, les mesures directes du CIB entre 10 et 200 μm étaient limitées par la qualité de la soustraction de l'émission zodiacale. Avec les observatoires spatiaux dans l'infrarouge ISO et Spitzer, des relevés profonds peuvent désormais résoudre l'essentiel du fond extragalactique en galaxies individuelles, dans l'infrarouge proche et moyen (de 3 à 24 μm). Le problème de la mesure du CIB reste entier à plus grande longueur d'onde. Dole et al. (2006) ont utilisé ces sources dans l'infrarouge moyen, pour les empiler (méthode de stacking) en infrarouge lointain, et ont ainsi gagné environ un ordre de grandeur en sensibilité en comparaison à une méthode de comptage directe, limitée en sensibilité par la confusion (Dole et al., 2001, 2004a,b). Bethermin et al. (2010a) a amélioré la technique en utilisant l'empilement pour mesurer les comptages de sources,

ensuite intégrés pour donner une estimation du CIB plus précise, quoique cohérente avec Dole et al. (2006).

Pour résumer, les mesures directes du CIB entre 5 et 100 μm sont extrêmement difficiles, et les valeurs publiées et leurs incertitudes doivent être prises en général avec circonspection.

Infrarouge proche

Les données Spitzer/IRAC permettent en principe, à partir des comptages de galaxie, d'estimer le CIB entre 3.6 et 8.0 μm . Malheureusement, l'exercice est également difficile, à cause de la présence d'étoiles et de sources étendues (galaxies assez proches), malgré les techniques assez raffinées de soustraction. En conséquence, les comptages de galaxies ne sont pas exempts de (forte) contamination stellaire. Par exemple, Fazio et al. (2004) et Magdis et al. (2008) obtiennent des comptages cohérents entre eux, mais Franceschini et al. (2008) mesure des comptages différant grandement 8.0 μm , aboutissant à une valeur du CIB estimée par intégration des comptages 50% plus faible. De même, Levenson & Wright (2008) ont réanalysé les données à 3.6 μm , et estiment un CIB plus élevé que l'estimation (déjà probablement contaminée par les étoiles) de Fazio et al. (2004).

La situation n'est donc pas claire sur les mesures du CIB entre quelques et 10 μm , y compris pour les limites inférieures : les incertitudes systématiques sont probablement de l'ordre de 50% voire plus, mais encore personne n'a repris proprement le problème. Matthieu Béthermin, au début de sa thèse et du projet ayant abouti à l'obtention de comptages sur tous les relevés importants de Spitzer sur plus de 50 degrés carrés entre 24 et 160 μm (Bethérmin et al., 2010a), a aussi travaillé sur les données IRAC, puisque le projet incluait également une redétermination propre des comptages. Malheureusement nous n'avons pas réussi à converger en un temps raisonnable, à cause des problèmes de contamination stellaire et des sources étendues. En particulier, des différences minimes sur l'estimation de la contamination stellaire changeait significativement les comptages extragalactiques. Souhaitant publier un travail robuste, nous avons reconcé pour le moment.

Ces mesures sont cependant importantes pour contraindre les modèles d'évolution des galaxies ou la physique des blazars (cf section 2.3). Par exemple, le modèle d'EBL de Primack et al. (1999) prédit un EBL inférieur aux comptages observés à 15 μm (Elbaz et al., 1999).

Une autre méthode élégante pour estimer des limites supérieures du CIB en infrarouge proche et moyen, quoique dépendante de modèle, est d'utiliser le rayonnement très énergétique (TeV) des photons γ émis des blazars, et absorbés par le rayonnement extragalactique (principalement infrarouge) sur leur chemin, via la production de paires électrons-positrons (cf section 2.3), par exemple par Schroedter (2005), Aharonian et al. (2007).

2.1.3 Forme spectrale de l'EBL : ajustements et contributions

Buts et procédure

Le but de cette approche est de proposer un ajustement simple et analytique de la distribution spectrale d'énergie du fond extragalactique, afin de permettre une comparaison rapide avec de nouveaux jeux de données, tout en permettant une intégration simplifiée par domaine spectral.

Il s'agit d'ajuster la SED de l'EBL par un polynôme dans un domaine spectral déterminé par :

$$\log \left[\frac{\nu I_\nu}{1 \text{ nW/m}^2/\text{sr}} \right] = \sum_{i=0}^{i=n} \alpha_i \left(\log \left[\frac{\nu}{1 \text{ GHz}} \right] \right)^n \quad (2.1)$$

où νI_ν est l'intensité de l'EBL en $\text{nW m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$, $\{\alpha_i\}_{i=0,\dots,n}$ les coefficients du polynôme de degré n , ν la fréquence observée. Ajuster la SED de l'EBL par domaine spectral distinct (UV+visible, infrarouge+submillimétrique, radio, etc..) permet d'utiliser des polynômes de petit degré, 3 à 4. Les résultats sont donnés dans la table 2.1, et dans les figures 2.1 à 2.4.

TABLE 2.1: Ajustement de la SED de l'EBL : coefficients des polynômes et fond extragalactique intégré.

	γ -rays	X-rays	UV+optical	IR+submm	Radio	total EBL
ν_{min}, ν_{max}^a	$1.69 \times 10^{12}, 8.46 \times 10^{15}$	$1.06 \times 10^8, 1.69 \times 10^{12}$	$3.75 \times 10^4, 1.96 \times 10^6$	$2.55 \times 10^2, 3.75 \times 10^4$	$4.69 \times 10^{-4}, 4.11 \times 10^{-1}$	—
$\lambda_{min}, \lambda_{max}^a$	$3.54 \times 10^{-11}, 1.77 \times 10^{-7}$	$1.77 \times 10^{-7}, 2.84 \times 10^{-3}$	$1.53 \times 10^{-1}, 8.00$	$8.00, 1.18 \times 10^3$	$7.30 \times 10^5, 6.40 \times 10^8$	—
E_{min}, E_{max}^a	$6.99 \times 10^3, 3.50 \times 10^7$	$4.38 \times 10^{-1}, 6.99 \times 10^3$	$1.55 \times 10^{-4}, 8.11 \times 10^{-3}$	$1.05 \times 10^{-6}, 1.55 \times 10^{-4}$	$1.94 \times 10^{-12}, 1.70 \times 10^{-9}$	—
$\alpha_0 \pm \delta\alpha_0^b$	$-1.61 \times 10^2 \pm 5.00 \times 10^1$	$5.86 \times 10^2 \pm 2.64 \times 10^1$	$8.09 \times 10^2 \pm 5.83 \times 10^2$	$-6.18 \times 10^1 \pm 2.91$	$-1.25 \times 10^1 \pm 2.81 \times 10^{-1}$	—
$\alpha_1 \pm \delta\alpha_1^b$	$3.27 \times 10^1 \pm 1.07 \times 10^1$	$-2.47 \times 10^2 \pm 1.06 \times 10^1$	$-6.29 \times 10^2 \pm 4.32 \times 10^2$	$4.33 \times 10^1 \pm 2.68$	$4.39 \times 10^{-1} \pm 6.32 \times 10^{-1}$	—
$\alpha_2 \pm \delta\alpha_2^b$	$-2.37 \pm 7.66 \times 10^{-1}$	$3.77 \times 10^1 \pm 1.57$	$1.80 \times 10^2 \pm 1.20 \times 10^2$	$-1.14 \times 10^1 \pm 8.08 \times 10^{-1}$	$2.78 \times 10^{-1} \pm 3.84 \times 10^{-1}$	—
$\alpha_3 \pm \delta\alpha_3^b$	$5.69 \times 10^{-2} \pm 1.82 \times 10^{-2}$	$-2.53 \pm 1.03 \times 10^{-1}$	$-2.26 \times 10^1 \pm 1.47 \times 10^1$	$9.79 \times 10^{-1} \pm 7.97 \times 10^{-2}$	$1.06 \times 10^{-1} \pm 6.80 \times 10^{-2}$	—
$\alpha_4 \pm \delta\alpha_4^b$	—	$6.30 \times 10^{-2} \pm 2.53 \times 10^{-3}$	$1.05 \pm 6.73 \times 10^{-1}$	—	—	—
Intensity ^c	1.90×10^{-2}	2.75×10^{-1}	2.59×10^1	3.20×10^1	6.40×10^{-4}	5.82×10^1
Percentage of EBL	3.26×10^{-2}	4.72×10^{-1}	4.46×10^1	5.49×10^1	1.10×10^{-3}	1.00×10^2

a : Spectral range used for the fit, written in frequency (GHz), wavelength (μm) and energy (eV) ranges.

b : Coefficients of the polynomial used for the fit; see Eq. 2.1.

c : Integrated background over the range $[\nu_{min}, \nu_{max}]$ in units of $\text{nW m}^{-2} \text{sr}^{-1}$.

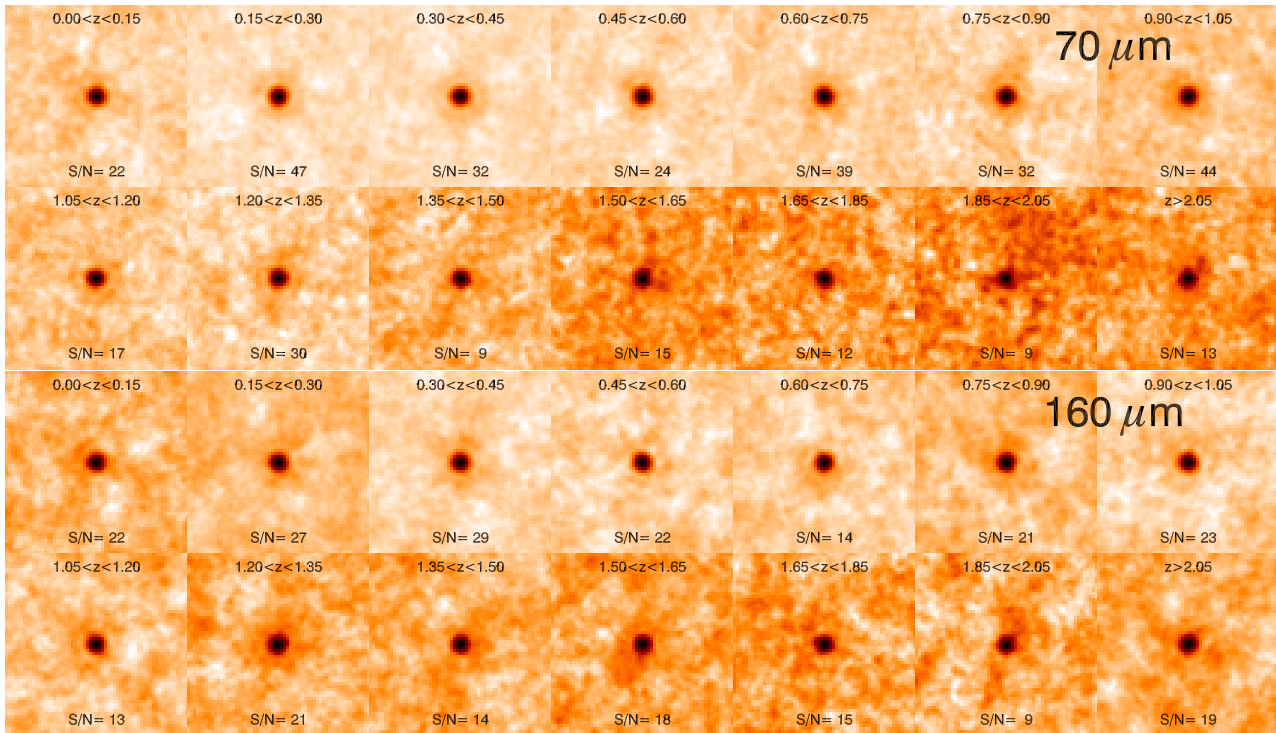


FIGURE 2.5: Images du signal empilé à 70 et 160 μm dans le champs COSMOS, par tranche de redshift. Chaque image à 70 μm couvre 244 \times 244 arcsecondes carrées (avec 4 arcsec par pixel), la largeur de la PSF valant environ 18 arcsec, soit environ 4.5 pixels. Chaque image à 160 μm couvre 488 \times 488 arcsecondes carrées (avec 8 arcsec par pixel), la largeur de la PSF valant environ 40 arcsec, soit environ 5 pixels. Tiré de Jauzac et al. (2010).

Contributions

Finalement, les contributions respectives des différents domaines de fréquence à l'EBL se résument ainsi, en unité de $\text{nW m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ (et sont repris de la table 2.1) :

- radio : 6.4×10^{-4} , soit 0.001 pour mille de l'EBL total
- infrarouge et submillimétrique : 32, soit 55% de l'EBL total
- ultraviolet et optique : 25.9, soit 45% de l'EBL total
- rayons X : 2.75×10^{-1} , soit 0.47% de l'EBL total
- rayons γ : 1.9×10^{-2} , soit 0.03% de l'EBL total
- EBL total : $58.2 \text{ nW m}^{-2} \text{sr}^{-1}$

Noter que les barres d'erreurs ne sont pas encore présentes (travail en cours).

2.2 Histoire du fond infrarouge

Le fond extragalactique infrarouge, dont l'intensité est mesurée avec une précision accrue (mais néanmoins avec des incertitudes de l'ordre de 20% au mieux), ne donne qu'une information intégrée, et donc dégénérée, de l'histoire des galaxies et de la formation des structures. L'un de mes projets est de lever en partie cette dégénérescence, en **mesurant le fond extragalactique en fonction du redshift**. Le projet est difficile car il est nécessaire de disposer de relevés cosmologiques avec information en redshift (photométrique ou spectroscopique), tout en ayant une couverture spectrale suffisante (typiquement de 70 à 500 μm). Les données de Herschel et Planck, sur des zones déjà couvertes par le satellite infrarouge Spitzer, rendent le projet viable, notamment sur les champs COSMOS, CDFS, FLS, certains champs SWIRE. Une partie du projet a été menée par le travail pionnier de Le Floch et al. (2009) à 24 μm avec Spitzer. Récemment, Berta et al. (2010) ont mesuré avec Herschel/PACS une partie de l'histoire du fond à 100 et 160 μm .

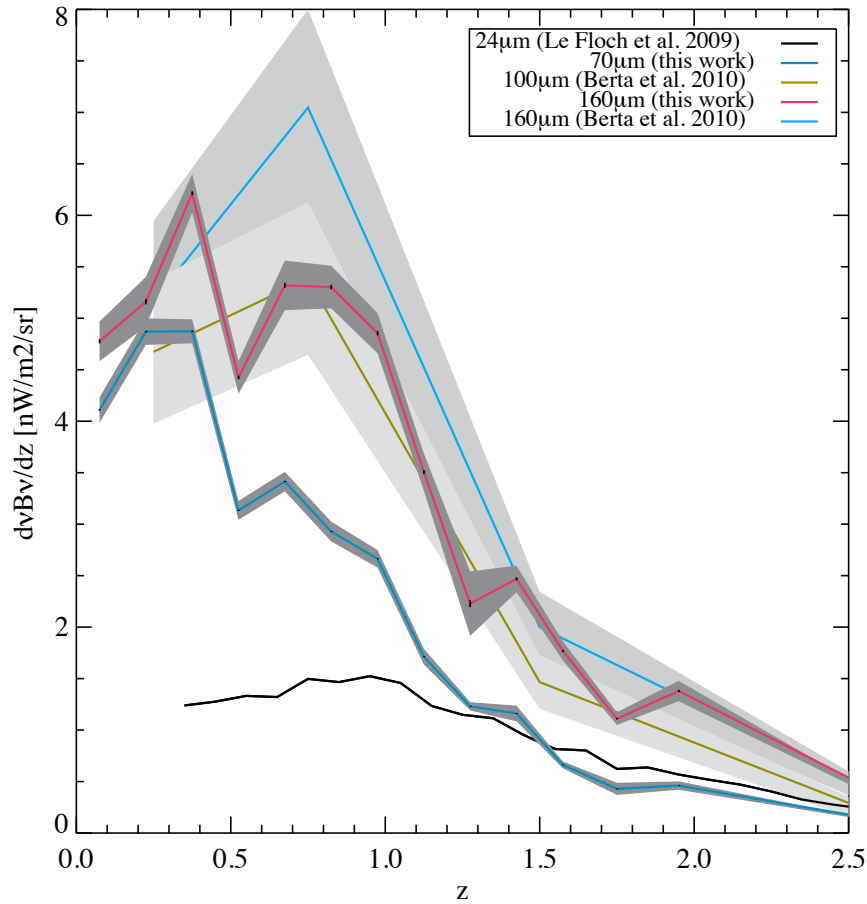


FIGURE 2.6: Brillance différentielle $\frac{d(\nu B_\nu)}{dz}$ du fond infrarouge à 24, 70, 100, et 160 μm , en fonction du redshift. Les données proviennent de : Spitzer à 24 μm (Le Floch et al., 2009), Spitzer à 70 et 160 μm (Jauzac et al., 2010) dans le champ COSMOS, et Herschel/PACS à 100 et 160 μm dans GOODS-N (Berta et al., 2010). Tiré de Jauzac et al. (2010).

Un argument rendant la projet faisable, est la **technique d'empilement** (Dole et al., 2006; Bethermin et al., 2010a). Elle permet de détecter statistiquement l'émission des galaxies à grande longueur d'onde alors qu'elle ne sont pas visibles individuellement, car noyées dans la confusion. Cette technique fait l'usage d'un a priori, en utilisant un catalogue d'entrée (par exemple des galaxies détectées à 24 μm , c.f. empilements dans COSMOS par tranche de redshift, figure 2.5). En empilant le signal, il est possible de mesurer des densités de flux jusqu'à un ordre de grandeur inférieures au bruit de confusion (Dole et al., 2006). *J'ai rendu, avec mon doctorant Matthieu Béthermin, avec mon ancien doctorant Nicolas Bavouzet et Alexandre Beelen, la suite logicielle permettant cet empilement disponible publiquement sur le web*¹. Le bruit de confusion, fortement présent dans les données SPIRE et Planck/HFI, ne sera donc pas une limitation pour détecter le rayonnement moyen des galaxies en fonction du redshift avec la technique d'empilement. Il faudra correctement prendre en compte l'effet du clustering, comme l'ont montré Nicolas Bavouzet dans sa thèse (Bavouzet, 2008) et Nestor Fernandez-Conde (Fernandez-Conde et al., 2010).

L'enjeu du projet (*dont un travail pilote est en cours avec Mathilde Jauzac, ancienne étudiante de M2 et actuellement en thèse à Marseille*) est d'apporter une contrainte nouvelle sur la formation de ce rayonnement extragalactique infrarouge et submillimétrique en fonction du redshift. Cette contrainte pourra être interprétée par les modèles (cf. Sect. 2.4), par exemple en terme de densité d'énergie infrarouge

1. le logiciel IDL d'empilement est téléchargeable sur <http://www.ias.u-psud.fr/irgalaxies/> et lire Bavouzet (2008) et Bethermin et al. (2010a)

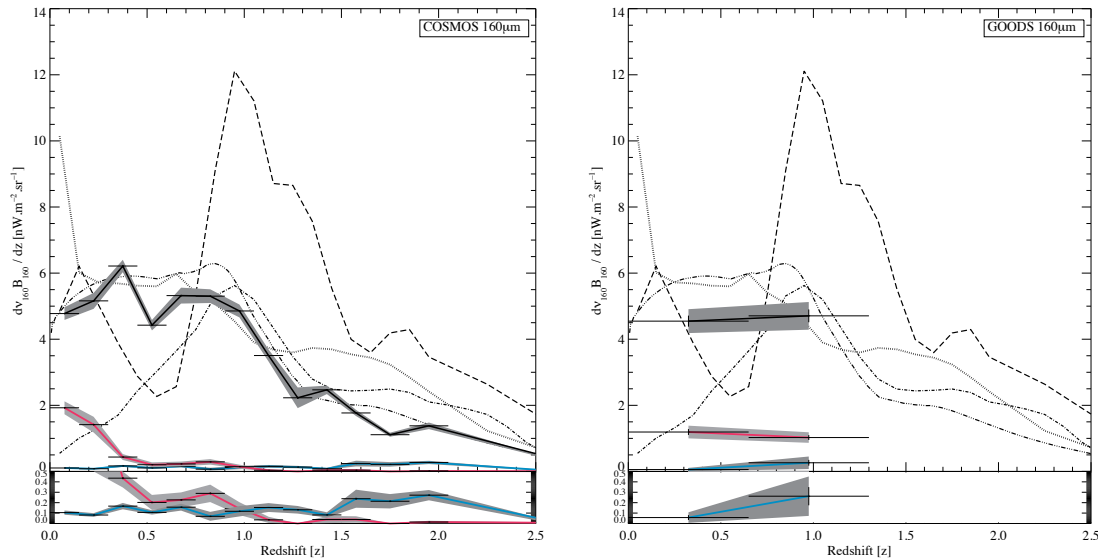


FIGURE 2.7: **Brillance différentielle** $\frac{d(\nu B_\nu)}{dz}$ **du fond infrarouge à 160 μm en fonction du redshift**, dans le champs COSMOS (à gauche) et GOODS (à droite) : contribution totale au CIB (pour une sélection de galaxies à 24 μm $S_{24} > 80 \mu\text{Jy}$) en grisé, sources résolues en grisé (bas redshift) et AGN (grisé en bas), avec zoom dans le panel inférieur pour plus de lisibilité. Trois modèles sont représentés : Lagache et al. (2004) (tiret), Le Borgne et al. (2009) (pointillé), Bethermin et al. (2011) (trait 3 points). Ces observables sont très discriminantes pour les modèles. Tiré de Jauzac et al. (2010).

convertie en formation d'étoile, en terme de nature des sources (par exemple liens avec le fond X (Daddi et al., 2007, e.g.)) et servira à estimer l'opacité de l'Univers à haute énergie en fonction du redshift (cf. Sect. 2.3).

Les premiers résultats sont encourageants : la figure 2.6 montre l'histoire du fond en fonction du redshift à 24, 70, 100 et 160 μm , alors que la figure 2.7 montre la brillance différentielle par redshift à 160 μm avec trois modèles, facilement discriminés par cette nouvelle observable.

2.3 Transparence de l'Univers

2.3.1 L'émission TeV et le CIB

Un type de galaxies, les blazars, a la particularité d'émettre du rayonnement de très haute énergie, jusqu'au TeV, probablement par des phénomènes d'accélération relativiste dans les jets issus de l'environnement d'un trou noir (une alternative étant la signature de désintégrations de particules de matière noire). Cette signature non-thermique reste en partie énigmatique, car les télescopes Cherenkov H.E.S.S et MAGIC n'ont détecté que quelques sources extragalactiques jusqu'à aujourd'hui (Punch et al., 1992; Aharonian et al., 2006, 2007; Albert & Magic Collaboration, 2008). Un problème central pour l'étude physique de ces sources est d'**accéder à leur spectre intrinsèque**, puisque le rayonnement de haute énergie intreragit avec le rayonnement infrarouge pour produire une paire électron positron. La section efficace d'interaction est maximale pour un photon infrarouge de longueur d'onde λ et un photon γ d'énergie E , selon : $\lambda/\mu\text{m} \sim 1.2 E/\text{TeV}$ (Raue et al., 2009, e.g.). **Le fond infrarouge provoque donc une absorption du spectre des blazars** (Fazio & Stecker, 1970). Le spectre observé des blazars ne pouvant être interprété finement qu'après correction d'extinction par le fond infrarouge, lui-même pas connu suffisamment précisément, le problème reste entier, tant du point de vue des blazars que du fond infrarouge.

Il existe typiquement deux familles de travaux. La première consiste contraindre et estimer une forme spectrale du fond infrarouge en s'assurant qu'il n'y a pas violation de contraintes (prédites) d'indice spectral du spectre intrinsèque des blazars, modulo une hypothèse sur le spectre intrinsèque

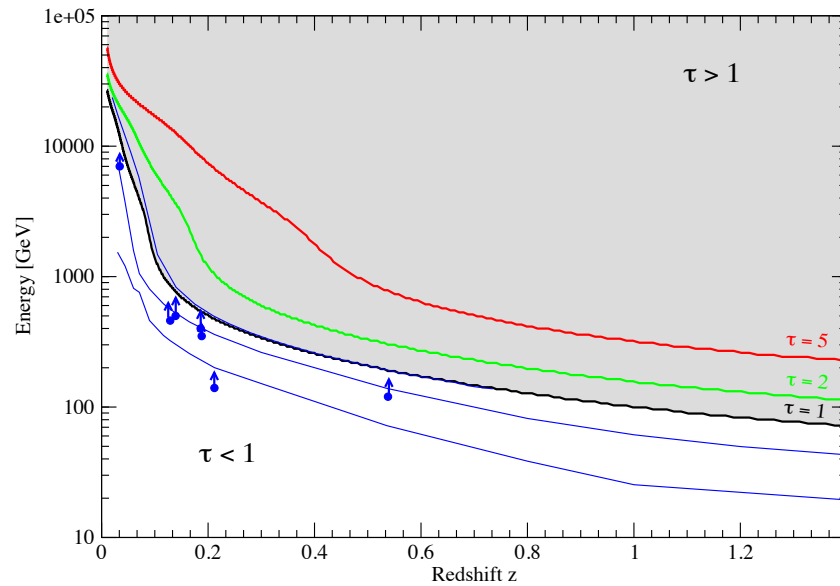


FIGURE 2.8: **Horizon des rayons γ (ou relation Fazio-Stecker)** selon le modèle de Kneiske & Dole (2010), qui représente l'opacité en fonction de l'énergie des photons et du redshift de la source de rayons γ . $\tau > 1$ indique que l'opacité devient forte. Les points représentent les données, et les lignes continues en bas représentent d'autres modèles (de bas en haut) : Stecker et al. (2006), Albert & MAGIC Collaboration (2008) et Primack et al. (2005).

des blazars (Renault et al., 2001; Aharonian et al., 2006, 2007). La seconde consiste à utiliser les mesures existantes et relativement incertaines du fond infrarouge, mais en prenant seulement les limites *inférieures* robustes du fond (Kneiske & Dole, 2010); cette approche permet de déduire une correction minimum garantie pour estimer les spectres intrinsèques des blazars, tout en sachant que cette correction est sous-estimée (mais néanmoins robuste). La figure 2.8 représente l'horizon gamma que nous déduisons de ce fond infrarouge minimum, et il est remarquable que nos résultats n'apparaissent fondamentalement pas si différents (facteur 1 à 4) que les autres modèles.

Notons enfin que la mesure de l'absorption du rayonnement γ par le CIB peut donner lieu à d'originales limites inférieures de la constante de Hubble (Barrau et al., 2008).

2.3.2 Projet : opacité de l'Univers aux rayons gamma

Mon projet comprend la **modélisation de l'opacité de l'Univers aux rayons γ** , qui sera un produit de sortie assez naturel du modèle d'évolution (sect. 2.4) qui calcule le spectre du fond extragalactique et son évolution en redshift, et qui complétera et approfondira le travail de Kneiske & Dole (2010) (effectué sur la base d'un autre modèle : (Kneiske et al., 2004), et complémentaire à d'autres modèles comme Franceschini et al. (2008)).

Il comprend également **l'établissement de contraintes du fond infrarouge et du spectre des blazars**, en tirant bénéfice de l'approche "fond extragalactique minimal" qui peut être largement raffinée en infrarouge proche et moyen (remesure des contraintes avec IRAC par exemple). Les données Planck et Herschel permettront en outre d'accroître la précision de mesure du fond infrarouge. Les observations H.E.S.S s'étendant de environ 100 GeV jusque vers 20 TeV, l'absorption du fond extragalactique est efficace de l'UV à l'infrarouge (environ 0.1 à 20 μm). Ce domaine spectral est particulièrement intéressant pour contraindre les scénarii de formation des premières étoiles de population III (cf section 3.4 ainsi que Santos et al. (2002); Fernandez & Komatsu (2006)).

