

Fond diffus cosmologique

Etat des lieux et perspectives scientifiques



Jacques Delabrouille

CNRS-IN2P3, laboratoire APC



33 *IN2P3 permanent researchers and research engineers*

APC: James G. Bartlett (Pr.-UPD – Planck), Pierre Binétruy (Pr.-UPD), Martin Bucher (DR2-CNRS – Planck), Jacques Delabrouille (DR2-CNRS – Planck), Ken Ganga (DR1-CNRS – Planck), Yannick Giraud-Héraud (DR1-CNRS - Planck/QUBIC), Laurent Grandsire (IR-CNRS – QUBIC), Jean-Christophe Hamilton (DR2-CNRS – QUBIC), Jean Kaplan (DR émérite-CNRS – Planck/QUBIC), Maude Le Jeune (IR-CNRS – Planck/POLARBEAR), Guillaume Patanchon (MCF-UPD – Planck), Michel Piat (Pr-UPD - Planck/QUBIC), Damien Prêle (IR-CNRS - QUBIC), Cayetano Santos (IR-CNRS, R&D mm), Radek Stompor (DR1-CNRS – Planck/POLARBEAR), Bartjan van Tent (MCF-UPS – Planck), Fabrice Voisin (IR-CNRS – QUBIC/R&D mm); **CSNSM:** Laurent Bergé (IR-CNRS – QUBIC/R&D mm), Louis Dumoulin (DR émérite-CNRS – QUBIC/R&D mm), Stefanos Marnieros (CR-CNRS – QUBIC/R&D mm); **LAL:** François Couchot (DR1-CNRS – Planck/QUBIC), Sophie Henrot-Versillé (CR1-CNRS – Planck/QUBIC), Olivier Perdereau (DR2-CNRS – Planck/QUBIC), Stéphane Plaszczyński (DR2-CNRS – Planck/QUBIC), Matthieu Tristram (CR1-CNRS – Planck/QUBIC); **LPSC:** Olivier Bourrion (IR1-CNRS – NIKA/NIKA2), Andrea Catalano (CR2-CNRS – Planck/NIKA/NIKA2), Céline Combet (CR2-CNRS – Planck), Juan Francisco Macías-Perez (DR2-CNRS – Planck/NIKA/NIKA2), Frédéric Mayet (MCF-UJF – NIKA/NIKA2), Laurence Perotto (CR1-CNRS – Planck/NIKA/NIKA2), Cécile Renault (CR1-CNRS – Planck), Daniel Santos (DR1-CNRS – Planck)

17 *IN2P3 Postdoctoral fellows and PhD students*

APC: Ranajoy Banerji (PhD), Pierre Chanial (post-doc – QUBIC), Hoang Duc Thuong (PhD), Ata Karackci (post-doc – Planck), Julien Peloton (PhD – POLARBEAR), Camille Perbost (PhD – QUBIC/R&D mm), Davide Poletti (PhD – POLARBEAR), Andrea Tartari (post-doc – QUBIC/R&D mm), Alessandro Traini (PhD – QUBIC/R&D mm); **LAL:** Anna Mangilli (post-doc IAS/LAL – Planck), Marta Spinelli (PhD – Planck); **LPNHE:** Josquin Errard (post-doc ILP – POLARBEAR); **LPSC:** Barbara Comis (post-doc – Planck/NIKA/NIKA2), Rémi Adam (PhD Planck/NIKA/NIKA2), Alessia Ritacco (PhD – NIKA/NIKA2), Florian Ruppin (PhD – NIKA/NIKA2), Monica Rebolo (IR CDD – NIKA2).

Plan de l'exposé

- ➔ • 50 années de fond cosmologique
- *PLANCK* à l'IN2P3
- Inflation, modèle cosmologique, neutrinos
- COrE – un satellite de 4ème génération européen
- CMB-S4 – un grand observatoire au sol
- Perspectives et "feuille de route"



1960s PENZIAS & WILSON

$T \approx 3 \text{ K}$

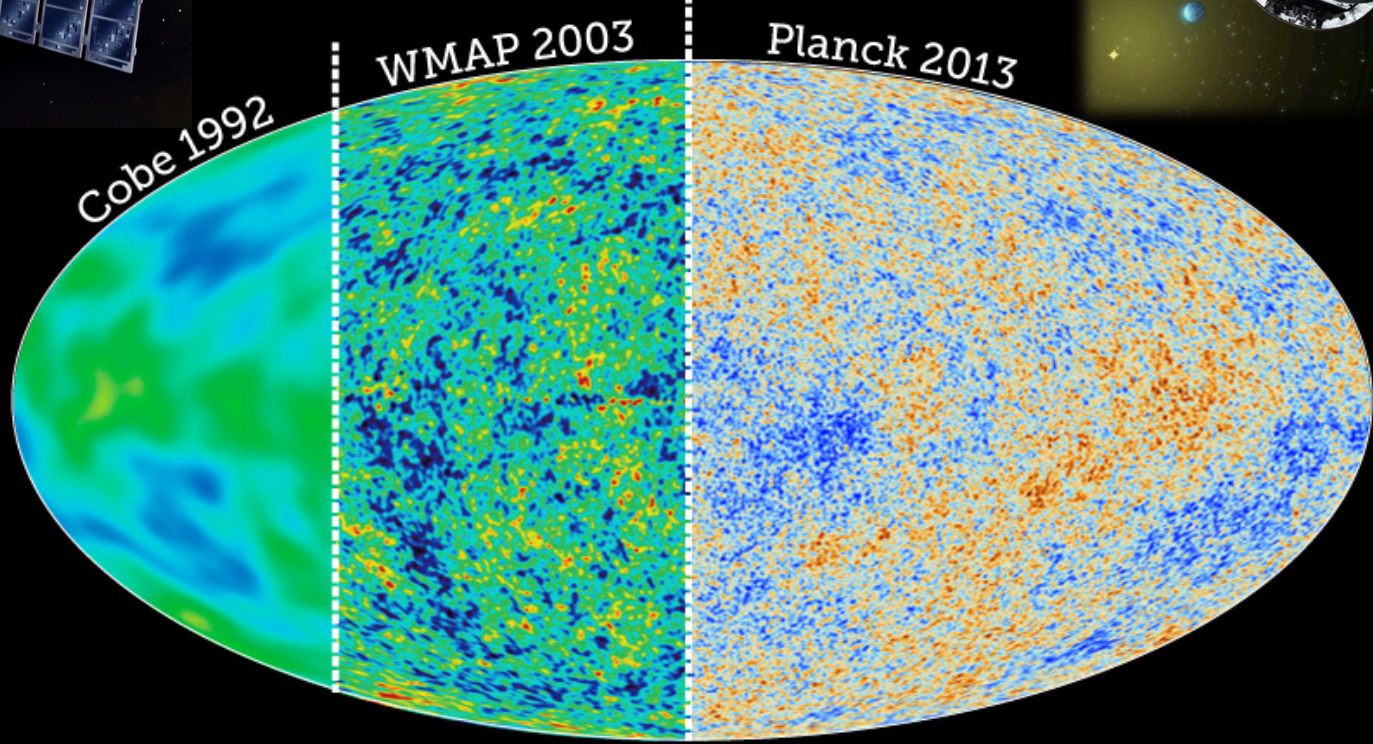
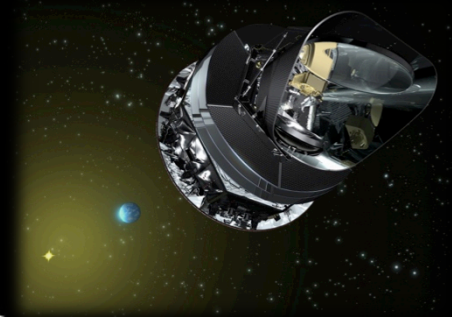
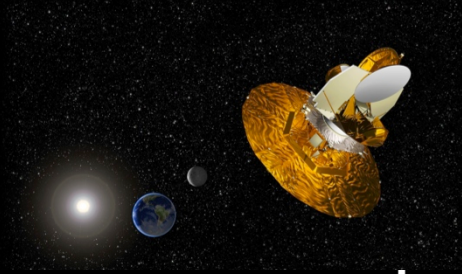
1990s COBE (+ exp. sol)

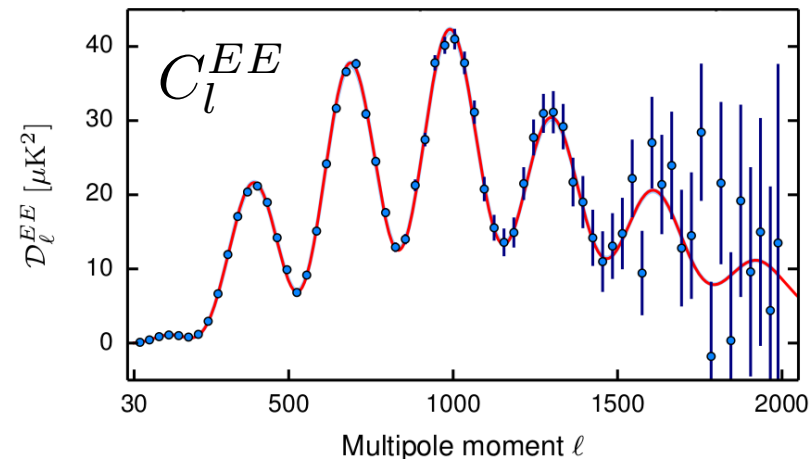
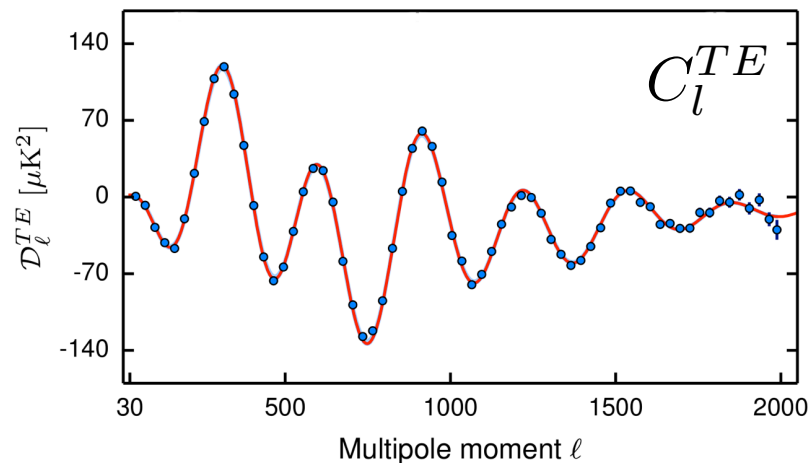
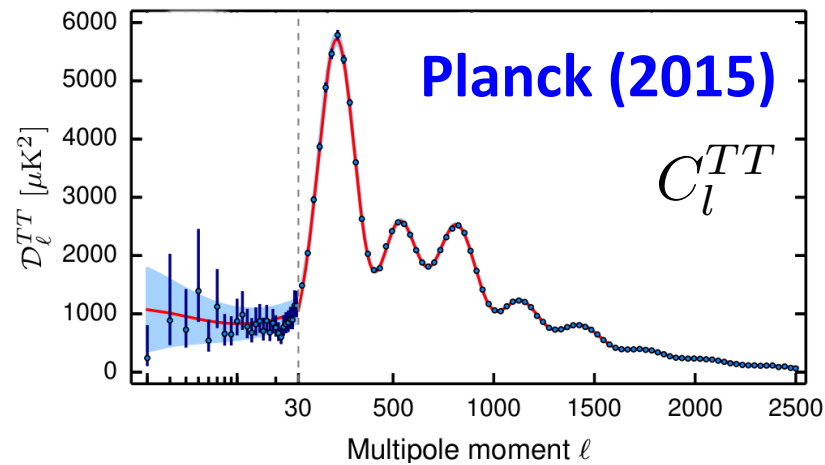
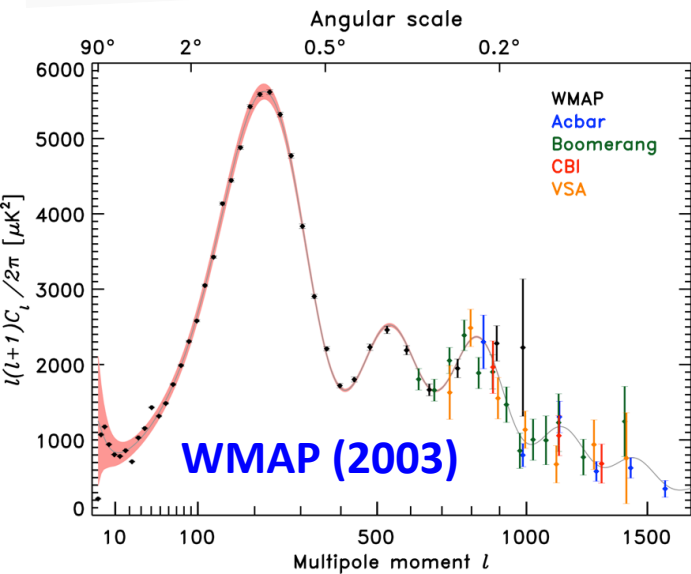
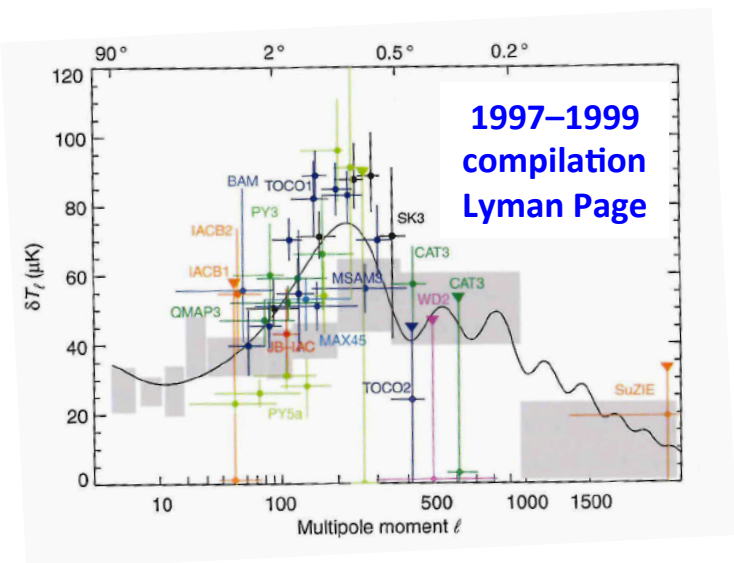
$T = 2.7255 \text{ K}$

$\Delta T/T \approx 10^{-4}$

corps noir

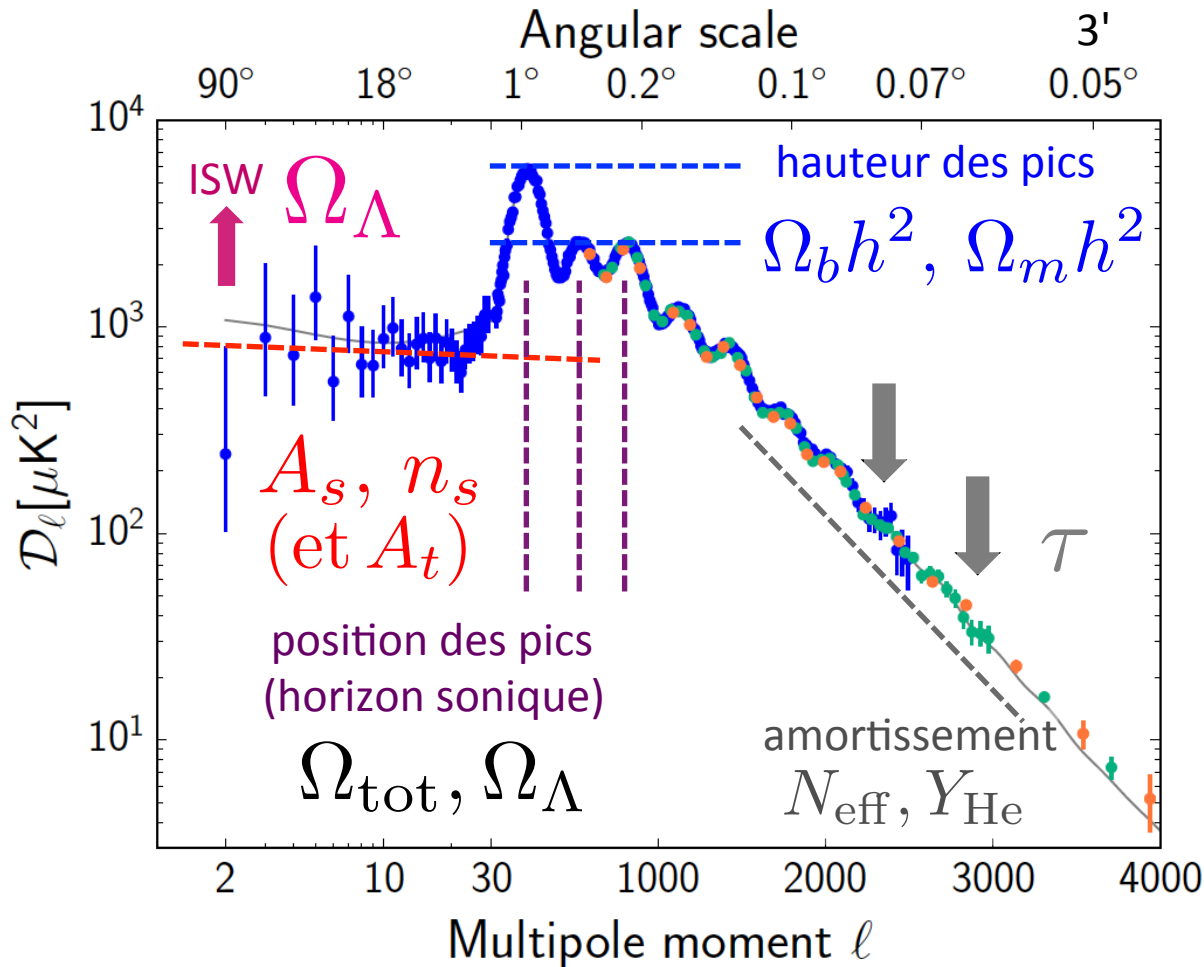
PROGRÈS SPECTACULAIRE : facteur 10^4 en 30 ans



