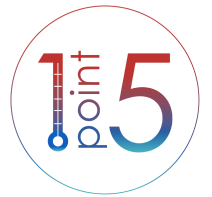
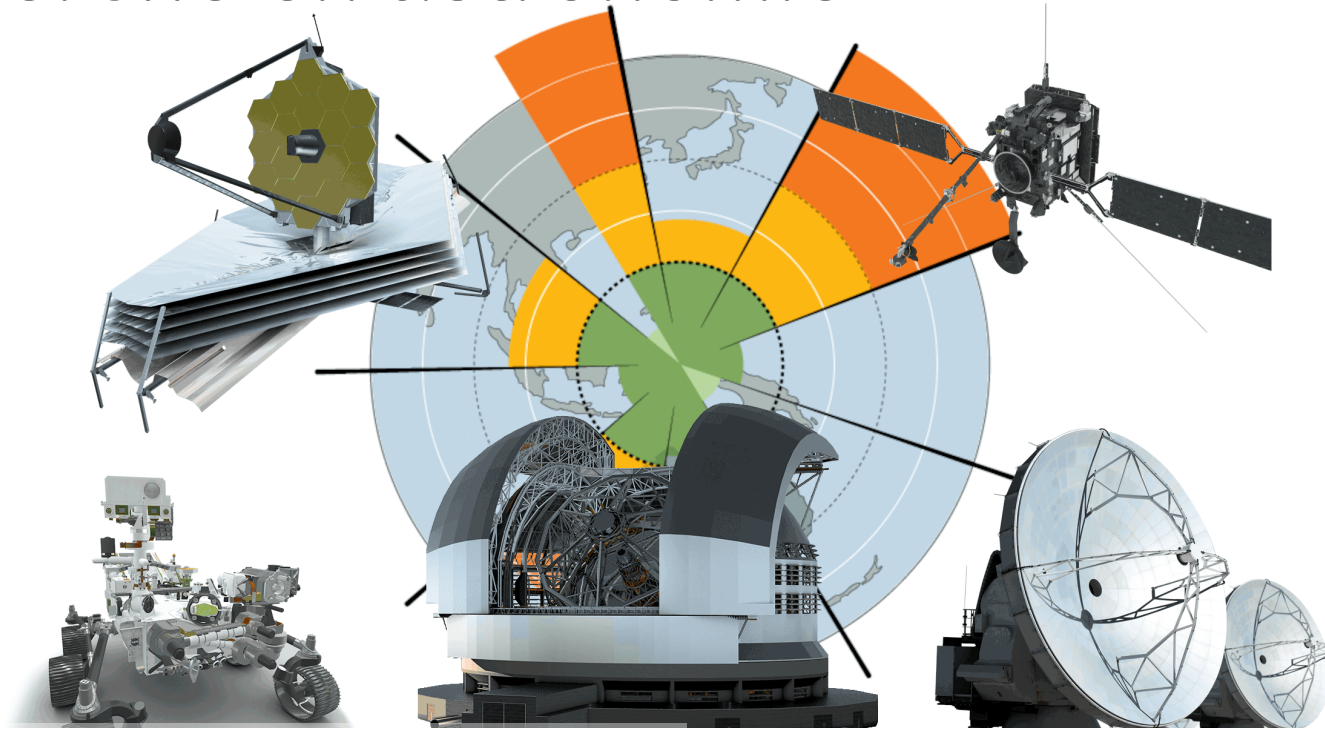


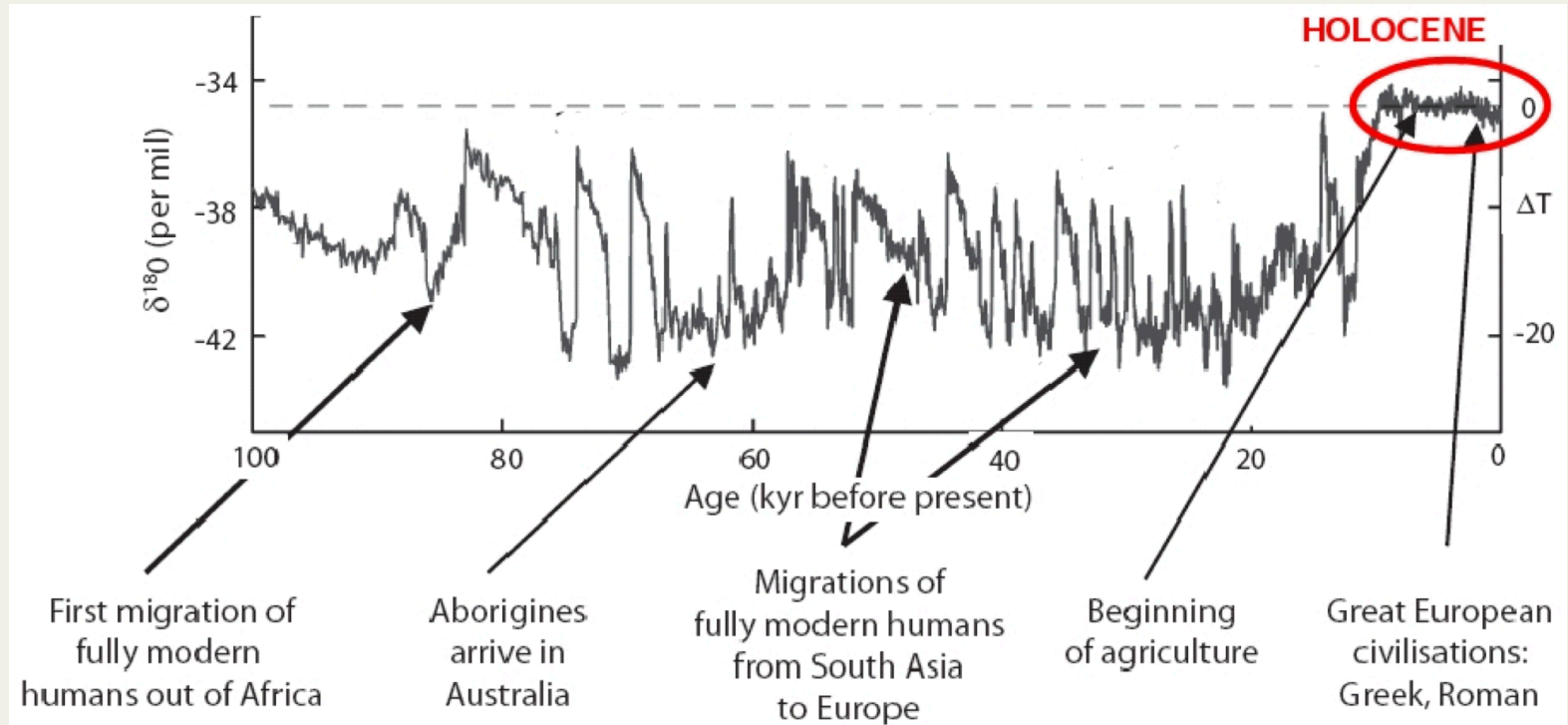
L'empreinte carbone des infrastructures de recherche en astronomie