Le projet CTA (Cherenkov Telescope Array) étendra la couverture en énergie jusque vers 100

TeV, rendant l'exploration possible du fond extragalactique jusque vers $100 \mu\text{m}$. *Je compte participer à ce projet, me suis déjà impliqué dans les journées du PPF NAG à Meudon (2007) et du GdR PCHE Paris (2009), et a co-organisé à l'IAS en juin 2010 un atelier GdR PCHE de 2 jours sur l'émission diffuse*².

2.4 Modèles

Notre modèle phénoménologique d'évolution des galaxies (Dole et al., 2000; Lagache et al., 2003; Dole et al., 2003; Lagache et al., 2004), a réussi à reproduire la plupart des observables comme les comptages de galaxies, les fonctions de luminosités, les spectres moyens, le niveau du fond extragalactique et de ses fluctuations. Néanmoins, les nouvelles données Spitzer, BLAST et Herschel (Bethérmin et al., 2010a,b; Oliver et al., 2010) montrent qu'une mise à jour est nécessaire.

Le modèle est actuellement en refonte complète (*travail de Matthieu Béthermin*, cf section 3.3 et Bethérmin et al. (2011) pour les détails), et son utilisation est indispensable pour l'interprétation des fluctuations du CIB observées en infrarouge lointain et dans le domaine submillimétrique (et actuellement avec Planck et Herschel). De plus, il inclura le calcul de l'opacité aux rayons gamma; la gestion de la SED du CIB "minimale" (comme dans Kneiske & Dole (2010)) ou "nominale" sera plus aisée. Une nouvelle prédiction du fond γ pourra être réalisée, et raffiner l'estimation de Fields et al. (2010). Enfin, il pourrait s'avérer utile dans le cadre de la contrainte sur les premiers objets, une fois couplé avec un modèle de réionisation (cf section 3.4).

2. Site web du colloque : http://www.ias.u-psud.fr/emission_diffuse_pche/

Chapitre 3

Propriétés statistiques des galaxies infrarouges

Sommaire

3.1	Propriétés photométriques	29
3.2	Propriétés spatiales : distribution angulaire	30
3.3	Modèles	31
3.3.1	Le modèle	31
3.3.2	Son évolution	31
3.4	Projet : sonder la formation des premières structures	33
3.4.1	Les galaxies infrarouges	33
3.4.2	Les amas de galaxies	34
3.4.3	Les proto-amas de galaxies.	34
3.4.4	Les sources de réionisation	34

L'APPROCHE statistique permet d'estimer des propriétés globales, visant à comprendre les principaux mécanismes physiques gouvernant la formation et l'évolution des galaxies. Ce chapitre décrit mes principaux travaux et projets concernant l'étude statistique des galaxies, effectuée principalement avec le satellite Spitzer.

3.1 Propriétés photométriques

La première analyse effectuée sur des relevés de nouvelle génération porte en général sur les propriétés photométriques des sources, dans la mesure où elles sont relativement faciles à qualifier et à étudier. Elles n'en sont pas moins dénuées de robustesse, ni inutiles pour comprendre la nature des galaxies nouvellement observées.

Je me suis impliqué dans la mesure des **comptages de galaxies** dans l'infrarouge moyen, lointain et submillimétrique. Sur les relevés Spitzer/MIPS, j'ai directement conçu les stratégies d'observation pour le GTO (Papovich et al., 2004; Dole et al., 2004a), participé à l'analyse de SWIRE et du FLS (Frayser et al., 2006a) et utilisé les données d'archive (Bethérmin et al., 2010a). M. Béthermin a utilisé les données publiques de BLAST pour les comptages submillimétriques Bethérmin et al. (2010b).

Ces comptages, tout comme ceux de la littérature à d'autres longueurs d'ondes (Frayser et al., 2006b; Shupe et al., 2008; Frayer et al., 2009; Oliver et al., 2010; Austermann et al., 2010), permettent d'apporter des contraintes fortes sur les scénarii d'évolution des galaxies (cf sections 2.4 et 3.3).

Notons que ces mesures et modèles sont aussi liés par une limitation observationnelle fondamentale : le bruit de confusion des sources. J'ai abordé des aspects théoriques Dole et al. (2003) et observationnels Dole et al. (2001, 2004b) de la question. La technique d'empilement Dole et al. (2006), avec ses raffinements Bavouzet (2008); Bethérmin et al. (2010a), peut être considérée comme un des moyens de s'affranchir, dans certaines conditions, de cette limitation.

fluctuations du fond infrarouge

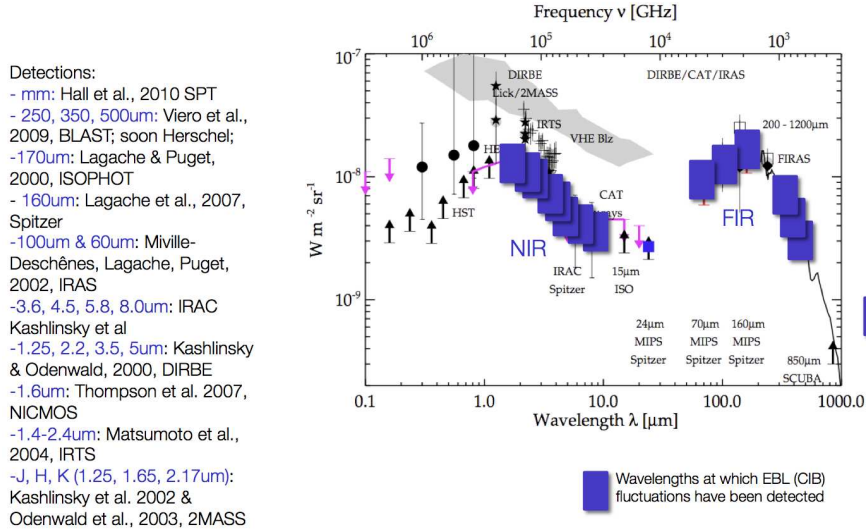


FIGURE 3.1: Détection des fluctuations du CIB (rectangles bleu sombre) tracés sur la SED du CIB.

Les comptages ne suffisent cependant pas, puisque l'information est dégénérée en redshift. D'autres observables importantes sont à prendre en compte, parmi lesquelles la **fonction de luminosité** des galaxies, leur **distributions spectrales d'énergie**, et surtout leur **distribution en redshift**. J'ai directement participé à la mesure de fonctions de luminosité en infrarouge lointain et moyen (Le Floc'h et al., 2005; Takeuchi et al., 2006; Caputi et al., 2007), ainsi qu'à l'estimation de SEDs moyennes (Lagache et al., 2004; Floc'h et al., 2004; Elbaz et al., 2005; Zheng et al., 2007; Bavouzet et al., 2008) (Rowan-Robinson et al., 2005; Sajina et al., 2006; Tyler et al., 2009; Kovacs et al., 2010, également).

De nombreuses perspectives (et travaux en cours, sous embargo) existent sur les données Planck, et Herschel (notamment dans GOODS-H).

3.2 Propriétés spatiales : distribution angulaire

La distribution angulaire des galaxies est mesurable soit directement via la corrélation angulaire des galaxies détectées, soit indirectement via le spectre de puissance angulaire des fluctuations du fond infrarouge.

Je participe aux travaux, *coordonnés par Guilaine Lagache*, d'étude des **fluctuations du fond extragalactique**, avec notamment un résultat emblématique à 160 μm (Lagache et al., 2007). Une perspective immédiate est en cours avec les données Planck. Les fluctuations du CIB sont maintenant détectées sur la plupart du spectre du CIB (figure 3.1), mais sont probablement générées par des populations différentes à chaque fréquence.

Par ailleurs, je dirige des travaux exploratoires visant à mesurer la **fonction de corrélation angulaire à deux points** de manière optimisée sur tout le ciel, en tirant bénéfice de la technique de l'empilement (ou stacking). Une application naturelle serait la détection des BAO dans des données de prochaine génération, de type EUCLID ou LSST. *J'ai encadré, parfois avec Marian Doupsis, des stagiaires de L3 et M2 pour des études de faisabilité.* Le stage de M2 récent de Jean-Pierre Treuil montre que la méthode de stacking permet de mesurer fidèlement la corrélation des galaxies sur toute la sphère, sur des échelles angulaires jusqu'à environ 20 degrés. L'algorithme n'est pas encore optimisé pour être très compétitif. Une perspective serait de poursuivre l'optimisation de la technique de stacking

sur toute la sphère pour la mesure de la corrélation angulaire, à la fois pour étudier la corrélation des galaxies, mais aussi pour soustraire la partie corrélée du stacking photométrique classique ; une autre piste prometteuse, suivie par Matthieu Béthermin, consiste à faire du stacking par couleur, un peu à la manière de Kurczynski & Gawiser (2010).

3.3 Modèles

3.3.1 Le modèle

Notre modèle phénoménologique d'évolution des galaxies (Dole et al., 2000; Lagache et al., 2003; Dole et al., 2003; Lagache et al., 2004), malgré d'indéniables succès à reproduire des observables comme les comptages de galaxies, les fonctions de luminosités, les spectres moyens, le niveau du fond extragalactique et de ses fluctuations, n'en reste pas moins perfectible. Les nouvelles données du domaine submillimétrique ou infrarouge lointain (Bethérmin et al., 2010a,b) montrent un ajustement perfectible, tout comme les distributions en redshift.

Notre modèle reste compétitif par rapport aux autres modèles récents, qui, chacun, ont une approche originale et des points forts différents (Devriendt & Guiderdoni, 2000; Chary & Elbaz, 2001; Balland et al., 2003; King & Rowan-Robinson, 2003; Le Borgne et al., 2009; Valiante et al., 2009; Rowan-Robinson, 2009, e.g.). Notre modèle fait partie de la famille des modèles dits "d'évolution en arrière", qui ont pour point de départ les propriétés de l'Univers local (spectres de galaxies, fonctions de luminosités, comptages). Le modèle fait ensuite évoluer un ou plusieurs paramètres (dans notre cas il s'agit de deux fonctions de luminosités de deux familles de galaxies : les galaxies froides et les galaxies à flambée de formation stellaire) en fonction du redshift, puis les résultats sont comparés aux observations. A l'heure actuelle, l'évolution de nos fonctions de luminosités sont guidées par leur évolution physique, mais leur ajustement fin n'est pas optimisé.

3.3.2 Son évolution

Matthieu Béthermin, avec Guilaine Lagache et moi (en collaboration avec Damien Le Borgne et Aurélie Penin) est en train de développer une nouvelle version **entièrement paramétrique du modèle**, qui inclura de manière analytique simple les évolutions des paramètres décrivant les fonctions de luminosités et leur évolutions en redshift (Bethérmin et al., 2011). Cela permettra une minimisation automatique des paramètres afin d'ajuster au mieux les données existantes et en cours de constitution (Planck, Herschel). Cette version paramétrique permettra d'effectuer des **estimations précises des barres d'erreur** des paramètres ajustés (ce qui n'est pas le cas actuellement), en explorant l'espace des paramètres de manière efficace (par exemple avec une méthode de type Monte Carlo Markov Chain), mais aussi d'effectuer des prédictions sur l'amélioration de l'estimation de tel paramètre physique en fonction de telle observable, avec le formalisme des matrices de Fisher. Ce dernier point sera utile à la préparation scientifique des futures observatoires, tout comme nous l'avons fait avant le lancement réussi de Spitzer (Dole et al., 2003).

L'évolution suivante concernera la **librairie des spectres de galaxies** utilisée, et il s'agira d'introduire une ou deux familles de spectres de galaxies, avec une dispersion autour des valeurs moyennes. En effet, il semble émerger de l'analyse des relevés profonds (Bavouzet et al., 2008; Magnelli et al., 2009, e.g.) qu'il n'est pas forcément nécessaire d'invoquer des populations différentes avec des types spectraux foncièrement différents (même si cette description simpliste fonctionne correctement) et que l'on pourrait rendre compte des observations en invoquant une famille de spectres, avec une dispersion autour de cette famille moyenne. Ce point n'est, à l'heure actuelle, pas testable avec notre modèle dans sa structure actuelle, et seule la version paramétrique permettra de mener ces tests, dont l'enjeu est de déceler la présence ou non de l'évolution de la forme du spectre des galaxies avec le redshift.

De plus, comme à notre habitude, nous rendrons tous les produits du modèle publics et

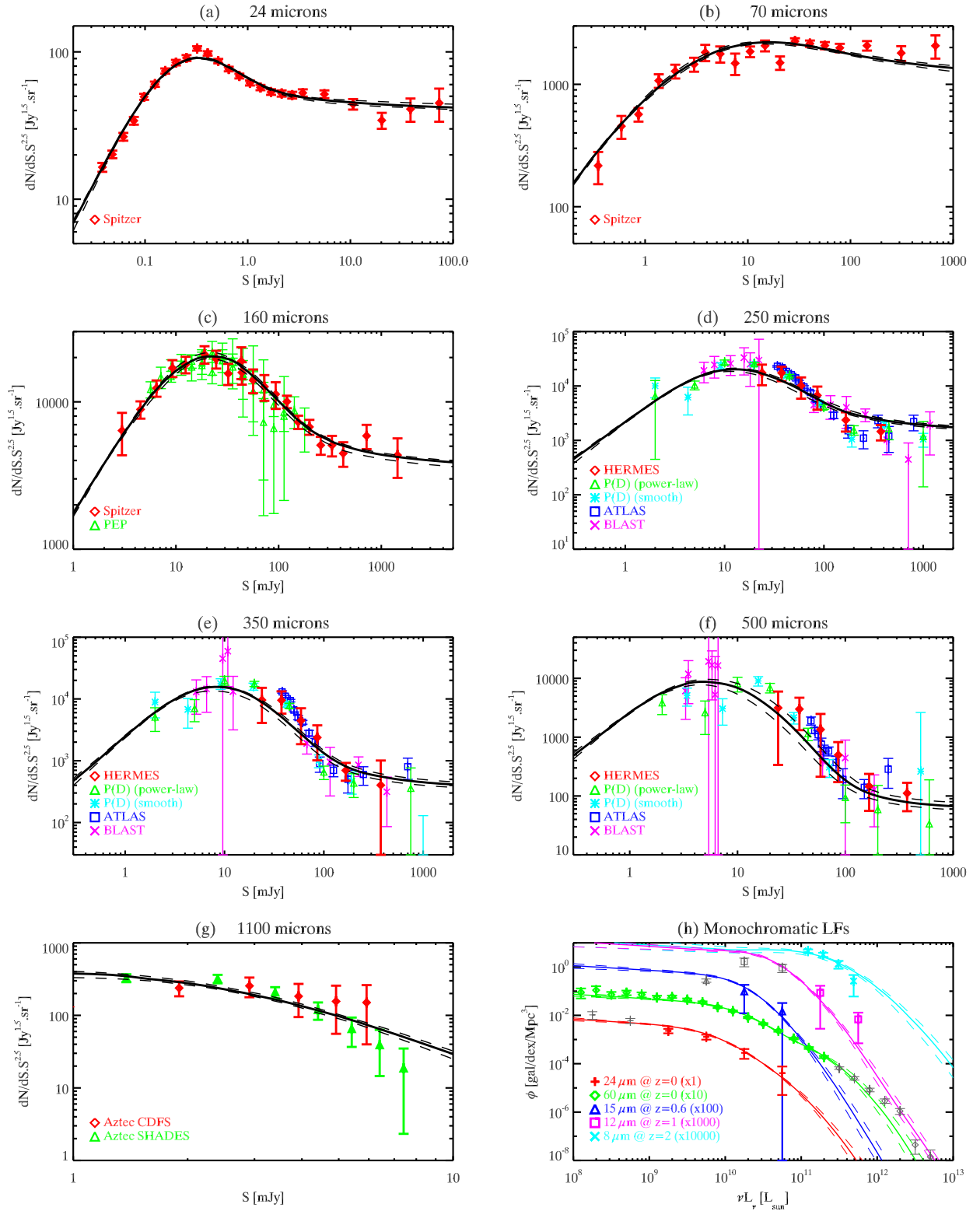


FIGURE 3.2: Données et modèle de Bethermin et al. (2011) : a-g : comptages à 24, 70, 160, 250, 350, 500 μm et 1.1 mm. h : fonctions de luminosités de 8 à 60 μm , de $z=0$ à $z=2$. Tiré de Bethermin et al. (2011).

téléchargeables¹.

1. le modèle est téléchargeable sur <http://www.ias.u-psud.fr/irgalaxies/model.php>

Par ailleurs, des discussions continueront d'avoir lieu avec l'équipe de GALICS, qui développe un modèle semi-analytique complémentaire et performant, mais qui est perfectible dans le domaine infrarouge. L'enjeu réside ici dans le raffinement de la description physique de l'émission des galaxies (au travers de la formation d'étoile, de la fonction initiale de masse, etc.). Ces aspects, *coordonnés par Guilaine Lagache et Bruno Guiderdoni*, ne manqueront pas d'être fertiles puisque les approches, radicalement différentes (notre modèle : approche paramétrique simple qui démarre à $z=0$; modèles semi-analytiques : description physique et évolution à partir de $z\sim 1000$), se complètent.

Enfin, le modèle évoluera pour inclure des aspects jusqu'ici négligés ou non traités :

- effet de lentillage par des sources ou amas proches, qui semble jouer un rôle principal dans le domaine submillimétrique et millimétrique à grand flux, comme en témoignent les premiers résultats de SPT (Vieira et al., 2009) et de Herschel ATLAS indiquant une grande quantité de sources magnifiées. Negrello et al. (2007) ont déjà inclus cet effet, mais leur modèle sous-jacent n'est pas optimal.
- contribution explicite des AGN. Bien que la contribution des AGN avait été testée comme négligeable dans notre modèle, les récents résultats de Valiante et al. (2009) suggèrent qu'il pourrait ne pas en être ainsi. Inclure les AGN dans la minimisation des paramètres ajustant au mieux les données donnera des arguments quantitatifs sur ce sujet, bien que notre intuition soit faite.
- évolution de la SED du CIB avec le redshift. Quoique cet aspect soit trivial, puisque produit naturel du modèle, sa mise en oeuvre requiert l'ajout de nombreuses longueurs d'onde et nécessite ainsi une optimisation.
- opacité aux rayons gamma. Comme discuté en section 2.3, ce calcul permettra d'apporter un éclairage nouveau à ce domaine, en prenant en compte explicitement les observables solides, telles que les comptages de galaxies et les fonctions de luminosités infrarouges, pour estimer le fond extragalactique et l'évolution de l'opacité.

Les ajustements des données de cette nouvelle version du modèle seront probablement de meilleure qualité, en grande partie grâce à l'ajout dans les contraintes de résultats récents de Herschel, dans le domaine spectral submillimétrique qui était peu contraint jusqu'alors.

3.4 Projet : sonder la formation des premières structures

Un moyen de sonder les processus physiques de formation des structures serait d'observer les structures évoluer avec l'époque cosmique, ce qui constitue un défi compte-tenu de la difficulté de détection. Il faut ainsi élaborer des stratégies visant à sélectionner des traceurs (de masse, ou de formation stellaire par exemple) sondant différentes époques, afin de reconstruire l'histoire des structures. Je classe mes projets par redshift croissant.

3.4.1 Les galaxies infrarouges

Les galaxies infrarouges tracent surtout la formation stellaire, mais aussi l'activité AGN. Il s'avère qu'aux redshifts supérieurs à 1.5, elles semblent tracer les puits de potentiels massifs de matière noire, tout comme les galaxies sélectionnées dans le submillimétrique (Caputi et al., 2006a,b; Farrah et al., 2006; Magliocchetti et al., 2007, 2008; Fiolet et al., 2009; Kovacs et al., 2010).

Je compte poursuivre mon travail de caractérisation des galaxies infrarouges, en étudiant leur **distribution spectrale d'énergie** de manière statistique avec la technique d'empilement dans les données Herschel (excellente sensibilité et résolution angulaire) et Planck (meilleure couverture du ciel et spectrale). Je participe au programme Planck d'étude des **fluctuations du fond infrarouge**, dirigé par Guilaine Lagache, qui consiste extraire le spectre de puissance angulaire en infrarouge lointain et submillimétrique, afin de détecter non seulement la partie poissonnienne, mais surtout la partie corrélée qui nous renseigne sur l'aggrégation des galaxies à grand redshift (Lagache et al., 2007). De même, je vais poursuivre le projet ambitieux d'extraire les fluctuations du fond infrarouge **par tranche de redshift**, puisque nous avons démontré la faisabilité du projet grâce à la technique

d'empilement (Fernandez-Conde et al., 2008, 2010). Ces observations seront comparées à un modèle de halo (*développé par Olivier Doré, Aurélie Penin et Guilaine Lagache ; je n'y participe pas, mais suis de près l'évolution du projet*) couplé au modèle paramétrique de galaxies infrarouges (sect. 2.4), afin de mieux contraindre le biais entre matière noire et galaxies.

Notons enfin que des perspectives d'étude s'ouvrent avec les nouvelles possibilités offertes par JWST, EUCLID et SPICA dans quelques années pour la détection de galaxies IR plus faibles et lointains, permettant de sonder la partie faible des fonctions de luminosités.

3.4.2 Les amas de galaxies

Les amas de galaxies tracent naturellement les grandes structures. Etudier leur nombre, leur taille, leur masse, et leur répartition angulaire sur le ciel nous renseigne sur les processus de structuration de la matière aux échelles cosmologiques, tout en apportant éventuellement une information sur la dynamique de l'Univers (en particulier la caractérisation de l'évolution de l'énergie noire) au travers de l'effet Sachs-Wolfe intégré.

Mes collègues Nabila Aghanim, Etienne Pointecouteau, Marian Douspis, Ludovic Montier, Matthieu Langer, dirigent l'étude des amas de galaxie dans Planck, au travers de l'effet Sunyaev-Zeldovich (ou SZ, diffusion Compton inverse des électrons chauds dans les amas de galaxie sur les photons froids du CMB), et je collabore avec eux sur les techniques de détection des amas SZ dans les données Planck, et sur la manière de mettre en oeuvre la technique d'empilement sur les amas pour gagner en sensibilité (de la même manière que nous avons gagné en sensibilité pour résoudre le fond infrarouge, cf Dole et al. (2006); Bethermin et al. (2010a)), ainsi que sur le suivi infrarouge avec Spitzer et WISE. Ce projet à moyen terme tirera bénéfice des données Planck pour contraindre la formation des structures très massives.

3.4.3 Les proto-amas de galaxies.

Je participe au projet Planck de détection des sources à grand redshift et proto-amas (validation coordonnée par L. Montier), et coordonne le suivi des sources potentiellement à grand redshift, avec mes collègues Jean-Loup Puget, Guilaine Lagache, Alexandre Beelen de l'IAS, Etienne Pointecouteau, Ludovic Montier et Martin Giard du CESR, Matthieu Tristram du LAL, et Alain Omont de l'IAP. Les proto-amas, à la jonction des amas de galaxies à bas redshift et des galaxies infrarouges et submillimétriques à grand redshift, nous renseigneraient sur la masse de gaz disponible et sa température, ainsi que sur le biais matière noire - gaz.

Ce projet difficile et à moyen terme, consiste à analyser les fluctuations des données, qui vérifient certains critères de couleur afin de sélectionner les objets froids (méthode CoCoCoDet de L. Montier et al). Les signatures des proto-amas sont en effet anticipées comme étant proches des caractéristiques des galaxies submillimétriques déjà connues. La couverture totale du ciel avec Planck donnera un aspect statistique à cette étude réellement novatrice. Enfin, la confirmation des candidats proto-amas Planck pourrait intervenir avec les observations Herschel des grands relevés ou programmées pour l'occasion, ainsi que des observations de suivi, par exemple MAMBO, LABOCA, WISE, Herschel. *Je coordonne le / participe activement au suivi infrarouge et millimétrique de ces sources.*

3.4.4 Les sources de réionisation

Un autre enjeu de la cosmologie actuelle est de détecter et de caractériser les premières sources de l'Univers, probablement celles responsables de la réionisation (Fan et al., 2006b,a,c, e.g.), comme les étoiles de population III (Santos et al., 2002; Fernandez & Komatsu, 2006; Fernandez et al., 2010, e.g.).

Un projet à ce sujet consistera à revisiter les contraintes déjà publiées (Cooray et al., 2007; Thompson et al., 2007a,b; Kashlinsky et al., 2007a,b), et dont l'interprétation est sujette à débat : s'agit-il vraiment de la signature des étoiles de population III ? Je compte **mesurer la corrélation dans les fluctuations** à partir des fluctuations du fond infrarouge proche, afin d'obtenir une mesure indépendante.

J'utiliserai un nouvel outil : *mes collègues Nicolas Ponthieu et Julien Grain* ont développé un outil raffiné de mesure de spectre de puissance (Poker) en présence d'un signal non régulier (par exemple masque compliqué dû au masquage de sources brillantes, au bruit non uniforme, etc.), qui va permettre de mesurer avec des barres d'erreurs crédibles les spectres de puissance.

Un autre projet ambitieux et prioritaire sera de développer un **modèle simple et cohérent**, liant l'évolution des premières sources, responsables de la réionisation, à celle des structures qui se sont formées ensuite, et en particulier les galaxies infrarouges (sect. 2.4) et proto-amas qui pourront certainement être décrit de la même manière. Il sera alors possible de prédire l'évolution complète du fond infrarouge et de ses fluctuations corrélées en fonction du redshift, et ainsi de mieux ajuster les stratégies d'observation, tout en permettant l'interprétation des données. *Ce travail sera amorcé début 2011 avec ma post-doc ANR spécialiste de réionisation, en collaboration avec mes collègues de l'IAS.*

Chapitre 4

Conclusions & Perspectives

Sommaire

4.1	Le fond extragalactique	37
4.2	Planck et Herschel	38
4.2.1	Planck	38
4.2.2	Herschel	38
4.3	Au-delà : les futurs observatoires pour la cosmologie	39
4.4	Un soupçon d'enseignement	40

Les conclusions et perspectives, détaillées ci-après, sont résumées schématiquement dans la figure 4.1.

4.1 Le fond extragalactique

Le fond extragalactique encode une information précieuse dans son spectre en intensité, et dans ses fluctuations angulaires. En couplant cette information aux propriétés statistiques des galaxies, il est/sera possible de contraindre (d’abord empiriquement, et semi-analytiquement ultérieurement certainement) plus finement le scénario d’évolution des galaxies, et de la “fabrication” de l’EBL. Cette dernière influe sur l’opacité de l’Univers à haute énergie.

J’ai montré l’importance de l’étude du spectre du CIB (et plus généralement de l’EBL) pour la compréhension de l’évolution des galaxies, mais aussi l’importance des approches variées de mesure, comme les mesures absolues, puis limites inférieures (stacking) et supérieures (absorption des photons TeV). La popularité de la méthode de stacking (empilement) a probablement pour origine le fait qu’en gagnant un ordre de grandeur en sensibilité par rapport à la confusion, il a été pour la première fois mesuré la contribution des galaxies détectées à $24 \mu\text{m}$ au CIB à 70 et $160 \mu\text{m}$ – contribution rendant compte de la quasi totalité du CIB à son pic d’émission.

J’ai également montré que l’approche statistique des propriétés des galaxies est riche pour contraindre les modèles d’évolution des galaxies. Ces modèles – en général assez simples d’évolution “en arrière” et contenant peu ou pas de physique – peuvent servir de description de base pour les modèles physiques semi-analytiques.

Je souhaite approfondir les méthodes d’analyse pour encore mieux contraindre les modèles, comme le fut le stacking et comme le permet l’introduction récente de la quantité de brillance différentielle $\frac{d\nu B_\nu}{dz}$, très discriminante.