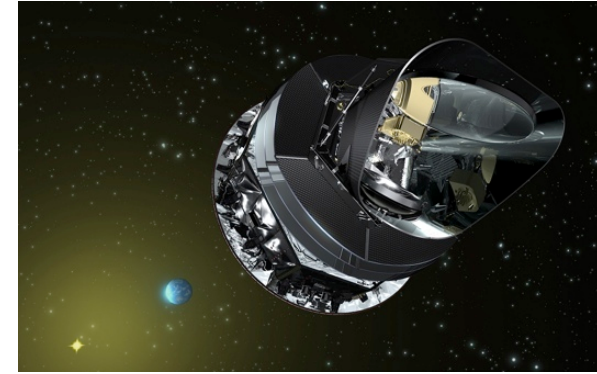


Spectre C_l^{TT}

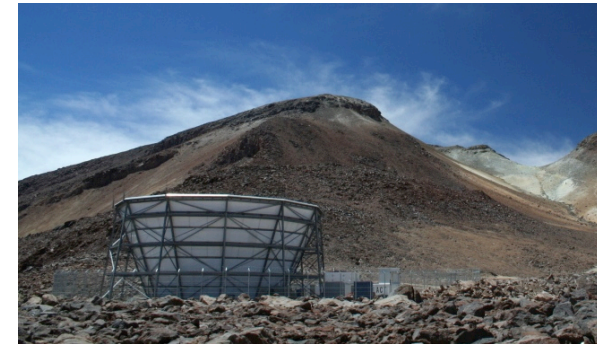
- Planck
- ACT
- SPT



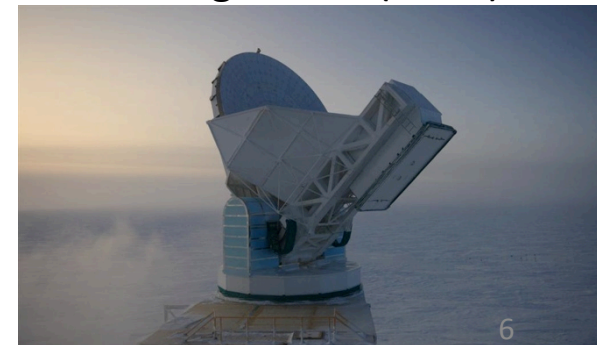
Planck 2015 results XI (2015)



ACT: Das et al. (2014)



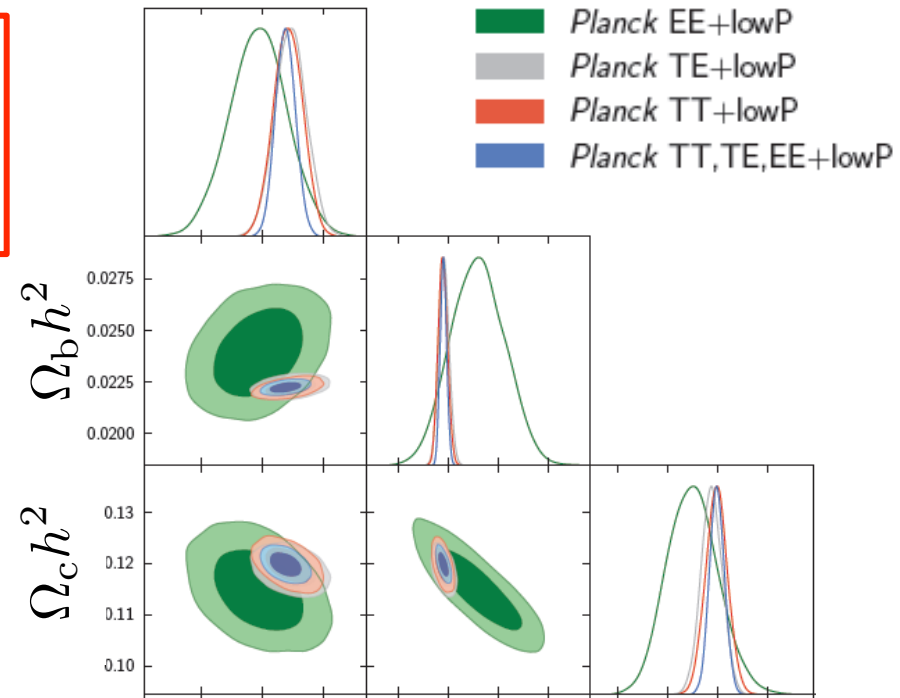
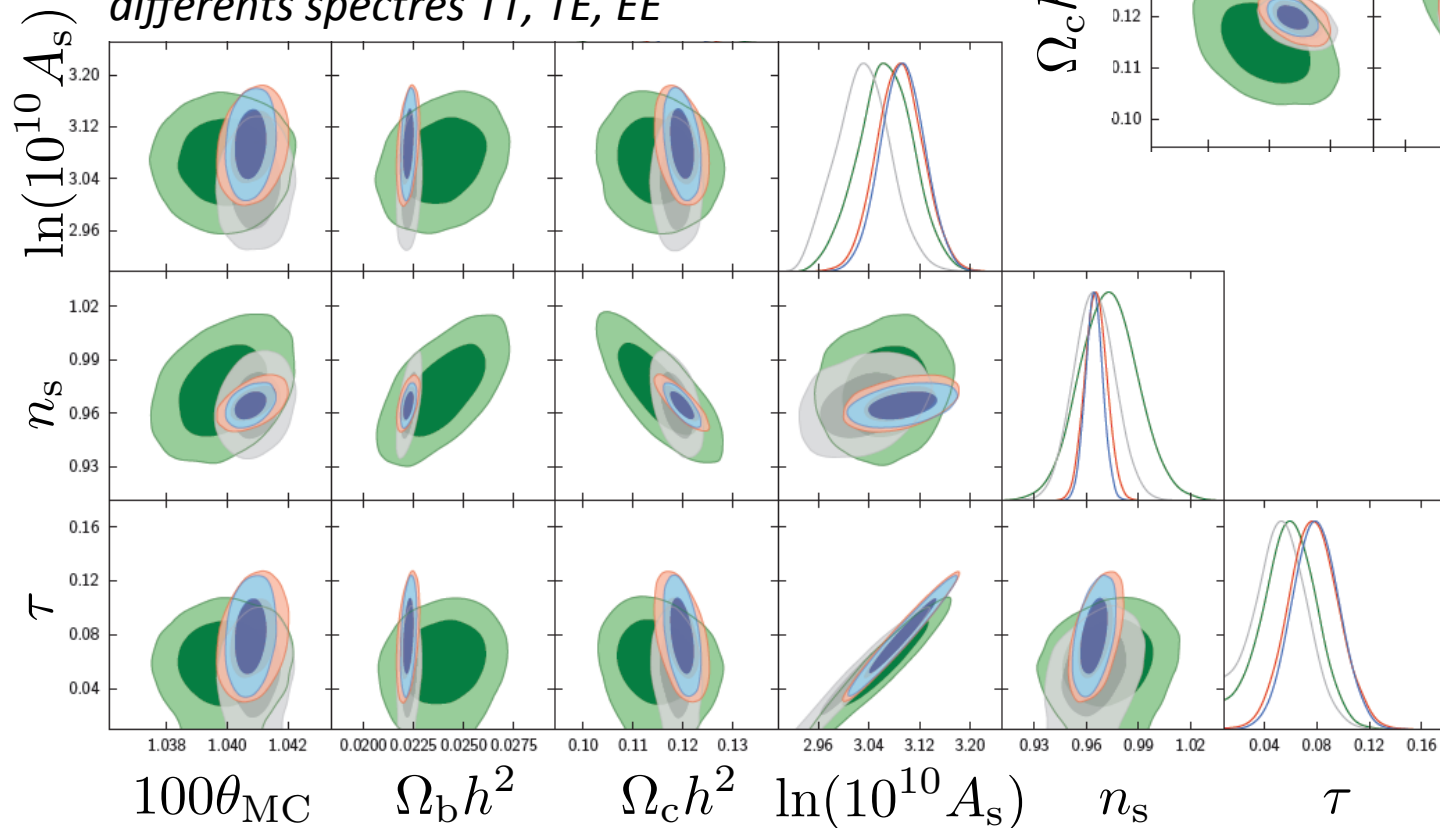
SPT: Story et al. (2012)
George et al. (2015)



Contraintes cosmologiques à 6 paramètres

Planck 2015 results XIII (2015)

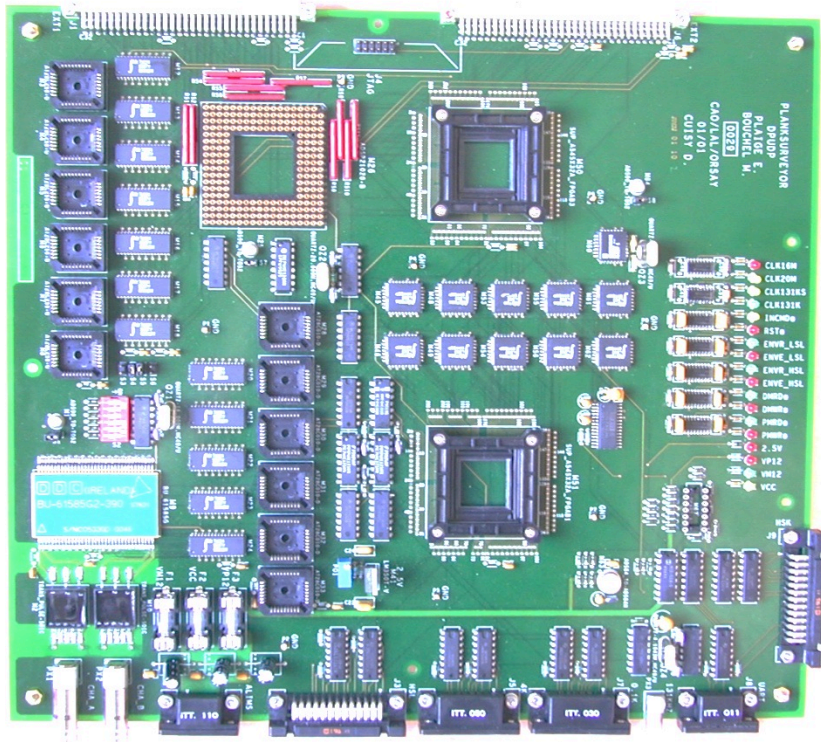
*Contraintes consistantes à partir des
différents spectres TT, TE, EE*



Plan de l'exposé

- 50 années de fond cosmologique
- ➔ • *PLANCK* à l'IN2P3
- Inflation, modèle cosmologique, neutrinos
- COrE – un satellite de 4ème génération européen
- CMB-S4 – un grand observatoire au sol
- Perspectives et "feuille de route"

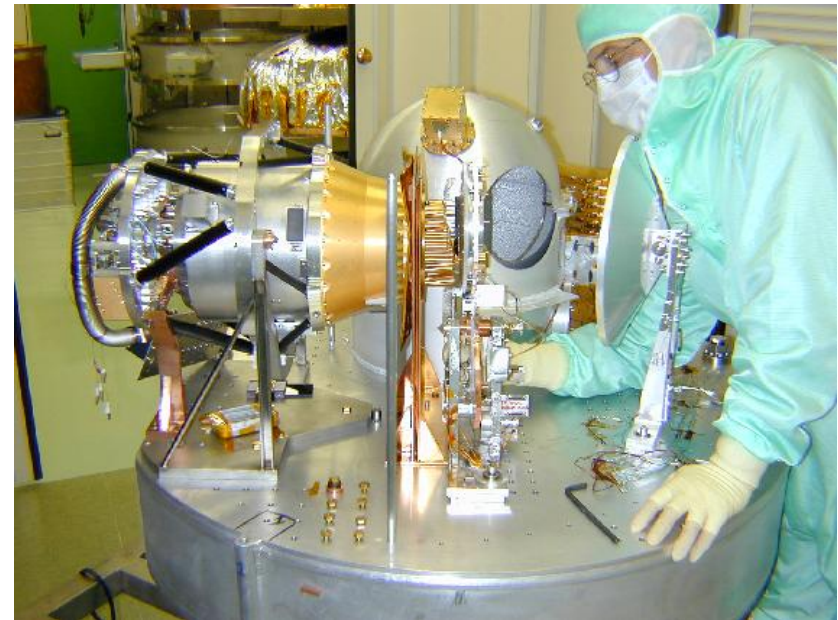
Contributions techniques (instrument)



DPU fabriquée à l'IN2P3 (LAL)

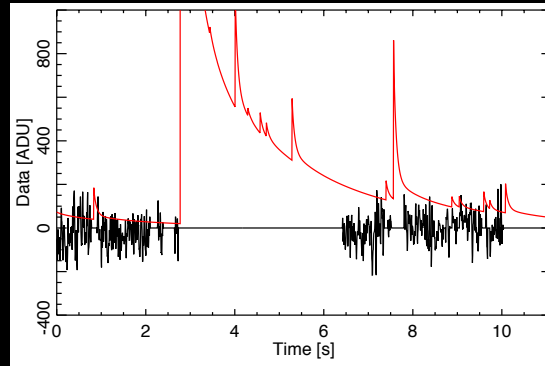
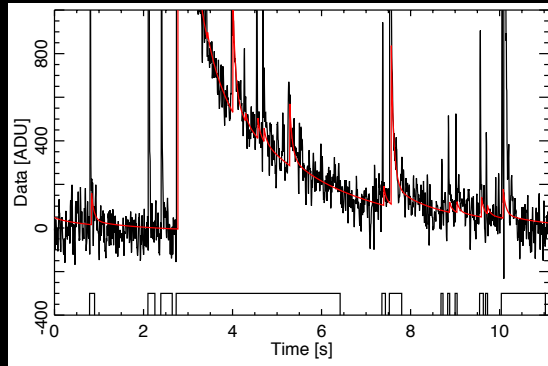
- Electronique de contrôle du 18K (LPSC)
- Tests post-lancement au sol (LPSC et APC)

IN2P3 depuis 1997

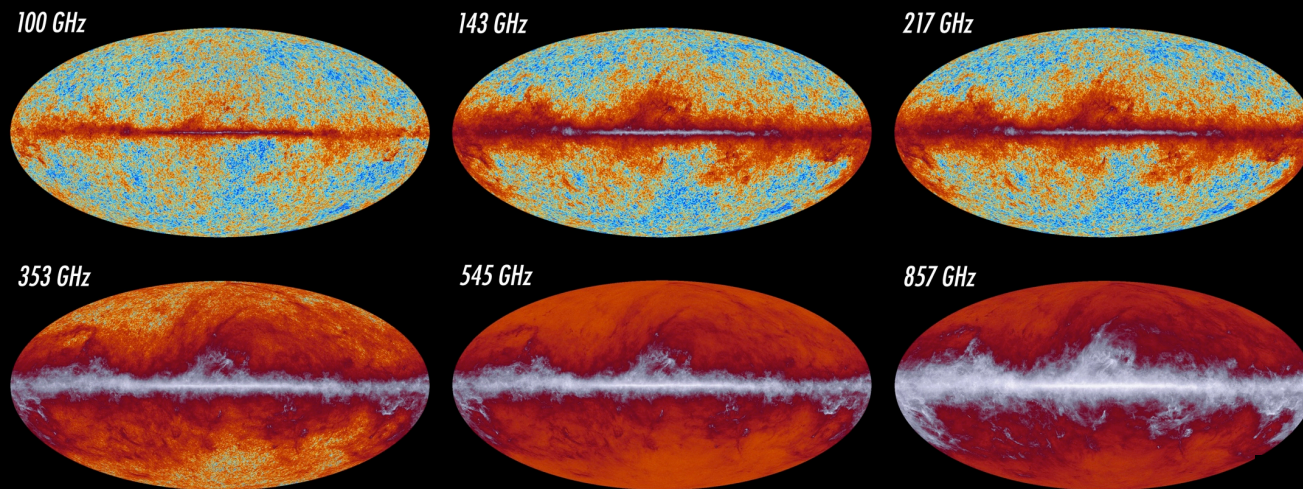


Étalonnage à Orsay
(contributions IN2P3: APC, LAL, LPSC)

Des flots de données aux cartes de Planck HFI

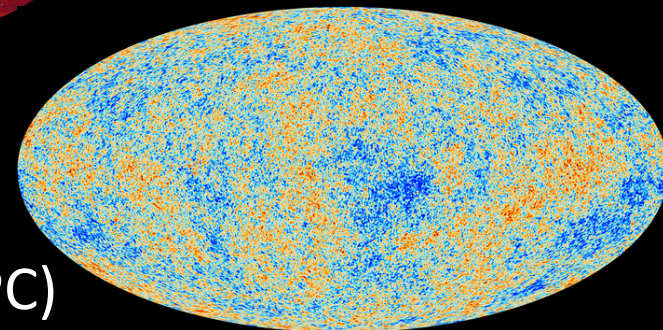


Traitement des flots de données (LPSC, APC)

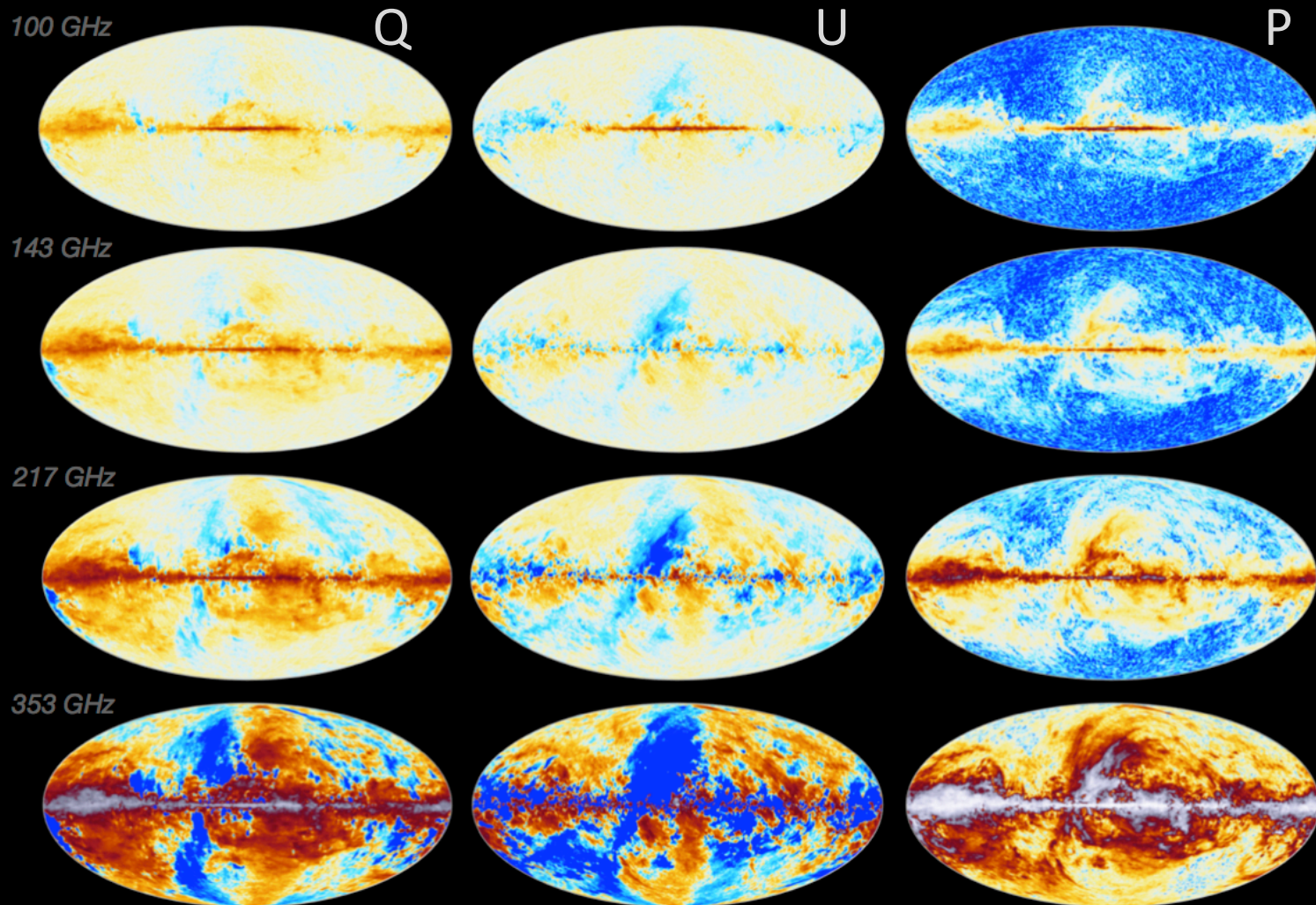


Cartes d'intensité de Planck HFI (LAL)