Jürgen Knödlseeder

 @jknodlseder@astrodon.social

Une brève histoire de l'Humanité



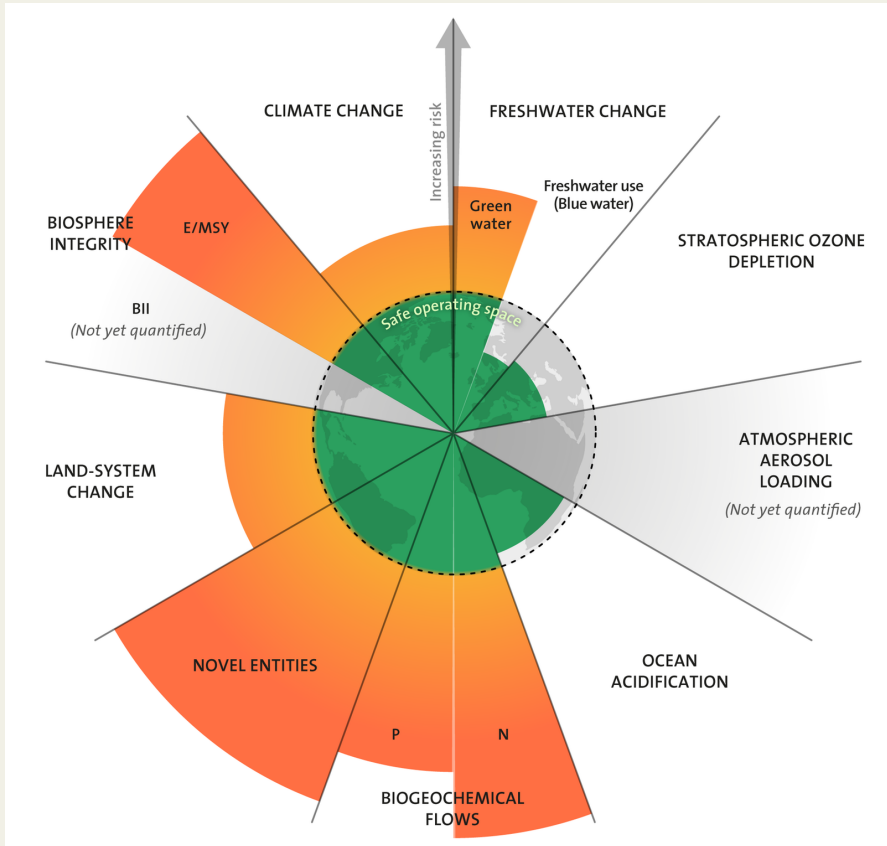
Rockström et al. (2009), *Ecology and Society*, 14, 32

Limites planétaires

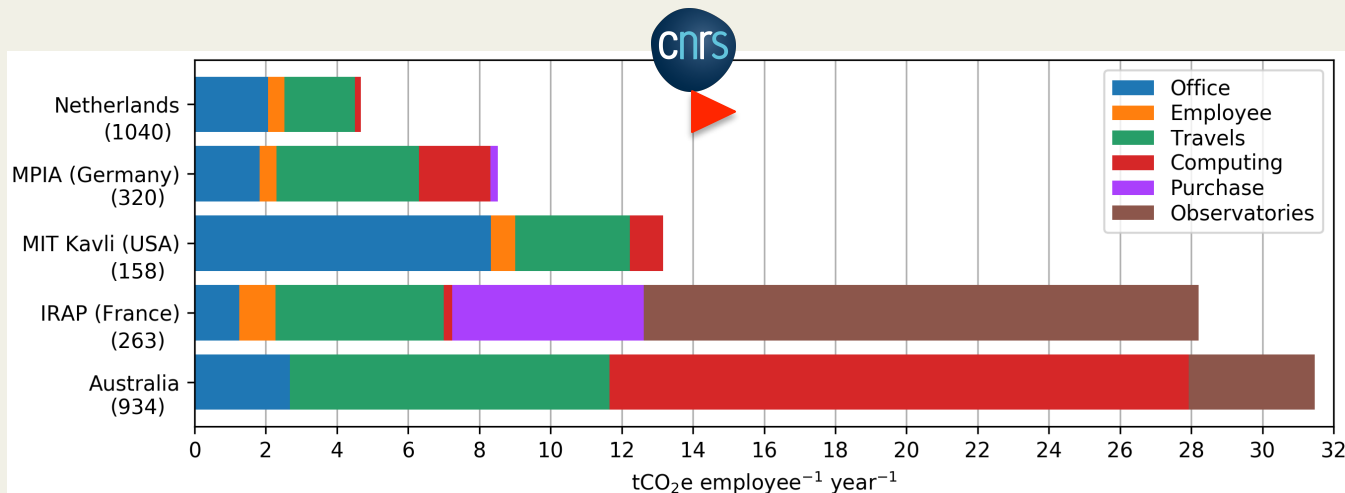
Analyse scientifique du risque que les activités humaines déstabilisent le système terrestre à l'échelle planétaire