Pour conclure, la figure 4.1 résume les projets, qui s’articulent autour de la caractérisation des propriétés des galaxies contribuant au fond extragalactique. Outre l’approche observationnelle avec des cibles pertinentes (ULIRGs, blazars, amas), les projets requièreront l’utilisation de nouvelles observables (comme les BAO, les signatures de réionisation) avec des données existantes (Spitzer $70 \mu\text{m}$ retraitées par exemple) ou à venir (EUCLID, mais aussi JWST, IRAM, ALMA, et pourquoi pas CCAT), ainsi que d’autres développements en modélisation et en techniques d’analyse du signal.

Je détaille ci-après les perspectives importantes pour Planck, Herschel et au-delà.

4.2 Planck et Herschel

Le travail sur les données Planck et Herschel est assez bien avancé, mais les clauses de confidentialité ne permettent pas de communiquer aisément à ce sujet. Néanmoins, les prochaines années seront occupées à l'analyse et l'interprétation de ces données, de qualité extraordinaire.

4.2.1 Planck

Mon activité scientifique est dominée par l'analyse des données dans le cadre : 1) de la recherche des sources submillimétriques à grand redshift, 2) de l'étude des fluctuations du fond extragalactique, 3) de la validation du catalogue de sources infrarouges sur tout le ciel et 4) de la participation à l'étude (et suivi) des amas SZ. Ce travail permettra, sinon de découvrir de nouvelles populations de galaxies ou de nouvelles techniques de sélection de structures à grand redshift, de caractériser l'émission submillimétrique (observée) d'une grande variété d'objets brillants. Des collaborations fructueuses, notamment avec SPT ou WISE, s'organisent, et des observations complémentaires, par exemple à l'IRAM, à APEX ou Herschel, sont effectuées, ou envisagées. L'arrivée en décembre 2010 d'un post-doc Planck que je co-dirigerai (avec Guilaine Lagache) nous aidera dans cette tâche de caractérisation fine, en collaboration avec nos collègues de Toulouse et d'Orsay.

Notons qu'une part des activités est dédiée, comme tout membre du Core Team HFI, au suivi des opérations quotidiennes de l'instrument pendant les DTCP (Daily Telecomand Period). Cette activité durera jusqu'à fin 2011.

Enfin, une petite part, non négligeable, du temps est dédiée à la communication du projet Planck HFI au niveau français et international. Le principal travail consiste à co-écrire les communiqués de presse en français, des affiches et du contenu pour des expositions et site web¹, et à coordonner certaines actions (écriture d'article grand public, organisation d'événements publics, contacts avec la presse et les autres médias, les tutelles).

4.2.2 Herschel

Mon activité principale concernera l'analyse du relevé profond GOODS-Herschel, avec mes collaborateurs du CEA, de l'IAS, ainsi que Marseille et de l'IAP. Outre les aspects d'étude des populations de galaxies résolues, pour lesquelles l'émission submillimétrique est pour la première fois accessible jusqu'à des redshifts et luminosités jamais atteints, et qui permettent de mesurer (et non de déduire comme jusqu'alors) la luminosité infrarouge totale, je m'intéresserai aux aspects de détection des galaxies plus faibles que la confusion, soit par la technique d'empilement, soit par l'étude des fluctuations. L'intérêt de ces approches et de sonder ces populations qui, avec les autres déjà étudiées, rendent compte de la grande majorité du fond infrarouge et submillimétrique. Comme il a été vu en section 3.3, la connaissance fine de l'évolution des propriétés statistiques avec le redshift rend l'interprétation bien plus robuste. Les données de Planck et d'Herschel nous permettent d'entrer dans cette ère des modèles d'évolution en arrière plus raffinés par leur évolution ou par les bibliothèques de SED qu'ils utilisent. Ma post-doc ANR (P.I. D. Elbaz) arrivant en septembre 2010 travaillera entre autres sur ces aspects, alors que Matthieu Béthermin (qui soutiendra sa thèse à l'automne 2011) travaille déjà activement sur les données et sur le modèle.

Par ailleurs, les grands relevés de type ATLAS (dont je suis Co-I) ou Herschel Legacy Survey (dont je suis co-proposant) complètent parfaitement le relevé Planck grâce à une résolution angulaire bien meilleure, malgré la couverture spectrale et du ciel moindres.

1. site public Planck : <http://www.planck.fr>

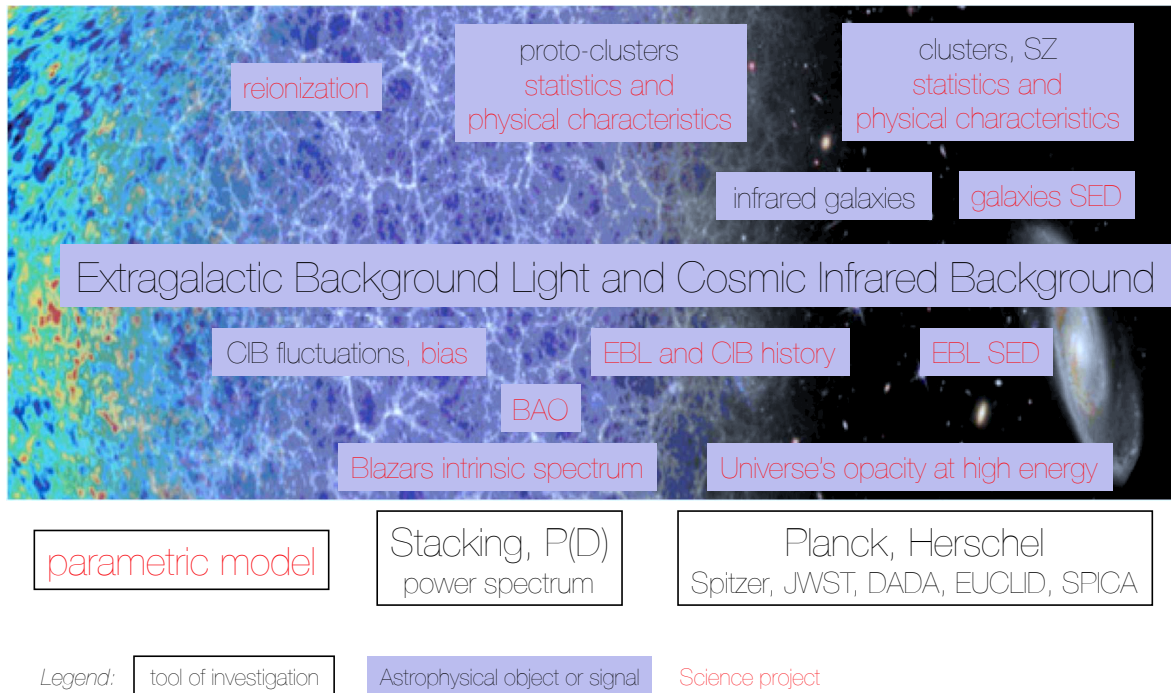


FIGURE 4.1: Résumé schématique des perspectives.

4.3 Au-delà : les futurs observatoires pour la cosmologie

En tant que scientifique expert en analyse de données spatiales, en caractérisation de certains paramètres en vol (étalonnage par exemple), en modélisation astrophysique des galaxies, et travaillant dans un institut spécialisé dans la conception, la réalisation, les tests, les opérations et l'exploitation scientifique d'instruments spatiaux, une petite partie de mon activité scientifique est (ou, récemment, devrait être) consacrée la **préparation scientifique des futures missions spatiales dédiées à l'étude des galaxies ou à but cosmologique**. Dans le passé, j'ai activement travaillé sur ISO (ISOPHOT), puis Spitzer (membre de l'équipe instrumentale de MIPS pendant 3 ans en Arizona) ; je participe aux opérations de Planck/HFI actuellement. Je suis co-proposant des missions H2EX (Boulanger et al., 2009) et de l'instrument SAFARI sur SPICA (Swinyard et al., 2009) soumis à Cosmic Vision de l'ESA. H2EX a été rejeté, mais la participation européenne à SPICA semble toujours d'actualité. J'ai également participé à une proposition au 2010-2020 Decadal Survey, avec une mission visant à mesurer le spectre du fond extragalactique (Cooray et al., 2009). J'ai aussi participé à la rédaction du rapport "Early Science Opportunities in extragalactic astronomy with SOFIA" en 2008. Enfin, je commence à m'impliquer dans EUCLID (Laureijs, 2009; Refregier et al., 2010), qui est sélectionné pour Cosmic Vision, dans le groupe de science additionnelle consacrée à l'évolution des galaxies.

Les perspectives naturelles seront de m'impliquer dans EUCLID, probablement à travers le centre IDOC. Les discussions dans le cadre de DADA vont en ce sens. L'IAS pourrait apporter son expertise dans de nombreux domaines de l'analyse de données spatiales et l'étalonnage de missions, ainsi que

sur des aspects d'étalonnage photométrique de l'instrument imageur. Mon intérêt scientifique porte sur les aspects statistiques de l'évolution des galaxies, et EUCLID apportera des données de qualité, notamment pour la détection des BAO. Je développe un outil, basé sur la technique d'empilement qui donne une image de la fonction de corrélation à deux points, pour tenter de détecter très rapidement sur la sphère la présence d'excès de corrélation dans la distribution de galaxies, que l'on pourrait attribuer aux BAO. Ce travail est effectué en collaboration principale avec Marian Douspis. Je compte accélérer le développement de cet outil.

4.4 Un soupçon d'enseignement

Il ne faut pas passer sous silence les aspects d'enseignement universitaire, qui, s'ils n'ont a priori pas de place dans un document comme celui-ci, n'en représentent pas moins une fraction importante de l'activité de tout enseignant-chercheur.

Les aspects de recherche et d'enseignement se nourrissent souvent l'un de l'autre : la recherche alimente naturellement l'enseignement universitaire en exemples, projets, approches, parfois TP et cours. L'enseignement nourrit également la recherche (même si c'est rarement souligné) par l'exigence de clarté du message, qui s'exprime jusque dans les méandres de la rédaction d'un article, mais également par la culture scientifique acquise par obligation, dans le but d'enseigner tous les champs de la physique, et qui débouche parfois vers une ouverture scientifique réelle.

J'insisterai finalement sur les aspects (ô combien chronophages mais enrichissants) d'innovation de l'enseignement universitaire par le biais de l'introduction de TP et de concepts issus de la recherche contemporaine.

Mon expérience de création d'un observatoire radio à Orsay² avec du matériel grand public détourné pour observer le Soleil avec 10 radiotélescopes est un exemple. Il s'agit d'aborder des concepts de physique de base (émission thermique du corps noir, ou notion de bruit, du L2 au M2) dans le cadre d'une observation du Soleil à 10 GHz. L'approche empirique (il n'y a pas de poly de TP) qui suit le cours magistral désarçonne les étudiants, qui finalement se prennent au jeu de la découverte et finissent en général par réussir les séances. Ce TP a évolué, grâce aux contacts avec Michel Piat (APC), et a en partie contribué à donner naissance à un autre TP plus ambitieux (en M2Pro) de détection du fond cosmologique depuis... le toit de l'APC en plein Paris avec du matériel similaire. Quelle belle expérience pour les étudiants (et pour moi !) de refaire les mesures de Penzias et Wilson en un après-midi, avec les antennes satellites et un peu d'azote liquide.

D'autres innovations existent : des projets d'analyse de données provenant de Spitzer, Mars Express, de l'OHP, ou de simulations numériques en M1³, et bientôt couplés avec l'utilisation de la coupole du campus⁴, ou encore la méthodologie de traitement des données avec observations à l'OHP en M2⁵. L'une dont je suis assez fier est le stage informatique de deux semaines dans le master 2 NPAC⁶, pendant lequel nous donnons aux étudiants accès aux données récentes de WMAP, BLAST ou Spitzer, avec la littérature associée, ce qui leur permet de faire des projets complets, parfois originaux (simulations de stacking qui nous aident par exemple), toujours intéressants (élaboration d'une méthode ILC et mesure du spectre de puissance, mesure de fonction angulaire de corrélation, résolution du CIB par stacking). La grande motivation des étudiant à terminer le projet, écrire le rapport et proposer une soutenance de qualité, le tout en 9 journées, et leurs retours positifs nous confortent dans cette approche.

Je souhaite continuer à introduire quelques innovations dans l'enseignement, en poursuivant

2. RAMEAU : Réseau d'Antennes Micro-onde pour l'Enseignement de l'Astrophysique à l'Université Paris-Sud 11, cf <http://www.ias.u-psud.fr/pperso/rameau/>

3. TP de M1 : <http://www.ias.u-psud.fr/pperso/hdole/m1.php>

4. coupole d'astrophysique : <http://www.ias.u-psud.fr/pperso/hdole/coupole/>

5. méthodologie liée à l'observation et au traitement des données au master 2 d'astrophysique : <http://www.ias.u-psud.fr/pperso/hdole/ohp/>

6. Stage info du master 2 Noyaux, Particules, Astroparticule et Cosmologie : <http://www.ias.u-psud.fr/pperso/hdole/m2.php#NPAC>

cette même ligne de proposer des enseignements pratiques qui se rapprochent le plus de nos activités de recherche, dans un cadre adapté au niveau des étudiants et en couplant un enseignement formel de haut niveau. Les étudiants sont très sensibles à notre enthousiasme et au caractère proche de la recherche (et pas seulement des cas d'école éculés) des enseignements que nous dispensons. La présence du laboratoire de recherche spatiale directement sur le campus est un atout indéniable. Je souhaite poursuivre ce double parcours, en étendant mon implication scientifique dans le groupe MIC (matière interstellaire et cosmologie) de l'IAS, tout en poursuivant les nouveautés dans l'enseignement universitaire, en couplant le plus fréquemment possible les deux aspects.

Bibliographie

- Aharonian, F., Akhperjanian, A. G., Bazer-Bachi, A. R., Beilicke, M., Benbow, W., Berge, D., Bernlöhner, K., Boisson, C., Bolz, O., Borrel, V., Braun, I., Breitling, F., Brown, A. M., Chadwick, P. M., Chouet, L. M., Cornils, R., Costamante, L., Degrange, B., Dickinson, H. J., Djannati-Ataï, A., Drury, L. O. C., Dubus, G., Emmanoulopoulos, D., Espigat, P., Feinstein, F., Fontaine, G., Fuchs, Y., Funk, S., Gallant, Y. A., Giebels, B., Gillessen, S., Glicenstein, J. F., Goret, P., Hadjichristidis, C., Hauser, D., Hauser, M., Heinzlmann, G., Henri, G., Hermann, G., Hinton, J. A., Hofmann, W., Holleran, M., Horns, D., Jacholkowska, A., De Jager, O. C., Khachatryan, B., Klages, S., Komin, N., Konopelko, A., Latham, I. J., Le Gallou, R., Lemièvre, A., Lemoine-Goumard, M., Leroy, N., Lohse, T., Martin, J. M., Martineau-Huynh, O., Marcowith, A., Masterson, C., McComb, T. J. L., De Naurois, M., Nolan, S. J., Noutsos, A., Orford, K. J., Osborne, J. L., Ouchrif, M., Panter, M., Pelletier, G., Pita, S., Pahlhofer, G., Punch, M., Raubenheimer, B. C., Raue, M., Raux, J., Rayner, S. M., Reimer, A., Reimer, O., Ripken, J., Rob, L., Rolland, L., Rowell, G., Sahakian, V., Sauge, L., Schlenker, S., Schlickeiser, R., Schuster, C., Schwanke, U., Siewert, M., Sol, H., Spangler, D., Steenkamp, R., Stegmann, C., Tavernet, J. P., Terrier, R., Theoret, C. G., Tluczykont, M., van Eldik, C., Vasileiadis, G., Venter, C., Vincent, P., Volk, H. J. & Wagner, S. J. *A low level of extragalactic background light as revealed by gamma-rays from blazars*, 2006, *Nature*, **440**, 1018.
- Aharonian, F., Akhperjanian, A. G., Barres De Almeida, U., Bazer-Bachi, A. R., Behera, B., Beilicke, M., Benbow, W., Bernlöhner, K., Boisson, C., Bolz, O., Borrel, V., Braun, I., Brion, E., Brown, A. M., Bulik, T., Busch, I., Boutelier, T., Carrigan, S., Chadwick, P. M., Chouet, L. M., Clapson, A. C., Coignet, G., Cornils, R., Costamante, L., Dalton, M., Degrange, B., Dickinson, H. J., Djannati-Ataï, A., Domaïko, W., O'C. Drury, L., Dubois, F., Dubus, G., Dyks, J., Egberts, K., Emmanoulopoulos, D., Espigat, P., Farnier, C., Feinstein, F., Fiasson, A., Fieringer, A., Fontaine, G., Funk, S., Faling, M., Gallant, Y. A., Giebels, B., Glicenstein, J. F., Gluck, B., Goret, P., Hadjichristidis, C., Hauser, D., Hauser, M., Heinzlmann, G., Henri, G., Hermann, G., Hinton, J. A., Hoffmann, A., Hofmann, W., Holleran, M., Hoppe, S., Horns, D., Jacholkowska, A., De Jager, O. C., Jung, I., Katarzyński, K., Kendziorra, E., Kerschhaggl, M., Khachatryan, B., Keogh, D., Komin, N., Kosack, K., Lamanna, G., Latham, I. J., Lemièvre, A., Lemoine-Goumard, M., Lenain, J. P., Lohse, T., Martin, J. M., Martineau-Huynh, O., Marcowith, A., Masterson, C., Maurin, D., Maurin, G., McComb, T. J. L., Moderski, R., Moulin, E., De Naurois, M., Nedbal, D., Nolan, S. J., Ohm, S., Olive, J. P., De Wilhelmi, E., Orford, K. J., Osborne, J. L., Ostrowski, M., Panter, M., Pedalletti, G., Pelletier, G., Petrucci, P. O., Pita, S., Pahlhofer, G., Punch, M., Ranchon, S., Raubenheimer, B. C., Raue, M., Rayner, S. M., Renaud, M., Ripken, J., Rob, L., Rolland, L., Rosier-Lees, S., Rowell, G., Rudak, B., Ruppel, J., Sahakian, V., Santangelo, A., Schlickeiser, R., Schack, F., Schrader, R., Schwanke, U., Schwarzbach, S., Schwemmer, S., Shalchi, A., Sol, H., Spangler, D., Stawarz, A., Steenkamp, R., Stegmann, C., Superina, G., Tam, P. H., Tavernet, J. P., Terrier, R., van Eldik, C., Vasileiadis, G., Venter, C., Vialle, J. P., Vincent, P., Vivier, M., Valk, H. J., Volpe, F., Wagner, S. J., Ward, M., Zdziarski, A. A. & Zech, A. *New constraints on the mid-ir ebl from the hess discovery of the gamma-rays from 1es 0229+200*, 2007, *A&A*, **475**, L9–L13.
- Albert, J. & MAGIC Collaboration. *Very-high-energy gamma rays from a distant quasar : How transparent is the universe ?*, 2008, *Science*, **320**, 1752.
- Alimi, J. M. 2002, *pourquoi la nuit est-elle noire ? le pommier, les petites pommes du savoir* edition.
- Alonso-Herrero, A., Perez-Gonzalez, P. G., Rigby, J., Rieke, G. H., Floc'h, E. L., Barmby, P., Page, M. J., Papovich, C., Dole, H., Egami, E., Huang, J. S., Rigopoulou, D., Cristobal-Hornillos, D., Eliche-Moral, C., Balcells, M., Prieto, M., Erwin, P., Engelbracht, C. W., Gordon, K. D., Werner, M., Willner, S. P., Fazio, G. G., Frayer, D., Hines, D., Kelly, D., Latter, W., Misselt, K., Miyazaki, S., Morrison, J., Rieke, M. J. & Wilson, G. *The nature of luminous x-ray sources with mid-infrared counterparts*, 2004, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **154**, 155.
- Armand, C., Milliard, B. & Deharveng, J. M. *Far-ultraviolet diffuse background and galaxy counts*, 1994, *A&A*, **284**, 12.
- Austermann, J. E., Dunlop, J. S., Perera, T. A., Scott, K. S., Wilson, G. W., Aretxaga, I., Hughes, D. H., Almaini, O., Chapin, E. L., Chapman, S. C., Cirasuolo, M., Clements, D. L., Coppin, K. E. K., Dunne, L., Dye, S., Eales, S. A., Egami, E., Farrah, D., Ferrusca, D., Flynn, S., Haig, D., Halpern, M., Ibar, E., Ivison, R. J., van Kampen, E., Kang, Y., Kim, S., Lacey, C., Lowenthal, J. D., Maukopf, P. D., McLure, R. J., Mortier, A. M. J., Negrello, M., Oliver, S., Peacock, J. A., Pope, A., Rawlings, S., Rieke, G., Roseboom, I., Rowan-Robinson, M., Scott, D., Serjeant, S., Smail, I., Swinbank, A. M., Stevens, J. A., Velazquez, M., Wagg, J. & Yun, M. S. *Aztec half square degree survey of the shades fields - i. maps, catalogues and source counts*, 2010, *MNRAS*, **401**, 160–176.
- Balland, C., Devriendt, J. E. G. & Silk, J. *Collision-induced galaxy formation : semi-analytical model and multiwavelength predictions*, 2003, *MNRAS*, **343**, 107.
- Barcons, X., Mateos, S. & Ceballos, M. T. *On the intensity of the extragalactic x-ray background*, 2000, *MNRAS*, **316**, L13–L16.
- Barrau, A., Gorecki, A. & Grain, J. *An original constraint on the hubble constant : $h \approx 0.74$* , 2008, *MNRAS*, **389**, 919–924.
- Bauer, F. E., Alexander, D. M., Brandt, W. N., Schneider, D. P., Treister, E., Hornschemeier, A. E. & Garmire, G. P. *The fall of active galactic nuclei and the rise of star-forming galaxies : A close look at the chandra deep field x-ray number counts*, 2004, *AJ*, **128**, 2048–2065.
- Bavouzet, N., Dole, H., Le Floc'h, E., Caputi, K. I., Lagache, G. & Kochanek, C. S. *Estimating the total infrared luminosity of galaxies up to $z \sim 2$ from mid- and far-infrared observations*, 2008, *A&A*, **479**, 83–96.

- Bavouzet, N. *Les galaxies infrarouges : distribution spectrale d'énergie et contributions au fond extragalactique*. PhD thesis, Université Paris-Sud 11 <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00363975/>, 2008.
- Bernstein, R. A., Freedman, W. L. & Madore, B. F. *The first detections of the extragalactic background light at 3000, 5500, and 8000 Å. i. results*, 2002, *ApJ*, **571**, 56.
- Bernstein, R. A. *The optical extragalactic background light : Revisions and further comments*, 2007, *ApJ*, **666**, 663–673.
- Berta, S., Magnelli, B., Lutz, D., Altieri, B., Aussel, H., Andreani, P., Bauer, O., Bongiovanni, A., Cava, A., Cepa, J., Cimatti, A., Daddi, E., Dominguez, H., Elbaz, D., Feuchtgruber, H., Foerster Schreiber, N. M., Genzel, R., Gruppioni, C., Katterloher, R., Magdis, G., Maiolino, R., Nordon, R., Perez Garcia, A. M., Poglitsch, A., Popesso, P., Pozzi, F., Riguccini, L., Rodighiero, G., Saintonge, A., Santini, P., Sanchez-Portal, M., Shao, L., Sturm, E., Tacconi, L. J., Valtchanov, I., Wetzstein, M. & Wiegrecht, E. *Dissecting the cosmic infra-red background with herchel/pep*. arXiv :1005.1073, 2010.
- Bethermin, M., Dole, H., Beelen, A. & Aussel, H. *Spitzer deep and wide legacy mid- and far-infrared number counts and lower limits of cosmic infrared background*, 2010a, *A&A*, **512**, 78.
- Bethermin, M., Dole, H., Cousin, M. & Bavouzet, N. *Submillimeter number counts at 250 μ m, 350 μ m and 500 μ m in blast data*, 2010b, *A&A*, **516**, 43.
- Bethermin, M., Dole, H., Lagache, G., Le Borgne, D. & Penin, A. *Modeling the evolution of the infrared galaxies : I. parametric backwards evolution model*, 2011, *AA*, in prep.
- Boulanger, F., Maillard, J. P., Appleton, P., Falgarone, E., Lagache, G., Schulz, B., Wakker, B. P., Bressan, A., Cernicharo, J., Charmandaris, V., Drissen, L., Helou, G., Henning, T., Lim, T. L., Valentijn, E. A., Abergel, A., Bourlot, J. L., Bouzit, M., Cabrit, S., Combes, F., Deharveng, J. M., Desmet, P., Dole, H., Dumesnil, C., Dutrey, A., Fourmond, J. J., Gavila, E., Grangá, R., Gry, C., Guillard, P., Guilloteau, S., Habart, E., Huet, B., Joblin, C., Langer, M., Longval, Y., Madden, S. C., Martin, C., Miville-Deschênes, M. A., Pineau Des Forêts, G., Pointecouteau, E., Roussel, H., Tresse, L., Verstraete, L., Viallefond, F., Bertoldi, F., Jorgensen, J., Bouwman, J., Carmona, A., Krause, O., Baruffolo, A., Bonoli, C., Bortoletto, F., Danese, L., Granato, G. L., Permechele, C., Rampazzo, R., Silva, L., Zotti, G. D., Pardo, J., Spaans, M., van Der Tak, F. F. S., Wild, W., Ferlet, M. J., Ramsay Howat, S. K., Smith, M. D., Swinyard, B., Wright, G. S., Joncas, G., Martin, P. G., Davis, C. J., Draine, B. T., Goldsmith, P. F., Mainzer, A. K., Ogle, P., Rinehart, S. A., Stacey, G. J. & Tielens, A. G. G. M. *The molecular hydrogen explorer h2ex*, 2009, *Experimental Astronomy*, **23**, 277–302.
- Bridle, A. H. *The spectrum of the radio background between 13 and 404 mhz*, 1967, *MNRAS*, **136**, 219.
- Brown, T. M., Kimble, R. A., Ferguson, H. C., Gardner, J. P., Collins, N. R. & Hill, R. S. *Measurements of the diffuse ultraviolet background and the terrestrial airglow with the space telescope imaging spectrograph*, 2000, *AJ*, **120**, 1153.
- Cambresy, L., Reach, W. T., Beichman, C. A. & Jarrett, T. H. *The cosmic infrared background at 1.25 and 2.2 microns using dirbe and 2mass : A contribution not due to galaxies ?*, 2001, *ApJ*, **555**, 563.
- Caputi, K. I., Dole, H., Lagache, G., McLure, R. J., Puget, J. L., Rieke, G. H., Dunlop, J. S., Floc'h, E. L., Papovich, C. & Perez-Gonzalez, P. G. *Linking stellar mass and star formation in spitzer mips 24 μ m galaxies*, 2006a, *ApJ*, **637**, 727.
- Caputi, K. I., McLure, R. J., Dunlop, J. S., Cirasuolo, M. & Schael, A. M. *Further constraints on the evolution of ks-selected galaxies in the goods/cdfs field*, 2006b, *MNRAS*, **366**, 609.
- Caputi, K. I., Lagache, G., Yan, L., Dole, H., Bavouzet, N., Le Floc'h, E., Choi, P. I., Helou, G. & Reddy, N. *The infrared luminosity function of galaxies at redshifts $z = 1$ and $z \sim 2$ in the goods fields*, 2007, *ApJ*, **660**, 97–116.
- Chary, R. & Elbaz, D. *Interpreting the cosmic infrared background : Constraints on the evolution of the dust-enshrouded star formation rate*, 2001, *ApJ*, **556**, 562.
- Clark, T. A., Brown, L. W. & Alexander, J. K. *Spectrum of the extra-galactic background radiation at low radio frequencies*, 1970, *Nature*, **228**, 847–849.
- Cooray, A., Sullivan, I., Chary, R. R., Bock, J. J., Dickinson, M., Ferguson, H. C., Keating, B., Lange, A. & Wright, E. L. *Ir background anisotropies in spitzer goods images and constraints on first galaxies*, 2007, *ApJ*, **659**, L91.
- Cooray, A., Amblard, A., Beichman, C., Benford, D., Bernstein, R., Bock, J. J., Brodwin, M., Bromm, V., Cen, R., Chary, R. R., Devlin, M., Dolch, T., Dole, H., Dwek, E., Elbaz, D., Fall, M., Fazio, G., Ferguson, H., Furlanetto, S., Gardner, J., Giavalisco, M., Gilmore, R., Gnedin, N., Gonzalez, A., Haiman, Z., Kelsall, T., Komatsu, E., Lagache, G., Levenson, L. R., Loeb, A., Badau, P., Mather, J. C., Matsumoto, T., Mattila, K., Moseley, M., Moustakas, L., Oh, S. P., Petro, L., Primack, J., Reach, W., Renbarger, T., Shapiro, P., Stern, D., Sullivan, I., Venkatesan, A., Werner, M., Windhorst, R., Wright, E. L. & Zemcov, M. *A new era in extragalactic background light measurements : The cosmic history of accretion, nucleosynthesis and reionization*. 0902.2372, 2009.
- Cowie, L. L., Barger, A. J. & Kneib, J. P. *Faint submillimeter counts from deep 850 micron observations of the lensing clusters a370, a851, and a2390*, 2002, *AJ*, **123**, 2197–2205.
- Daddi, E., Alexander, D. M., Dickinson, M., Gilli, R., Renzini, A., Elbaz, D., Cimatti, A., Chary, R., Frayer, D., Bauer, F. E., Brandt, W. N., Giavalisco, M., Grogan, N. A., Huynh, M., Kurk, J., Mignoli, M., Morrison, G., Pope, A. & Ravindranath, S. *Multiwavelength study of massive galaxies at $z \sim 2$. ii. widespread compton-thick active galactic nuclei and the concurrent growth of black holes and bulges*, 2007, *ApJ*, **670**, 173–189.
- Devriendt, J. E. G. & Guiderdoni, B. *Galaxy modelling. ii. multi-wavelength faint counts from a semi-analytic model of galaxy formation*, 2000, *A&A*, **363**, 851.