Séparation de composantes (APC)

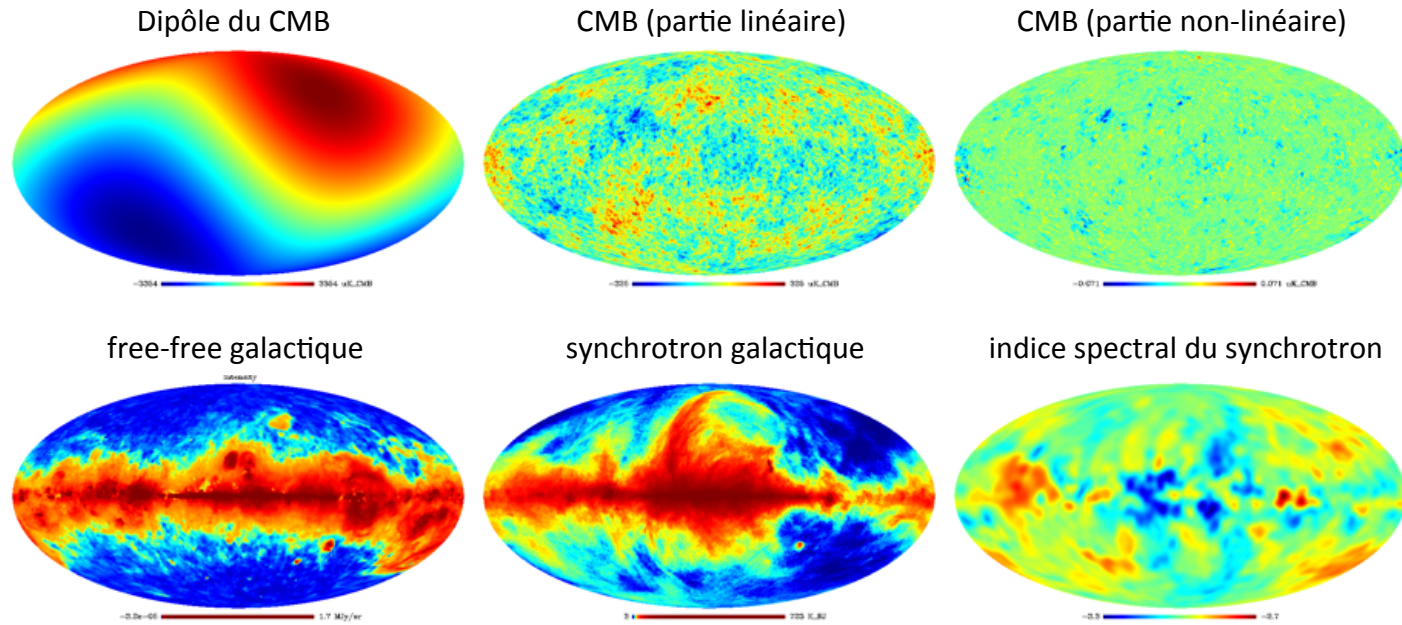


Cartes de Planck HFI : Polarisation



Planck Sky Model


Welcome to the PSM website!



The project





The Planck Sky Model (PSM) is a global representation of the multi-component sky at frequencies ranging from a few GHz to a few THz. It is designed to summarize in a synthetic way as much as possible of our present knowledge of the GHz sky. It comes with a complete and versatile set of programs and data, that can be used for the simulation or the prediction of sky emission in the frequency range of typical CMB experiments, and in particular of the Planck sky mission. It has originally been developed as part of the activities of Planck component separation Working Group (or "Working Group 2" - WG2), and of the ADAMIS team at APC.

Planck Sky Model

Date	Release page	Comments	Download user manual in pdf format 	Status
26 Jun 2014	v1.9.0	Version used to generate FFP8 simulations.	PSM_user_manual_v1_9_0.pdf	RESTRICTED
27 Feb 2014	v1.8.0	Major update after FFP7 simulations (snapshot before new major update for FFP8).	PSM_user_manual_v1_8_0.pdf	RESTRICTED
31 May 2013	v1.7.8	This is the public release that goes with the PSM Pre-Launch publication.	PSM_user_manual_v1_7_8.pdf	PUBLIC
24 September 2012	v1.7.7	This is a minor update of v1.7.6. The documentation has been expanded, and some details have been fixed in various places (nothing critical).	PSM_user_manual_v1_7_7.pdf	RESTRICTED
18 September 2012	v1.7.6	This is a major update of the PSM software. See the release page for details.	PSM_user_manual_v1_7_6.pdf	RESTRICTED
21 March 2012	v1.7.5	This is a minor update of v1.7.4. A new feature is a model of galactic magnetic field according to Fauvet et al. 2011, that can be used to generate templates of polarised galactic emission. Available instrument models based on Planck RIMOs have been temporarily modified, but probably need a complete revision.	PSM_user_manual_v1_7_5.pdf	RESTRICTED
16 March 2012	v1.7.4	Version essentially fixing bugs introduced in version 1.7.3: Corrected dust polarisation amplitude, fixed bugs for Gaussian CMB (which has been improved and tested more thoroughly). Also expanded the documentation, implemented relativistic SZ effect included for some SZ models, and updated the radio-frequency part of ultra-compact HII regions.	PSM_user_manual_v1_7_4.pdf	RESTRICTED
04 December 2011	v1.7.3	Version updated and released specifically for preparing Planck FFP4 simulations. Not recommended (tested only for very limited configurations).	PSM_user_manual_v1_7_3.pdf	RESTRICTED
28 September 2011	v1.7.2	This version is a minor update of v1.7.1.	PSM_user_manual_v1_7_2.pdf	RESTRICTED
13 September 2011	v1.7.1	This version updates some templates for the Galaxy, corrects high multipole galactic emission and fixes a few minor bugs in v1.7.0-beta.	PSM_user_manual_v1_7_1.pdf	RESTRICTED
25 August 2011	v1.7.0-beta	This version is a major revision of the PSM, released internally to the Planck collaboration for beta-testing.	PSM_user_manual_v1_7_0-beta.pdf	RESTRICTED

Impact de Planck / CMB : top-5 sur ADS en 2014 ...

(5 publications Planck dans le top-10)

#	Bibcode Authors	Cites Title	Date	List of Links Access Control Help
1	 2014A&A...571A..16P Planck Collaboration; Ade, P. A. R.; Aghanim, N.; Armitage-Caplan, C.; Arnaud, M.; Ashdown, M.; Atrio-Barandela, F.; Aumont, J.; Baccigalupi, C.; Banday, A. J.; and 255 coauthors	3449.000 Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters	11/2014	A E F X
2	 2014PhRvL.112x1101A Ade, P. A. R.; Aikin, R. W.; Barkats, D.; Benton, S. J.; Bischoff, C. A.; Bock, J. J.; Brevik, J. A.; Buder, I.; Bullock, E.; Dowell, C. D.; and 38 coauthors	1102.000 Detection of B-Mode Polarization at Degree Angular Scales by BICEP2	06/2014	A E X
3	 2014A&A...571A..22P Planck Collaboration; Ade, P. A. R.; Aghanim, N.; Armitage-Caplan, C.; Arnaud, M.; Ashdown, M.; Atrio-Barandela, F.; Aumont, J.; Baccigalupi, C.; Banday, A. J.; and 234 coauthors	944.000 Planck 2013 results. XXII. Constraints on inflation	11/2014	A E F X
4	2014ChPhC..38i0001O Olive, K. A.; Particle Data Group	887.000 Review of Particle Physics	08/2014	A E
5	 2014A&A...571A...1P Planck Collaboration; Ade, P. A. R.; Aghanim, N.; Alves, M. I. R.; Armitage-Caplan, C.; Arnaud, M.; Ashdown, M.; Atrio-Barandela, F.; Aumont, J.; Aussel, H.; and 391 coauthors	713.000 Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results	11/2014	A E F X

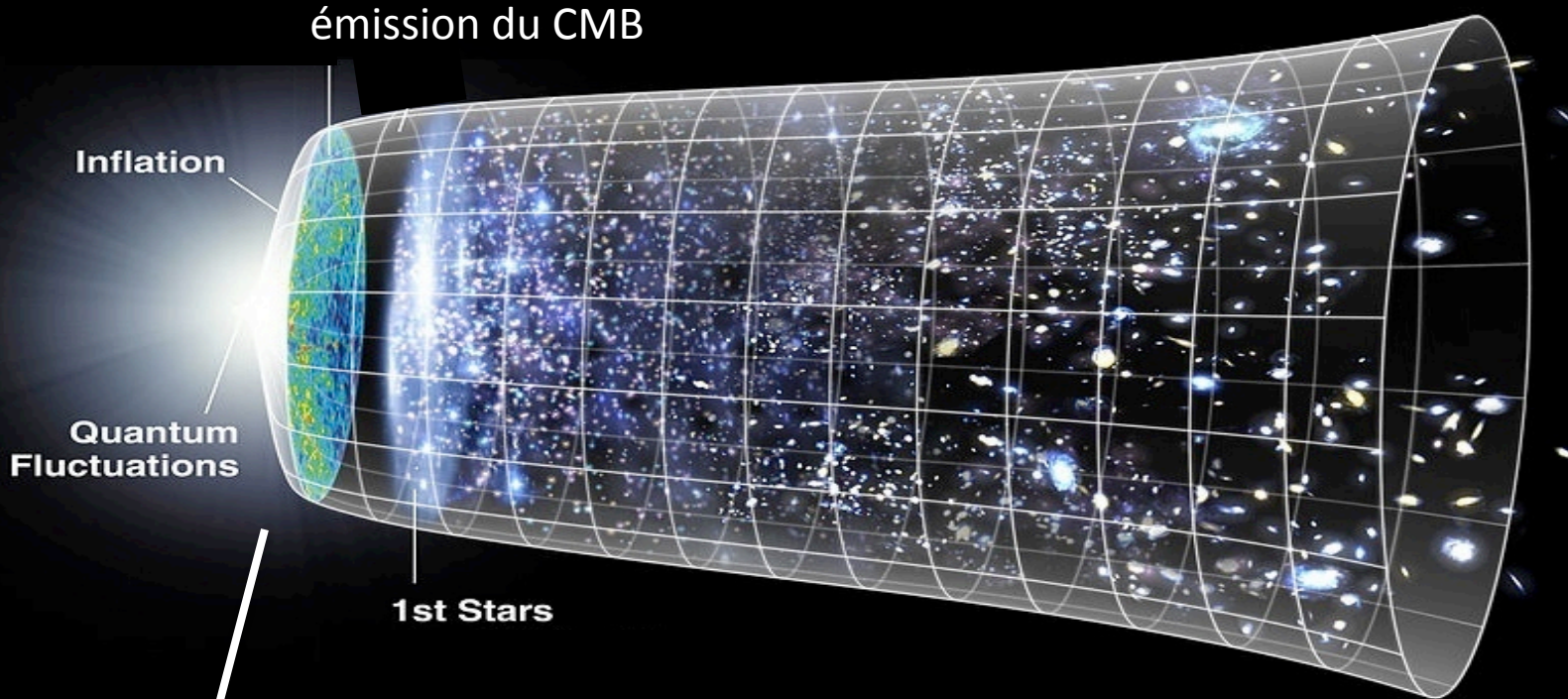
... et top-5 en 2015 !

#	Bibcode Authors	Cites Title	Date	List of Links Access Control Help			
1	<input type="checkbox"/> 2015arXiv150201589P Planck Collaboration; Ade, P. A. R.; Aghanim, N.; Arnaud, M.; Ashdown, M.; Aumont, J.; Baccigalupi, C.; Banday, A. J.; Barreiro, R. B.; Bartlett, J. G.; and 251 coauthors	653.000 Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters	02/2015	A		X	
2	<input type="checkbox"/> 2015arXiv150202114P Planck Collaboration; Ade, P. A. R.; Aghanim, N.; Arnaud, M.; Arroja, F.; Ashdown, M.; Aumont, J.; Baccigalupi, C.; Ballardini, M.; Banday, A. J.; and 236 coauthors	254.000 Planck 2015 results. XX. Constraints on inflation	02/2015	A		X	
3	<input type="checkbox"/> 2015EPJC...75..212K Khachatryan, V.; Sirunyan, A. M.; Tumasyan, A.; Adam, W.; Bergauer, T.; Dragicovic, M.; Erö, J.; Friedl, M.; Frühwirth, R.; Ghete, V. M.; and 2141 coauthors	175.000 Precise determination of the mass of the Higgs boson and tests of compatibility ...	05/2015	A	E	X	
4	<input type="checkbox"/> 2015PhRvL.114j1301B BICEP2/Keck and Planck Collaborations; Ade, P. A. R.; Aghanim, N.; Ahmed, Z.; Aikin, R. W.; Alexander, K. D.; Arnaud, M.; Aumont, J.; Baccigalupi, C.; Banday, A. J.; and 269 coauthors	157.000 Joint Analysis of BICEP2/Keck Array and Planck Data	03/2015	A	E	X	D
5	<input type="checkbox"/> 2015MNRAS.446..521S Schaye, Joop; Crain, Robert A.; Bower, Richard G.; Furlong, Michelle; Schaller, Matthieu; Theuns, Tom; Dalla Vecchia, Claudio; Frenk, Carlos S.; McCarthy, I. G.; Helly, John C.; and 12 coauthors	152.000 The EAGLE project: simulating the evolution and assembly of galaxies ...	01/2015	A	E	F	X

Plan de l'exposé

- 50 années de fond cosmologique
- *PLANCK* à l'IN2P3
- ➔ • Inflation, modèle cosmologique, neutrinos
- COrE – un satellite de 4ème génération européen
- CMB-S4 – un grand observatoire au sol
- Perspectives et "feuille de route"

Physique du CMB



Inflation
Physique à $\approx 10^{16}$ GeV
 $E > 10^{12} \times E_{\text{LHC}}$

Extrêmement important and fondamental !

$$z < 2 \times 10^6$$

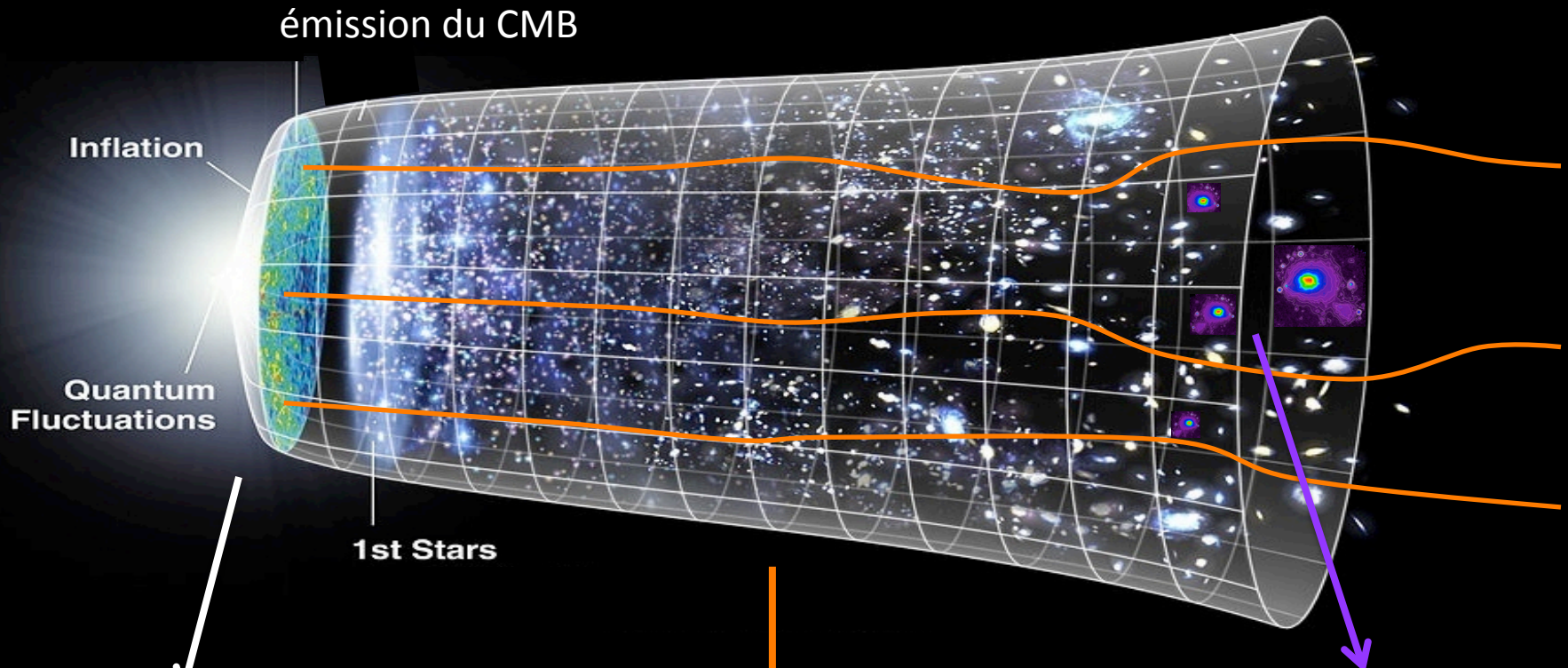
Histoire thermique de l'Univers
(injection d'énergie dans le CMB)