Nous ne sommes plus dans la zone de fonctionnement sûr pour au moins 6* des 9 limites planétaires

***changement climatique, intégrité de la biosphère, utilisation des terres, nouvelles entités, flux biogéochimiques, eau douce**



L'empreinte carbone de l'astronomie



Netherlands : Van der Tak et al. (2021)

MPIA : Jahnke et al. (2020)

MIT Kavli : Simcoe et al. (2022)

IRAP : Martin et al. (2022)

Australia : Stevens et al. (2020)

**Des estimations
disparates**

**Un impact important
de l'intensité carbone
de la production
d'électricité**

Exemple pour l'année 2015 :

- France: 61 gCO₂e / kWh
- Australie: 1120 gCO₂e / kWh

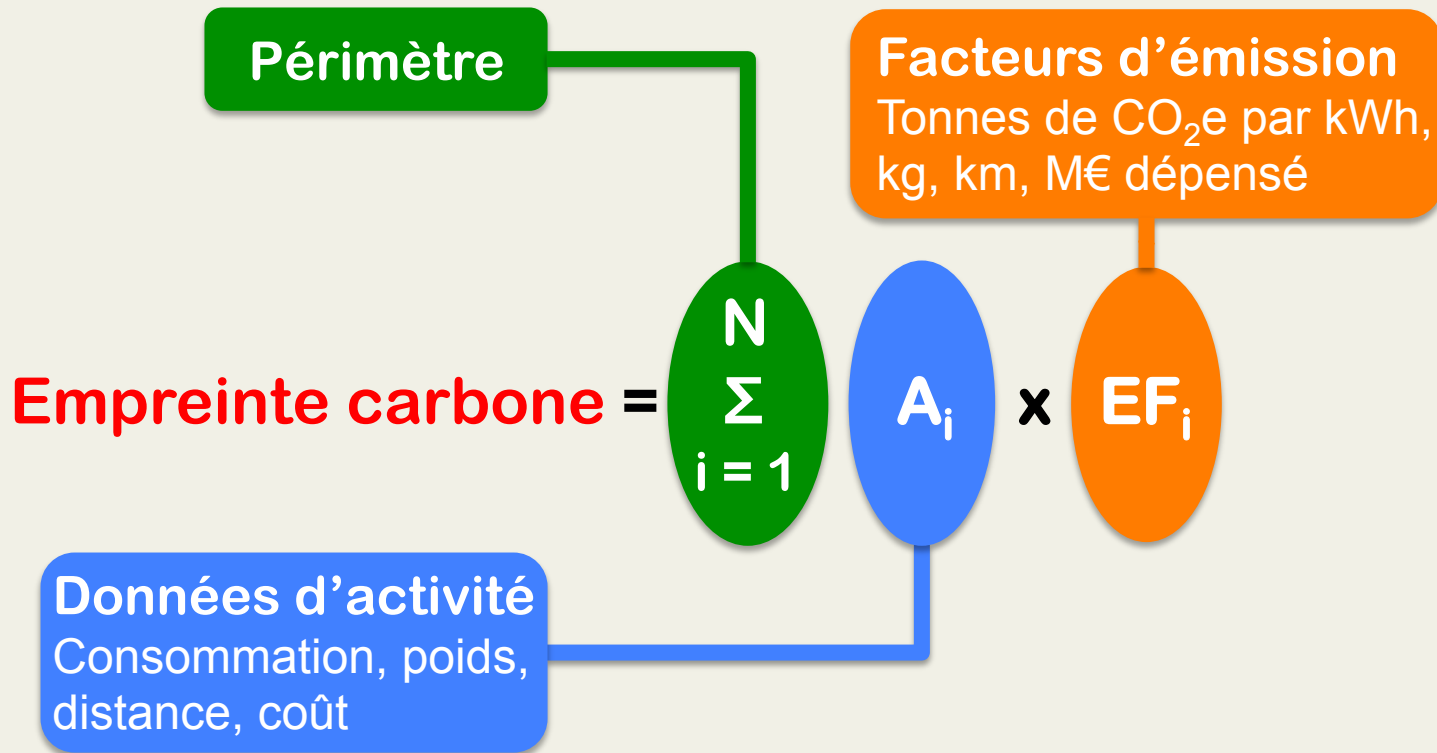
Pour mesurer l'empreinte il est important de

- suivre des standards (p.e. méthode Bilan Carbone®)
- d'inclure toutes les sources d'émission