- Dole, H., Gispert, R., Lagache, G., Puget, J. L., Aussel, H., Bouchet, F. R., Ciliegi, P., Clements, D. L., Cesarsky, C., Desert, F. X., Elbaz, D., Franceschini, A., Guiderdoni, B., Harwit, M., Laureijs, R., Lemke, D., McMahon, R., Moorwood, A. F. M., Oliver, S., Reach, W. T., Rowan-Robinson, M. & Stickel, M. *Firback source counts and cosmological implications*, 2000, Berlin Springer Verlag Lecture Notes in Physics, **548**, 54.
- Dole, H., Gispert, R., Lagache, G., Puget, J. L., Bouchet, F. R., Cesarsky, C., Ciliegi, P., Clements, D. L., Dennefeld, M., Désert, F. X., Elbaz, D., Franceschini, A., Guiderdoni, B., Harwit, M., Lemke, D., Moorwood, A. F. M., Oliver, S., Reach, W. T., Rowan-Robinson, M. & Stickel, M. *Firback : iii. catalog, source counts, and cosmological implications of the 170 μ m iso*, 2001, A&A, **372**, 364.
- Dole, H., Lagache, G. & Puget, J. L. *Predictions for cosmological infrared surveys from space with the multiband imaging photometer for sirtf*, 2003, ApJ, **585**, 617.
- Dole, H., Floc'h, E. L., Perez-Gonzalez, P. G., Papovich, C., Egami, E., Lagache, G., Alonso-Herrero, A., Engelbracht, C. W., Gordon, K. D., Hines, D. C., Krause, O., Misselt, K. A., Morrison, J. E., Rieke, G. H., Rieke, M. J., Rigby, J. R., Young, E. T., Bai, L., Blaylock, M., Neugebauer, G., Beichman, C. A., Frayer, D. T., Mould, J. R. & Richards, P. L. *Far-infrared source counts at 70 and 160 microns in spitzer deep surveys*, 2004a, Astrophys. J. Suppl. Ser., **154**, 87.
- Dole, H., Rieke, G. H., Lagache, G., Puget, J. L., Alonso-Herrero, A., Bai, L., Blaylock, M., Egami, E., Engelbracht, C. W., Gordon, K. D., Hines, D. C., Kelly, D. M., Floc'h, E. L., Misselt, K. A., Morrison, J. E., Muzerolle, J., Papovich, C., Perez-Gonzalez, P. G., Rieke, M. J., Rigby, J. R., Neugebauer, G., Stansberry, J. A., Su, K. Y. L., Young, E. T., Beichman, C. A. & Richards, P. L. *Confusion of extragalactic sources in the mid- and far-infrared : Spitzer and beyond*, 2004b, Astrophys. J. Suppl. Ser., **154**, 93.
- Dole, H., Lagache, G., Puget, J. L., Caputi, K. I., Fernández-Conde, N., Le Floc'h, E., Papovich, C., Pérez-González, P. G., Rieke, G. H. & Blaylock, M. *The cosmic infrared background resolved by spitzer. contributions of mid-infrared galaxies to the far-infrared background*, 2006, A&A, **451**, 417.
- Dole, H., Lagache, G. & Puget, J. L. *Le fond infrarouge de galaxies livre ses secrets*, 2009, Images de la Physique, CNRS, <http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/2008.htm>.
- Dunkley, J., Komatsu, E., Nolta, M. R., Spergel, D. N., Larson, D., Hinshaw, G., Page, L., Bennett, C. L., Gold, B., Jarosik, N., Weiland, J. L., Halpern, M., Hill, R. S., Kogut, A., Limon, M., Meyer, S. S., Tucker, G. S., Wollack, E. & Wright, E. L. *Five-year willkinson microwave anisotropy probe observations : Likelihoods and parameters from the wmap data*, 2009, Astrophys. J. Suppl. Ser., **180**, 306–329.
- Edelstein, J., Bowyer, S. & Lampton, M. *Reanalysis of voyager ultraviolet spectrometer limits to the extreme-ultraviolet and far-ultraviolet diffuse astronomical flux*, 2000, ApJ, **539**, 187.
- Egami, E., Dole, H., Huang, J. S., Perez-Gonzalez, P., Floc'h, E. L., Papovich, C., Barmby, P., Ivison, R. J., Serjeant, S., Mortier, A., Frayer, D. T., Rigopoulou, D., Lagache, G., Rieke, G. H., Willner, S. P., Alonso-Herrero, A., Bai, L., Engelbracht, C. W., Fazio, G. G., Gordon, K. D., Hines, D. C., Misselt, K. A., Miyazaki, S., Morrison, J. E., Rieke, M. J., Rigby, J. R. & Wilson, G. *Spitzer observations of the scuba/vla sources in the lockman hole : Star formation history of infrared-luminous galaxies*, 2004, Astrophys. J. Suppl. Ser., **154**, 130.
- Eisenstein, D. J., Zehavi, I., Hogg, D. W., Scoccimarro, R., Blanton, M. R., Nichol, R. C., Scranton, R., Seo, H. J., Tegmark, M., Zheng, Z., Anderson, S. F., Annis, J., Bahcall, N., Brinkmann, J., Burles, S., Castander, F. J., Connolly, A., Csabai, I., Doi, M., Fukugita, M., Frieman, J. A., Glazebrook, K., Gunn, J. E., Hendry, J. S., Hennessy, G., Ivezia, Z., Kent, S., Knapp, G. R., Lin, H., Loh, Y. S., Lupton, R. H., Margon, B., McKay, T. A., Meiksin, A., Munn, J. A., Pope, A., Richmond, M. W., Schlegel, D., Schneider, D. P., Shimasaku, K., Stoughton, C., Strauss, M. A., Subbarao, M., Szalay, A. S., Szapudi, I. A., Tucker, D. L., Yanny, B. & York, D. G. *Detection of the baryon acoustic peak in the large-scale correlation function of sdss luminous red galaxies*, 2005, ApJ, **633**, 560–574.
- Elbaz, D., Cesarsky, C. J., Fadda, D., Aussel, H., Désert, F. X., Franceschini, A., Flores, H., Harwit, M., Puget, J. L., Starck, J. L., Clements, D. L., Danese, L., Koo, D. C. & Mandolesi, R. *Source counts from the 15 μ m isocam deep surveys*, 1999, A&A, **351**, L37.
- Elbaz, D., Flores, H., Chanial, P., Mirabel, I. F., Sanders, D., Duc, P. A., Cesarsky, C. J. & Aussel, H. *Isocam mid-infrared detection of hr 10 : A distant clone of arp 220 at $z = 1.44$* , 2002, A&A, **381**, L1.
- Elbaz, D., Floc'h, E. L., Dole, H. & Marcillac, D. *Observational evidence for the presence of pabs in distant luminous infrared galaxies using iso and spitzer*, 2005, A&A, **434**, L1.
- Elbaz, D. Understanding galaxy formation with iso deep surveys. astro-ph/0503389, 2005.
- Fan, X., Carilli, C. L. & Keating, B. *Observational constraints on cosmic reionization*, 2006a, ARA&A, **44**, 415–462.
- Fan, X., Strauss, M. A., Becker, R. H., White, R. L., Gunn, J. E., Knapp, G. R., Richards, G. T., Schneider, D. P., Brinkmann, J. & Fukugita, M. *Constraining the evolution of the ionizing background and the epoch of reionization with $z < 6$ quasars. ii. a sample of 19 quasars*, 2006b, AJ, **132**, 117.
- Fan, X., Strauss, M. A., Richards, G. T., Hennawi, J. F., Becker, R. H., White, R. L., Diamond-Stanic, A. M., Donley, J. L., Jiang, L., Kim, J. S., Vestergaard, M., Young, J. E., Gunn, J. E., Lupton, R. H., Knapp, G. R., Schneider, D. P., Brandt, W. N., Bahcall, N. A., Barentine, J. C., Brinkmann, J., Brewington, H. J., Fukugita, M., Harvanek, M., Kleinman, S. J., Krzesinski, J., Long, D., jr Neilsen, E. H., Nitta, A., Snedden, S. A. & Voges, W. *A survey of $z < 5.7$ quasars in the sloan digital sky survey. iv. discovery of seven additional quasars*, 2006c, AJ, **131**, 1203.
- Farrah, D., Lonsdale, C. J., Borys, C., Fang, F., Waddington, I., Oliver, S., Rowan-Robinson, M., Babbedge, T., Shupe, D., Polletta, M., Smith, H. E. & Surace, J. *Erratum : "the spatial clustering of ultraluminous infrared galaxies over $1.5 < z < 3$ " ([ja href="http://abs/2006apj..641l.17" ;apj 641, 117 \[2006\];a z](http://abs/2006apj..641l.17))*, 2006, ApJ, **643**, L139–L140.

- Fazio, G. G. & Stecker, F. W. *Predicted high energy break in the isotropic gamma ray spectrum : a test of cosmological origin*, 1970, *Nature*, **226**, 135–136.
- Fazio, G. G., Ashby, M. L. N., Barmby, P., Hora, J. L., Huang, J. S., Pahre, M. A., Wang, Z., Willner, S. P., Arendt, R. G., Moseley, S. H., Brodwin, M., Eisenhardt, P., Stern, D., Tollestrup, E. V. & Wright, E. L. *Number counts at $3 \hat{I}_{\frac{1}{4}}m$; $\hat{I}_{\frac{1}{4}}m$ from the spitzer space telescope*, 2004, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **154**, 39.
- Fernandez, E. R. & Komatsu, E. *The cosmic near-infrared background : Remnant light from early stars*, 2006, *ApJ*, **646**, 703.
- Fernandez-Conde, N., Lagache, G., Puget, J. L. & Dole, H. *Simulations of the cosmic infrared and submillimeter background for future large surveys. i. presentation and first application to herschel/spire and planck/lfi*, 2008, *A&A*, **481**, 885–895.
- Fernandez-Conde, N., Lagache, G., Puget, J. L. & Dole, H. *Simulations of the cosmic infrared and submillimeter background for future large surveys : ii. removing the low-redshift contribution to the anisotropies using stacking*. arXiv :1004.0123, 2010.
- Fernandez, E. R., Komatsu, E., Iliev, I. T. & Shapiro, P. R. *The cosmic near-infrared background. ii. fluctuations*, 2010, *ApJ*, **710**, 1089.
- Fields, B. D., Pavlidou, V. & Prodanovic, T. *Cosmic gamma-ray background from star-forming galaxies*. arXiv :1003.3647, 2010.
- Fiolet, N., Omont, A., Polletta, M., Owen, F., Berta, S., Shupe, D., Siana, B., Lonsdale, C., Strazzullo, V., Pannella, M., Baker, A. J., Beelen, A., Biggs, A., de Breuck, C., Farrah, D., Ivison, R., Lagache, G., Lutz, D., Tacconi, L. J. & Zylka, R. *Multi-wavelength properties of spitzer selected starbursts at $z < 2$* , 2009, *A&A*, **508**, 117–132.
- Fixsen, D. J. & Mather, J. C. *The spectral results of the far-infrared absolute spectrophotometer instrument on coBE*, 2002, *ApJ*, **581**, 817.
- Fixsen, D. J., Dwek, E., Mather, J. C., Bennett, C. L. & Shafer, R. A. *The spectrum of the extragalactic far-infrared background from the coBE FIRAS observations*, 1998, *ApJ*, **508**, 123.
- Fixsen, D. J. *The temperature of the cosmic microwave background*, 2009, *ApJ*, **707**, 916.
- Floc'h, E. L., Pérez-González, P. G., Rieke, G. H., Papovich, C., Huang, J. S., Barmby, P., Dole, H., Egami, E., Alonso-Herrero, A., Wilson, G., Miyazaki, S., Rigby, J. R., Bei, L., Blaylock, M., Engelbracht, C. W., Fazio, G. G., Frayer, D. T., Gordon, K. D., Hines, D. C., Misselt, K. A., Morrison, J. E., Muzerolle, J., Rieke, M. J., Rigopoulou, D., Su, K. Y. L., Willner, S. P. & Young, E. T. *Identification of luminous infrared galaxies at $1 < z < 2.5$* , 2004, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **154**, 170.
- Fomalont, E. B., Kellermann, K. I., Partridge, R. B., Windhorst, R. A. & Richards, E. A. *The microjansky sky at 8.4 ghz*, 2002, *AJ*, **123**, 2402–2416.
- Franceschini, A., Rodighiero, G. & Vaccari, M. *The extragalactic optical-infrared background radiations, their time evolution and the cosmic photon-photon opacity*. 0805.1841, 2008.
- Frayer, D. T., Fadda, D., Yan, L., Marleau, F. R., Choi, P. I., Helou, G., Soifer, B. T., Appleton, P. N., Armus, L., Beck, R., Dole, H., Engelbracht, C. W., Fang, F., Gordon, K. D., Heinrichsen, I., Henderson, D., Hesselroth, T., Im, M., Kelly, D. M., Lacy, M., Laine, S., Latter, W. B., Mahoney, W., Makovoz, D., Masci, F. J., Morrison, J. E., Moshir, M., Noriega-Crespo, A., Padgett, D. L., Pesenson, M., Shupe, D. L., Squires, G. K., Storrie-Lombardi, L. J., Surace, J. A., Teplitz, H. I. & Wilson, G. *Spitzer 70 and 160 um observations of the extragalactic first look survey*, 2006a, *AJ*, **131**, 250.
- Frayer, D. T., Huynh, M. T., Chary, R., Dickinson, M., Elbaz, D., Fadda, D., Surace, J. A., Teplitz, H. I., Yan, L. & Mobasher, B. *Spitzer 70 micron source counts in goods-north*, 2006b, *ApJ*, **647**, L9–L12.
- Frayer, D. T., Sanders, D. B., Surace, J. A., Aussel, H., Salvato, M., Le Floc'h, E., Huynh, M. T., Scoville, N. Z., Afonso-Luis, A., Bhattacharya, B., Capak, P., Fadda, D., Fu, H., Helou, G., Ilbert, O., Kartaltepe, J. S., Koekemoer, A. M., Lee, N., Murphy, E., Sargent, M. T., Schinnerer, E., Sheth, K., Shopbell, P. L., Shupe, D. L. & Yan, L. *Spitzer 70 and 160 $\hat{I}_{\frac{1}{4}}m$ observations of the cosmos field*, 2009, *AJ*, **138**, 1261.
- Fukada, Y., Hayakawa, S., Kasahara, I., Makino, F., Tanaka, Y. & Sreekantan, B. V. *Energy spectrum of diffuse component of cosmic soft gamma rays*, 1975, *Nature*, **254**, 398.
- Gardner, J. P., Brown, T. M. & Ferguson, H. C. *Ultraviolet galaxy counts from space telescope imaging spectrograph observations of the hubble deep fields*, 2000, *ApJ*, **542**, L79.
- Gendreau, K. C., Mushotzky, R., Fabian, A. C., Holt, S. S., Kii, T., Serlemitsos, P. J., Ogasaka, Y., Tanaka, Y., Bautz, M. W., Fukazawa, Y., Ishisaki, Y., Kohmura, Y., Makishima, K., Tashiro, M., Tsusaka, Y., Kunieda, H., Ricker, G. R. & Vanderspek, R. K. *Asca observations of the spectrum of the x-ray background*, 1995, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **47**, L5–L9.
- Gordon, K. D., Rieke, G. H., Engelbracht, C. W., Muzerolle, J., Stansberry, J. A., Misselt, K. A., Morrison, J. E., Cadieu, J., Young, E. T., Dole, H. A., Kelly, D. M., Alonso-Herrero, A., Egami, E., Su, K. Y. L., Papovich, C., Smith, P. S., Hines, D. C., Rieke, M. J., Blaylock, M., Perez-Gonzalez, P. G., Floc'h, E. L., Hinz, J. L., Latter, W. B., Hesselroth, T., Frayer, D. T., Noriega-Crespo, A., Masci, F. J., Padgett, D. L., Smylie, M. P. & Haegel, N. M. *Reduction algorithms for the multiband imaging photometer for spitzer*, 2005, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **117**, 503.
- Gordon, K. D., Engelbracht, C. W., Fadda, D., Stansberry, J., Wachter, S., Frayer, D. T., Rieke, G., Noriega-Crespo, A., Latter, W. B., Young, E., Neugebauer, G., Balog, Z., Beaman, J. W., Dole, H. A., Egami, E., Haller, E. E., Hines, D., Kelly, D., Marleau, F., Misselt, K., Morrison, J., Pérez-González, P., Rho, J. & Wheaton, W. A. *Absolute calibration and characterization of the multiband imaging photometer for spitzer. ii. 70 $\hat{I}_{\frac{1}{4}}m$ imaging*, 2007, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **119**, 1019–1037.
- Gorjian, V., Wright, E. L. & Chary, R. R. *Tentative detection of the cosmic infrared background at 2.2 and 3.5 microns using ground-based and space-based observations*, 2000, *ApJ*, **536**, 550.

- Gruber, D. E., Matteson, J. L., Peterson, L. E. & Jung, G. V. *The spectrum of diffuse cosmic hard x-rays measured with heao 1*, 1999, ApJ, **520**, 124–129.
- Hauser, M. G. & Dwek, E. *The cosmic infrared background : Measurements and implications*, 2001, ARA&A, **37**, 249.
- Hauser, M. G., Gillett, F. C., Low, F. J., Gautier, T. N., Beichman, C. A., Aumann, H. H., Neugebauer, G., Baud, B., Boggess, N. & Emerson, J. P. *Iras observations of the diffuse infrared background*, 1984, ApJ, **278**, L15.
- Hauser, M. G., Arendt, R. G., Kelsall, T., Dwek, E., Odegard, N., Weiland, J. L., Freudenreich, H. T., Reach, W. T., Silverberg, R. F., Moseley, S. H., Pei, Y. C., Lubin, P., Mather, J. C., Shafer, R. A., Smoot, G. F., Weiss, R., Wilkinson, D. T. & Wright, E. L. *The coBE diffuse infrared background experiment search for the cosmic infrared background. i. limits and detections*, 1998, ApJ, **508**, 25.
- Hickox, R. C. & Markevitch, M. *Absolute measurement of the unresolved cosmic x-ray background in the 0.5-8 keV band with chandra*, 2006, ApJ, **645**, 95–114.
- Jauzac, M., Dole, H. & Le Floch, E. *The cosmic far-infrared background buildup since redshift 2 at 70 and 160 microns in the cosmos and goods fields*. astro-ph/1009.0419, 2010.
- Kashlinsky, A. & Odenwald, S. *Clustering of the diffuse infrared light from the COBE DIRBE maps. iii. power spectrum analysis and excess isotropic component of fluctuations*, 2000, ApJ, **528**, 74.
- Kashlinsky, A., Odenwald, S., Mather, J., Skrutskie, M. F. & Cutri, R. M. *Detection of small-scale fluctuations in the near-infrared cosmic infrared background from long-exposure 2MASS fields*, 2002, ApJ, **579**, L53.
- Kashlinsky, A., Arendt, R. G., Mather, J. & Moseley, S. H. *Demonstrating the negligible contribution of optical HST ACS galaxies to source-subtracted cosmic infrared background fluctuations in deep Spitzer IRAC images*, 2007a, ApJ, **666**, L1–L4.
- Kashlinsky, A., Arendt, R. G., Mather, J. & Moseley, S. H. *Erratum : “new measurements of cosmic infrared background fluctuations from early epochs”*, 2007b, ApJ, **657**, L131–L131.
- Kashlinsky, A., Arendt, R. G., Mather, J. & Moseley, S. H. *New measurements of cosmic infrared background fluctuations from early epochs*, 2007c, ApJ, **654**, L5–L8.
- Kashlinsky, A. *Cosmic infrared background and early galaxy evolution [review article]*, 2005, Phys. Rep., **409**, 361.
- Kelsall, T., Weiland, J. L., Franz, B. A., Reach, W. T., Arendt, R. G., Dwek, E., Freudenreich, H. T., Hauser, M. G., Moseley, S. H., Odegard, N. P., Silverberg, R. F. & Wright, E. L. *The COBE diffuse infrared background experiment search for the cosmic infrared background. ii. model of the interplanetary dust cloud*, 1998, ApJ, **508**, 44.
- Kim, M., Wilkes, B. J., Kim, D. W., Green, P. J., Barkhouse, W. A., Lee, M. G., Silverman, J. D. & Tananbaum, H. D. *Chandra multiwavelength project x-ray point source number counts and the cosmic x-ray background*, 2007, ApJ, **659**, 29–51.
- King, A. J. & Rowan-Robinson, M. *Fitting optical source counts with an infrared-defined model : insights into galaxy evolution*, 2003, MNRAS, **339**, 260.
- Kneiske, T. & Dole, H. *A lower-limit flux for the extragalactic background light*, 2010, A&A, in press, ArXiv :1001.2132.
- Kneiske, T. M., Bretz, T., Mannheim, K. & Hartmann, D. H. *Implications of cosmological gamma-ray absorption. ii. modification of gamma-ray spectra*, 2004, A&A, **413**, 807–815.
- Knudsen, K. K., van Der Werf, P. P. & Kneib, J. P. *Probing the submillimetre number counts at f(850 μ m) ; 2mJy*. astro-ph/0712.1904, 2007.
- Kovacs, A., Omont, A., Beelen, A., Lonsdale, C., Polletta, M., Fiolet, N., Greve, T. R., Borys, C., Cox, P., de Breuck, C., Dole, H., Dowell, C. D., Farrah, D., Lagache, G., Menten, K. M., Bell, T. A. & Owen, F. *Far-infrared properties of Spitzer-selected luminous starbursts*. arXiv :1004.0819, 2010.
- Kurczynski, P. & Gawiser, E. *A simultaneous stacking and deblending algorithm for astronomical images*, 2010, AJ, **139**, 1592.
- Lagache, G., Abergel, A., Boulanger, F., Désert, F. X. & Puget, J. L. *First detection of the warm ionised medium dust emission. implication for the cosmic far-infrared background*, 1999, A&A, **344**, 322.
- Lagache, G., Haffner, L. M., Reynolds, R. J. & Tufte, S. L. *Evidence for dust emission in the warm ionised medium from WISE data*, 2000, A&A, **354**, 247.
- Lagache, G., Dole, H. & Puget, J. L. *Modelling infrared galaxy evolution using a phenomenological approach*, 2003, MNRAS, **338**, 555.
- Lagache, G., Dole, H., Puget, J. L., Perez-Gonzalez, P. G., Floch, E. L., Rieke, G. H., Papovich, C., Egami, E., Alonso-Herrero, A., Engelbracht, C. W., Gordon, K. D., Misselt, K. A. & Morrison, J. E. *Polycyclic aromatic hydrocarbon contribution to the infrared output energy of the universe at $z = 2$* , 2004, Astrophys. J. Suppl. Ser., **154**, 112.
- Lagache, G., Puget, J. L. & Dole, H. *Dusty infrared galaxies : Sources of the cosmic infrared background*, 2005, ARA&A, **43**, 727.
- Lagache, G., Bavouzet, N., Fernandez-Conde, N., Ponthieu, N., Rodet, T., Dole, H., Miville-Deschênes, M. A. & Puget, J. L. *Correlated anisotropies in the cosmic far-infrared background detected by the multiband imaging photometer for Spitzer : Constraint on the bias*, 2007, ApJ, **665**, L89–L92.
- Laureijs, R. *Euclid assessment study report for the ESA Cosmic Vision*. arXiv :0912.0914, 2009.