$$z \approx 6-11$$

Réionisation

$$z \approx 0-1$$

Effet Sach Wolfe intégré:
Expansion accélérée



Inflation

Physique à $\approx 10^{16}$ GeV
 $E > 10^{12} \times E_{\text{LHC}}$

$$z \approx 1-3$$

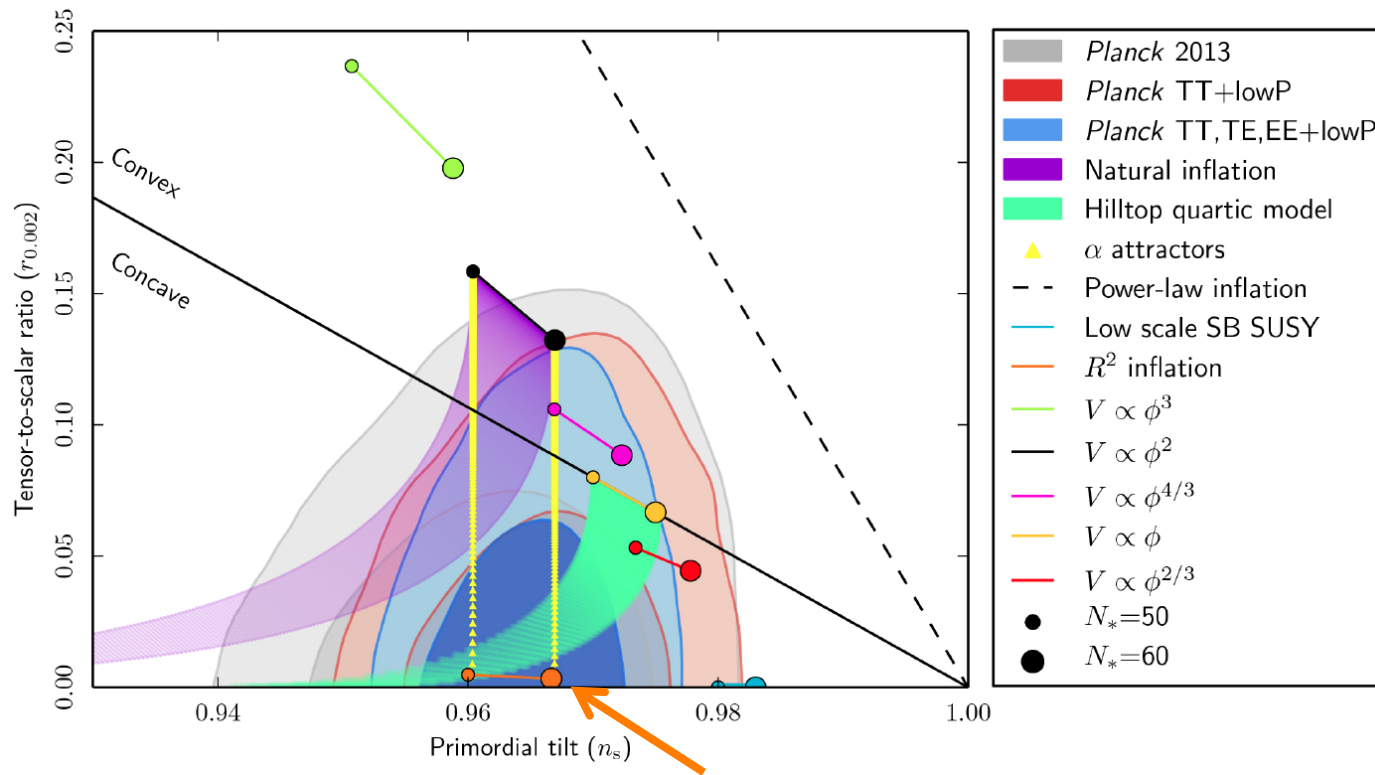
Lentille gravitationnelle
Distribution de matière noire

$$z \approx 0-2$$

Effet Sunyaev-Zeldovich:
Distribution du gaz chaud
et champ de vitesses

Inflation

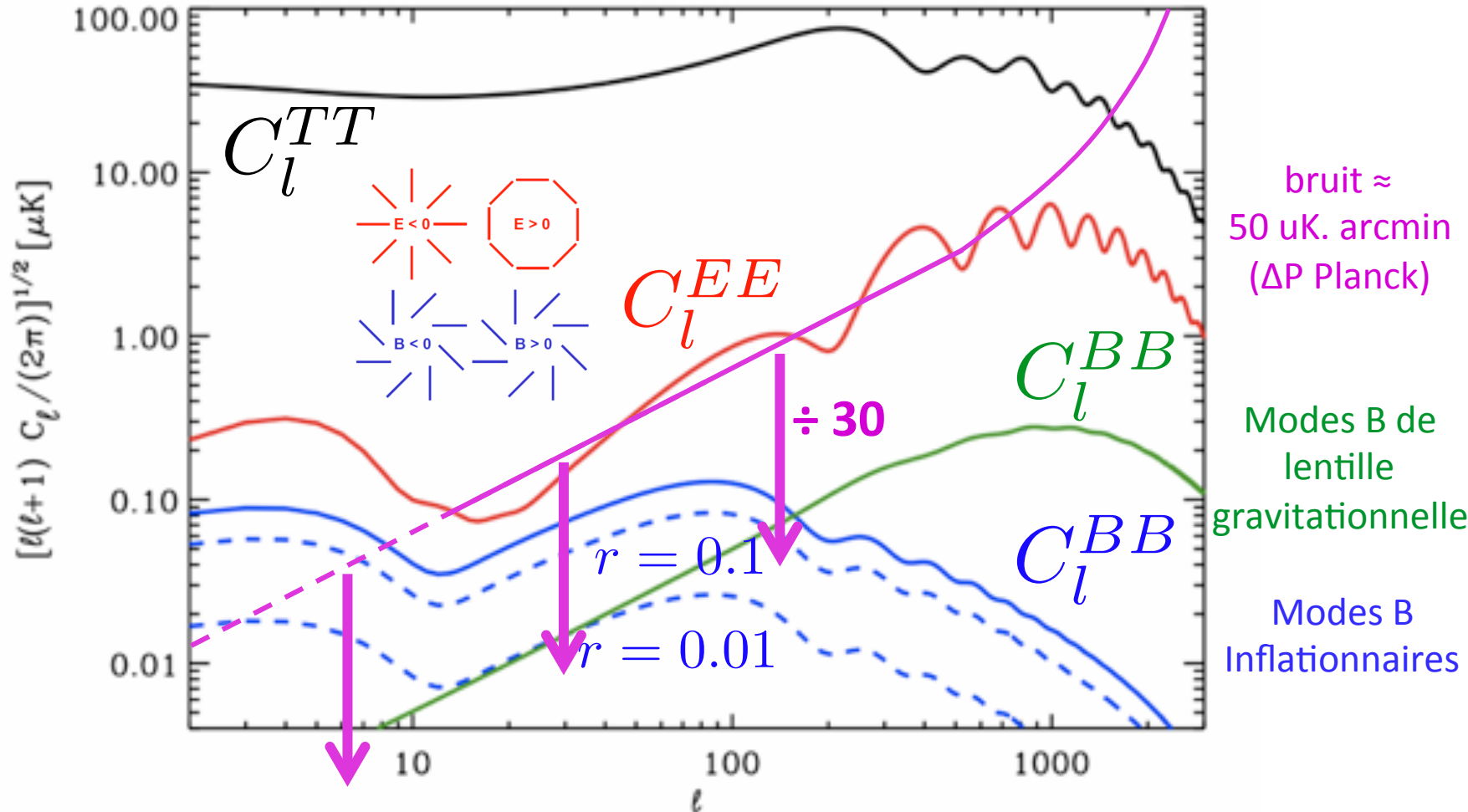
(publication Planck sous responsabilité IN2P3 – M. Bucher, APC)



Objectifs futurs pour l'inflation:

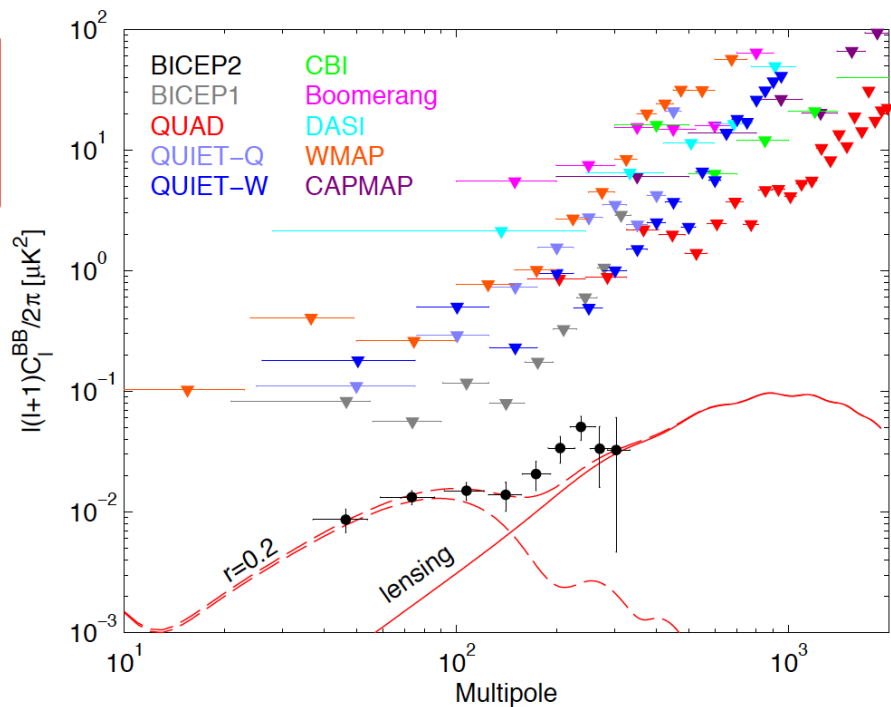
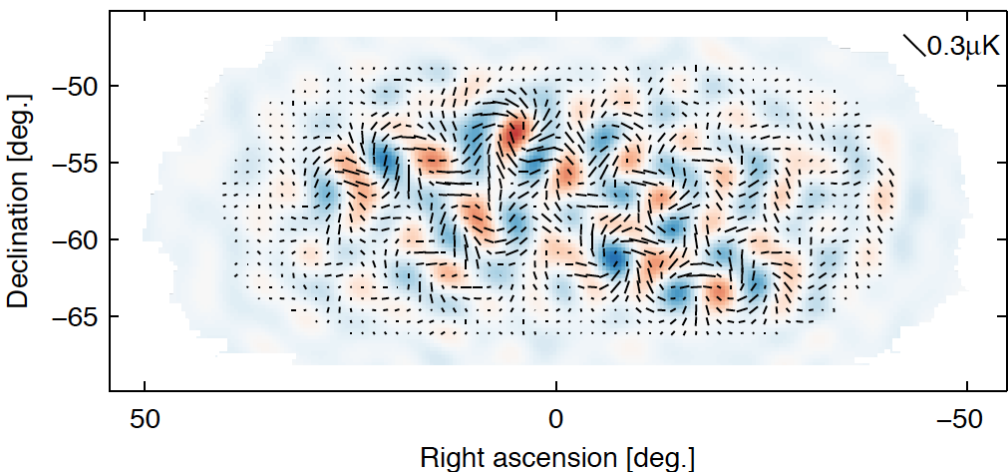
- détecter sans ambiguïté $r \approx 3 \times 10^{-3}$ polarisation B
- améliorer la mesure de n_s T,E + autres sondes
- autres contraintes: "running", n_T ,
- non gaussianité, ...

Spectres en intensité et polarisation



Inflation: BICEP2

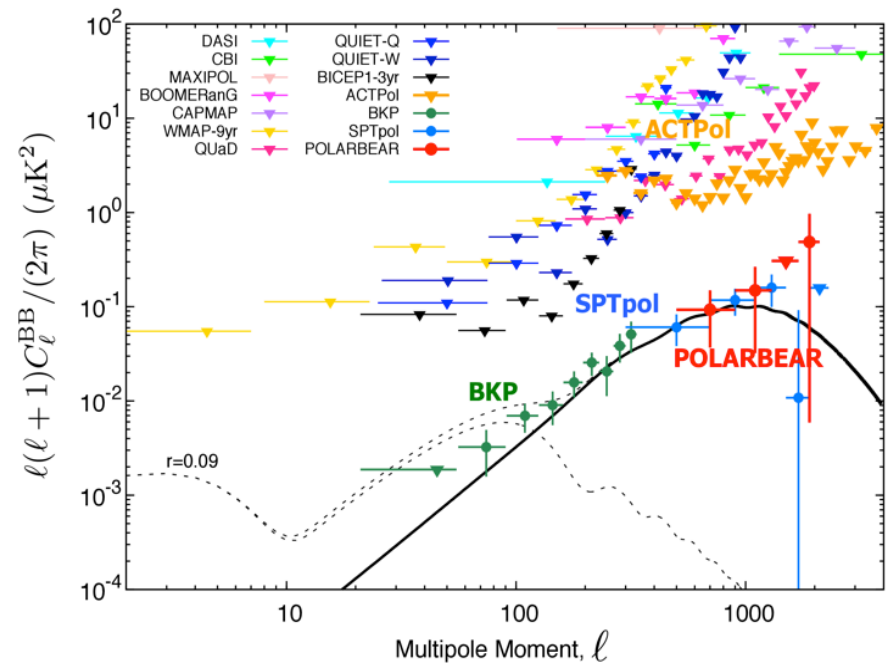
BICEP2: B signal



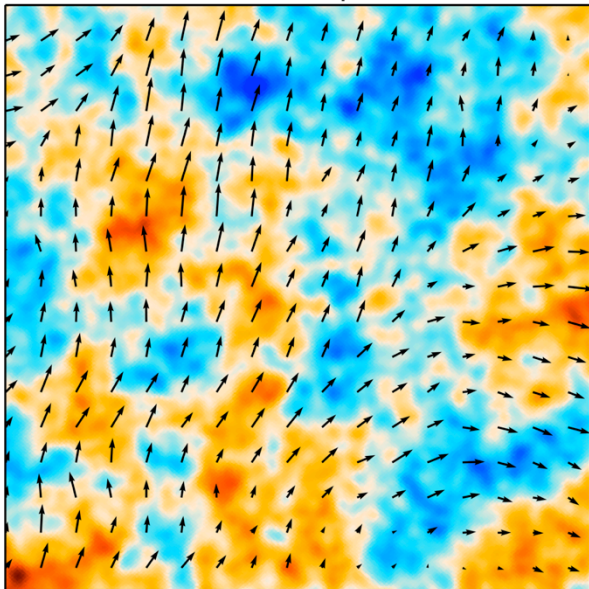
Données de BICEP2
compatibles avec $r=0.2$!

Analyse jointe avec Planck :

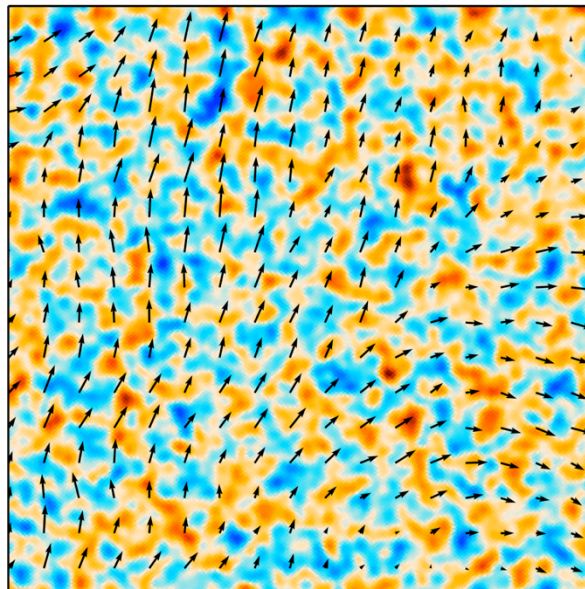
- **poussière galactique !**
- $r < 0.12$ (Planck + BICEP/Keck)
- $r < 0.09$ (Planck + WMAP)



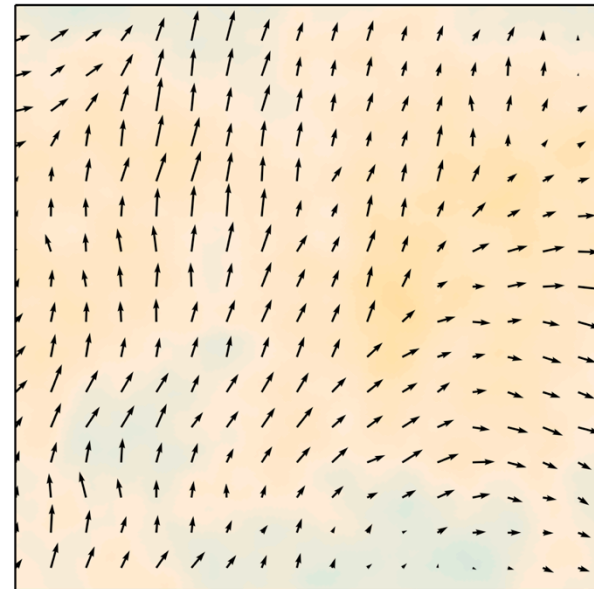
Unlensed Temperature



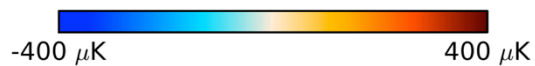
Unlensed E-Modes



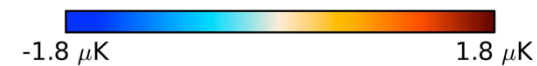
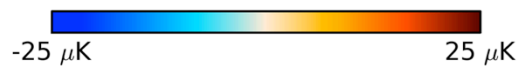
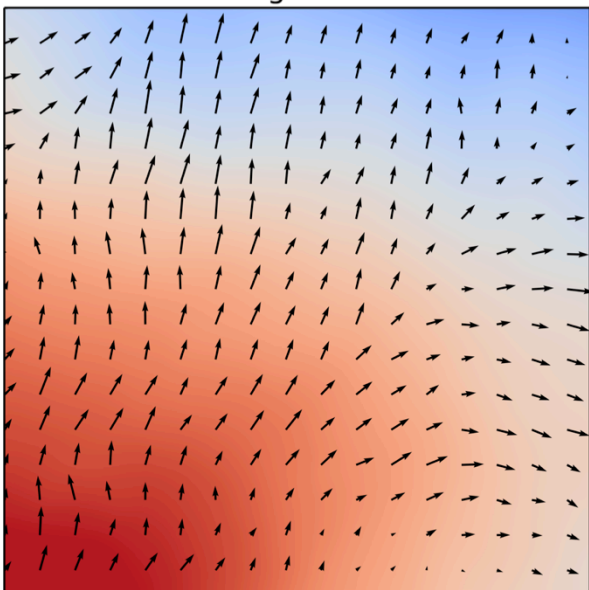
Unlensed B-Modes