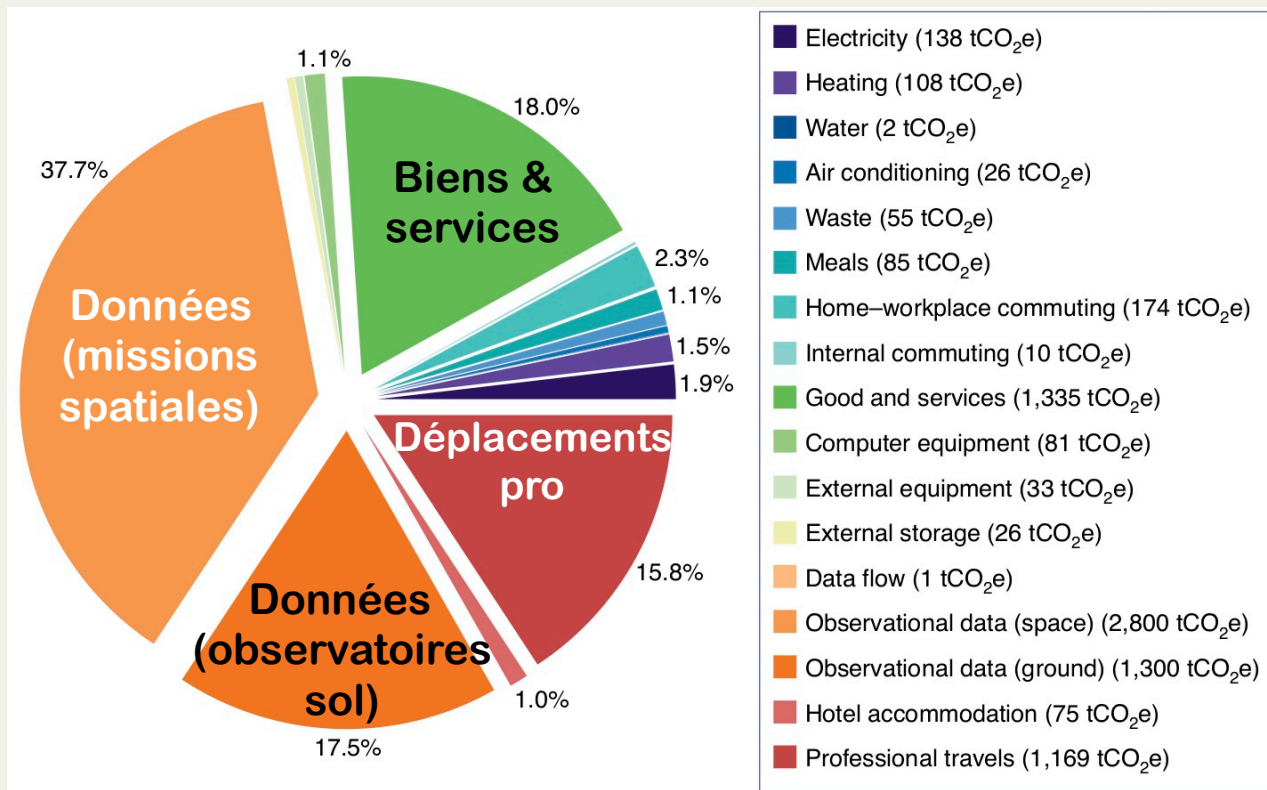
Notre approche à l'IRAP

- **Formation à la méthode Bilan Carbone®**
 - méthode compatible avec d'autres standards (GHG protocol, ISO 14064-1)
- **Le DU annonce le démarrage de l'activité**
- **Définition du périmètre**
 - La méthode Bilan Carbone® prescrit d'inclure tous les flux d'énergie, de matériel et de services dont on est **responsable** ont dont l'activité **dépend**
 - Question à se poser : est-ce que l'activité sera impacté si un flux est enlevé ?
- **Collecte et analyse de données**
 - données d'activité et facteurs d'émission
- **Communication des résultats (DU, personnel)**
 - incluant un rapport intermédiaire
- **Définition d'un plan d'action plan (en cours)**
 - recrutement d'une chargée de transition (CDD)

Calcul de l'empreinte carbone



L'empreinte carbone de IRAP en 2019



7418 ± 860 tCO₂e

Moyennes :
52 tCO₂e / astronome*
28 tCO₂e / employé*

***144 astronomes**
263 employés

Empreinte carbone des observatoires

- **Inventaire des observatoires utilisés pour des publications avec auteurs IRAP en 2019**
 - 46 missions spatiales
 - 39 observatoires sol
- **Evaluation de l'empreinte carbone sur le cycle de vie de ces observatoires**
 - Utilisation des ratios monétaires et de poids ($\text{tCO}_2\text{e} \sim \text{M€}$; $\text{tCO}_2\text{e} \sim \text{kg}$)
 - Facteurs d'émission estimés à partir des bilans de gaz à effet de serre ou des analyses cycle de vie publiés dans la littérature
 - Données d'activité collectées de la littérature et d'internet
- **Attribution d'une fraction de l'empreinte carbone à l'IRAP**
 - Sur la base de la communauté utilisateur à l'IRAP comparée au monde
 - Estimée à partir de la fraction du nombre d'auteurs (auteurs IRAP / tous les auteurs) des publications 2019 citant un observatoire donné

Facteurs d'émission

Observatoires

Knödlseider et al. 2022, Nature Astronomy, 6, 503; arXiv:2201.08748

Activité	Facteur d'émission
Mission spatiale (sur la base du poids du satellite)	50 tCO ₂ e / kg
Mission spatiale (sur la base du coût complet de la mission)	140 tCO ₂ e / M€
Construction d'un observatoire sol	240 tCO ₂ e / M€
Fonctionnement d'un observatoire sol	250 tCO ₂ e / M€

Quelques autres secteurs d'activité

Base Empreinte (Ademe)

Activité	Facteur d'émission
Assurance, services bancaires, conseil et honoraires	110 tCO ₂ e / M€
Architecture et ingénierie, maintenance des bâtiments	170 tCO ₂ e / M€
Réparation et installation de machines et d'équipements	390 tCO ₂ e / M€
Métaux (aluminium, cuivre, acier, etc.)	1700 tCO ₂ e / M€
Produits minéraux (ciment, verre, etc.)	1800 tCO ₂ e / M€