- Le Borgne, D., Elbaz, D., Ocvirk, P. & Pichon, C. *Cosmic star-formation history from a non-parametric inversion of infrared galaxy counts*, 2009, *A&A*, **504**, 727–740.
- Le Floch, E., Papovich, C., Dole, H., Bell, E. F., Lagache, G., Rieke, G. H., Egami, E., Pérez-González, P. G., Alonso-Herrero, A., Rieke, M. J., Blaylock, M., Engelbracht, C. W., Gordon, K. D., Hines, D. C., Misselt, K. A., Morrison, J. E. & Mould, J. *Infrared luminosity functions from the chandra deep field-south : The spitzer view on the history of dusty star formation at $0 < z < 1$* , 2005, *ApJ*, **632**, 169.
- Le Floch, E., Aussel, H., Ilbert, O., Riguccini, L., Frayer, D. T., Salvato, M., Arnouts, S., Surace, J., Feruglio, C., Rodighiero, G., Capak, P., Kartaltepe, J., Heinis, S., Sheth, K., Yan, L., McCracken, H. J., Thompson, D., Sanders, D., Scoville, N. & Koekemoer, A. *Deep spitzer 24um cosmos imaging. i. the evolution of luminous dusty galaxies : Confronting the models*, 2009, *ApJ*, **703**, 222.
- Levenson, L. R. & Wright, E. L. Probing the 3.6 micron cirb with spitzer in 3 dirbe dark spots. 0802.1239, 2008.
- Levy-Leblond, J. M. Pourquoi la nuit est-elle noire ? <http://www.fermedesetoiles.com/supports/2008/pourquoi-nuit-est-noire.pdf>, 2008.
- Madau, P. & Pozzetti, L. *Deep galaxy counts, extragalactic background light and the stellar baryon budget*, 2000, *MNRAS*, **312**, L9.
- Magdis, G. E., Rigopoulou, D., Huang, J. S., Fazio, G. G., Willner, S. P. & Ashby, M. L. N. *Irac photometric analysis and the mid-ir photometric properties of lyman-break galaxies*, 2008, *MNRAS*, **386**, 11–21.
- Magliocchetti, M., Silva, L., Lapi, A., De Zotti, G., Granato, G. L., Fadda, D. & Danese, L. *A highly obscured and strongly clustered galaxy population discovered with the spitzer space telescope*, 2007, *MNRAS*, **375**, 1121–1132.
- Magliocchetti, M., Cirasuolo, M., McLure, R. J., Dunlop, J. S., Almaini, O., Foucaud, S., De Zotti, G., Simpson, C. & Sekiguchi, K. *On the evolution of clustering of 24- μ m-selected galaxies*, 2008, *MNRAS*, **383**, 1131–1142.
- Magnelli, B., Elbaz, D., Chary, R. R., Dickinson, M., Le Borgne, D., Frayer, D. T. & Willmer, C. N. A. *The 0.4 μ m ; 1.3 star formation history of the universe as viewed in the far-infrared*, 2009, *A&A*, **496**, 57–75.
- Marsden, G., Ade, P. A. R., Bock, J. J., Chapin, E. L., Devlin, M. J., Dicker, S. R., Griffin, M., Gundersen, J. O., Halpern, M., Hargrave, P. C., Hughes, D. H., Klein, J., Mauskopf, P., Magnelli, B., Moncelsi, L., Netterfield, C. B., Ngo, H., Olmi, L., Pascale, E., Patanchon, G., Rex, M., Scott, D., Semisch, C., Thomas, N., Truch, M. D. P., Tucker, C., Tucker, G. S., Viero, M. P. & Wiebe, D. V. *Blast : Resolving the cosmic submillimeter background*, 2009, *ApJ*, **707**, 1729.
- Mather, J. C., Cheng, E. S., Cottingham, D. A., jr Eplee, R. E., Fixsen, D. J., Hewagama, T., Isaacman, R. B., Jensen, K. A., Meyer, S. S., Noerdlinger, P. D., Read, S. M., Rosen, L. P., Shafer, R. A., Wright, E. L., Bennett, C. L., Boggess, N. W., Hauser, M. G., Kelsall, T., jr Moseley, S. H., Silverberg, R. F., Smoot, G. F., Weiss, R. & Wilkinson, D. T. *Measurement of the cosmic microwave background spectrum by the coBE firas instrument*, 1994, *ApJ*, **420**, 439.
- Mather, J. C., Fixsen, D. J., Shafer, R. A., Mosier, C. & Wilkinson, D. T. *Calibrator design for the coBE far-infrared absolute spectrophotometer (firas)*, 1999, *ApJ*, **512**, 511–520.
- Matsumoto, T., Matsuura, S., Murakami, H., Tanaka, M., Freund, M., Lim, M., Cohen, M., Kawada, M. & Noda, M. *Infrared telescope in space observations of the near-infrared extragalactic background light*, 2005, *ApJ*, **626**, 31.
- Mattila, K. *Has the optical extragalactic background light been detected ?*, 2003, *ApJ*, **591**, 119.
- Miville-Deschênes, M. A., Lagache, G. & Puget, J. L. *Power spectrum of the cosmic infrared background at 60 and 100 μ m with iras*, 2002, *A&A*, **393**, 749.
- Miyaji, T., Ishisaki, Y., Ogasaka, Y., Ueda, Y., Freyberg, M. J., Hasinger, G. & Tanaka, Y. *The cosmic x-ray background spectrum observed with rosat and asca*, 1998, *A&A*, **334**, L13–L16.
- Moretti, A., Campana, S., Lazzati, D. & Tagliaferri, G. *The resolved fraction of the cosmic x-ray background*, 2003, *ApJ*, **588**, 696–703.
- Mushotzky, R. F., Cowie, L. L., Barger, A. J. & Arnaud, K. A. *Resolving the extragalactic hard x-ray background*, 2000, *Nature*, **404**, 459.
- Negrello, M., Perrotta, F., González-Nuevo, J., Silva, L., de Zotti, G., Granato, G. L., Baccigalupi, C. & Danese, L. *Astrophysical and cosmological information from large-scale submillimetre surveys of extragalactic sources*, 2007, *MNRAS*, **377**, 1557–1568.
- Nitschelm, C. L'énigme de l'obscurité du ciel nocturne (le paradoxe de chéseaux-olbers). pourquoi la nuit est-elle noire ? aspect historique. http://www.astrosurf.com/nitschelm/Nuit_noire.html, 2008.
- Oliver, S. J., Wang, L., Smith, A. J., Altieri, B., Amblard, A., Arumugam, V., Auld, R., Aussel, H., Babbedge, T., Blain, A., Bock, J., Boselli, A., Buat, V., Burgarella, D., Castro-Rodriguez, N., Cava, A., Chianial, P., Clements, D. L., Conley, A., Conversi, L., Cooray, A., Dowell, C. D., Dwek, E., Eales, S., Elbaz, D., Fox, M., Franceschini, A., Gear, W., Glenn, J., Griffin, M., Halpern, M., Hatziminaoglou, E., Ibar, E., Isaak, K., Ivison, R. J., Lagache, G., Levenson, L., Lu, N., Madden, S., Maffei, B., Mainetti, G., Marchetti, L., Mitchell-Wynne, K., Mortier, A. M. J., Nguyen, H. T., O'Halloran, B., Omont, A., Page, M. J., Panuzzo, P., Papageorgiou, A., Pearson, C. P., Perez-Fournon, I., Pohlen, M., Rawlings, J. I., Raymond, G., Rigopoulou, D., Rizzo, D., Roseboom, I. G., Rowan-Robinson, M., Sanchez Portal, M., Savage, R., Schulz, B., Scott, D., Seymour, N., Shupe, D. L., Stevens, J. A., Symeonidis, M., Trichas, M., Tugwell, K. E., Vaccari, M., Valiante, E., Valtchanov, I., Vieira, J. D., Vigroux, L., Ward, R., Wright, G., Xu, C. K. & Zemcov, M. *Hermes : Spire galaxy number counts at 250, 350 and 500 microns*. arXiv :1005.2184, 2010.

- Papovich, C., Dole, H., Egami, E., Floc'h, E. L., Perez-Gonzalez, P. G., Alonso-Herrero, A., Bai, L., Beichman, C. A., Blaylock, M., Engelbracht, C. W., Gordon, K. D., Hines, D. C., Misselt, K. A., Morrison, J. E., Mould, J., Muzerolle, J., Neugebauer, G., Richards, P. L., Rieke, G. H., Rieke, M. J., Rigby, J. R., Su, K. Y. L. & Young, E. T. *The 24 micron source counts in deep spitzer space telescope surveys*, 2004, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **154**, 70.
- Partridge, R. B. & Peebles, P. J. E. *Are young galaxies visible ? ii. the integrated background*, 1967, *ApJ*, **148**, 377.
- Percival, W. J., Nichol, R. C., Eisenstein, D. J., Frieman, J. A., Fukugita, M., Loveday, J., Pope, A. C., Schneider, D. P., Szalay, A. S., Tegmark, M., Vogeley, M. S., Weinberg, D. H., Zehavi, I., Bahcall, N. A., Brinkmann, J., Connolly, A. J. & Meiksin, A. *The shape of the sloan digital sky survey data release 5 galaxy power spectrum*, 2007, *ApJ*, **657**, 645–663.
- Pérez-González, P. G., Rieke, G. H., Egami, E., Alonso-Herrero, A., Dole, H., Papovich, C., Blaylock, M., Jones, J., Rieke, M., Rigby, J., Barmby, P., Fazio, G. G., Huang, J. & Martin, C. *Spitzer view on the evolution of star-forming galaxies from $z = 0$ to $z = 3$* , 2005, *ApJ*, **630**, 82.
- Primack, J. R., Bullock, J. S., Somerville, R. S. & Macminn, D. *Probing galaxy formation with tev gamma ray absorption*, 1999, *Astroparticle Physics*, **11**, 93.
- Primack, J. R., Bullock, J. S. & Somerville, R. S. *Observational gamma-ray cosmology*, Dans Aharonian, F. A., Voelk, H. J. & Horns, D, editeurs, *HIGH ENERGY GAMMA-RAY ASTRONOMY : 2nd International Symposium on High Energy Gamma-Ray Astronomy*, volume 745, pages 23–33. AIP, 2005.
- Puget, J. L., Abergel, A., Bernard, J. P., Boulanger, F., Burton, W. B., Désert, F. X. & Hartmann, D. *Tentative detection of a cosmic far-infrared background with coBE.*, 1996, *A&A*, **308**, L5.
- Punch, M., Akerlof, C. W., Cawley, M. F., Chantell, M., Fegan, D. J., Fennell, S., Gaidos, J. A., Hagan, J., Hillas, A. M., Jiang, Y., Kerrick, A. D., Lamb, R. C., Lawrence, M. A., Lewis, D. A., Meyer, D. I., Mohanty, G., O'Flaherty, K. S., Reynolds, P. T., Rovero, A. C., Schubnell, M. S., Sembroski, G., Weekes, T. C. & Wilson, C. *Detection of tev photons from the active galaxy markarian 421*, 1992, *Nature*, **358**, 477.
- Raue, M., Kneiske, T. & Mazin, D. *First stars and the extragalactic background light : how recent gamma-ray observations constrain the early universe*, 2009, *A&A*, **498**, 25–35.
- Refregier, A., Amara, A., Kitching, T. D., Rassat, A., Scaramella, R., Weller, J. & f. t. Euclid Imaging Consortium. *Euclid imaging consortium science book*. arXiv :1001.0061, 2010.
- Renault, C., Barrau, A., Lagache, G. & Puget, J. L. *New constraints on the cosmic mid-infrared background using tev gamma-ray astronomy*, 2001, *A&A*, **371**, 771.
- Ressell, M. T. & Turner, M. S. *The grand unified photon spectrum : A coherent view of the diffuse extragalactic background radiation*, 1990, *Communications in Astrophysics*, **14**, 323.
- Riazuelo, A. *Retour sur le paradoxe d'olbers*. <http://www.planck.fr/article383.html>, 2005.
- Rowan-Robinson, M., Babbedge, T., Surace, J., Shupe, D., Fang, F., Lonsdale, C., Smith, G., Polletta, M., Siana, B., Gonzalez-Solares, E., Xu, K., Owen, F., Davoodi, P., Dole, H., Domingue, D., Efstathiou, A., Farrah, D., Fox, M., Franceschini, A., Frayer, D., Hatziminaoglou, E., Masci, F., Morrison, G., Nandra, K., Oliver, S., Onyett, N., Padgett, D., Perez-Fournon, I., Serjeant, S., Stacey, G. & Vaccari, M. *Spectral energy distributions and luminosities of galaxies and active galactic nuclei in the spitzer wide-area infrared extragalactic (swire) legacy survey*, 2005, *AJ*, **129**, 1183.
- Rowan-Robinson, M. *A new model for infrared and submillimetre counts*, 2009, *MNRAS*, **394**, 117–123.
- Sajina, A., Scott, D., Dennefeld, M., Dole, H., Lacy, M. & Lagache, G. *The 1-1000 μ m spectral energy distributions of far-infrared galaxies*, 2006, *MNRAS*, **369**, 939.
- Santos, M. R., Bromm, V. & Kamionkowski, M. *The contribution of the first stars to the cosmic infrared background*, 2002, *MNRAS*, **336**, 1082–1092.
- Schroedter, M. *Upper limits on the extragalactic background light from the very high energy gamma-ray spectra of blazars*, 2005, *ApJ*, **628**, 617.
- Serjeant, S., Mortier, A. M. J., Ivison, R. J., Egami, E., Rieke, G. H., Willner, S. P., Rigopoulou, D., Alonso-Herrero, A., Barmby, P., Bei, L., Dole, H., Engelbracht, C. W., Fazio, G. G., Floc'h, E. L., Gordon, K. D., Greve, T. R., Hines, D. C., Huang, J. S., Misselt, K. A., Miyazaki, S., Morrison, J. E., Papovich, C., Perez-Gonzalez, P. G., Rieke, M. J., Rigby, J. & Wilson, G. *Submillimeter detections of spitzer space telescope galaxy populations*, 2004, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **154**, 118.
- Shupe, D. L., Rowan-Robinson, M., Lonsdale, C. J., Masci, F., Evans, T., Fang, F., Oliver, S., Vaccari, M., Rodighiero, G., Padgett, D., Surace, J. A., Xu, C. K., Berta, S., Pozzi, F., Franceschini, A., Babbedge, T., Gonzalez-Solares, E., Siana, B. D., Farrah, D., Frayer, D. T., Smith, H. E., Polletta, M., Owen, F. & PÄ©rez-Fournon, I. *Galaxy counts at 24 μ m in the swire fields*, 2008, *AJ*, **135**, 1050–1056.
- Sirothia, S. K., Dennefeld, M., Saikia, D. J., Dole, H., Riquebourg, F. & Roland, J. *325-mhz observations of the elais-n1 field using the giant metrewave radio telescope*, 2009, *MNRAS*, **395**, 269–281.
- Smail, I., Ivison, R. J., Blain, A. W. & Kneib, J. P. *The nature of faint submillimetre-selected galaxies*, 2002, *MNRAS*, **331**, 495.
- Soifer, B. T. & Neugebauer, G. *The properties of infrared galaxies in the local universe*, 1991, *AJ*, **101**, 354.
- Stecker, F. W. & Jager, O. C. D. *On the absorption of high-energy gamma rays by intergalactic infrared radiation*, 1997, *ApJ*, **476**, 712.

- Stecker, F. W., Puget, J. L. & Fazio, G. G. *The cosmic far-infrared background at high galactic latitudes*, 1977, ApJ, **214**, L51.
- Stecker, F. W., Malkan, M. A. & Scully, S. T. *Intergalactic photon spectra from the far-ir to the uv lyman limit for $0 < z < 6$ and the optical depth of the universe to high-energy gamma rays*, 2006, ApJ, **648**, 774–783.
- Strong, A. W., Moskalenko, I. V. & Reimer, O. *A new determination of the extragalactic diffuse gamma-ray background from egret data*, 2004, ApJ, **613**, 956.
- Swinyard, B., Nakagawa, T., Merken, P., Royer, P., Souverijns, T., Vandenbussche, B., Waelkens, C., Davis, P., Di Francesco, J., Halpern, M., Houde, M., Johnstone, D., Joncas, G., Naylor, D., Plume, R., Scott, D., Abergel, A., Bensammar, S., Braine, J., Buat, V., Burgarella, D., Cais, P., Dole, H., Duband, L., Elbaz, D., Gerin, M., Giard, M., Goicoechea, J., Joblin, C., Jones, A., Kneib, J. P., Lagache, G., Madden, S., Pons, R., Pajot, F., Rambaud, D., Ravera, L., Ristorcelli, I., Rodriguez, L., Vives, S., Zavagno, A., Geis, N., Krause, O., Lutz, D., Poglitsch, A., Raab, W., Stegmaier, J., Sturm, E., Tuffs, R., Lee, H. M., Koo, B. C., Im, M., Pak, S., Han, W., Park, J. H., Nam, U. W., Jin, H., Lee, D. H., Yuk, I. S., Lee, S., Aikawa, Y., Arimoto, N., Doi, Y., Enya, K., Fukagawa, M., Furusho, R., Hasegawa, S., Hayashi, M., Honda Kanagawa, M., Ida, S., Imanishi, Masatoshi, i. Inutsuka, S., Izumiura, H., Kamaya, H., Kaneda, H., Kasuga, T., Katata, H., Kawabata, K., Kawada, M., Kawakita, H., Kii, T., Koda, J., Kodama, T., Kokubo, E., Komatsu, . K., Matsuhara, H., Matsumoto, T., Matsuura, S., Miyata, T., Miyata, M. H., Nagata, H., Nagata, T., Nakajima, T., Naoto, K., Nishi, R., Noda, A., Okamoto, A., Okamoto, Y. K., Omukai, K., Onaka, T., Ootsubo, T., Ouchi, M., Saito, H., Sato, Y., Sako, S., Sekiguchi, T., Shibai, H., Sugita, H., Sugitani, K., Susa, H., s. Pyo, T., Tamura, M., Ueda, Y., Ueno, M., Wada, T., Watanabe, J., Yamada, T., Yamamura, I., Yoshida, N., Yoshimi, K., Yui, Y., Benedettini, M., Cerulli, R., Di Giorgio, A., Molinari, S., Orfei, R., Pezzuto, S., Piazzo, L., Saraceno, P., Spinoglio, L., de Graauw, T., de Korte, P., Helmich, F., Hoevers, H., Huisman, R., Shipman, R., van Der Tak, F., van Der Werf, P., Wild, W., Acosta-Pulido, J., Cernicharo, J., Herreros, J., Martin-Pintado, J., Najarro, F., Perez-Fourmon, I., Ramon Pardo, J., Gomez, F., Castro Rodriguez, N., Ade, P., Barlow, M., Clements, D., Ferlet, M., Fraser, H., Griffin, D., Griffin, M., Hargrave, P., Isaak, K., Ivison, R., Mansour, M., Lanieste, J., Maukopf, P., Morozov, D., Oliver, S., Orlando, A., Page, M., Popescu, C., Serjeant, S., Sudiwala, R., Rigopoulou, D., Walker, I., White, G., Viti, S., Winter, B., Bock, J., Bradford, M., Harwit, M. & Holmes, W. *The space infrared telescope for cosmology and astrophysics : Spica a joint mission between jaxa and esa*, 2009, Experimental Astronomy, **23**, 193–219.
- Takeuchi, T. T., Ishii, T. T., Dole, H., Dennefeld, M., Lagache, G. & Puget, J. L. *The iso 170 $\hat{?}$ luminosity function of galaxies*, 2006, A&A, **448**, 525.
- Tegmark, M., Strauss, M. A., Blanton, M. R., Abazajian, K., Dodelson, S., Sandvik, H., Wang, X., Weinberg, D. H., Zehavi, I., Bahcall, N. A., Hoyle, F., Schlegel, D., Scoccimarro, R., Vogeley, M. S., Berlind, A., Budavari, T. A., Connolly, A., Eisenstein, D. J., Finkbeiner, D., Frieman, J. A., Gunn, J. E., Hui, L., Jain, B., Johnston, D., Kent, S., Lin, H., Nakajima, R., Nichol, R. C., Ostriker, J. P., Pope, A., Scranton, R., Seljak, U. A., Sheth, R. K., Stebbins, A., Szalay, A. S., Szapudi, I. A., Xu, Y., Annis, J., Brinkmann, J., Burles, S., Castander, F. J., Csabai, L., Loveday, J., Doi, M., Fukugita, M., Gillespie, B., Hennessy, G., Hogg, D. W., Ivezi, A., Knapp, G. R., Lamb, D. Q., Lee, B. C., Lupton, R. H., McKay, T. A., Kunszt, P., Munn, J. A., O'Connell, L., Peoples, J., Pier, J. R., Richmond, M., Rockosi, C., Schneider, D. P., Stoughton, C., Tucker, D. L., Vanden Berk, D. E., Yanny, B. & York, D. G. *Cosmological parameters from sdss and wmap*, 2004, Phys. Rev. D, **69**, 3501.
- Thompson, R. I., Eisenstein, D., Fan, X., Rieke, M. & Kennicutt, R. C. *Constraints on the cosmic near-infrared background excess from nicmos deep field observations*, 2007a, ApJ, **657**, 669–680.
- Thompson, R. I., Eisenstein, D., Fan, X., Rieke, M. & Kennicutt, R. C. *Evidence for a $z > 8$ origin of the source-subtracted near-infrared background*, 2007b, ApJ, **666**, 658–662.
- Thompson, R. I. *Star formation history and other properties of the northern hubble deep field*, 2003, ApJ, **596**, 748.
- Tyler, K. D., Floc'h, E. L., Rieke, G. H., Dey, A., Desai, V., Brand, K., Borys, C., Jannuzi, B. T., Armus, L., Dole, H., Papovich, C., Brown, M. J. I., Blaylock, M., Higdon, S. J. U., Higdon, J. L., Charmandaris, V., Ashby, M. L. N. & Smith, H. A. *Spitzer 70/160 $1\frac{1}{4}$ m observations of high-redshift ulirgs and hylirgs in the boA¶tes field*, 2009, ApJ, **691**, 1846.
- Valiante, E., Lutz, D., Sturm, E., Genzel, R. & Chapin, E. L. *A backward evolution model for infrared surveys : The role of agn- and color- $l_{sub\text{tir}}/sub_c$ distributions*, 2009, ApJ, **701**, 1814.
- Vecchi, A., Molendi, S., Guainazzi, M., Fiore, F. & Parmar, A. N. *The beposax 1-8 kev cosmic background spectrum*, 1999, A&A, **349**, L73–L76.
- Vieira, J. D., Crawford, T. M., Switzer, E. R., Ade, P. A. R., Aird, K. A., Ashby, M. L. N., Benson, B. A., Bleem, L. E., Brodwin, M., Carlstrom, J. E., Chang, C. L., Cho, H. H. M., Crites, A. T., de Haan, T., Dobbs, M. A., Everett, W., George, E. M., Gladders, M., Hall, N. R., Halverson, N. W., High, F. W., Holder, G. P., Holzappel, W. L., Hrubes, J. D., Joy, M., Keisler, R., Knox, L., Lee, A. T., Leitch, E. M., Lueker, M., Marrone, D. P., McIntyre, V., McMahon, J. J., Mehl, J., Meyer, S. S., Mohr, J. J., Montroy, T. E., Padin, S., Plagge, T., Pryke, C., Reichardt, C. L., Ruhl, J. E., Schaffer, K. K., Shaw, L., Shirokoff, E., Spieler, H. G., Stalder, B., Staniszewski, Z., Stark, A. A., Vanderlinde, K., Walsh, W., Williamson, R., Yang, Y., Zahn, O. & Zenteno, A. *Extragalactic millimeter-wave sources in south pole telescope survey data : source counts, catalog, and statistics for an 87 square-degree field*. arXiv :0912.2338, 2009.
- Watanabe, K., Hartmann, D. H., Leising, M. D., The, L. S., Share, G. H. & Kinzer, R. L. *The cosmic gamma ray background from supernovae*, Dans Charles D. Dermer, M. S. S. & Kurfess, J. D, editeurs, *Proceedings of the Fourth Compton Symposium*, page 1223, AIP Conference Proceedings, 1997. AIP Conference Proceedings.
- Wesson, P. S., Valle, K. & Stabell, R. *The extragalactic background light and a definitive resolution of olbers's paradox*, 1987, ApJ, **317**, 601–606.
- Wesson, P. S. *Olbers's paradox and the spectral intensity of the extragalactic background light*, 1991, ApJ, **367**, 399–406.
- Windhorst, R. A., Fomalont, E. B., Partridge, R. B. & Lowenthal, J. D. *Microjansky source counts and spectral indices at 8.44 ghz*, 1993, ApJ, **405**, 498.
- Wright, E. L. *Dirbe minus 2mass : Confirming the cosmic infrared background at 2.2 microns*, 2001, ApJ, **553**, 538.

- Wright, E. L. *Cobe observations of the cosmic infrared background*, 2004, *New Astronomy Reviews*, **48**, 465.
- Xu, C. K., Donas, J., Arnouts, S., Wyder, T. K., Seibert, M., Iglesias-Páramo, J., Blaizot, J., Small, T., Milliard, B., Schiminovich, D., Martin, D. C., Barlow, T. A., Bianchi, L., Byun, Y. I., Forster, K., Friedman, P. G., Heckman, T. M., Jelinsky, P. N., Lee, Y. W., Madore, B. F., Malina, R. F., Morrissey, P., Neff, S. G., Rich, R. M., Siegmund, O. H. W., Szalay, A. S. & Welsh, B. Y. *Number counts of galex sources in far-ultraviolet (1530 Å) and near-ultraviolet (2310 Å) bands*, 2005, *ApJ*, **619**, L11–L14.
- Zheng, X. Z., Dole, H., Bell, E. F., Le Floch, E., Rieke, G. H., Rix, H. W. & Schiminovich, D. *Infrared spectral energy distributions of $z \approx 0.7$ star-forming galaxies*, 2007, *ApJ*, **670**, 301.

Annexes

Annexe A

Liste des publications

1. *The Cosmic Infrared Background Resolved by Spitzer. Contributions of Mid-Infrared Galaxies to the Far-Infrared Background.*

H. Dole, G. Lagache, J.-L. Puget, K. I. Caputi, N. Fernández-Conde, E. Le Floch, C. Papovich, P. G. Pérez-González, G. H. Rieke, M. Blaylock, 2006, *A&A*, 451, 417.

2. *Far Infrared Source Counts at 70 and 160 microns in Spitzer Deep Surveys*

H. Dole, E. Le Floch, P. G. Perez-Gonzalez, C. Papovich, E. Egami, G. Lagache, A. Alonso-Herrero, C. W. Engelbracht, K. D. Gordon, D. C. Hines, O. Krause, K. A. Misselt, J. E. Morrison, M. J. Rieke, J. R. Rigby, E. T. Young, L. Bai, M. Blaylock, G. Neugebauer, C. A. Beichman, D. T. Frayer, J. R. Mould, P. L. Richards, 2004, *ApJS*, 154, 87.