$r = 0.01$

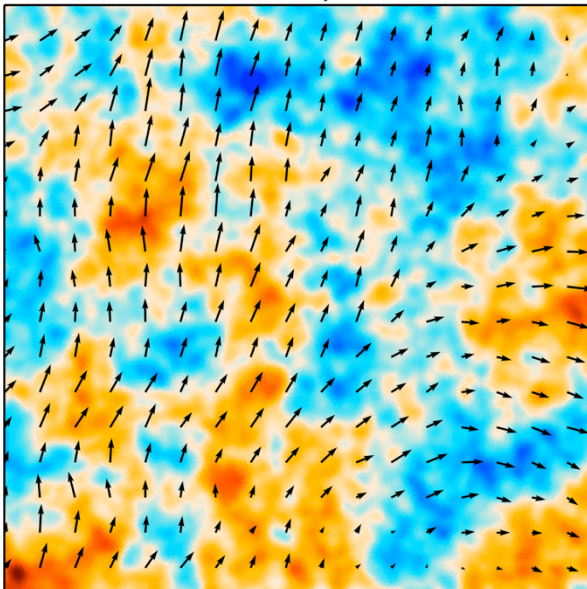


Lensing Potential

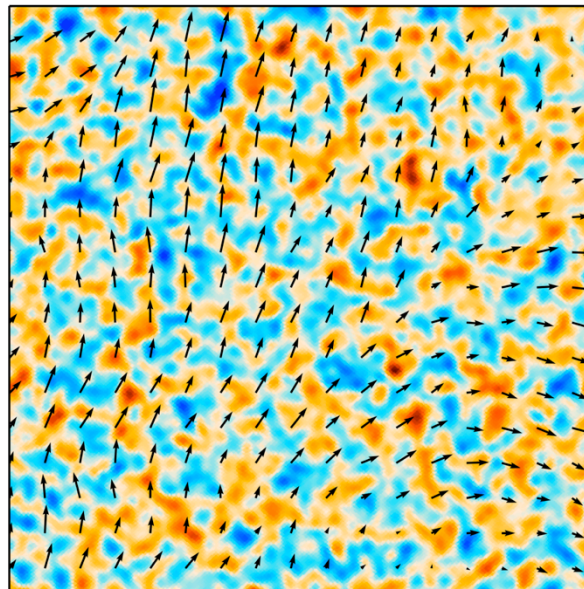


Effet de lentille gravitationnelle
sur le CMB

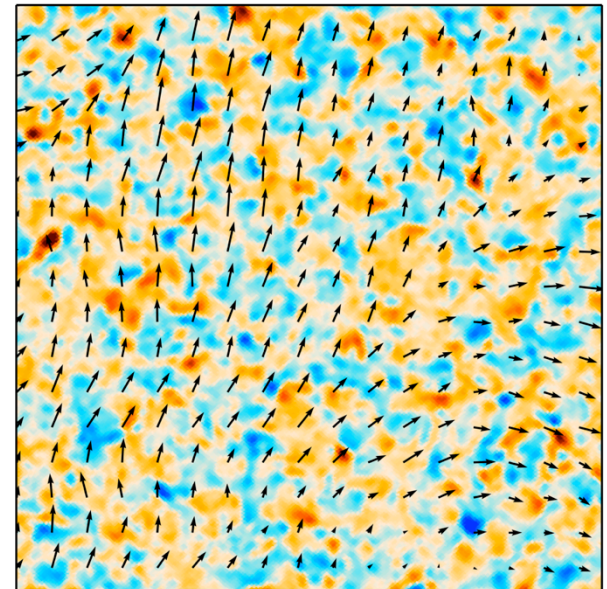
Lensed Temperature



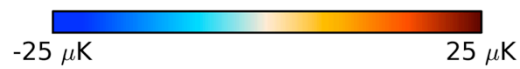
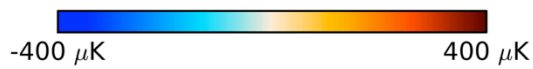
Lensed E-Modes



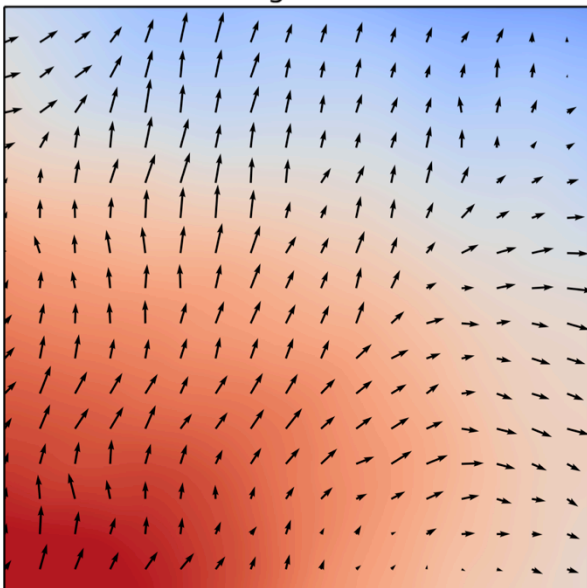
Lensed B-Modes



$r = 0.01$



Lensing Potential



Effet de lentille gravitationnelle
 sur le CMB

Effet de lentille gravitationnelle sur le CMB

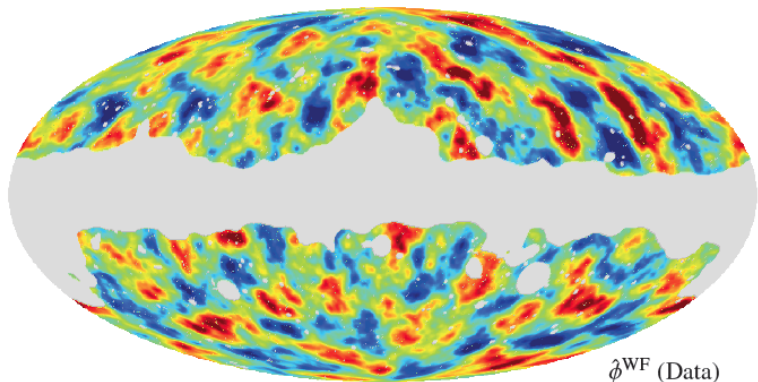
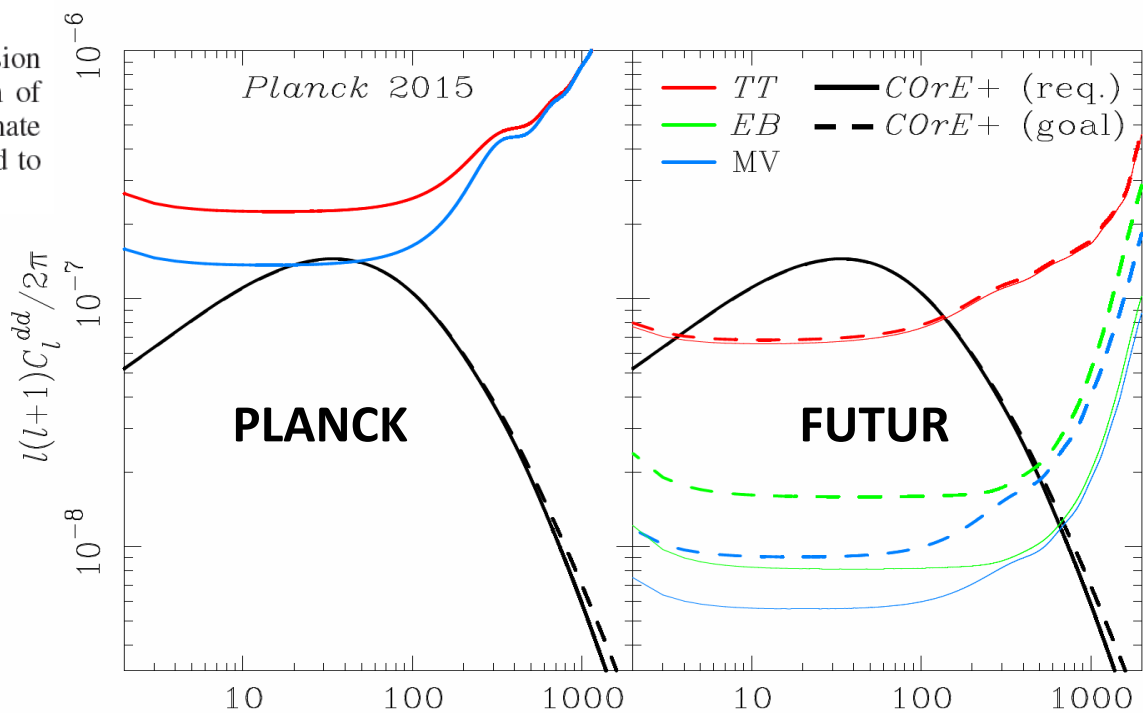
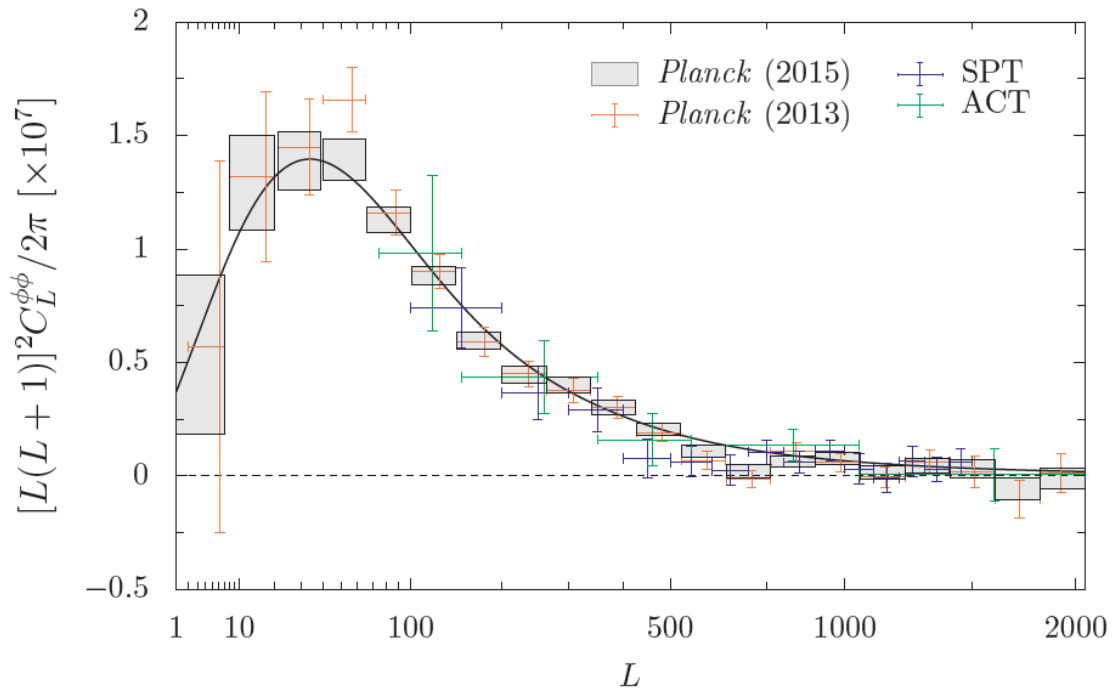


Fig. 2 Lensing potential estimated from the SMICA full-mission CMB maps using the MV estimator. The power spectrum of this map forms the basis of our lensing likelihood. The estimate has been Wiener filtered following Eq. (5), and band-limited to $8 \leq L \leq 2048$.



Effet de lentille gravitationnelle sur le CMB

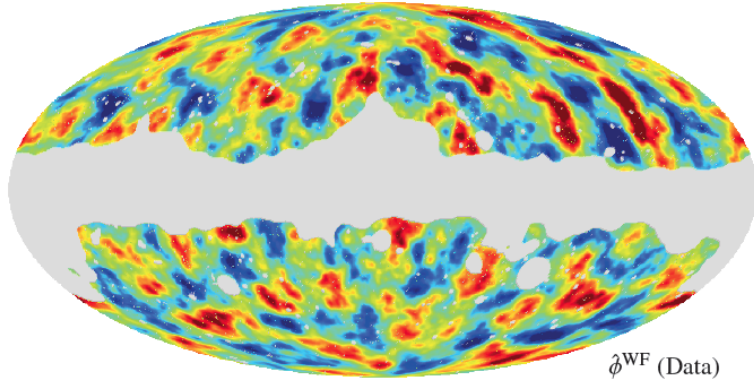


Fig. 2 Lensing potential estimated from the SMICA full-mission CMB maps using the MV estimator. The power spectrum of this map forms the basis of our lensing likelihood. The estimate has been Wiener filtered following Eq. (5), and band-limited to $8 \leq L \leq 2048$.

Travail piloté à l'IN2P3 (L. Perotto)

22 octobre 2015

+ Carte de polarisation E vue par Planck

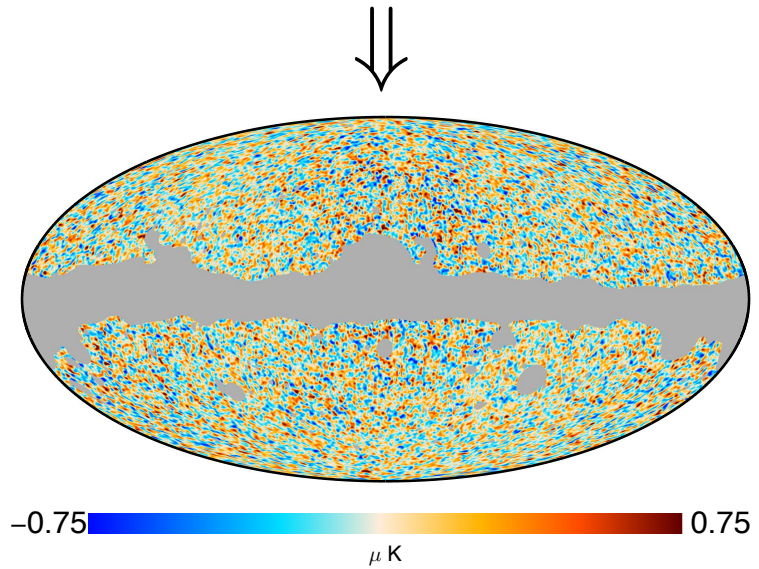
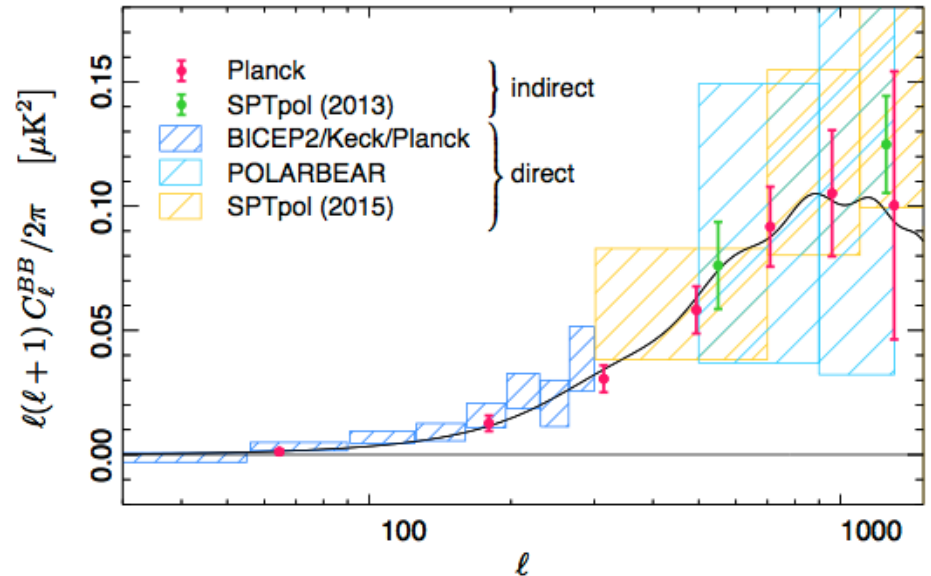
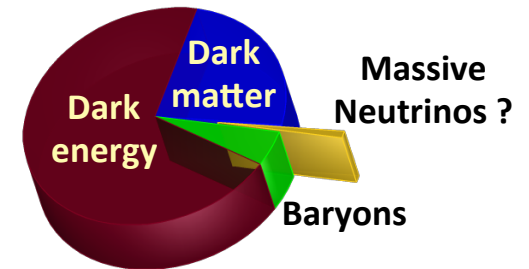
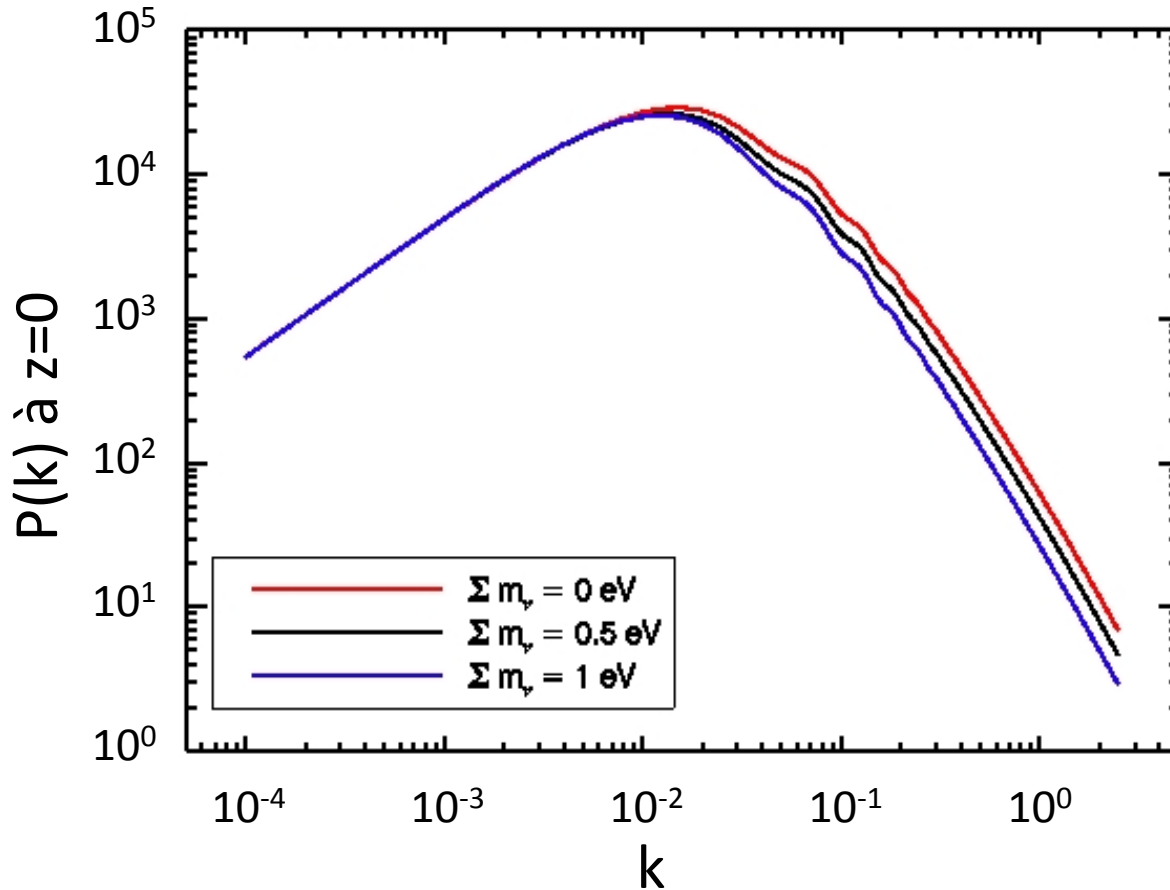


Figure 5. Planck-derived B -mode template map computed using the SMICA foreground-cleaned CMB maps. For illustration, the map has been convolved with a Gaussian beam of $10'$ (upper panel) and $60'$ (lower panel) FWHM. The grey area represents the galactic mask.