Données d'activité

Mission	Payload launch mass (kg)	Mission cost (M€)	Reference
HST	11 110	8 037	43
Chandra	5 860	4 114	44
Cassini	5 820	2 806	45
Cluster	4 800	944	46
Fermi	4 303	863	47
INTEGRAL	4 000	419	48
Curiosity	3 893	2 590	45
XMM	3 800	1 113	49
Juno	3 625	1 082	45
Herschel	3 400	1 152	50
RXTE	3 200	360	51
SDO	3 100	865	52
Rosetta	2 900	1 709	53
Galileo	2 560	1 275	45
MAVEN	2 454	638	45
ROSAT	2 421	635	54
MRO	2 180	928	45
GAIA	2 034	1 037	55
Planck	1 900	775	56
SoHO	1 850	1 469	57
Suzaku	1 706		
AstroSat	1 515	27	59
MMS	1 360	1 054	58
Venus Express	1 270	300	61
WIND	1 250		
STEREO	1 238	614	60
Mars Express	1 223	374	62
Dawn	1 218	439	45
Hipparcos	1 140	933	63
Kepler	1 052	636	64
GEOTAIL	1 009		
Akari	952	106	65
Spitzer	950	1 188	66
SWIFT	843	279	67
ACE	752		
InSight	694	714	45
PSP	685	1 310	43
WISE	661	335	68
TIMED	660	259	67
Double Star	560		
IMP-8	410		
NICER	372	53	69
NuSTAR	360	156	70
TESS	325	275	71
GALEX	280	120	67
DEMETER	130	21	72

Observatory	Construction		Cost	
	(M€)	Reference	(M€ / yr)	Reference
VLT (Paranal)	1 384	78	40	79
ALMA	1 248	80	105	81
SOFIA	1 098	58	90	58
AAT	124	82	15	83
VLA	345	75	10	84
VLBA	132	85	15	85
IRAM	51	86	15	87
Gemini-South	135	75	13	75
CFHT	85	78	6.3	88
ESO 3.6m (La Silla)	99	89	5.2	89
GBT	120	90	10	91
LOFAR	200	92	9.2	93
JCMT	38	94	5.5	95
ATCA	95	96	3.5	97
H.E.S.S.	49	(1)	8.8	32
MeerKAT	128	98	13	98
GTC	125	78		
NRO	51	(1)	1.5	(1)
LMT	77	99	3.1	100
MLSO			1.2	101
APEX	20	(1)	2.7	102
SMA	60	103		
EHT	52	104	-	
Noto Radio Observatory			1.5	105
2m TBL	6.0	(2)	1.0	106
2.16m (Xinglong Station)	7.3	(2)	0.7	(3)
1.93m OHP	5.5	(2)	0.5	(3)
KMTNet	17	(1)	1.7	(1)
THEMIS			1.1	(1)
2.4m Lijiang (YAO)	9.6	(2)	1.0	(3)
2m HCT (IAO)	6.1	(2)	0.6	(3)
1.5m Tillinghast (FLWO)	2.8	(2)	0.3	(3)
1.5m (OAN-SPM)	2.8	(2)	0.3	(3)
1.8m (BOAO)	4.6	(2)	0.5	(3)
1m (Pic-du-Midi)	1.0	(2)	0.1	(3)
1.3m Warsaw (OGLE)	2.0	(2)	0.2	(3)
C2PU	2.0	(2)	0.2	(3)
TAROT	0.9	(1)	0.1	(3)
1m NOWT	1.0	(2)	0.1	(3)

- La collecte des coûts était la partie la plus chronophage du travail (trouver des masses à été bien plus facile)
- Les coût n'incluent pas toujours les extensions de mission et n'incluent jamais les mises à niveau ; si aucune donnée n'a été trouvée, la contribution a été ignorée (les résultats sont des limites inférieures)
- Les coûts ont été corrigés de l'inflation (année de référence : 2019)