3. *Confusion of Extragalactic Sources in the Mid and Far Infrared : Spitzer and Beyond*

H. Dole, G. H. Rieke, G. Lagache, J.-L. Puget, et al. [and 22 co-authors], 2004, *ApJS*, 154, 93.

4. *Predictions for Cosmological Infrared Surveys from Space with the Multiband Imaging Photometer for SIRTf (MIPS)*

H. Dole, G. Lagache, J.-L. Puget, 2003, *ApJ*, 585, 617

5. *FIRBACK : III. Source Counts and Cosmological Implications of the 170 μm ISO Deep Survey*

H. Dole, R. Gispert, G. Lagache, J.-L. Puget, F. R. Bouchet, C. Cesarsky, P. Ciliegi, D. L. Clements, M. Dennefeld, F.-X. Désert, D. Elbaz, A. Franceschini, B. Guiderdoni, M. Harwit, D. Lemke, A. F. M. Moorwood, S. Oliver, W. T. Reach, M. Rowan-Robinson, M. Stickel, 2001, *A&A*, 372, 364

6. *Simulations of the cosmic infrared and submillimeter background for future large surveys. I. Presentation and first application to Herschel/SPIRE and Planck/HFI*

Fernandez-Conde, N. ; Lagache, G. ; Puget, J.-L. ; **Dole, H.**, 2008, *A&A*, 481, 885

7. *Estimating the total infrared luminosity of galaxies up to $z \sim 2$ from mid- and far-infrared observations*

Bavouzet, N. ; **Dole, H.** ; Le Floch, E. ; Caputi, K. I. ; Lagache, G. ; Kochanek, C. S., 2008, *A&A*, 479, 83

8. *Infrared Spectral Energy Distributions of $z \sim 0.7$ Star-forming Galaxies*

Zheng, Xian Zhong ; **Dole, Hervé** ; Bell, Eric F. ; Le Floch, Emeric ; Rieke, George H. ; Rix, Hans-Walter ; Schiminovich, David, 2007, *A&A*, 670, 301

9. *Correlated Anisotropies in the Cosmic Far-Infrared Background Detected by the Multiband Imaging Photometer for Spitzer : Constraint on the Bias*

Lagache, G. ; Bavouzet, N. ; Fernandez-Conde, N. ; Ponthieu, N. ; Rodet, T. ; **Dole, H.** ; Miville-Deschênes, M.-A. ; Puget, J.-L., 2007, *ApJ*, 665, 89

10. *The Infrared Luminosity Function of Galaxies at Redshifts $z = 1$ and $z = 2$ in the GOODS Fields*
Caputi, K. I.; Lagache, G.; Yan, Lin; **Dole, H.**; Bavouzet, N.; Le Floch, E.; Choi, P. I.; Helou, G.; Reddy, N., 2007, ApJ, 660, 97
11. *The role of the LIRG and ULIRG phases in the evolution of Ks-selected galaxies*
K. I. Caputi, **H. Dole**, G. Lagache, G., R. J. McLure, R. J., J. S. Dunlop, J-L. Puget, E. Le Floch, P. G. Perez-Gonzalez, 2006, A&A, 454, 143
12. *The 1-1000 μ m spectral energy distributions of far-infrared galaxies*
A. Sajina, D. Scott, M. Dennefeld, **H. Dole**, M. Lacy, G. Lagache, 2006, MNRAS, 369, 939
13. *The ISO 170 μ m luminosity function of galaxies*
T.T. Takeuchi, T. T. Ishii, **H. Dole**, M. Dennefeld, G. Lagache, J.-L. Puget, 2006, A&A, 448, 525
14. *Linking Stellar Mass and Star Formation in Spitzer MIPS 24 μ m Galaxies*
Caputi, K. I., **Dole, H.**, Lagache, G., McLure, R. J., Puget, J.-L., Rieke, G. H., Dunlop, J. S., Le Floch, E., Papovich, C., Pérez-González, P. G., 2006, ApJ, 637, 727
15. *Infrared Luminosity Functions from the Chandra Deep Field-South : The Spitzer View on the History of Dusty Star Formation at $0 < z < 1$*
Le Floch, Emeric; Papovich, Casey; **Dole, Hervé**; Bell, Eric F.; Lagache, Guilaine; Rieke, George H.; Egami, Eiichi; Pérez-González, Pablo G.; Alonso-Herrero, Almudena; Rieke, Marcia J., [and 7 co-authors] 2005, ApJ, 632, 169
16. *DUSTY INFRARED GALAXIES : Sources of the Cosmic Infrared Background*
Lagache, Guilaine; Puget, Jean-Loup; **Dole, Hervé**, 2005, Ann. Rev. Astron. Astrop., 43, 727
17. *Observational evidence for the presence of PAHs in distant Luminous Infrared Galaxies using ISO and Spitzer*
Elbaz, D.; Le Floch, E.; **Dole, H.**; Marcillac, D., 2005, A&A, 434, 1
18. *The 24 μ m Source Counts in Deep Spitzer Surveys*
C. Papovich, **H. Dole**, E. Egami et al. [and 10 co-authors], 2004, ApJS, 154, 70.
19. *Spitzer Observations of the SCUBA/VLA Sources in the Lockman Hole : Star Formation History of Infrared Luminous Galaxies*
E. Egami, **H. Dole**, J. Huang et al. [and 24 co-authors], 2004, ApJS, 154, 130.
20. *PAH contribution to the infrared output energy of the Universe at $z \sim 2$*
G. Lagache, **H. Dole**, J-L. Puget, P. G. Perez-Gonzalez, E. Le Floch, G. H. Rieke, C. Papovich, E. Egami, A. Alonso-Herrero, C. W. Engelbracht, K. D. Gordon, K. A. Misselt, J. E. Morrison, 2004, ApJS, 154, 112.
21. *Modelling the infrared galaxy evolution using a phenomenological approach*
G. Lagache, **H. Dole**, J-L. Puget, 2003, MNRAS, 338, 555
22. *FIRBACK II. Data Processing and Calibration of the 170 μ m ISO Cosmological Deep Survey*
G. Lagache & **H. Dole**, 2001, A&A, 372, 702
23. *325-MHz observations of the ELAIS-N1 field using the Giant Metrewave Radio Telescope*
Sirothia, S. K.; Dennefeld, M.; Saikia, D. J.; **Dole, H.**; Ricquebourg, F.; Roland, J., 2009, MNRAS, 395, 269

24. *The molecular hydrogen explorer H2EX*

Boulanger, F. ; Maillard, J. P. ; Appleton, P. ; Falgarone, E. ; Lagache, G. ; Schulz, B. ; Wakker, B. P. ; Bresnan, A. ; Cernicharo, J. ; Charmandaris, V. ; Drissen, L. ; Helou, G. ; Henning, T. ; Lim, T. L. ; Valentijn, E. A. ; Abergel, A. ; Bourlot, J. Le ; Bouzit, M. ; Cabrit, S. ; Combes, F. ; Deharveng, J. M. ; Desmet, P. ; **Dole, H.** ; [and 54 co-authors], 2008, *Experimental Astronomy*, 23, 277

25. *The space infrared telescope for cosmology and astrophysics : SPICA A joint mission between JAXA and ESA*

Swinyard, Bruce ; Nakagawa, Takao ; Merken, Patrick ; Royer, Pierre ; Souverijns, Tim ; Vandembussche, Bart ; Waelkens, Christoffel ; Davis, Peter ; Di Francesco, James ; Halpern, Mark ; Houde, Martin ; Johnstone, Doug ; Joncas, Gilles ; Naylor, David ; Plume, Rene ; Scott, Douglas ; Abergel, A. ; Bensammar, S. ; Braine, J. ; Buat, V. ; Burgarella, D. ; Cais, Ph. ; **Dole, H.** ; [and 155 co-authors], 2008, *Experimental Astronomy*, 23, 193

26. *Spitzer 70/160um observations of high-redshift ULIRGs and HyLIRGs in the Bootes field*

Tyler, Krystal D. ; Floc'h, Emeric Le ; Rieke, George H. ; Dey, Arjun ; Desai, Vandana ; Brand, Kate ; Borys, Colin ; Jannuzi, Buell T. ; Armus, Lee ; **Dole, Hervé** ; [and 8 coauthors], 2009, *ApJ*, 691, 1846

27. *Submillimeter observations of the J2142-4423 Ly-alpha protocluster at z = 2.38*

Beelen, A. ; Omont, A. ; Bavouzet, N. ; Kovács, A. ; Lagache, G. ; De Breuck, C. ; Weiss, A. ; Menten, K. M. ; Colbert, J. W. ; **Dole, H.** ; Siringo, G. ; Kreysa, E., 2008, *A&A*, 485, 645

28. *Absolute Calibration and Characterization of the Multiband Imaging Photometer for Spitzer. II. 70 micron Imaging*

Gordon, Karl D. ; Engelbracht, Charles W. ; Fadda, Dario ; Stansberry, John ; Wachter, Stefanie ; Frayer, Dave T. ; Rieke, George ; Noriega-Crespo, Alberto ; Latter, William B. ; Young, Erick ; Neugebauer, Gerry ; Balog, Zoltan ; Beeman, Jeffrey W. ; **Dole, Hervé** ; Egami, Eiichi ; Haller, Eugene E. ; Hines, Dean ; Kelly, Doug ; Marleau, Francine ; Misselt, Karl ; Morrison, Jane ; Pérez-González, Pablo ; Rho, Jeonghee ; Wheaton, Wm. A. 2007, *PASP*, 119, 1019

29. *Far-Infrared Characterization of an Ultraluminous Starburst Associated with a Massively Accreting Black Hole at z=1.15*

Le Floc'h, E. ; Willmer, C. N. A. ; Noeske, K. ; Konidakis, N. P. ; Laird, E. S. ; Koo, D. C. ; Nandra, K. ; Bundy, K. ; Salim, S. ; Maiolino, R. ; Conselice, C. J. ; Lotz, J. M. ; Papovich, C. ; Smith, J. D. ; Bai, L. ; Coil, A. L. ; Barmby, P. ; Ashby, M. L. N. ; Huang, J.-S. ; Blaylock, M. ; Rieke, G. ; Newman, J. A. ; Ivison, R. ; Chapman, S. ; **Dole, H.** ; Egami, E. ; Elbaz, D., 2007, *ApJ*, 660, L65

30. *Spitzer Observations of the Brightest Galaxies in X-Ray-Luminous Clusters*

Egami, E. ; Misselt, K. A. ; Rieke, G. H. ; Wise, M. W. ; Neugebauer, G. ; Kneib, J.-P. ; Le Floc'h, E. ; Smith, G. P. ; Blaylock, M. ; **Dole, H.** ; Frayer, D. T. ; Huang, J.-S. ; Krause, O. ; Papovich, C. ; Pérez-González, P. G. ; Rigby, J. R., 2006, *ApJ*, 647, 922

31. *Infrared Power-Law Galaxies in the Chandra Deep Field-South : Active Galactic Nuclei and Ultraluminous Infrared Galaxies*

Alonso-Herrero, A. ; Perez-Gonzalez, P. G. ; Alexander, D. M. ; Rieke, G. H. ; Rigopoulou, D. ; Le Floc'h, E. ; Barmby, P. ; Papovich, C. ; Rigby, J. R. ; Bauer, F. E. ; Brandt, W. N. ; Egami, E. ; Willner, S. P. ; **Dole, H.** ; Huang, J.-S., 2006, *ApJ*, 670, 167

32. *Spitzer 70 and 160 $\hat{I}_{\frac{1}{4}}m$ Observations of the Extragalactic First Look Survey*

Frayser, D. T. ; Fadda, D. ; Yan, L. ; Marleau, F. R. ; Choi, P. I. ; Helou, G. ; Soifer, B. T. ; Appleton, P. N. ; Armus, L. ; Beck, R. ; **Dole, H.** ; Engelbracht, C. W. ; Fang, F. ; Gordon, K. D. ; Heinrichsen, I. ; Henderson, D. ; Hesselroth, T. ; Im, M. ; Kelly, D. M. ; Lacy, M. ; Laine, S. ; Latter, W. B. ; Mahoney, W. ; Makovoz, D. ; Masci, F. J. ; Morrison, J. E. ; Moshir, M. ; Noriega-Crespo, A. ; Padgett, D. L. ; Pesenson,

M. ; Shupe, D. L. ; Squires, G. K. ; Storrie-Lombardi, L. J. ; Surace, J. A. ; Teplitz, H. I. ; Wilson, G., 2006, AJ, 131, 250

33. *Spitzer View on the Evolution of Star-forming Galaxies from $z=0$ to $z\sim 3$*

Pérez-González, Pablo G. ; Rieke, George H. ; Egami, Eiichi ; Alonso-Herrero, Almudena ; **Dole, Hervé** ; Papovich, Casey ; Blaylock, Myra ; Jones, Jessica ; Rieke, Marcia ; Rigby, Jane ; Barmby, Pauline ; Fazio, Giovanni G. ; Huang, Jiasheng ; Martin, Christopher, 2005, ApJ, 630, 82

34. *FIRBACK. IV. Towards the nature of the 170 μm source population*

Dennefeld, M. ; Lagache, G. ; Mei, S. ; Ciliegi, P. ; **Dole, H.** ; Mann, R. G. ; Taylor, E. L. ; Vaccari, M., 2005, A&A, 440, 5

35. *Properties of FIRBACK-ELAIS 175- $\hat{I}_{\frac{1}{4}}^1$ m sources in the ELAIS N2 region*

Taylor, E. L. ; Mann, R. G. ; Efstathiou, A. N. ; Babbedge, T. S. R. ; Rowan-Robinson, M. ; Lagache, G. ; Lawrence, A. ; Mei, S. ; Vaccari, M. ; HÃ©raudeau, Ph. ; Oliver, S. J. ; Dennefeld, M. ; Perez-Fournon, I. ; Serjeant, S. ; González-Solares, E. ; Puget, J.-L. ; **Dole, H.** ; Lari, C., 2005, MNRAS, 361, 1352

36. *Reduction Algorithms for the Multiband Imaging Photometer for Spitzer*

Gordon, Karl D. ; Rieke, George H. ; Engelbracht, Charles W. ; Muzerolle, James ; Stansberry, John A. ; Misselt, Karl A. ; Morrison, Jane E. ; Cadien, James ; Young, Erick T. ; **Dole, Hervé** ; Kelly, Douglas M. ; Alonso-Herrero, Almudena ; Egami, Eiichi ; Su, Kate Y. L. ; Papovich, Casey ; Smith, Paul S. ; Hines, Dean C. ; Rieke, Marcia J. ; Blaylock, Myra ; Pérez-González, Pablo G. ; Le Floch, Emeric ; Hinz, Joanna L. ; Latter, William B. ; Hesselroth, Ted ; Frayer, David T. ; Noriega-Crespo, Alberto ; Masci, Frank J. ; Padgett, Deborah L. ; Smylie, Matthew P. ; Haegel, Nancy M., 2005, PASP, 117, 503

37. *Spectral Energy Distribution and Luminosities of Galaxies and Active Galactic Nuclei in the Spitzer Wide Area Infrared Extragalactic (SWIRE) Legacy Survey*

M. Rowan-Robinson, T. Babbedge, J. Surace, D. Shupe, F. Fang, C. Lonsdale, G. Smith, M. Polletta, B. Siana, E. Gonzalez-Solares, K. Xu, F. Owen, P. Davoodi, **H. Dole**, et al., 2005, AJ, 129, 1183

38. *Spitzer and Hubble Space Telescope Constraints on the Physical Properties of the $z \sim 7$ Galaxy Strongly Lensed by A2218*

E. Egami, J-P. Kneib, G. H. Rieke, R. S. Ellis, J. Richard, J. Rigby, C. Papovich, D. Starck, M. R. Santos, J-S. Huang, **H. Dole**, et al., 2005, ApJ, 618, L5

39. *Identification of Luminous Infrared Galaxies at $1 < z < 2.5$*

E Le Floch, P. G. Pérez-González, G. H. Rieke, C. Papovich, J-S. Huang, P. Barmby, **H. Dole**, et al., 2004, ApJ, 154, 170

40. *The Nature of Luminous X-Ray Sources with Mid-Infrared Counterparts*

A. Alonso-Herrero, P. G. Pérez-González, J. Rigby, G. H. Rieke, E. Le Floch, P. Barmby, M. J. Page, C. Papovich, **H. Dole**, et al. [and 22 co-authors], 2004, ApJ, 154, 155

41. *Spitzer Observations of MAMBO Galaxies : Weeding Out Active Nuclei in Starbursting Protoellipticals*

R. J. Ivison, T. R. Greve, S. Serjeant, F. Bertoldi, E. Egami, A. M. J. Mortier, A. Alonso-Herrero, P. Barmby, L. Bei, **H. Dole**, et al. [and 19 co-authors], 2004, ApJ, 154, 118

42. *Submillimeter Detections of Spitzer Space Telescope Galaxy Populations*

S. Serjeant, A. M. J. Mortier, R. J. Ivison, E. Egami, G. H. Rieke, S. P. Willner, D. Rigopoulou, A. Alonso-Herrero, P. Barmby, L. Bei, **H. Dole**, et al. [and 15 co-authors], 2004, ApJ, 154, 118

43. *Extremely red Objects in the Lockman Hole*

G. Wilson, J-S. Huang, P. G. Pérez-González, E. Egami, R. J. Ivison, J. R. Rigby, A. Alonso-Herrero, P. Barmby, **H. Dole**, et al. [and 15 co-authors], 2004, ApJ, 154, 107

44. *First Insights into the Spitzer Wide-Area Infrared Extragalactic Legacy Survey (SWIRE) Galaxy Populations*

C. J. Lonsdale, M. Polleta, J. Surace, D. Shupe, F. Fang, K. C. Xu, H. E. Smith, B. Siana, M. Rowan-Robinson, T. Babbege, S. Oliver, F. Pozzi, P. Davoodi, F. Owen, D. Padgett, D. Frayer, t, Jarrett, F. Masci, J. O'Linger, T. Conrow, D. Farrah, G. Morrison, N. Gautier, A. Franceshini, S. Berta, I. Perez-Fournon, E. Hatziminaoglou, A. Afonso-Luis, **H. Dole**, G. Stacey, S. Serjeant, M. Pierre, M. Griffin, R. Puetter, 2004, ApJ, 154, 54

45. *Infrared Array Camera (IRAC) Imaging of the Lockman Hole*

J-S. Huang, P. Barmby, G. G. Fazio, S. P. Willner, G. Wilson, D. Rigopoulou, A. Alonso-Herrero, **H. Dole**, et al. [and 12 co-authors], 2004, ApJ, 154, 44

46. *The Multiband Imaging Photometer for Spitzer (MIPS)*

G. H. Rieke, E. T. Young, C. W. Engelbracht, D. M. Kelly, F. J. Low, E. E. Haller, J. W. Beeman, K. D. Gordon, J. A. Stansberry, K. A. Misselt, J. Cadien, J. E. Morrison, G. Rivlis, W. B. Latter, A. Noriega-Crespo, D. L. Padgett, K. R. Stapelfeld, D. C. Hines, E. Egami, J. Muzerolle, A. Alonso-Herrero, M. Blaylock, **H. Dole**, J. L. Hinz, E. Le Floc'h, C. Papovich, P. G. Pérez-González, P. S. Smith, K. Y. L. Su, L. Bennett, D. T. Frayer, D. Henderson, N. Lu, F. Masci, M. Pensenson, L. Rebull, J. Rho, J. Keene, S. Stolovy, S. Watcher, W. Wheaton, M. W. Werner, P. L. Richards, 2004, ApJ, 154, 25

47. *Far-Infrared Imaging of NGC 55*

C. W. Engelbracht, K. D. Gordon, G. J. Bendo, P. G. Pérez-González, K. A. Misselt, G. H. Rieke, E. T. Young, D. C. Hines, D. M. Kelly, J. A. Stansberry, C. Papovich, J. E. Morrison, K. Y. L. Su, J. Muzerolle, **H. Dole**, et al., 2004, ApJ, 154, 248

48. *Spectroscopic Follow-up of FIRBACK-South Bright Galaxies*

J. Patris, M. Dennefeld, G. Lagache, **H. Dole**, 2003, A&A, 412, 349

49. *SWIRE : The SIRTf Wide-area InfraRed Extragalactic Survey*

C. Lonsdale, H. Smith, M. Rowan-Robinson, J. Surace, D. Shupe, K. Xu, S. Oliver, D. Padgett, F. Fang, T. Conrow, A. Franceshini, N. Gautier, M. Griffin, P. Hacking, F. Masci, G. Morrison, J. O'Linger, F. Owen, I. Perez-Fournon, M. Pierre, R. Puetter, G. Stacey, S. Castro, M. Del Carmen Polletta, D. Farrah, D. Frayer, B. Siana, T. Babbege, S. Dye, M. Fox, E. Gonzales-Solares, M. Salaman, S. Berta, J. Condon, **H. Dole**, S. Serjeant, M. Werner, 2003, PASP, 115, 897

50. *Sub-mm and Near-IR Observations of galaxies selected at 170 μm*

A. Sajina, C. Borys, S. Chapman, **H. Dole**, M. Halpern, G. Lagache, J-L. Puget, D. Scott, 2003, MNRAS, 343, 1365

51. *First detections of FIRBACK sources with SCUBA*

D. Scott, G. Lagache, C. Borys, S.C. Chapman, M. Halpern, A. Sajina, P. Ciliegi, D. L. Clements, **H. Dole**, S. Oliver, J-L. Puget, W. T. Reach, M. Rowan-Robinson, 2000, A&A, 357, L5

52. *FIRBACK : I. A deep survey at 175 μm with ISO preliminary results,*

J.L. Puget, G. Lagache, D. Clements, W.T. Reach, H. Aussel, F. Bouchet, C. Cesarsky, F.X. Désert, **H. Dole**, D. Elbaz, A. Franceschini, B. Guiderdoni, A. Moorwood, 1999, A&A 345, 29

53. *An attempt to detect the dust disk of Vega by photopolarimetry, and constraints on the grain size*

N. Mauron & **H. Dole**, 1998, A&A, 337, 808

54. *A new distance criterion for spirals in the zone of avoidance*

H. Dole and G. Theureau, C. R. Acad. Sci. Paris, 1997, 324 Série II b, 201

Annexe B

Curriculum Vitae

Septembre 2010

Coordonnées

Nom : **DOLE**

Prénom : **Hervé**

Etablissement d'affectation : **Université Paris Sud 11**

Adresse professionnelle : **Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS, UMR8617), bât 121, Université Paris Sud 11 et CNRS, 91405 Orsay Cedex – Tel : 01 69 85 85 72 – Fax : 01 69 85 86 75**

Email : **Herve.Dole@ias.u-psud.fr** – Page web : **<http://www.ias.u-psud.fr/dole/>**

Parcours

- à partir d'octobre 2010 : membre junior de l'**Institut Universitaire de France**, pour 5 ans.
 - depuis septembre 2003 : **Maître de Conférences** à l'IAS & l'Université Paris Sud 11, 34ème section.
 - 2000-2003 : **Research Associate** à l'University of Arizona, Steward Observatory (Tucson, USA) sur financement NASA : coordination du temps garanti MIPS sur le télescope spatial Spitzer.
 - 1997-2000 : **Doctorat-monitorat** en astrophysique et techniques spatiales, Université Paris-Sud 11, "*L'évolution des galaxies infrarouges : des observations cosmologiques avec ISO à une modélisation de l'infrarouge moyen au submillimétrique*", disponible sur : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00394938/fr/>
 - 1996-1997 : **Service National**.
 - 1995-1996 : **DEA d'astrophysique** de Paris 6 "*Méthodes instrumentales en astrophysique et leurs applications spatiales*". Major de promotion.
 - 1993-1995 : **Licence et maîtrise de Physique fondamentale**, Université Paris-Sud 11.
-

Recherche : publications et communications

- **54 articles référés publiés (rang A), dont 5 en premier auteur et 1 revue.**
 - **H-index : 31. 4600 citations** (source : ADS/NASA).
 - **35 présentations** orales en colloque ou réunion internationales,
 - dont **6 invitations et 3 revues.**
 - plus de **50 séminaires.**
 - **Livre** : "*L'observation en astronomie*", de Léna, Dole, Lagrange, Rouan, Binetruy, Génova, 2010, Ellipses.
-

Recherche : rayonnement et responsabilités collectives

- Membre nommé du **Conseil National des Astronomes et des Physiciens (CNAP), section Astronomie** (2008-2011) : concours de recrutement annuel national des astronomes-adjoints, évaluation des personnels CNAP et des OSU (Observatoires des Sciences de l'Univers).

- **Expert aeres** pour comités d'évaluation de laboratoires et d'observatoires.
- **Vice-président B** de la CCSU (Commission consultative des spécialistes d'université) section 34 de l'université Paris-Sud 11 2008-2010.
- membre de la CSE/CCSU (section 34) de l'université Paris-Sud 11 depuis 2006.
- membre de la CSE (section 34) de l'université Paris 6 Pierre et Marie Curie 2007-2008.
- membre de la CSE (section 34) de l'université Paris 7 en 2008.
- membre de la CSE (section 34) de l'Observatoire de Paris en 2007 et 2008.
- **Rapporteur** pour les principales revues scientifiques de rang A : *Astrophysical Journal*, *Astronomy & Astrophysics*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.
- Membre élu depuis 2007 aux **conseils scientifique et pédagogique** du département de Physique de la Faculté des sciences d'Orsay.
- **Président** du comité des utilisateurs de l'informatique de l'IAS, 2005-2010.
- Bénéficiaire de la **Prime d'Excellence Scientifique** depuis octobre 2009.

Recherche : animation et encadrement scientifiques

- **Encadrement** de 3 post-docs, 2 thèses, 2 stages de Master 2, 1 stage de Master 1, et de 7 stages de Licence.
- **Responsable** du noeud IAS et co-proposant de l'ANR HUGE : Herschel Unveils Galaxy Evolution.
- **Co-organisateur** du colloque "Emissions diffuses galactiques et extragalactiques : des avant-plans galactiques aux fonds cosmologiques : de Fermi à Planck et Herschel", IAS, 8-9 juin 2010, <http://www.ias.u-psud.fr/emission.diffuse.pche/>
- **Responsable scientifique** du colloque "Univers et Origines", UFR des Sciences d'Orsay, 18 mars 2009, <http://www.ias.u-psud.fr/universetorigines/>
- **Co-organisateur** de l'école d'hiver "des cigales" Herschel à l'IAS, 8-12 décembre 2008.
- Membre du **jury des stages de Master 2 Recherche NPAC** (Noyaux, Particules, Astroparticules et Cosmologie) de Paris 6, 7, 11 et INSTN, en 2006 et 2007.
- Membre du **jury des stages de Master 2 Recherche Astronomie et Astrophysique** de Paris 6, 7 et 11 et Observatoire de Paris, depuis 2008.
- Bénéficiaire de la **Prime d'Encadrement Doctoral et de Recherche** 2005-2009.
- Membre du **Comité de pilotage national AMA09** (année mondiale de l'astronomie 2009).
- Coordinateur des **actions universitaires au niveau national AMA09**.
- **Responsable** des activités AMA09 à l'Université Paris-Sud 11 et à l'IAS.

Collaborations

- **Planck** : membre du *Core Team HFI*; membre de l'équipe d'opération en vol de l'instrument HFI. Membre du Working Group 6 (IR galaxies), et des groupes de validation des sources "High-z" et "IR galaxies".
- **Herschel** : membre des collaborations GOODS et ATLAS.
- **EUCLID** : (mission ESA Cosmic Vision) membre du groupe "additional Science" pour les galaxies.
- **SPICA** : (mission JAXA/ESA Cosmic Vision) co-proposant de l'instrument SAFARI.
- **H2EX** : (mission rejetée ESA Cosmic Vision) co-proposant de la mission.
- **Spitzer/MIPS** : membre de l'équipe instrumentale MIPS et temps garanti, Université d'Arizona.
- **ANR HUGE** (GOODS-Herschel 2009-2013) : CEA/SAp, IAS, LAM, IAP.
- membre de l'**ANR D-SIGALE** (2006-2009). IAS, CEA/SAp, LAM.

Enseignement à l'Université Paris-Sud 11

- Service statutaire de (plus de) 192h ETD/an 2003-2010, avec des innovations (dont construction de

radiotélescopes). Enseignements actuels (ou passés) :

- Construction et opération de **10 radiotélescopes à 10 GHz RAMEAU** : Réseau d'Antennes Micro-ondes pour l'Enseignement de l'Astrophysique à l'Université Paris-Sud 11 (lauréat financement BQP). TP du L2 au M2.
- Responsable de l'observatoire avec **télescope de 35cm d'Orsay** : imagerie CCD et spectroscopie. Du L1 au M2.
- **Master 2 Astrophysique** : responsable de la méthodologie "Initiation aux techniques d'observation et de traitement des données" incluant des observations à l'Observatoire de Haute-Provence (40h + 48h d'observations, avec M. Dennefeld, K. Benabed et H. J. McCracken). Traitement et analyse d'image (40h, avec G. Lagache).
- **Master 2 NPAC** : cours de Cosmologie (5h sur 30, avec M. Langer et M. Joyce); responsable de l'enseignement "traitement de données spatiales en cosmologie" (64h).
- **Master 2 Pro OSAE** : TP de radioastronomie (32h).
- **Master 1 Physique fondamentale** : responsable TP d'observation et analyse de données (CCD, espace) (16h); Conférence en astrophysique. TP d'optique (40h).
- **Licence 3** : TD de Mécanique Quantique (Magistère de Physique Fondamentale) (50h).
- **Licence 2** : Co-responsable de l'option Cosmologie Observationnelle (25h, avec A. Abada). Astrophysique (50h, resp avec J-P. Bibring et G. P. des Forêts).

Vulgarisation

- **Année mondiale de l'astronomie**. Forte implication nationale, universitaire et locale depuis 2008 (cf plus haut).
- **Conférences**. Plus de 50, données en milieu associatif, scolaire, ou universitaire.
- **Presse**. 12 articles (ou participation à, ou interviews), dont les quotidiens Libération et Le Monde, et 2 revues (dont 1 pour le CNRS : Images de la Physique 2008); Press Releases : 1 NASA, 1 CNRS.
- **Télévision**. En 2009 : 1 passage France 3 IdF, 3 passages sur Telessonne.
- **Radio**. Interviews sur Radio Classique, France Bleu IdF.
- Membre du groupe de communication du projet Planck (niveau international et français).
- Membre de la cellule de communication de l'IAS.

Annexe C

Présentation orale : copie des diapositives

Les diapositives présentées lors de la soutenance sont reproduites dans cette annexe, et sont aussi disponibles en ligne (pdf, 28 pages, 17 Mo) sur <http://www.ias.u-psud.fr/dole/hdr/> .