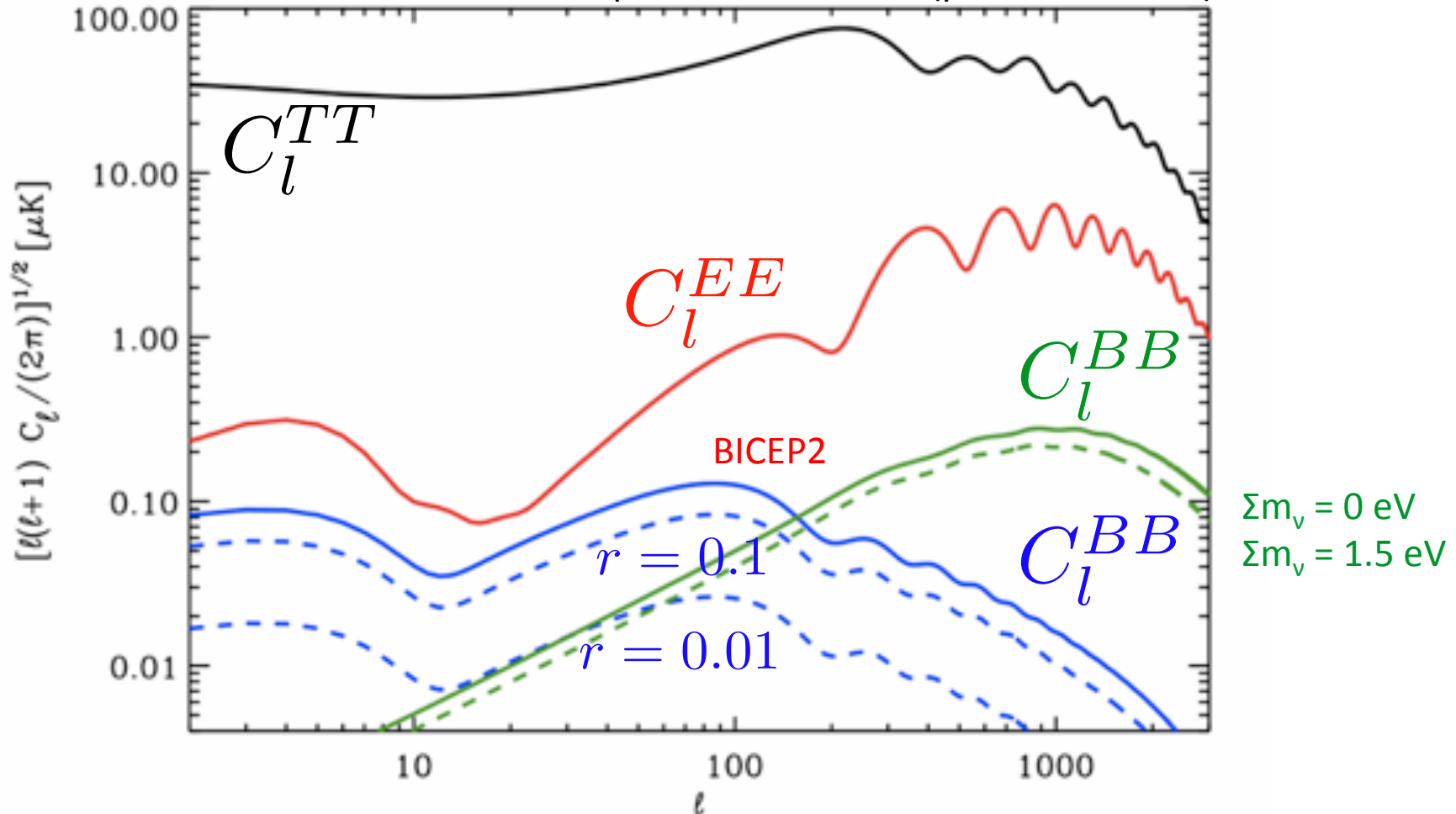


Contraindre les masses des neutrinos

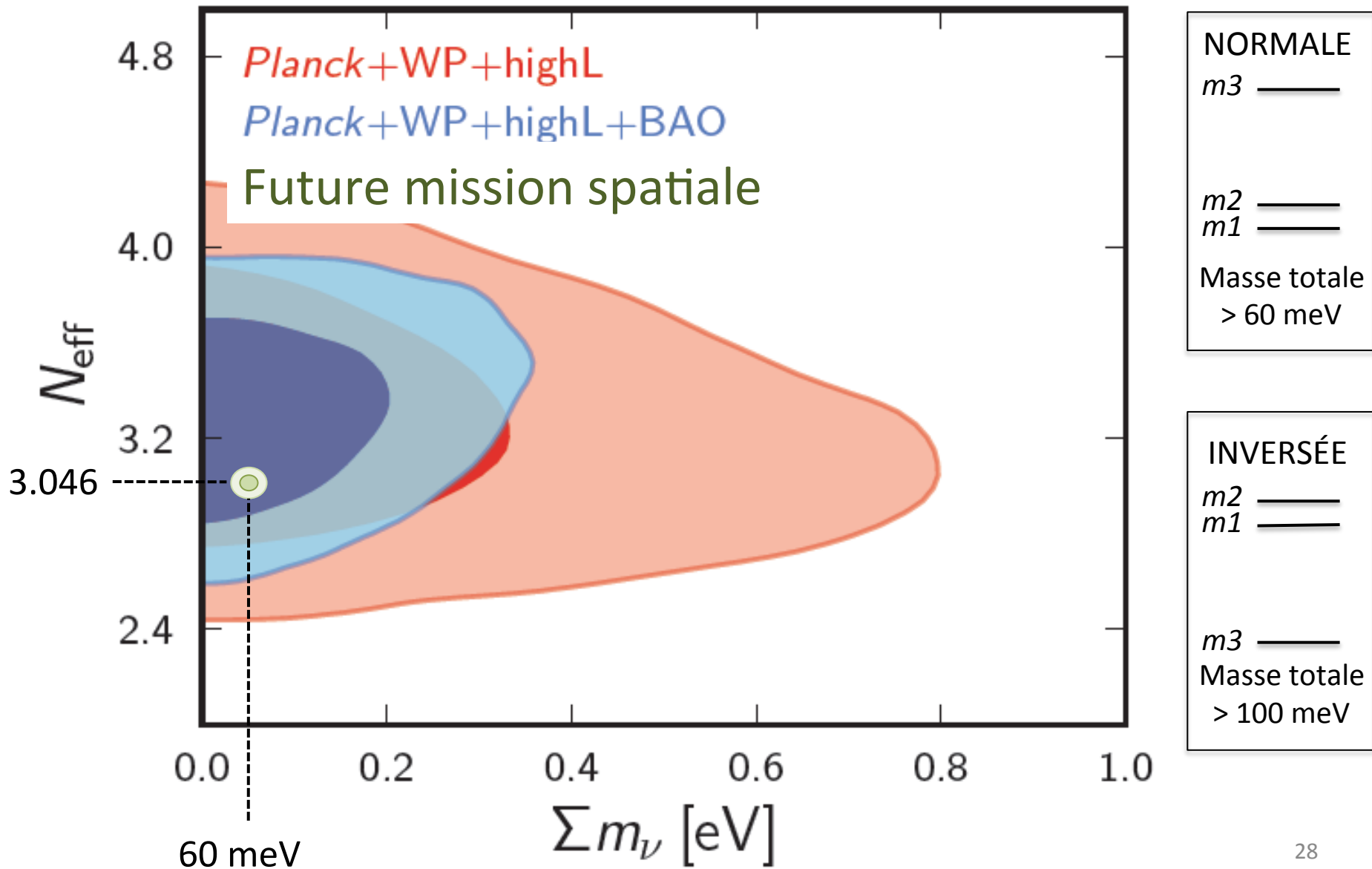


Temperature & Polarisation CMB C_l

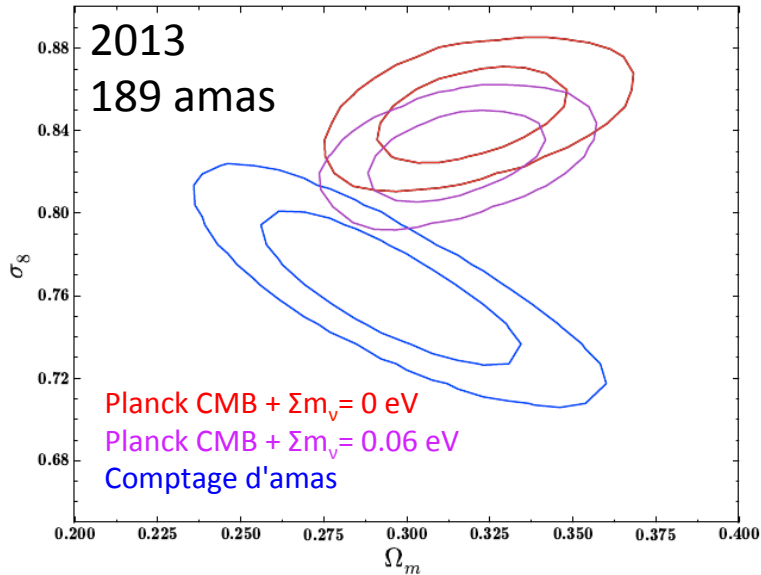
adapté de J. Carlstrom (présentation P5)



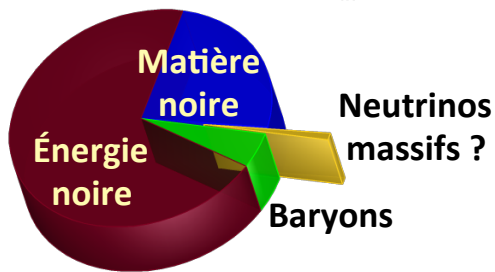
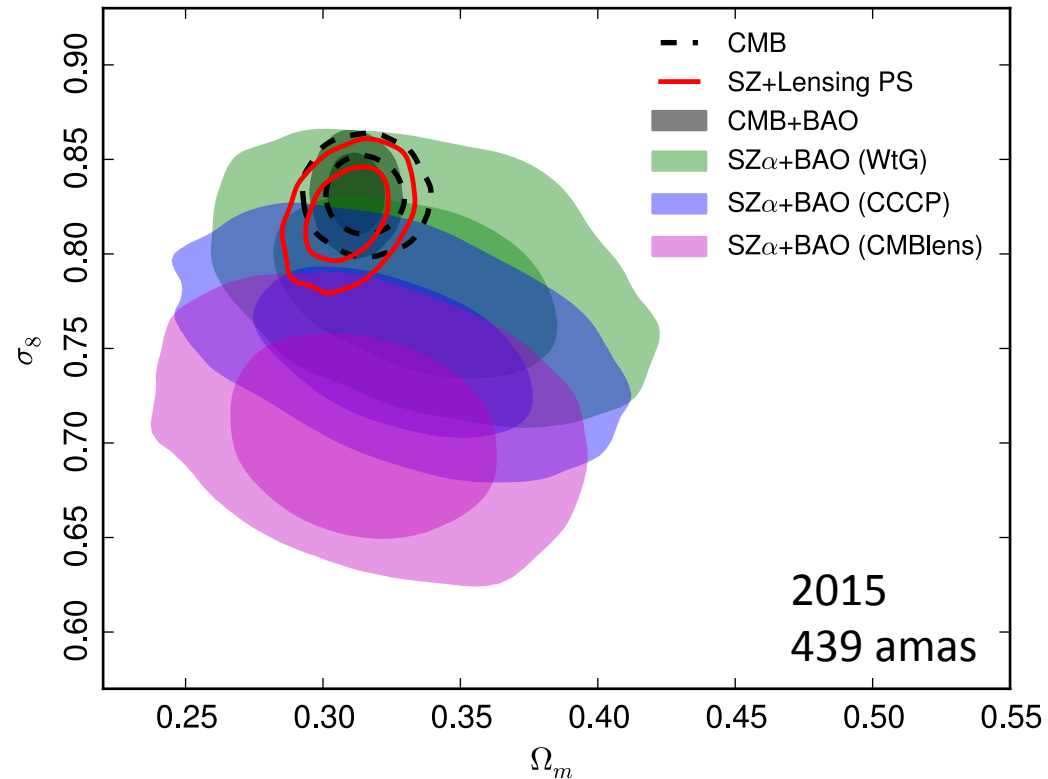
Secteur des neutrinos



Amas de galaxies et contraintes cosmologiques



Revoir la cosmologie ?
Revoir la modélisation des amas (relation Y-M)



Cartes d'effet SZ
Spectre de l'effet SZ
Analyses jointes avec SDSS et avec X

Plan de l'exposé

- 50 années de fond cosmologique
- *PLANCK* à l'IN2P3
- Inflation, modèle cosmologique, neutrinos
- ➔ • COrE – un satellite de 4ème génération européen
- CMB-S4 – un grand observatoire au sol
- Perspectives et "feuille de route"

Pourquoi une mission CMB post-Planck?

- Planck
 - a tiré l'essentiel de l'information des anisotropies de température,
 - sera très loin d'exploiter pleinement l'information de la polarisation du CMB.
- La polarisation du CMB est une source d'information cosmologique unique:
 - *globalité* (ensemble des paramètres dont certains quasi-inaccessibles par ailleurs, e.g. r),
 - *complémentarité* avec température (sonde indépendante), avec d'autres sondes LSS,
 - *nature* (quasi-linéarité).
- La technologie permet maintenant d'envisager une mission ultime qui extrairait au mieux toute l'information polarisée cosmologique: mission **COre** à l'ESA.
- La France et l'IN2P3 peuvent y jouer un rôle important
 - Communauté forte et expérimentée
 - Des technologies et moyens clés
 - M4 : 25 IN2P3 dont 2 dans le comité de pilotage (M. Bucher, J. Delabrouille)
 - Organisation du kick-off meeting pour M5 à l'APC

ESA : annonce de l'appel M5 le 20 juillet 2015

TENTATIVE SCHEDULE FOR THE M5 CALL

The current tentative schedule is offered for planning purposes, and it's liable to evolve, also based on the responses received in the form of SoI.