Empreinte carbone

Mission*	Years	Papers	Authors	Mass-based				Cost-based ^b			
				Footprint (tCO ₂ e)	Annual (tCO ₂ e yr ⁻¹)	Carbon intensity (tCO ₂ e paper ⁻¹)	Carbon intensity (tCO ₂ e author ⁻¹)	Footprint (tCO ₂ e)	Annual (tCO ₂ e yr ⁻¹)	Carbon intensity (tCO ₂ e paper ⁻¹)	Carbon intensity (tCO ₂ e author ⁻¹)
HST	30	52,497	42,315	555,500	18,517	11	13	1,125,197	37,507	21	27
Chandra	21	17,714	23,942	293,000	13,952	17	12	575,955	27,426	33	24
Cassini	22	4,691	9,328	291,000	13,227	62	31	392,902	17,859	84	42
Cluster	20	2,433	2,959	240,000	12,000	99	81	132,207	6,610	54	45
Fermi	12	8,619	19,675	215,150	17,929	25	11	120,881	10,073	14	6
INTEGRAL	18	2,808	10,640	200,000	11,111	71	19	58,720	3,262	21	6
Curiosity	7	1,360	4,393	194,650	19,465	143	44	362,595	36,259	267	83
XMM	21	18,859	23,773	190,000	9,048	10	8	155,845	7,421	8	7
Juno	8	521	1,832	181,250	18,125	348	99	151,547	15,155	291	83
Herschel	11	5,046	11,092	170,000	15,455	34	15	161,238	14,658	32	15
RXTE	24	7,473	11,601	160,000	6,667	21	14	50,438	2,102	7	4
SDO	10	4,189	4,946	155,000	15,500	37	31	121,164	12,116	29	24
Rosetta	16	1,665	4,337	145,000	9,063	87	33	239,316	14,957	144	55
Galileo	30	2,432	4,594	128,000	4,267	53	28	178,503	5,950	73	39
MAVEN	6	672	2,023	122,700	12,270	183	61	89,270	8,927	133	44
ROSAT	30	19,765	23,154	121,050	4,035	6	5	88,844	2,961	4	4
MRO	14	1,927	4,261	109,000	7,786	57	26	129,850	9,275	67	30
Gaia	7	2,550	10,565	101,700	10,170	40	10	145,114	14,511	57	14
Planck	11	5,515	13,388	95,000	8,636	17	7	108,486	9,862	20	8
SoHO	25	12,218	12,955	92,500	3,700	8	7	205,617	8,225	17	16
Suzaku	15	3,869	9,525	85,300	5,687	22	9				
AstroSat	5	313	5,406	75,750	7,575	242	14	3,751	375	12	1
MMS	5	769	1,623	68,000	6,800	88	42	147,501	14,750	192	91
Venus Express	15	1,221	3,394	63,500	4,233	52	19	41,945	2,796	34	12
Wind	26	3,877	8,254	62,500	2,404	16	8				
STEREO	14	3,731	6,768	61,900	4,421	17	9	86,021	6,144	23	13
Mars Express	17	2,969	6,118	61,150	3,597	21	10	52,332	3,078	18	9
Dawn	12	791	2,175	60,885	5,074	77	28	61,409	5,117	78	28
Hipparcos	31	4,743	8,373	57,000	1,839	12	7	130,664	4,215	28	16
Kepler	11	4,306	9,606	52,620	4,784	12	5	89,037	8,094	21	9
Geotail	28	3,288	3,996	50,450	1,802	15	13				
Akari	14	2,037	6,993	47,600	3,400	23	7	14,878	1,063	7	2
Spitzer	17	9,050	15,940	47,500	2,794	5	3	166,333	9,784	18	10
Swift	16	7,397	17,307	42,150	2,634	6	2	39,030	2,439	5	2
ACE	23	4,147	7,560	37,600	1,635	9	5				
InSight	1	58	447	34,700	3,470	598	78	99,922	9,992	1723	224
PSP	2	287	1,075	34,250	3,425	119	32	183,456	18,346	639	171
WISE	11	6,990	18,877	33,050	3,005	5	2	46,855	4,260	7	2
TIMED	18	2,205	3,593	33,000	1,833	15	9	36,196	2,011	16	10
Double Star	16	166	540	28,000	1,750	169	52				
IMP-8	47	2,485	3,835	20,500	436	8	5				
NICER	3	338	2,657	18,600	1,860	55	7	7,374	737	22	3
NuSTAR	8	2,227	9,559	18,000	1,800	8	2	21,799	2,180	10	2

Continued

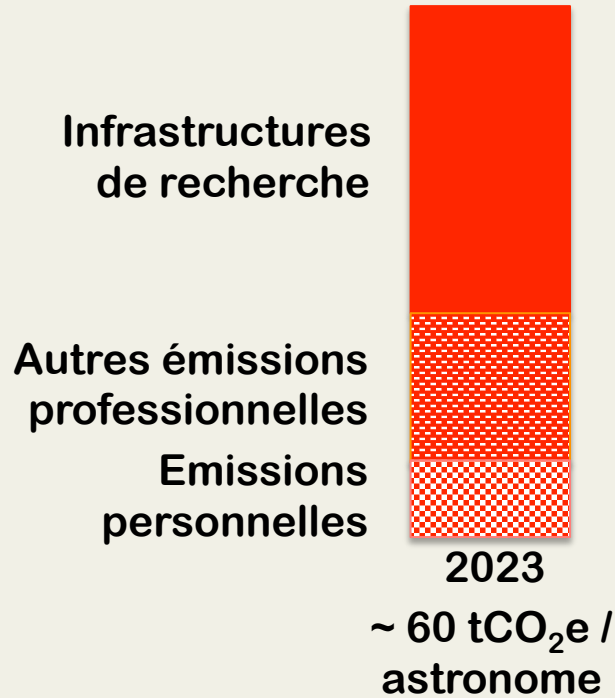
- **Estimations de l'ordre de grandeur des empreintes carbone pour 85 infrastructures de recherche astronomiques sur leur cycle de vie**
- **Les résultats individuelles sont incertains à 80% (incertitude recommandée par l'ADEME pour la méthode des rations monétaires)**
- **Empreintes annuelles en divisant l'empreinte du cycle de vie par la durée de vie de la mission / de l'observatoire (ou dix ans, selon la durée la plus longue)**