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 !

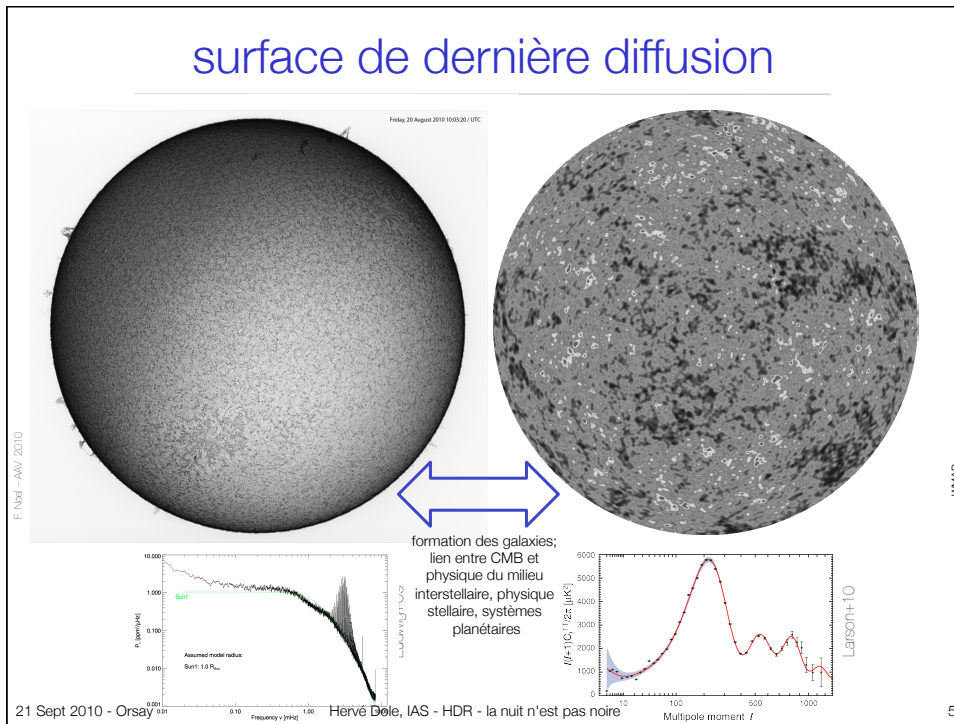
photos: H. Dole

21 Sept 2010 - Orsay

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

4

surface de dernière diffusion



petite histoire de l'Univers



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, ...).

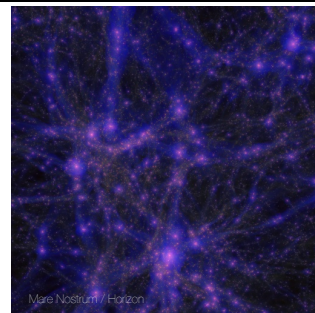
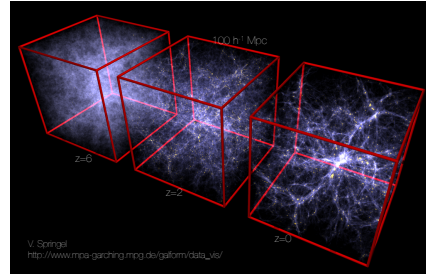
L'intensité et la structure du fond extragalactique dépendent directement de l'histoire de la production d'énergie dans l'Univers post-recombinaison. [Kashlinsky, 2005]

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



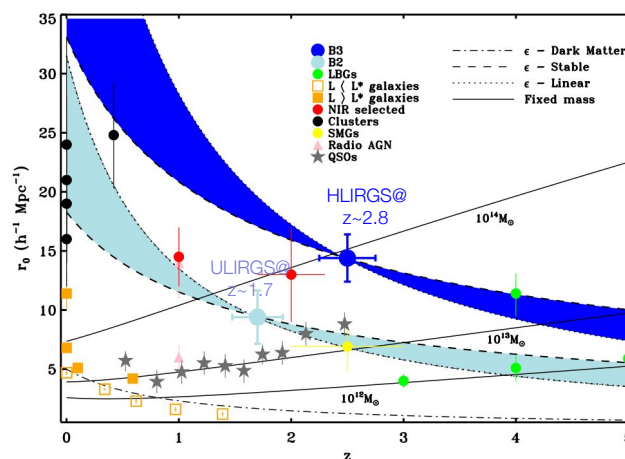
21 Sept 2010 - Orsay

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



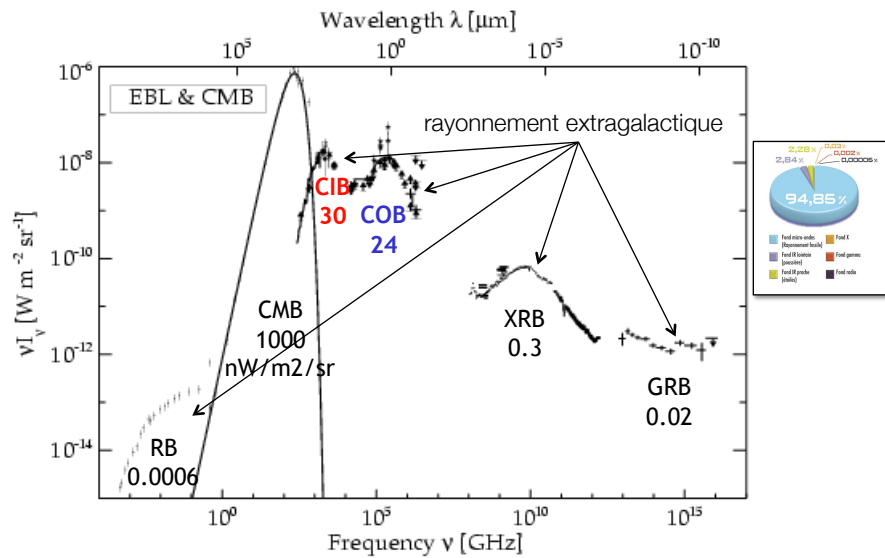
Overzier et al., 2003, A&A; Farrah et al., 2006

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 ?

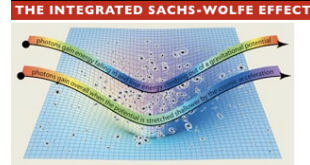
21 Sept 2010 - Orsay

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

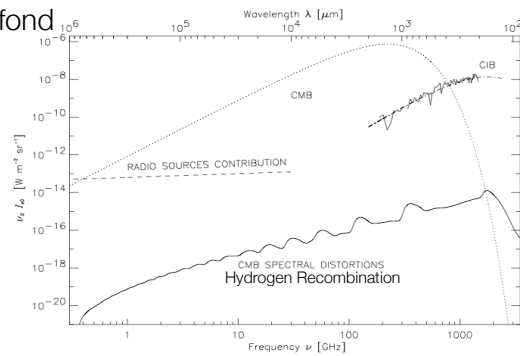
12

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



Physicsworld.com - May 2004



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

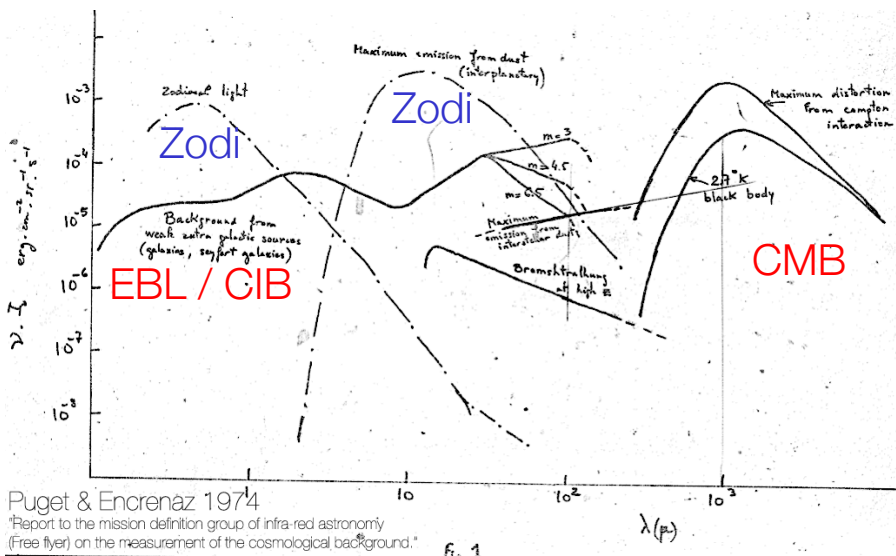
14

mesures du fond extragalactique

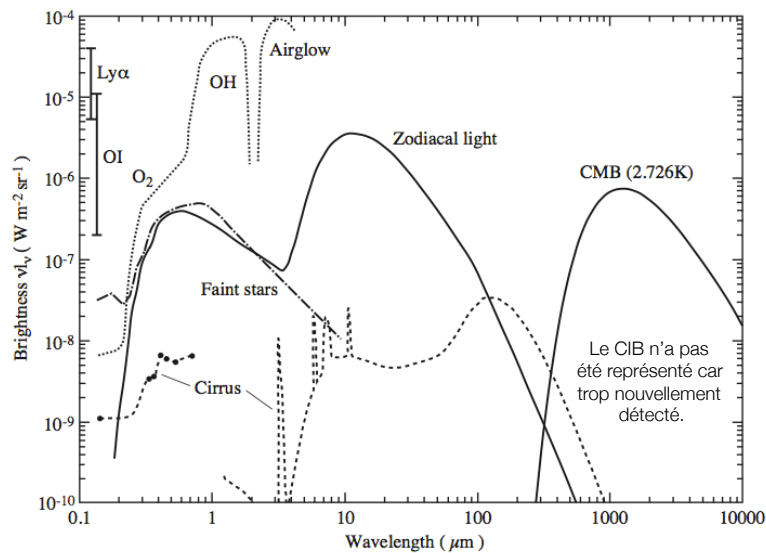
une longue quête pour tracer l'histoire des galaxies

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

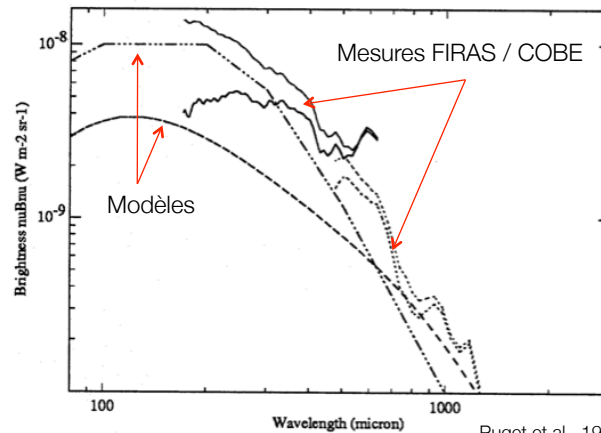
Letter to the Editor

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

J.-L. Puget¹, A. Abergel¹, J.-P. Bernard¹, F. Boulanger¹, W.R. Burton², F.-X. Désert¹, and D. Hartmann^{2,3}

¹ Institut d'Astrophysique Spatiale, Bât. 121, Université Paris XI, F-91405 Or
² Sterrewacht Leiden, Postbox 9503, 2300 RA Leiden, The Netherlands
³ 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

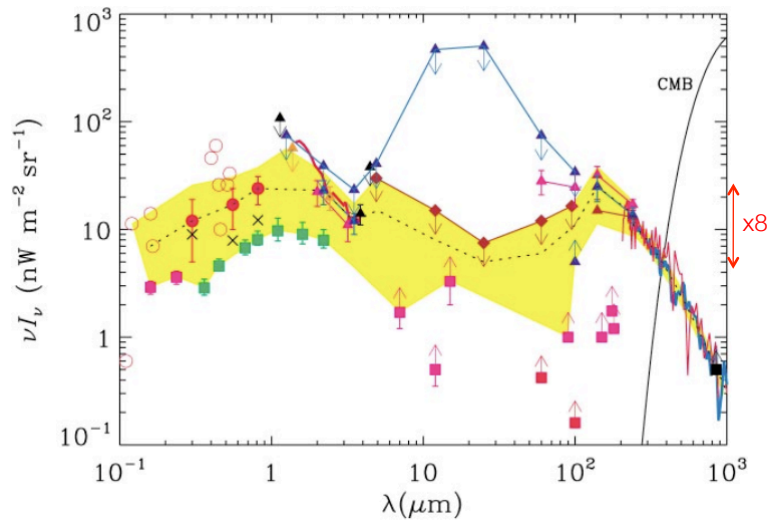
Puget et al., 1996
18

mesures à la fin des années 90 ...

la lumière zodiacale est le principal contaminant.

a 60 μ 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

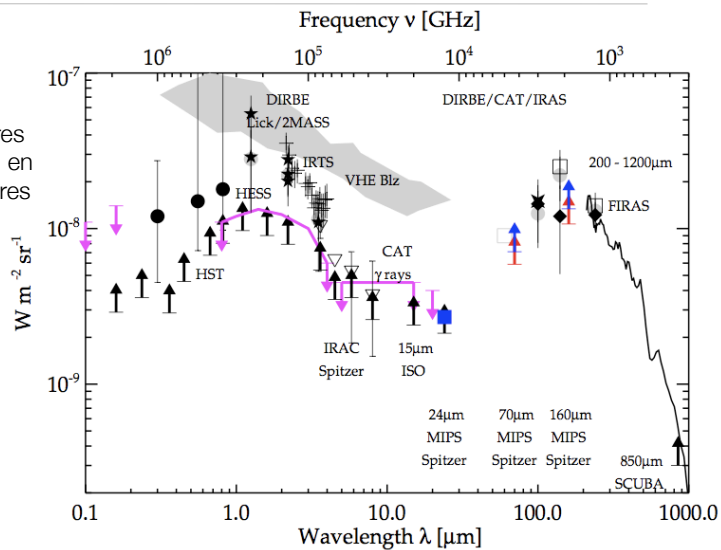
Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

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/>

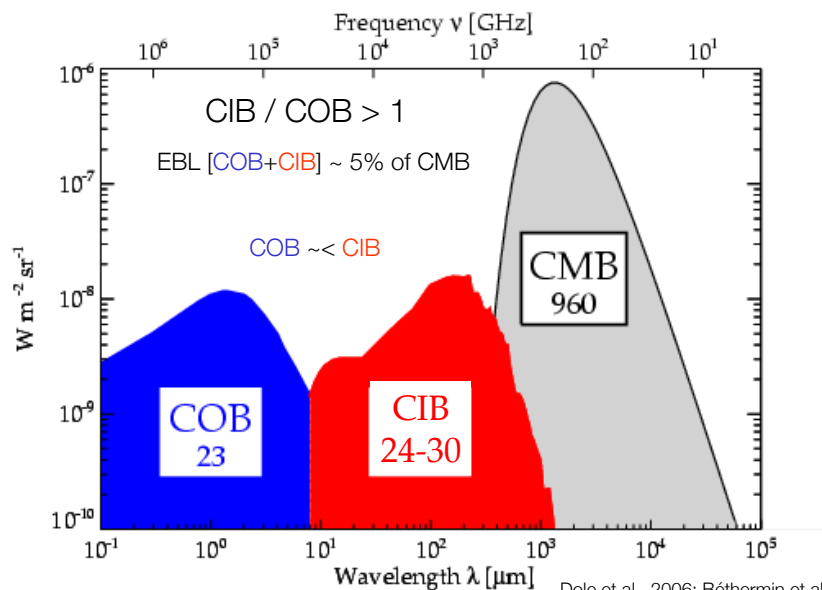
Dole et al., 2006

21 Sept 2010 - Orsay

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

21

résumé des mesures [1]

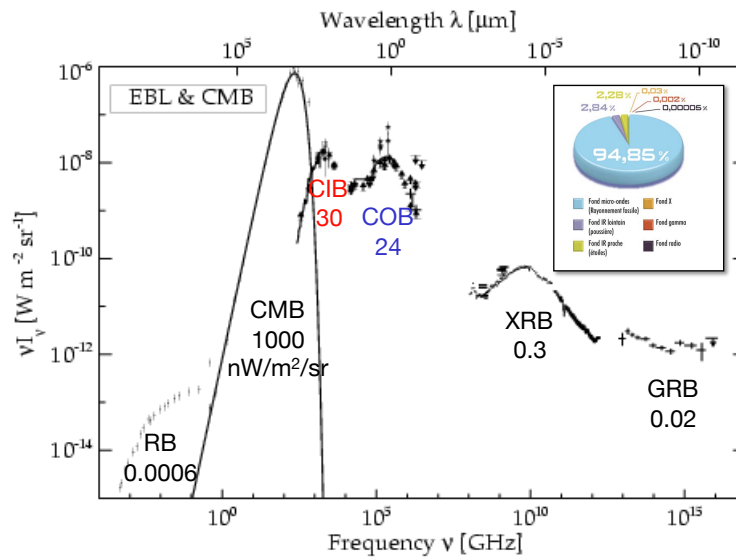


21 Sept 2010 - Orsay

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

23

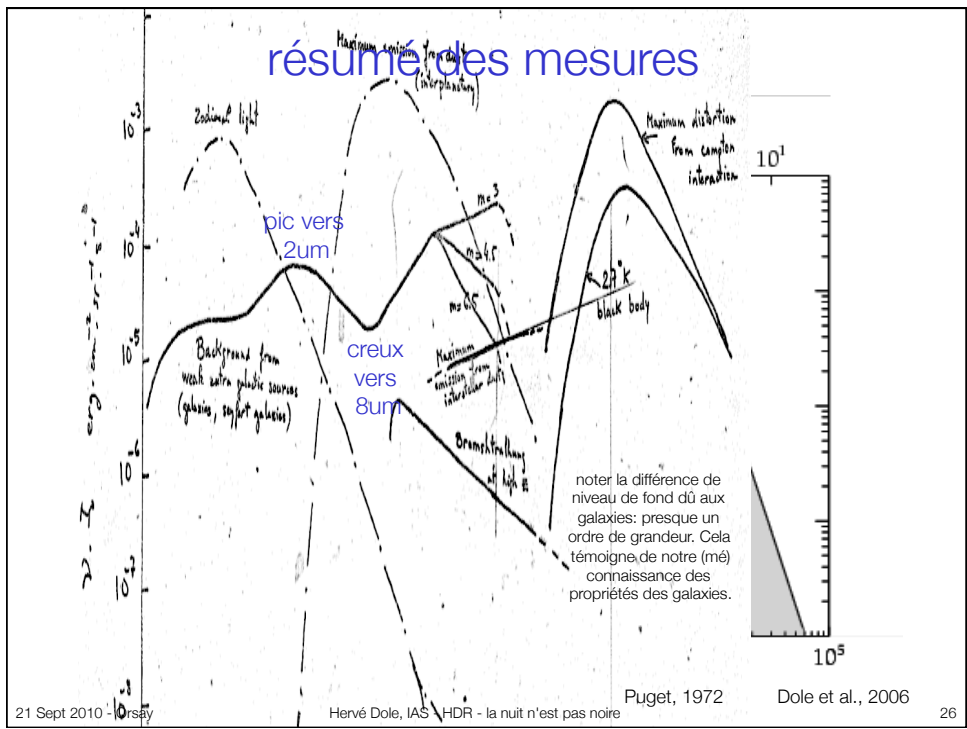
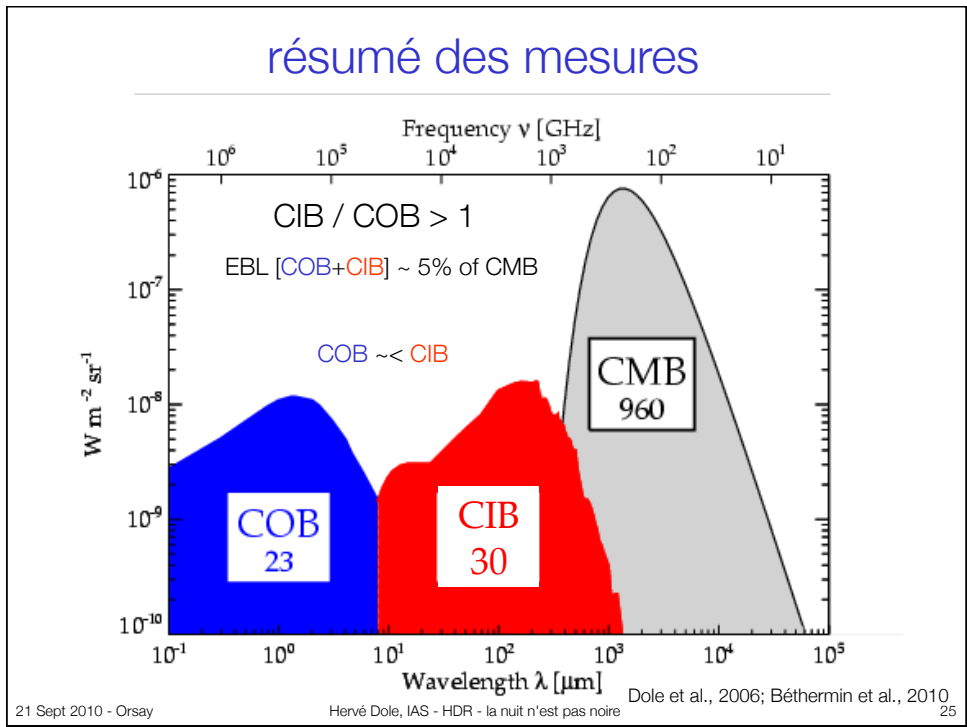
informations encodées dans le fond extragalactique

le rôle – assez mal compris – des galaxies

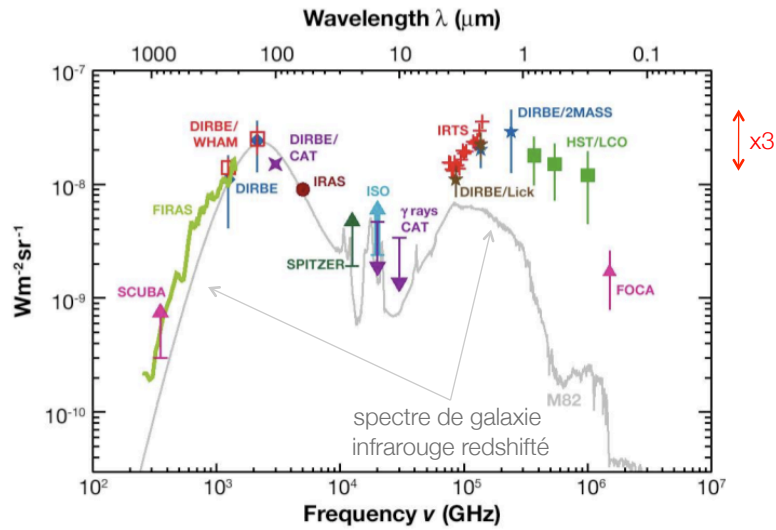
21 Sept 2010 - Orsay

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

24



quelles galaxies contribuent à l'EBL ?



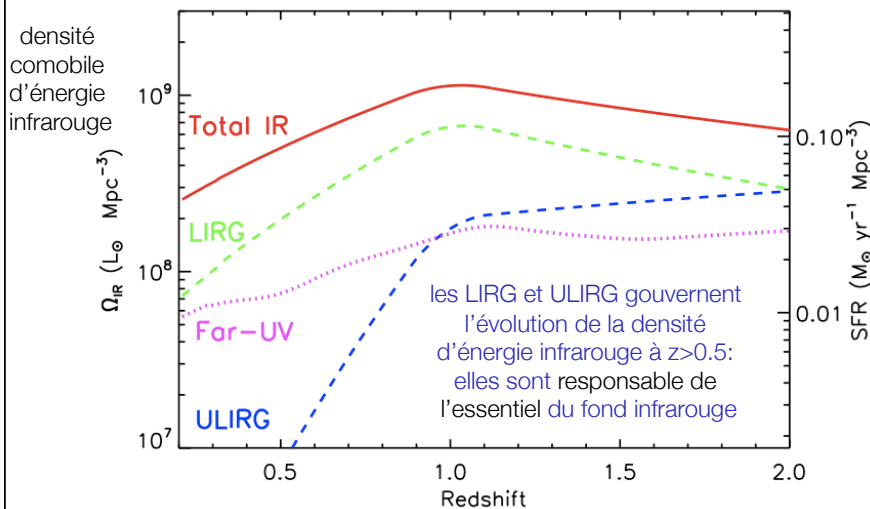
Lagache, Puget, Dole, 2005, ARAA

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

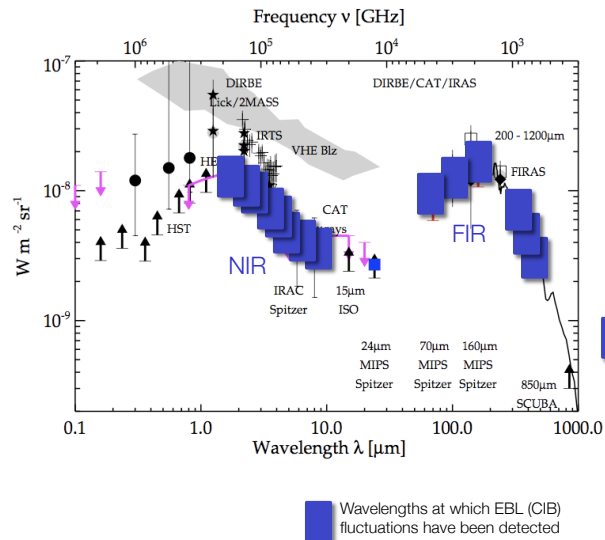
Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

30

fluctuations du fond infrarouge

Detections:

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



21 Sept 2010 - Orsay

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

31

(quelques) propriétés statistiques des galaxies

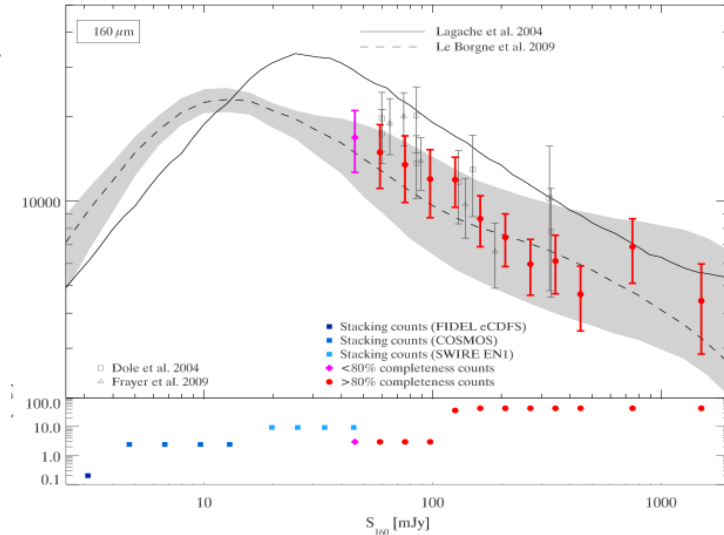
21 Sept 2010 - Orsay

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

32

Sonder les populations [1]

Spitzer
160um



Béthermin et al., 2010, 2010b, A&A

21 Sept 2010 - Orsay

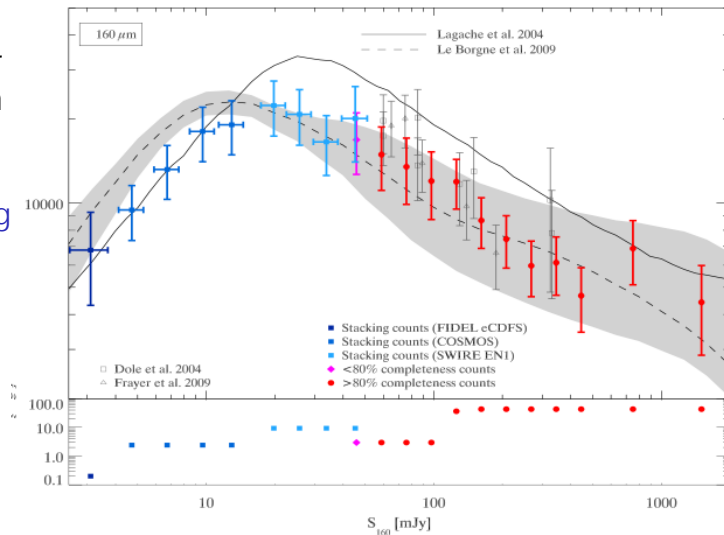
Hervé Dole, IAS - HDR - la nuit n'est pas noire

33

Sonder les populations [1]

Spitzer
160um

avec
stacking



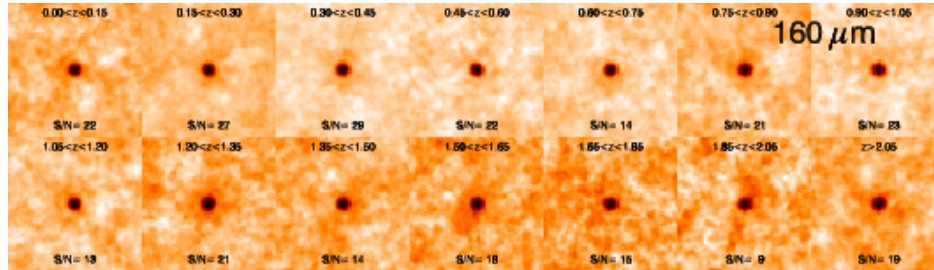
Béthermin et al., 2010, 2010b, A&A

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.