Budget prévisionnel ESA < 550 m€

Event	Tentative date
M5 Call release	December 2015
Letters of Intent due	January 2016
Proposals due	April 2016
Evaluation process	May-June 2016
Selection of proposals for study phase	June 2016
Phase 0+A completion	June 2018
Down-selection to one mission	November 2018
Phase B1 completion	June 2020
Mission Adoption Reviews	September 2020
Mission adoption	November 2020
Launch (for an ESA-only mission)	Mid-2029 to mid-2030

25 Septembre 2015: "Statement of Interest" soumis à l'ESA
Point de contact ESA à l'IN2P3 (J. Delabrouille)

En parallèle, discussions ESA-JAXA pour une option de mission jointe

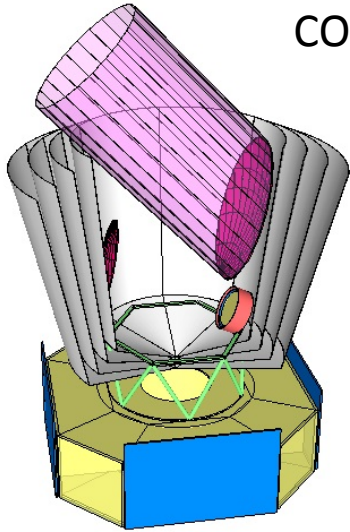
Concept proposé pour M4

Une mission dimensionnée pour la mesure de la polarisation du Fond Cosmologique (et spécifiquement les modes B, primordiaux et lentille)

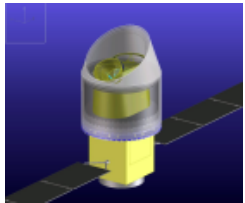
<i>Performance / caractéristique requise</i>	<i>Solution technique</i>
Résoudre les modes B du CMB $\approx 4\text{-}6'$ de résolution	Télescope de classe 1.5m $\approx 6'$ à 135 GHz; $\approx 4'$ à 200 GHz
S/N = 2-3 par mode B de lentille $\sigma_p = 1.7\text{-}2.5 \mu\text{K.arcmin}$ sur $\approx 100\%$ du ciel	De ≈ 2500 (baseline) à 5000 (extension) détecteurs à $\approx 100 \text{ mK}$
Contrôle des effets systématiques pour la mesure de polarisation	Orbite L2; Redondance et modulation de polarisation par stratégie de balayage
Contrôle/séparation des avant plans en polarisation (et intensité)	15-20 bandes de fréquence couvrant $\approx 60\text{-}600 \text{ GHz}$ (ou plus)

Satellite proposé à l'ESA pour l'appel M4

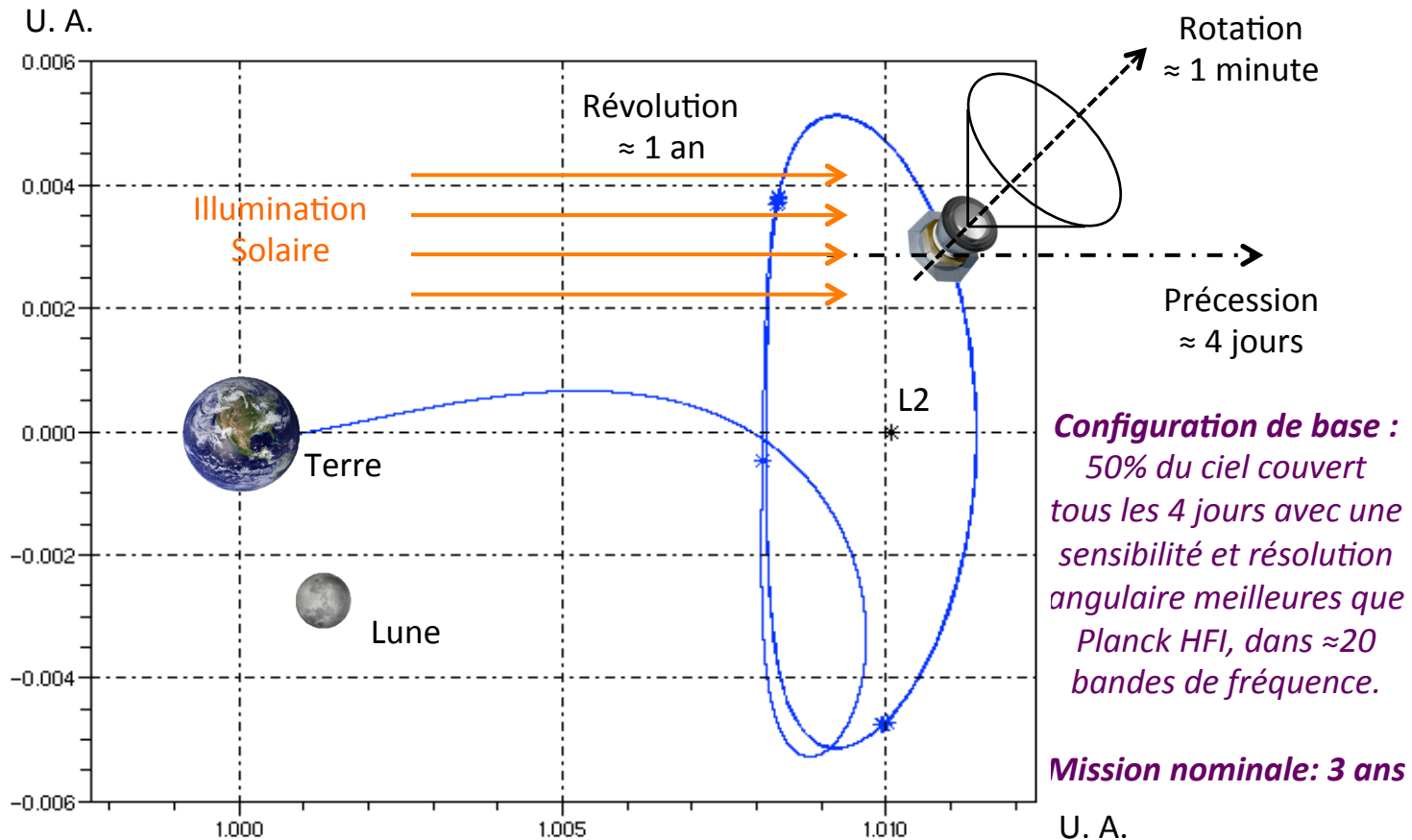
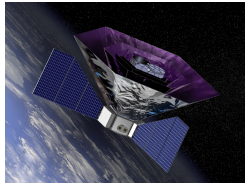
COrE+ (proposition ESA - M4) – Doit être revu et repropocé pour M5



LiteBIRD - JAXA



PIXIE – NASA ?



Contrainte du modèle cosmologique

- **Inflation** – *bien sûr, mais aussi...*
 - Cartes de distribution de masse (lentille)
 - Cartes du gaz chaud (effet SZ thermique)
 - Champ de vitesses (effet SZ cinétique)
 - Paramètres cosmologiques
 - Validation détaillée du modèle
 - Histoire thermique
 - Surprises...
- résoudre le CMB
résolution $< 4'$
- Résoudre les amas
FWHM $< 1'-3'$
- mesures absolues
avec une
précision $\approx 10^{-8}$

Extensions du modèle à 6 paramètres?

Paramètres inflationnaires (conditions initiales)

$$r = \frac{P_t(k_0)}{P_s(k_0)} = 0 \quad n_t \simeq -r/8 = 0 \quad \frac{dn_s}{d \ln k} \simeq 0$$

Courbure spatiale ?

$$\Omega_k h^2 = 0$$

Equation d'état de l'énergie noire ?

$$w_0 = -1 \quad w_1 = 0$$

Secteur des neutrinos ?

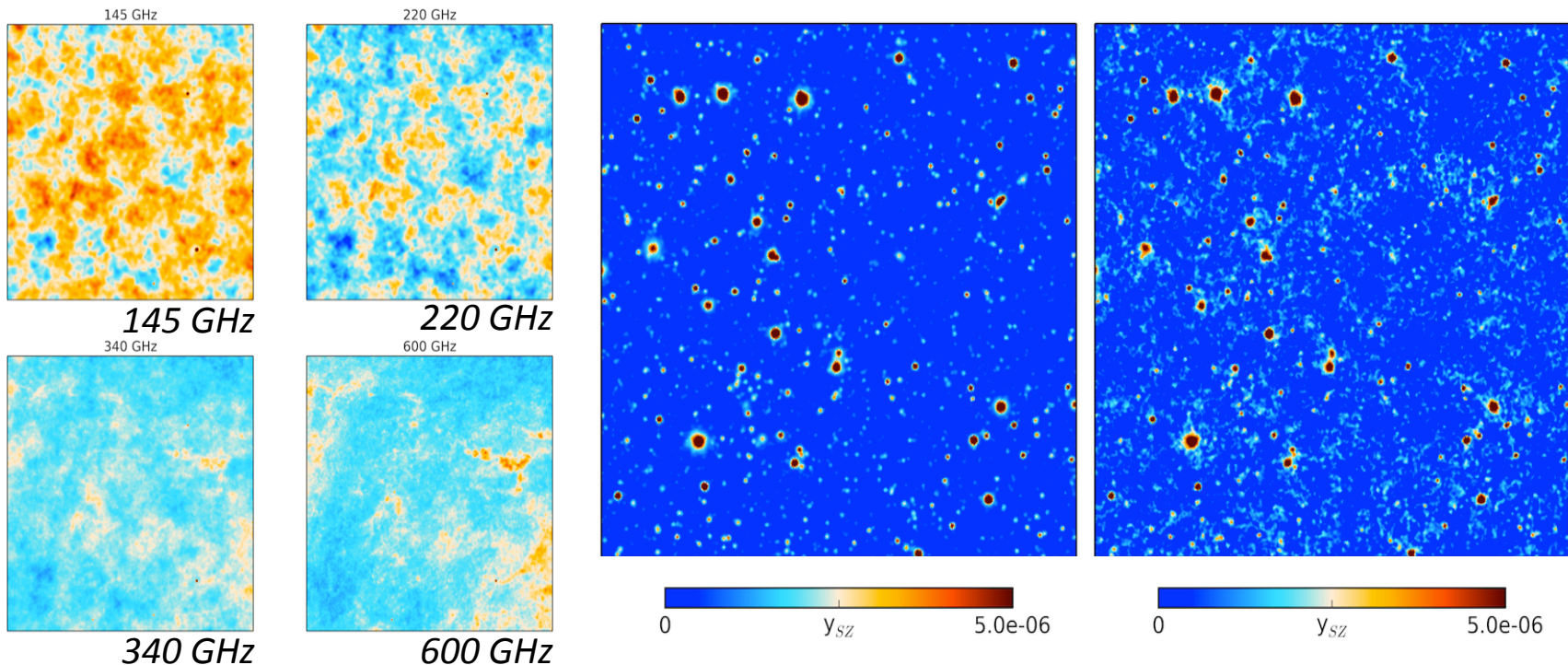
$$N_{\text{eff}} = 3.046 \quad \Omega_\nu h^2 = \frac{\Sigma m_\nu}{93 \text{ eV}} \quad \Sigma m_\nu \simeq 60 \text{ meV}$$

Abondance primordiale d'Hélium ?

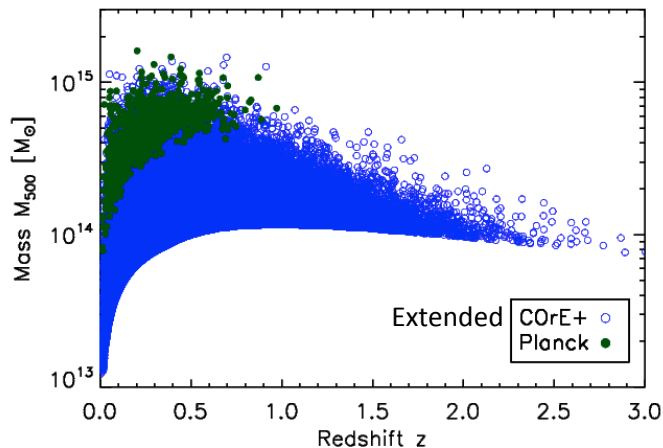
$$Y_{\text{He}} \simeq 0.25$$

Les futures observations permettront de réduire le volume de la boîte d'erreur **par un facteur >10⁶** (un facteur de ≈ 5 en moyenne pour chaque paramètre)

Observation de $>100,000$ amas de galaxies

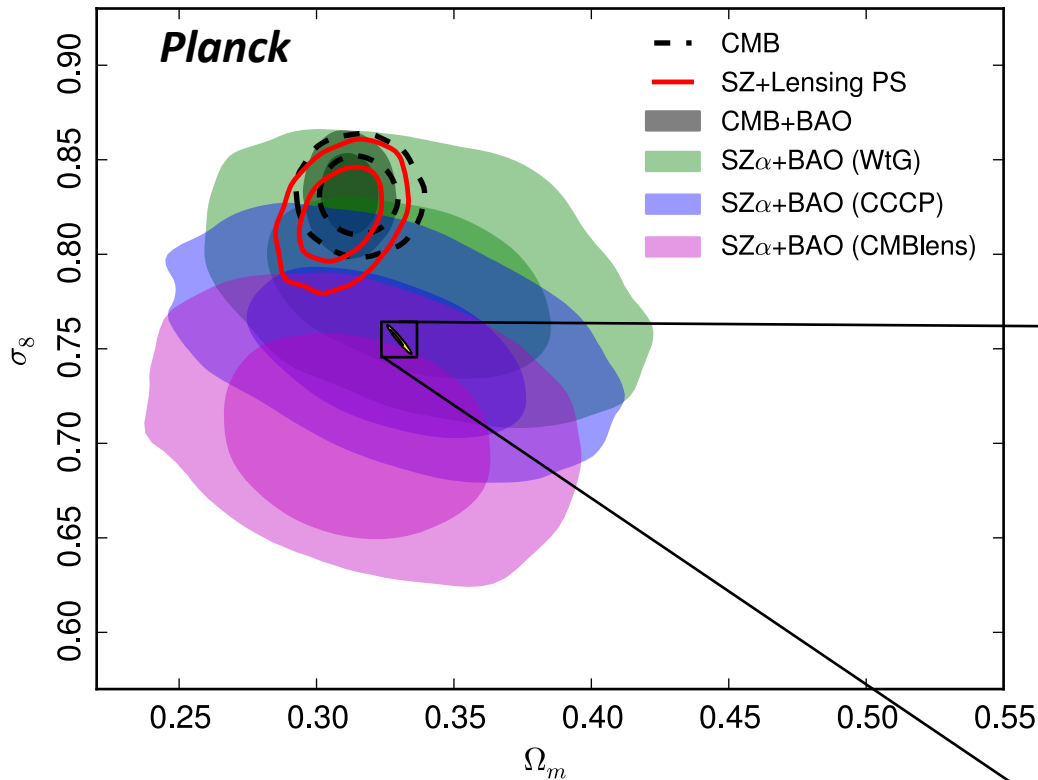


reconstruction carte SZ

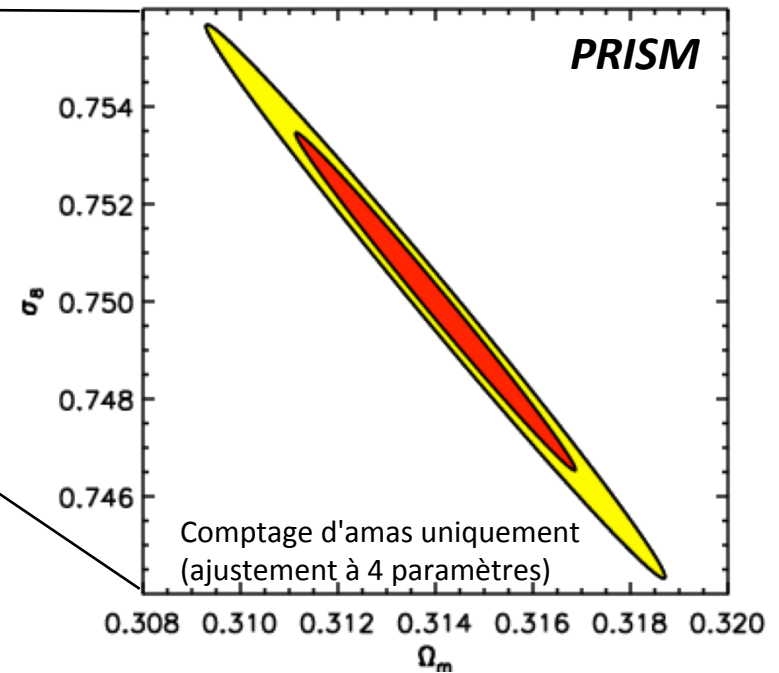


Masse limite en fonction du décalage spectral

Ω_m et σ_8 avec 10^6 amas de galaxies

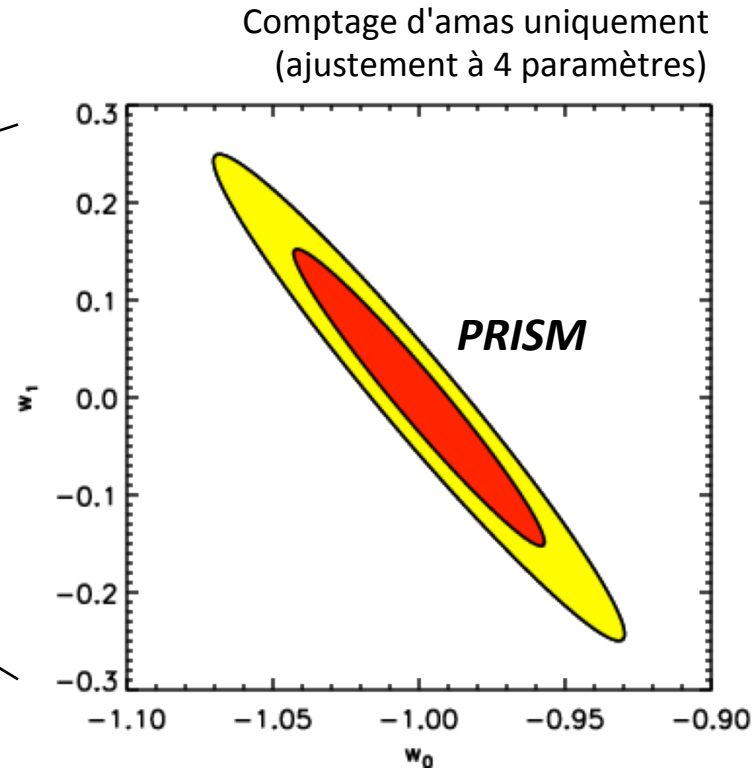
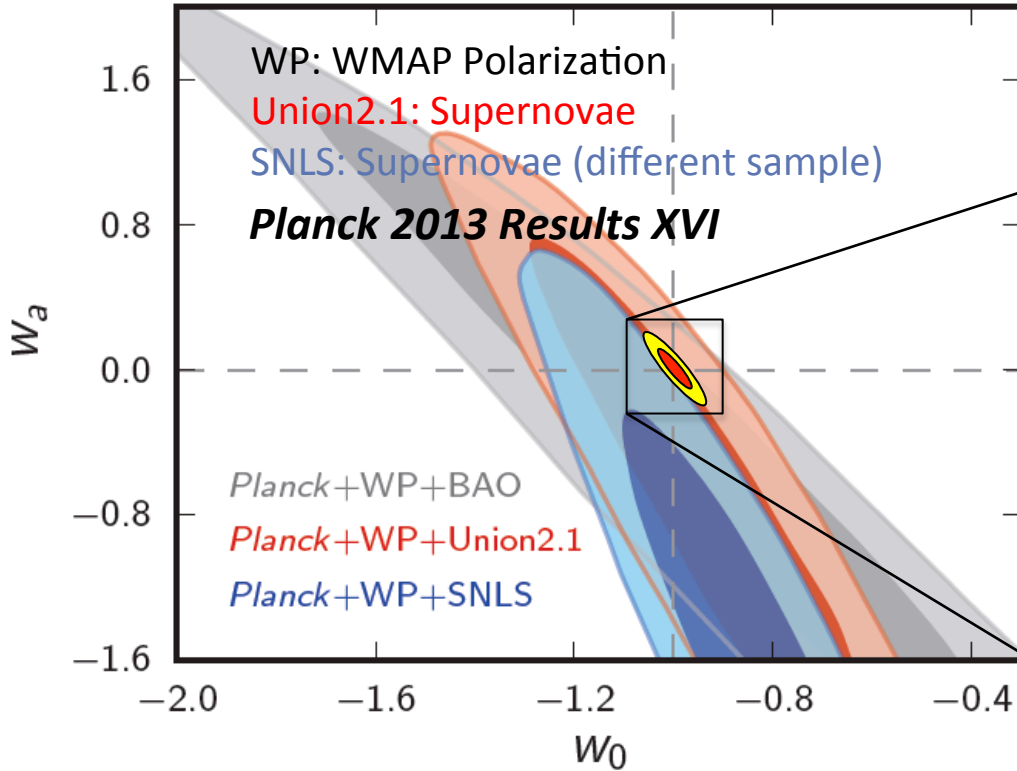