L'empreinte associée à l'utilisation des observatoires

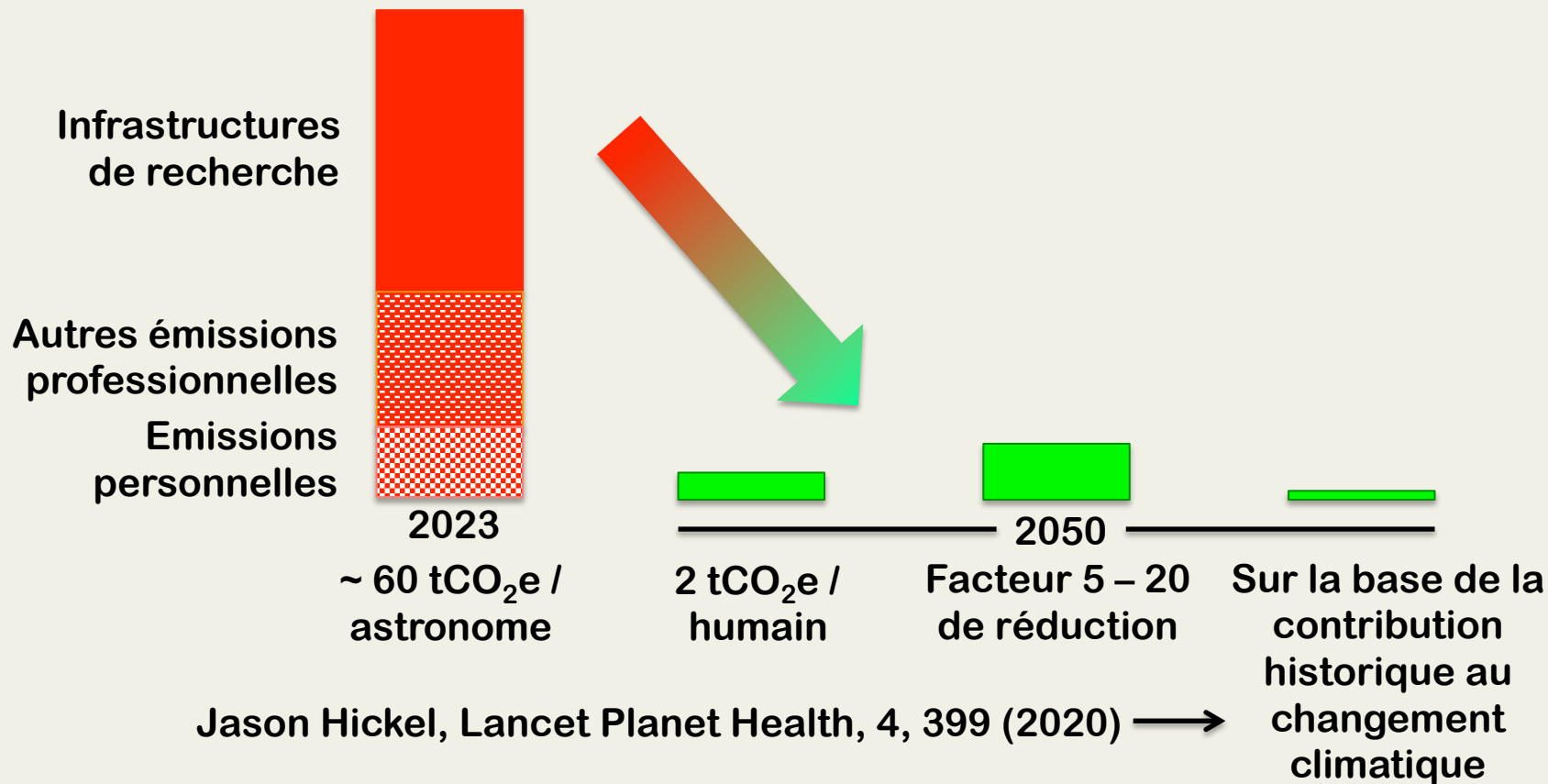
Categorie	Empreinte cycle de vie (MtCO ₂ e)	Empreinte annuelle (ktCO ₂ e / an)	Empreinte attribuée à l'IRAP (tCO ₂ e / an)
Spatiale (coût)	5.9 ± 1.2	366 ± 64	2 788 ± 555
Spatiale (poids)	4.9 ± 0.8	310 ± 47	2 548 ± 490
Sol	3.0 ± 0.8	194 ± 64	1 289 ± 490
Total	7.8 ± 1.4	532 ± 106	3 953 ± 689

- Les estimations basées sur les coûts et le poids fournissent des résultats comparables
- 53% de l'empreinte carbone de l'IRAP est lié à l'utilisation des observatoires
- L'empreinte est dominée par les missions spatiales (biais IRAP)
- Empreinte par chercheur : 27.4 ± 4.8 tCO₂e / an
- Extrapolation à l'inventaire mondiale : 36.6 ± 14.0 tCO₂e / an / astronome