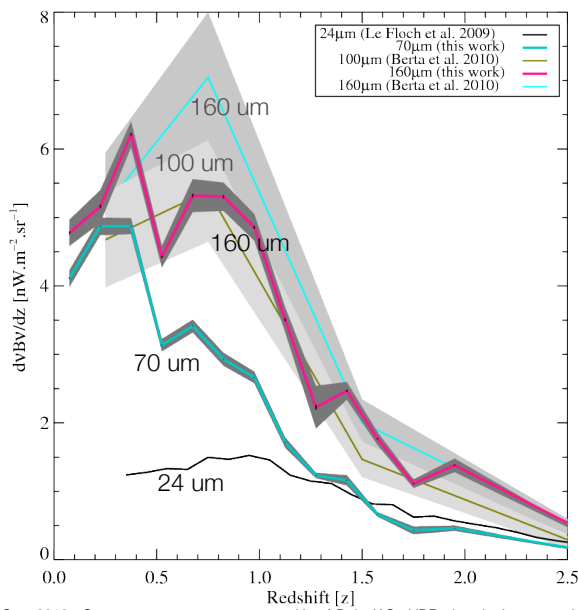
Jauzac et al., 2010, A&A, in press

21 Sept 2010 - Orsay

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

35

histoire du CIB depuis z~2...



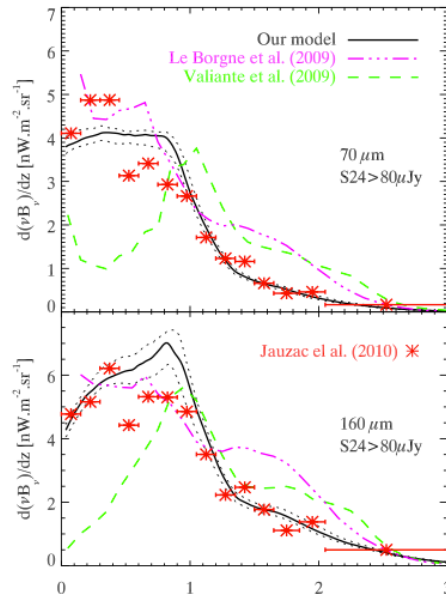
Jauzac et al., 2010, A&A, in press

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

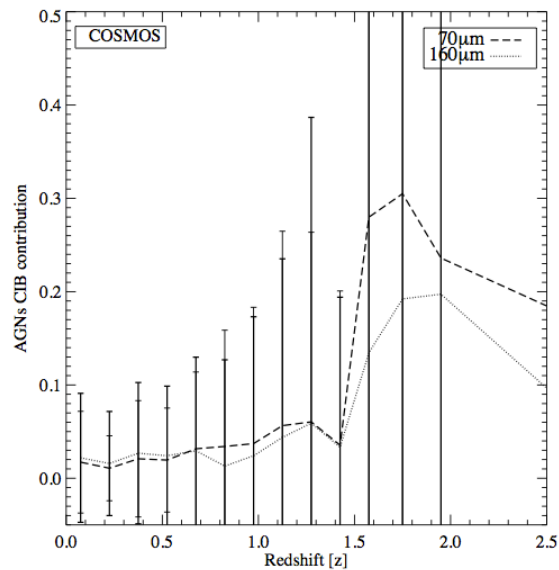
21 Sept 2010 - Orsay

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 $z < 2$.



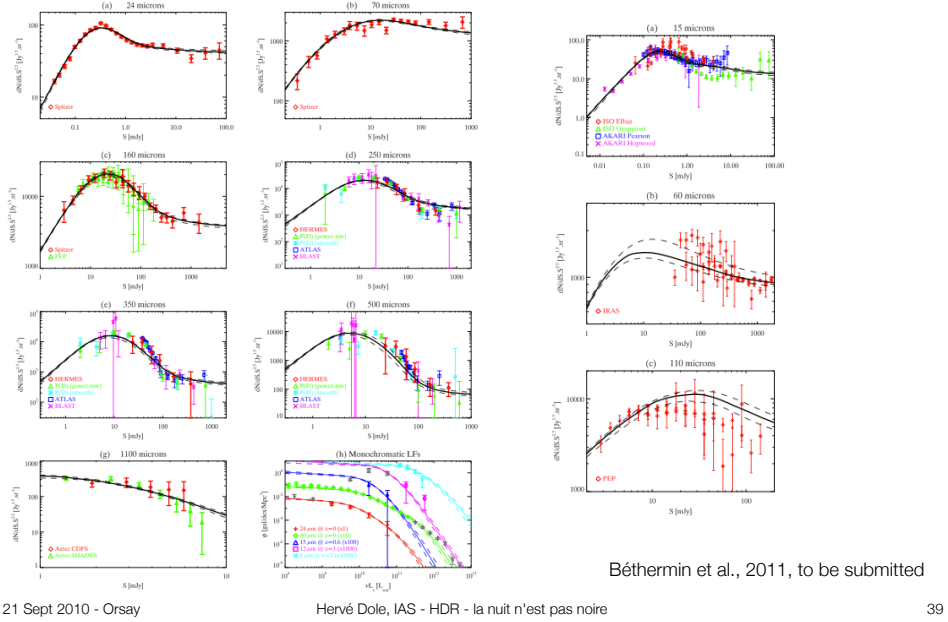
Jauzac et al., 2010, A&A, in press

21 Sept 2010 - Orsay

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

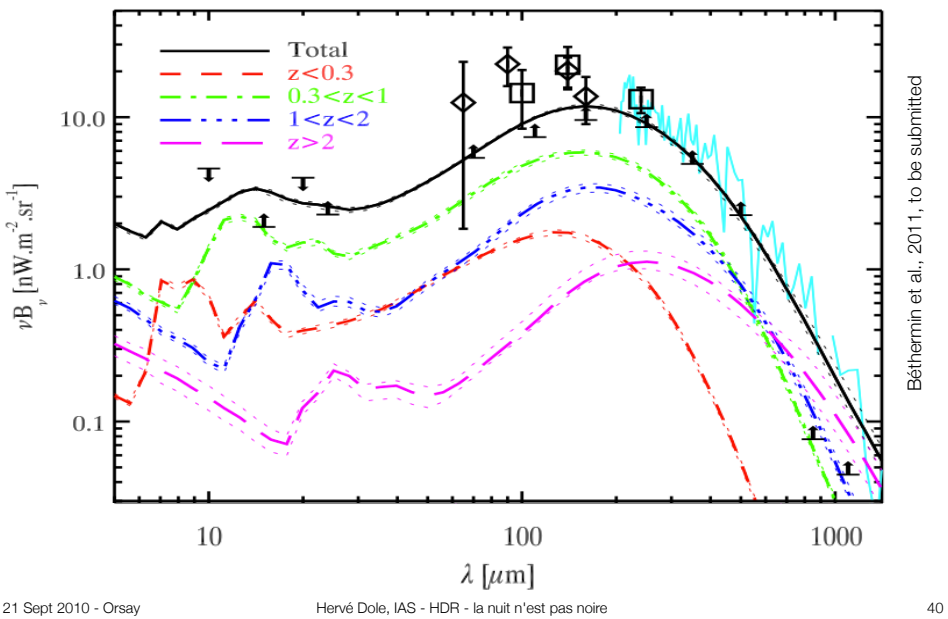
38

modèle: comptages



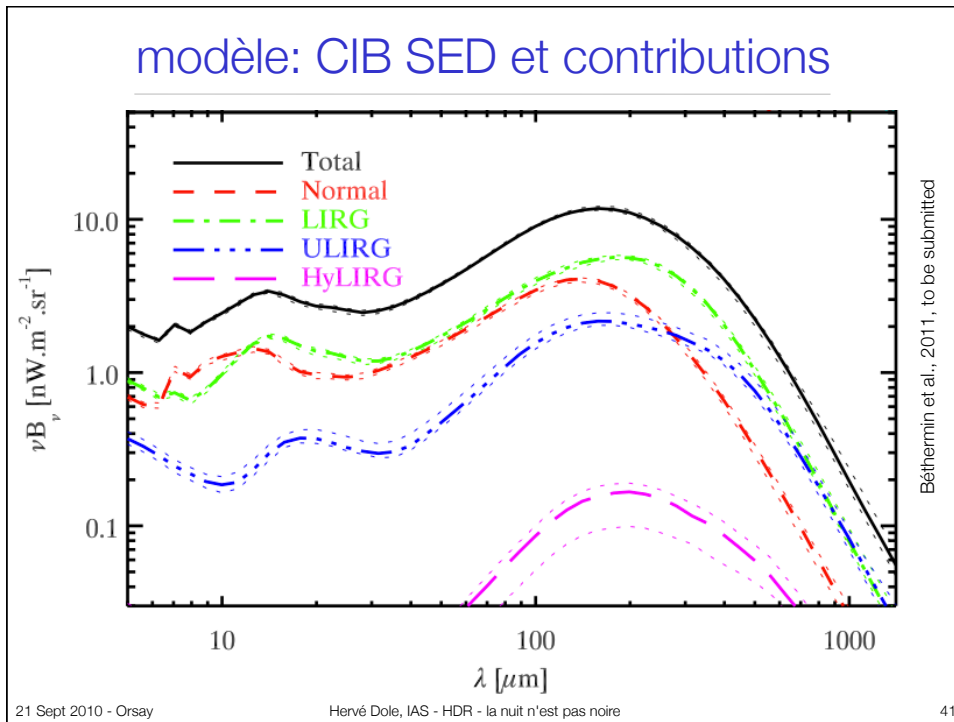
Béthermin et al., 2011, to be submitted

modèle: CIB SED et contributions

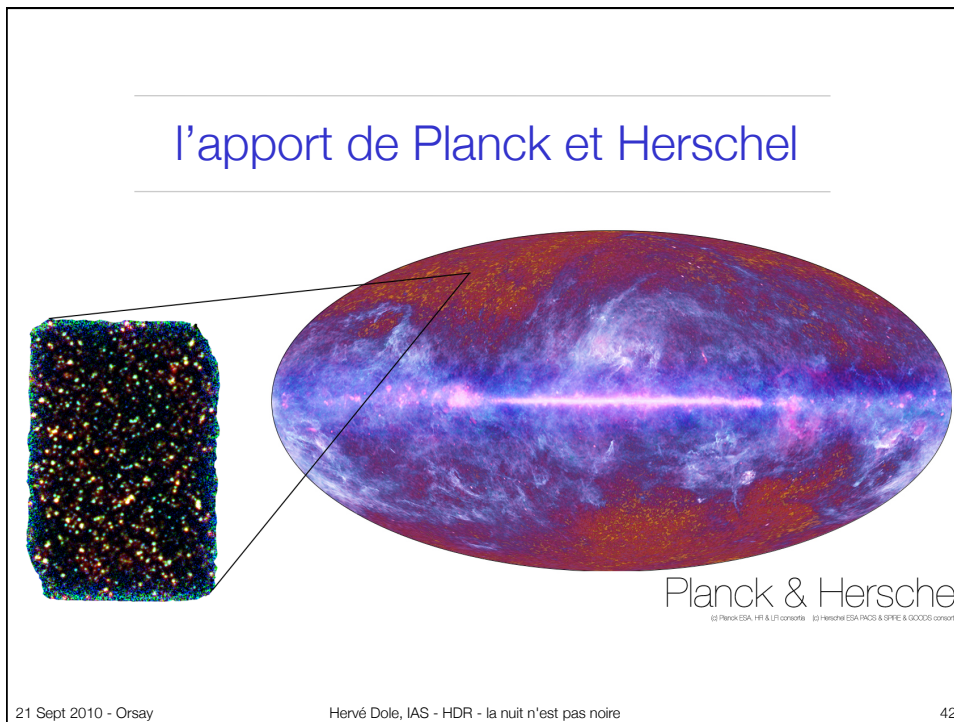


Béthermin et al., 2011, to be submitted

modèle: CIB SED et contributions

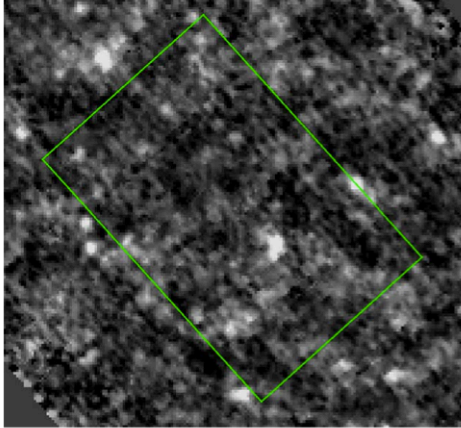


l'apport de Planck et Herschel



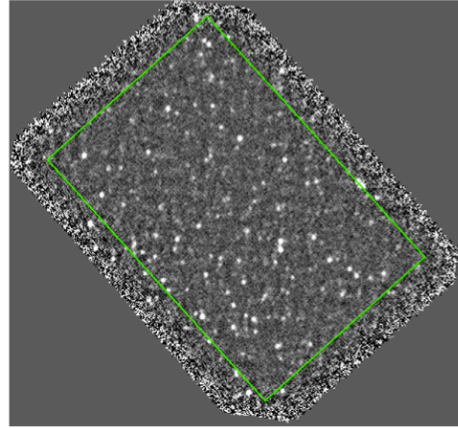
résolution du CIB en galaxies

GOODS-N 160 μ m



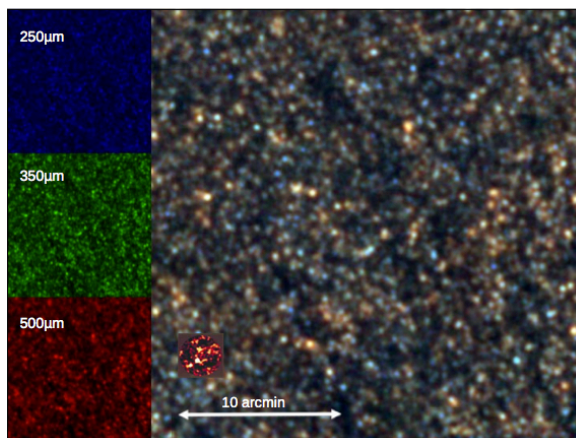
Spitzer MIPS 160um
FIDEL

GOODS-N 160 μ m



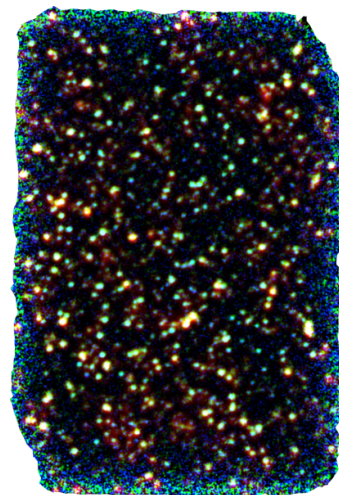
Herschel PACS 160um
PEP

résolution du CIB en galaxies



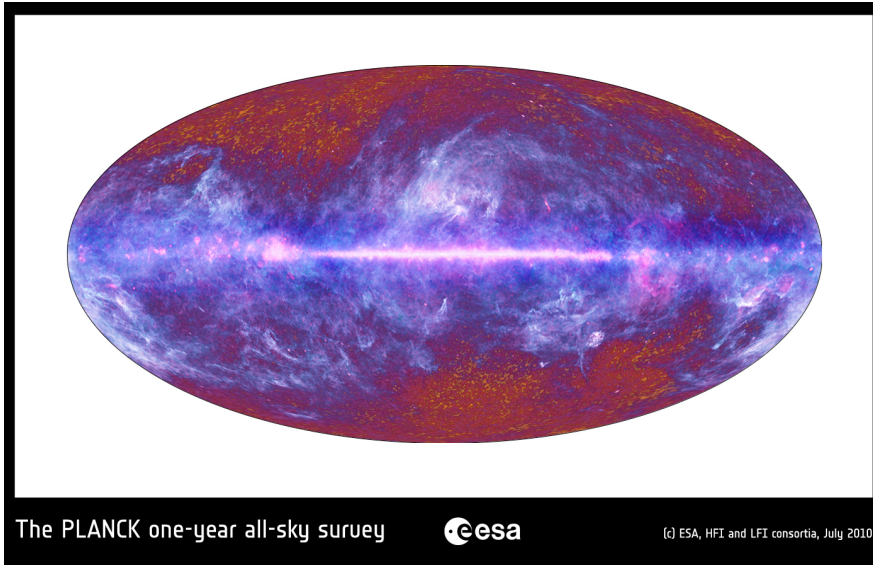
PACS 100, 160 & SPIRE 250 μ m – GOODS-H

Herschel SPIRE 250, 350 & 500 μ m – HERMES



courtoise D. Elbaz et GOODS-H team

statistique sur tout le ciel



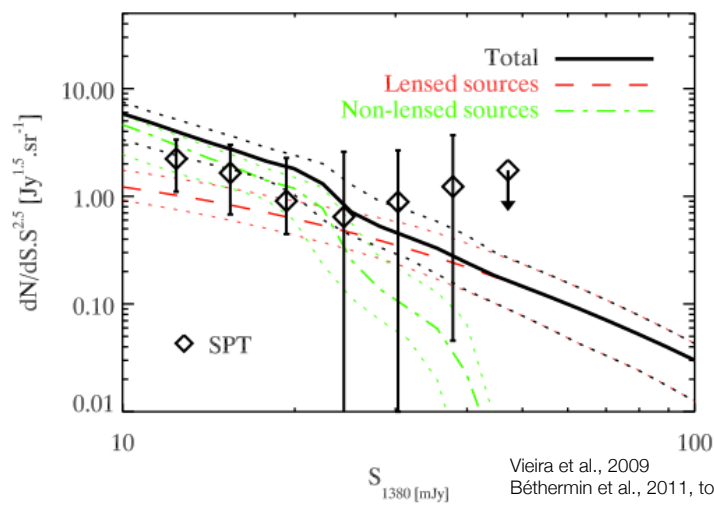
21 Sept 2010 - Orsay

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

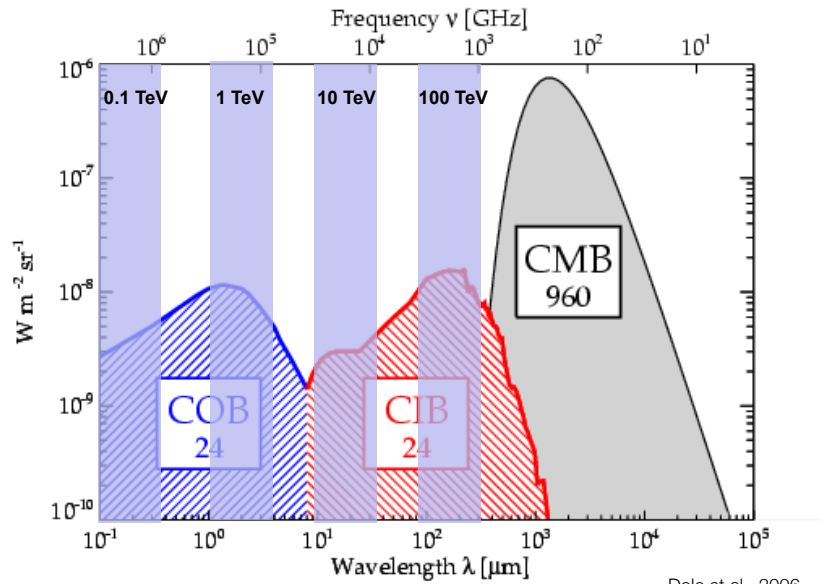
Transparence de l'Univers à haute énergie

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

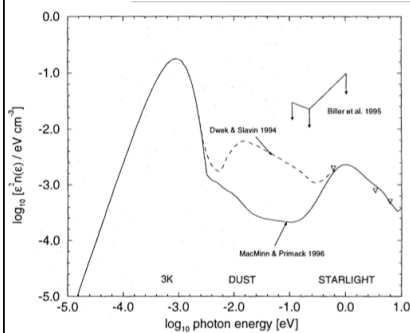


Fig. 2. Solid line: the infrared-to-ultraviolet diffuse background radiation field adopted in the present work. Dashed line: a diffuse background assuming that the γ -ray spectrum of Mrk421 cuts off at TeV due to cosmic absorption. Triangles denote estimates by Madau & Phinney (1996) of the optical-to-ultraviolet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

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

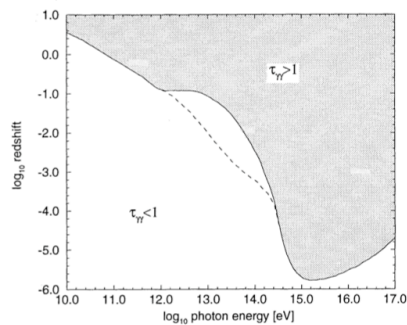


Fig. 1. The γ -ray horizons $\tau_{\gamma\gamma}(E, z) = 1$ corresponding to the two different diffuse background models shown in Fig. 2. The horizons were calculated assuming $\Omega = 1$, $q_0 = 0.5$, $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ and a photon number density evolving with redshift as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

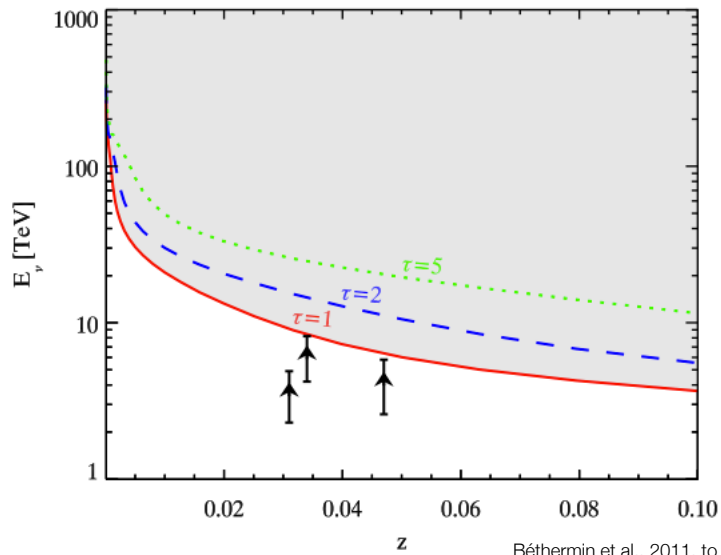
Mannheim et al., 1996

21 Sept 2010 - Orsay

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

50

horizon gamma



Béthermin et al., 2011, to be submitted
of also Kneiske & Dole, 2010

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 μ m)
 - CIB > COB: importance des phases infrarouge des galaxies
 - EBL ~ 50 nW/m²/sr, à comparer à ~ 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 γ , Cosmic Vision

21 Sept 2010 - Orsay

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

54

merci

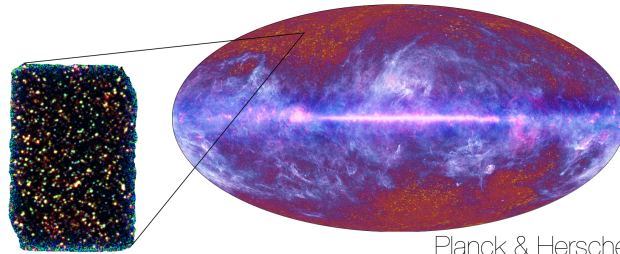
à l'IAS:

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

Annexe D

Une sélection d'articles publiés (disponible en ligne)

Les versions papier et pdf en ligne du document de la HDR ne contiennent pas cette sélection d'articles, afin de minimiser le nombre de pages imprimées et de garder la taille du fichier petite.

Cette annexe est disponible dans un fichier pdf séparé (379 pages, 40Mo) en ligne sur <http://www.ias.u-psud.fr/dole/hdr/>

Résumé

L'Univers, en dehors de notre Galaxie, est baigné de nombreux rayonnements, le principal étant observable dans le domaine des ondes radio centimétriques et millimétriques : le fond cosmologique (ou CMB pour *Cosmic Microwave Background*), corps noir de température actuelle 2.7 Kelvin. Découvert dans les années soixante, et largement étudié depuis pour ses infimes fluctuations de température et de polarisation, il se propage librement depuis une époque située environ 400000 ans après le big-bang. Il nous renseigne sur l'état de l'Univers primordial, sur son contenu, ainsi que sur certains processus physiques ayant eu lieu ultérieurement, comme la réionisation ou la formation des amas de galaxie. Un autre rayonnement d'importance cosmologique a été découvert il y a seulement quatorze ans¹ dans les données du satellite COBE, mais ici dans le domaine de l'infrarouge lointain, vers 200 microns de longueur d'onde : le **rayonnement fossile des galaxies**, ou fond diffus extragalactique infrarouge. Il est environ 50 fois moins intense que le fond cosmologique (pic à pic, ou de 20 à 40 fois moins en intégrale). Cette détection a constitué une grande surprise vu la grande intensité relative de l'infrarouge lointain par rapport à la partie visible provenant directement des étoiles. Ce fond diffus a pour origine l'émission de toutes les galaxies depuis leur formation, et résume ainsi toute leur histoire.

Il est donc permis d'écrire, presque sans ironie, que **la nuit n'est pas noire**, dans la mesure où, si nos yeux (avec le concours d'une hypothétique fenêtre atmosphérique) étaient sensibles aux rayonnements infrarouge lointain, millimétrique et centimétrique, ils verraient une nuit brillante de rayonnements cosmologiques.

Notons que la question de la nuit noire - connue sous le nom de paradoxe d'Olbers Chéseaux - est ancienne, fertile, et touche aux fondements de la description et la compréhension de notre Univers physique, de son origine et de son évolution.

Mesurer précisément ce rayonnement de fond infrarouge et comprendre la nature des galaxies qui en sont à l'origine et leur évolution, constituent l'une des thématiques importantes de la cosmologie observationnelle d'aujourd'hui.

Je détaille, dans ce manuscrit de HDR, quelques-unes de mes contributions à l'étude statistique des galaxies infrarouges, à la mesure et l'interprétation du rayonnement extragalactique, et esquisse quelques perspectives.

Le document de la HDR – soutenue le 21 septembre 2010 à l'Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay – et ses annexes sont disponibles en ligne sur <http://www.ias.u-psud.fr/dole/hdr/>

1. Puget et al. (1996); Hauser et al. (1998); Hauser & Dwek (2001)