Pour illustration uniquement



(En supposant que la relation Y-M est étalonnée)

w_0 et w_a avec 10^6 amas de galaxies



NÉCESSAIRE : Combinaison de mesures spatiales et sol

Plan de l'exposé

- 50 années de fond cosmologique
- *PLANCK* à l'IN2P3
- Inflation, modèle cosmologique, neutrinos
- COrE – un satellite de 4ème génération européen
- ➔ • CMB-S4 – un grand observatoire au sol
- Perspectives et "feuille de route"

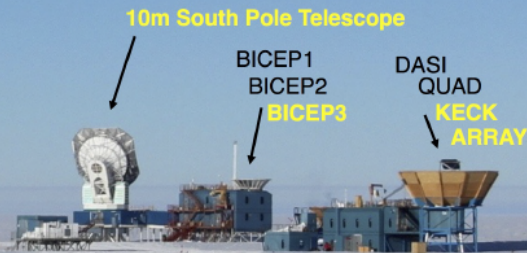
CMB-S4

Expérience multi-télescopes, multi-sites, avec $O(500.000)$ détecteurs, pour cartographier le CMB sur $>50\%$ du ciel, avec une sensibilité suffisante pour détecter $r=0.001$

Cas scientifique riche: anisotropies secondaires, neutrinos, astrophysique extragalactique

Budget ≈ 200 à 300 M\$

Recent South Pole CMB experiments



From John Carlstrom

Photo credit Cynthia Chiang



Recent Atacama CMB experiments



From John Carlstrom

Photo: Rahul Datta & Alessandro Schillaci

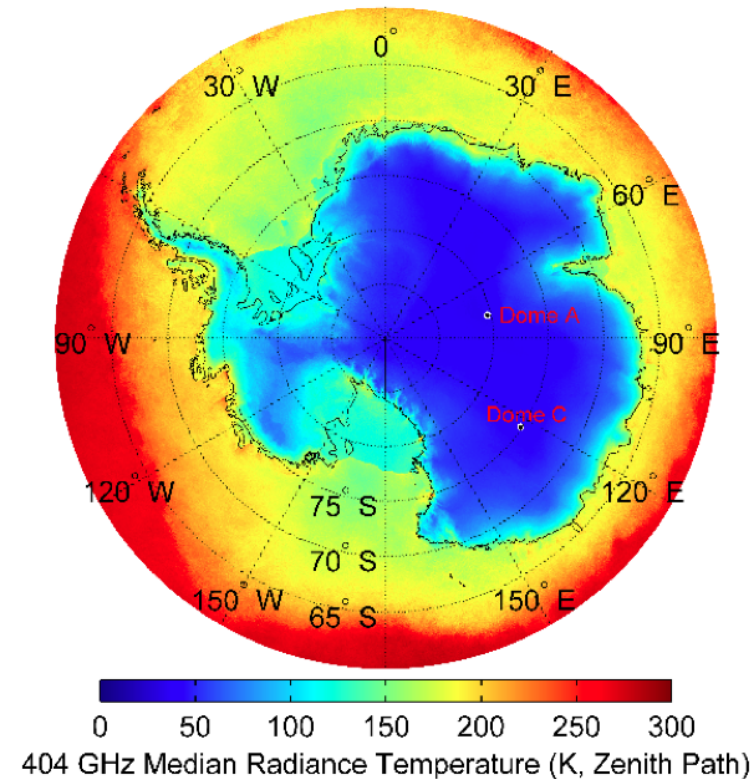
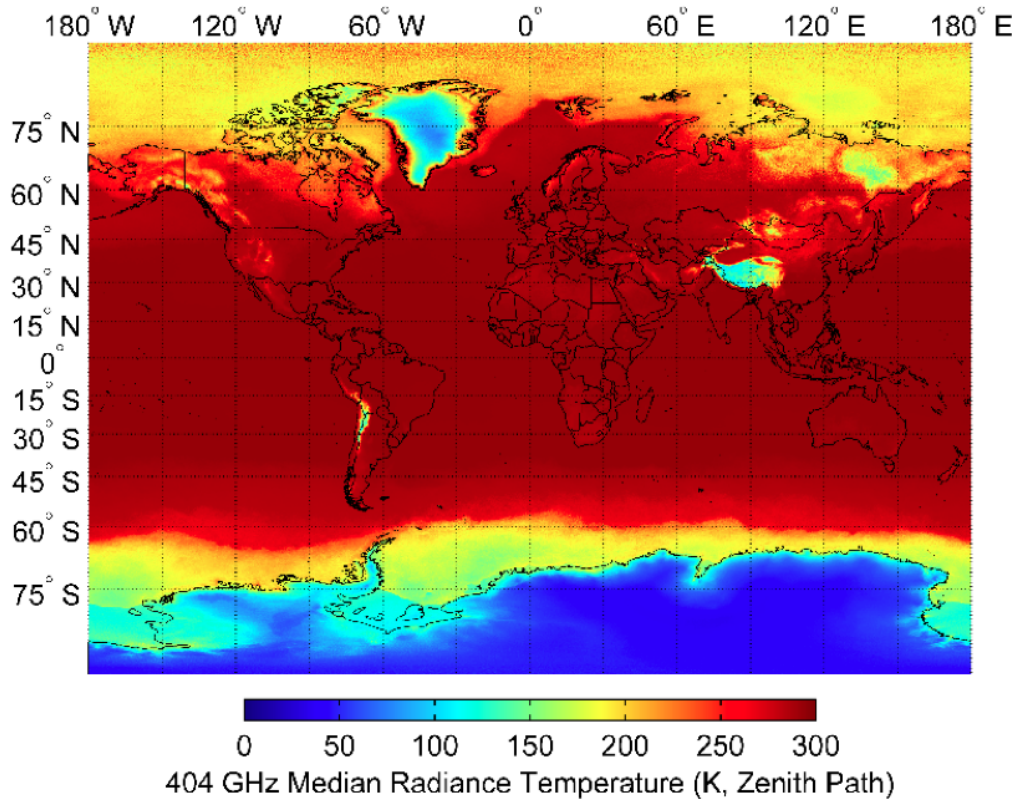


Atmosphère: absorption et émission

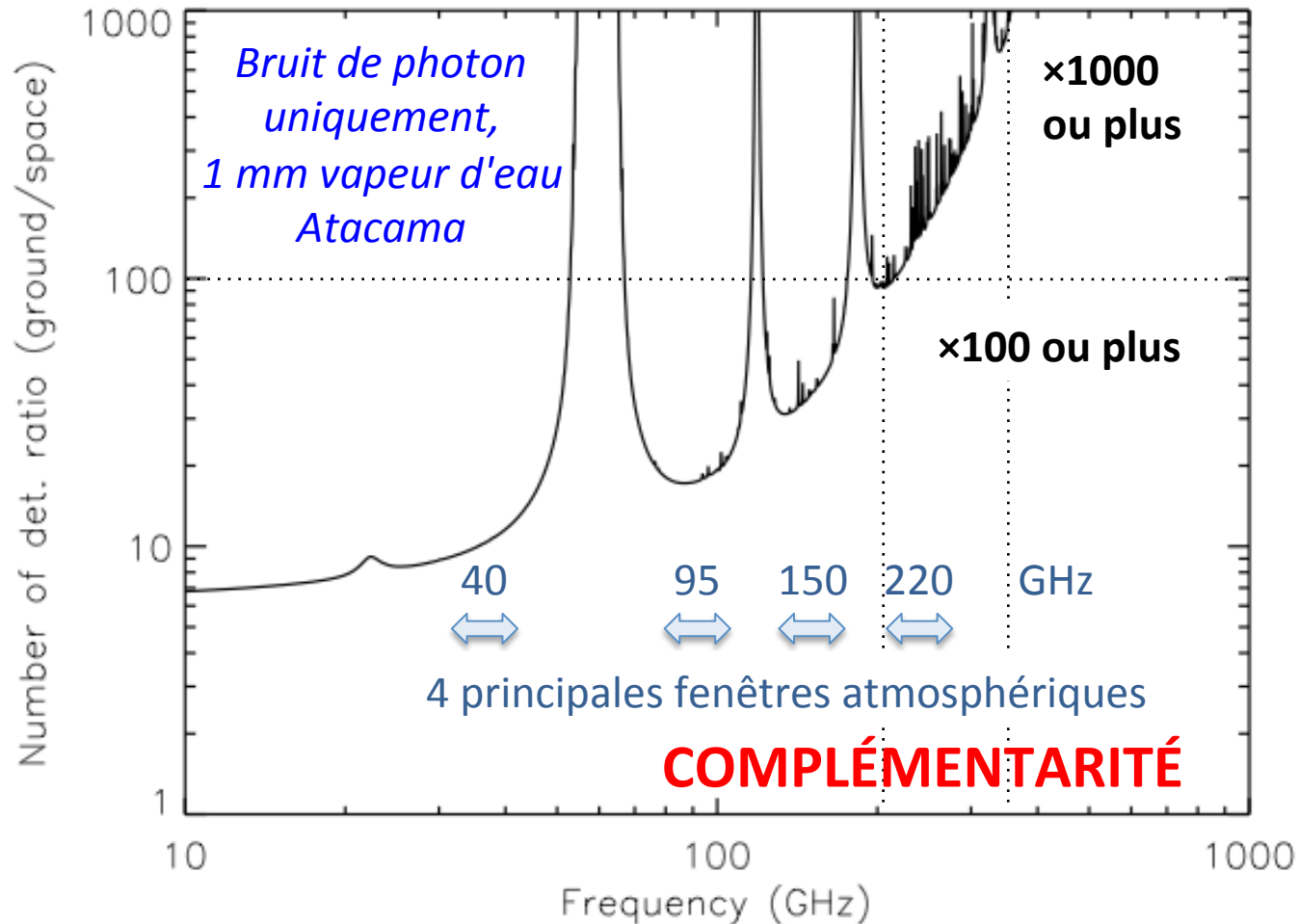
Émission à 404 GHz

(bruit de photon sur les détecteurs)

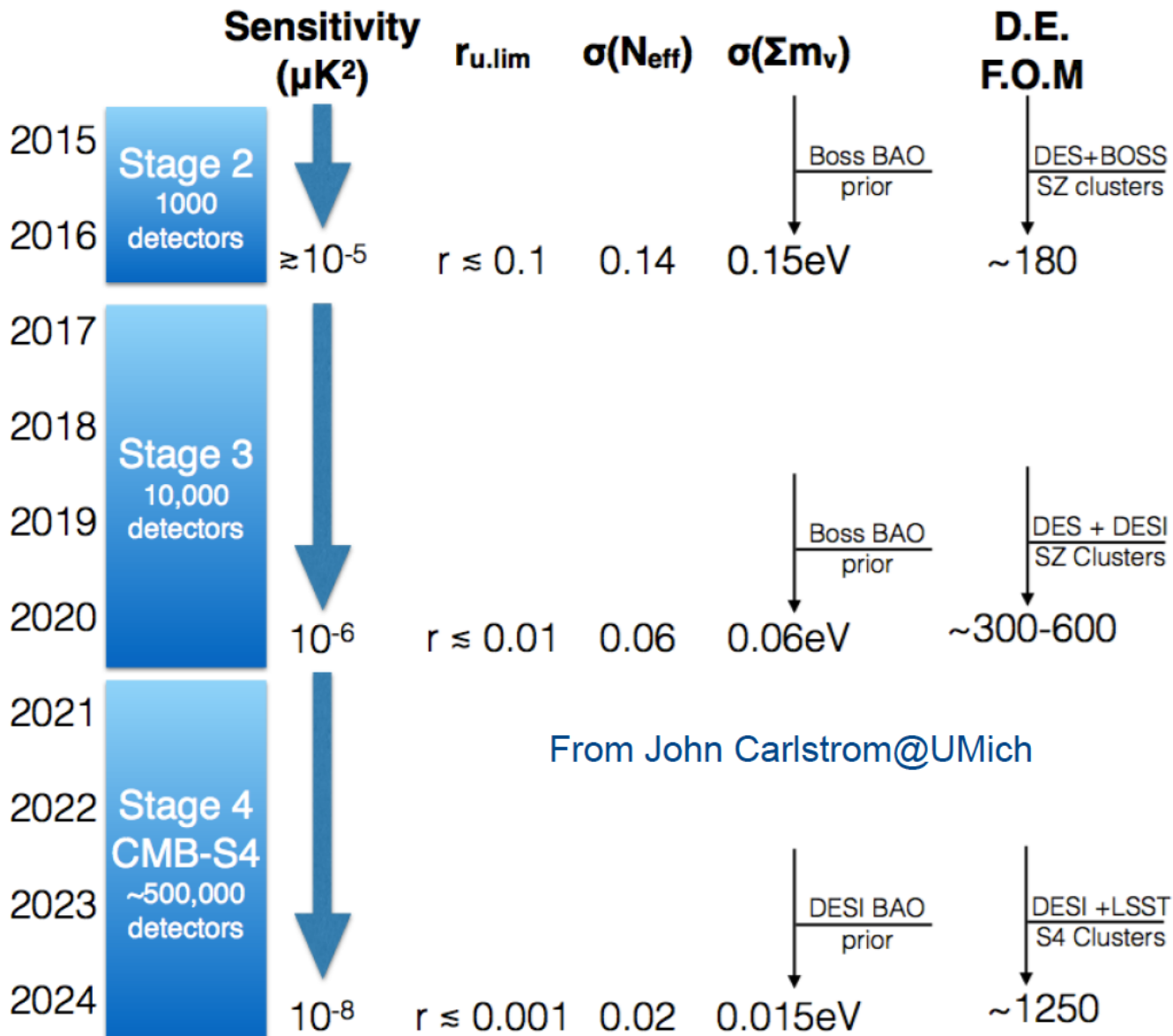
Suen, Fang & Lubin, IEEE trans. (3014)



Comparaison de sensibilité sol - espace



CMB – S4: feuille de route



Plan de l'exposé

- 50 années de fond cosmologique
- *PLANCK* à l'IN2P3
- Inflation, modèle cosmologique, neutrinos
- COrE – un satellite de 4ème génération européen
- CMB-S4 – un grand observatoire au sol
- ➔ • Perspectives et "feuille de route"

Objectifs, stratégie, complémentarité

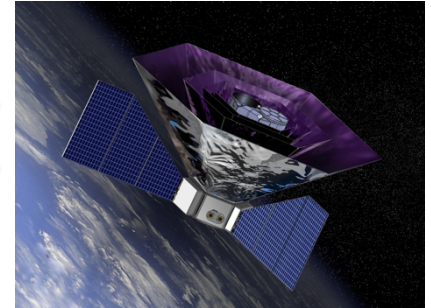
CMB S4

Imageur au sol. Petites échelles (1-2')
dans les fenêtres atmosphériques
 $\nu = 40, 95, 150, 220$

Spectrophotométrie ($N_{\text{freq}} > 20$)
absolue (10^{-8})
à **haute resolution** (1-2'),

Cosmic Origins Explorer
Imageur spatial, multi-fréquence
1-2' à haute fréquence ($\nu \geq 300$)
4'-6' aux fréquences CMB

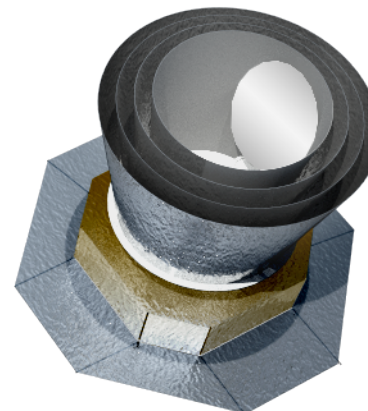
Haute résolution
angulaire



PIXIE (+)

Mesure absolue
1-2° dans 400 bandes
de fréquence

Calibration absolue
& niveau zéro des cartes



Bilan

- Depuis 18 ans, l'IN2P3 est impliqué dans l'observation et la science du CMB.
 - Archeops et Planck
 - Analyse de données d'autres expériences (WMAP)
 - Développements technologiques
 - Expériences au sol en cours : QUBIC (inflation), NIKA2 (amas SZ), POLARBEAR (lentilles gravitationnelles et inflation)
- Rôle majeur pour la préparation d'expériences futures
 - Mission spatiale Européenne "Cosmic Origins Explorer"
 - Développements technologiques (détecteurs)
 - Planck Sky Model: un outil à valoriser
- Une expertise et un investissement de l'IN2P3 à valoriser pour une future mission spatiale et pour une participation à CMB-S4 !

Perspectives scientifiques

- Il reste beaucoup à apprendre du CMB. L'IN2P3 a une expertise scientifique reconnue sur
 - Les anisotropies primaires (paramètres cosmologiques, inflation)
 - Les anisotropies secondaires (effet de lentille gravitationnelle, amas de galaxie SZ)
 - Synergie forte entre CMB et grands relevés (énergie noire)
- Dans la suite de Planck, de *QUBIC*, *NIKA*, *POLARBEAR*
 - Priorité : Mission spatiale Européenne
 - Priorité : Participation à CMB – S4
- Une science à fort impact avec encore un potentiel de découverte important
 - Contraindre la physique de l'Univers primordial
 - Cartographier la matière noire et contraindre la cosmologie (secteur sombre)
 - Observer et cartographier le gaz chaud et le champ de vitesses
 - CMB: Une observable unique pour mettre à l'épreuve le modèle cosmologique

COMPLÉMENTARITÉ

Feuille de route

- 31 août au 1 septembre 2015: Atelier APPEC et ASTRONET : Towards the European Coordination of the CMB programme.
 - A poursuivre l'année prochaine (Europe, et Europe + international)
- Effort expérimental à l'IN2P3 qui s'appuie sur la feuille de route détection millimétrique et sub-millimétrique du groupe de travail inter-organisme CNES-CEA-INSU-IN2P3-Labex FOCUS
 - Voir présentation de Juan Macias Perez
- 2015-2020 : **QUBIC**, **NIKA**, **Polarbear**: déploiement, observations, exploitation
 - en parallèle avec les développements technologiques
 - préparatoire de CMB-S4
- 2020-2025 : Participation à **CMB-S4** (à concrétiser)
 - Suite / intégration de POLARBEAR et QUBIC
 - Planck Sky Model, simulations, analyse de données
- 2025+ : Mission spatiale **COre** et/ou participation à LiteBIRD ou PIXIE