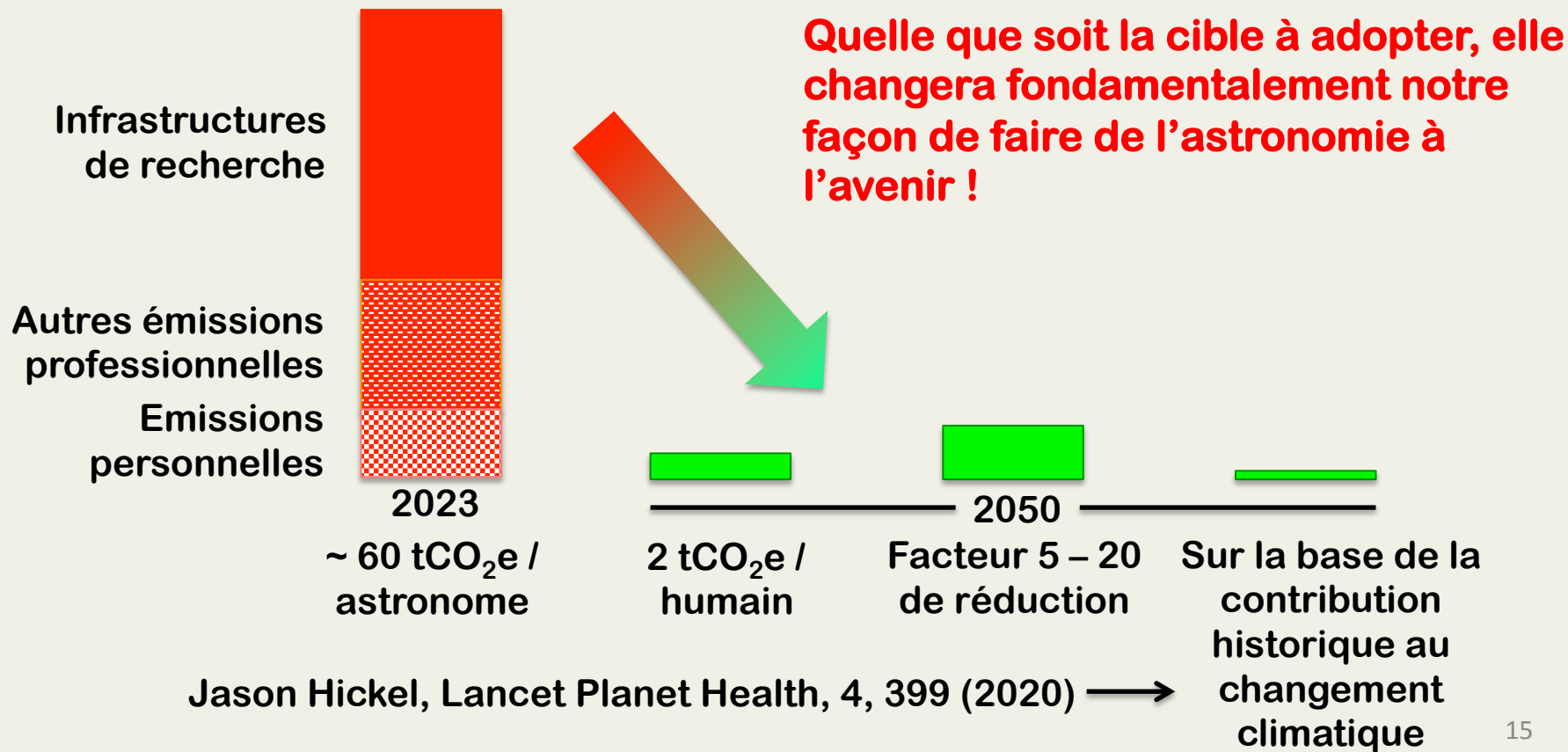
Résumé de la situation



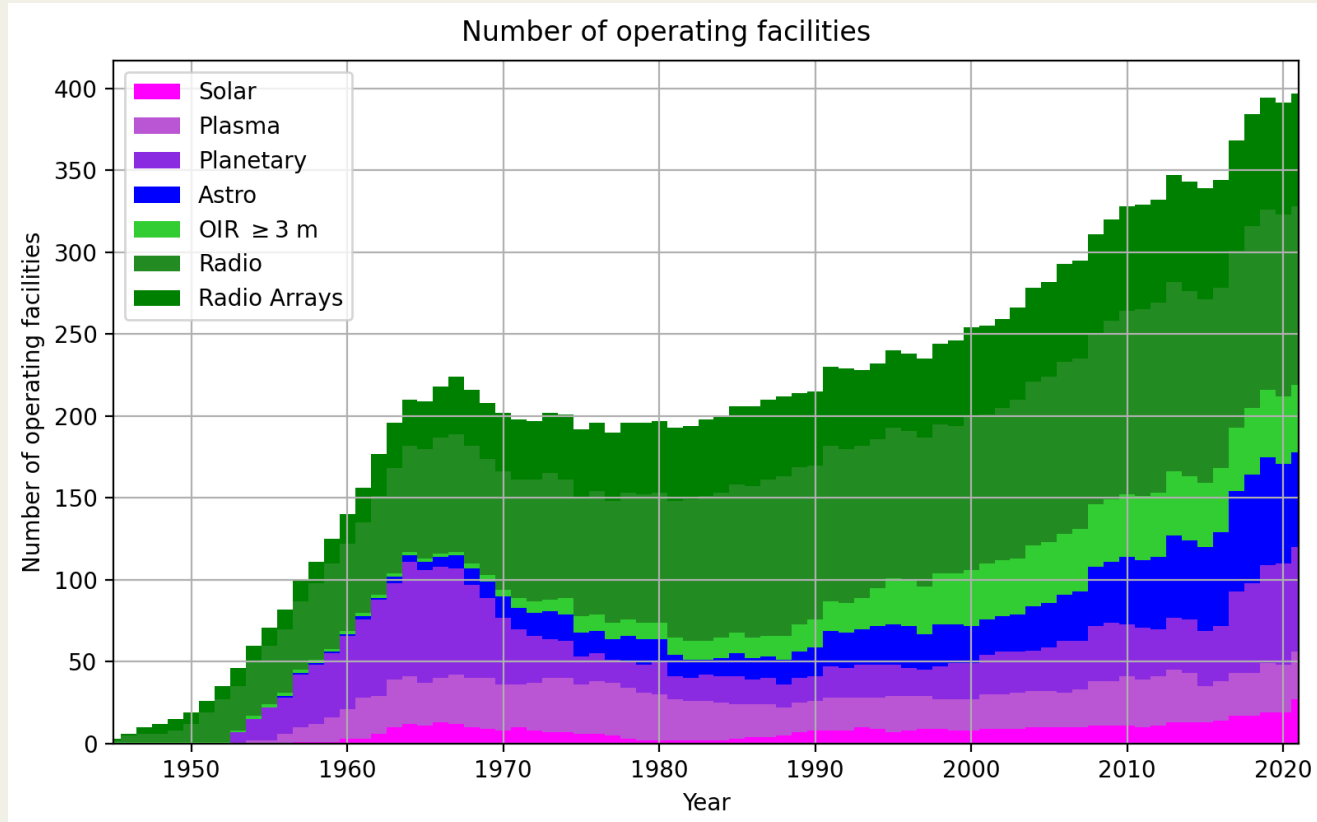
Résumé de la situation



Résumé de la situation

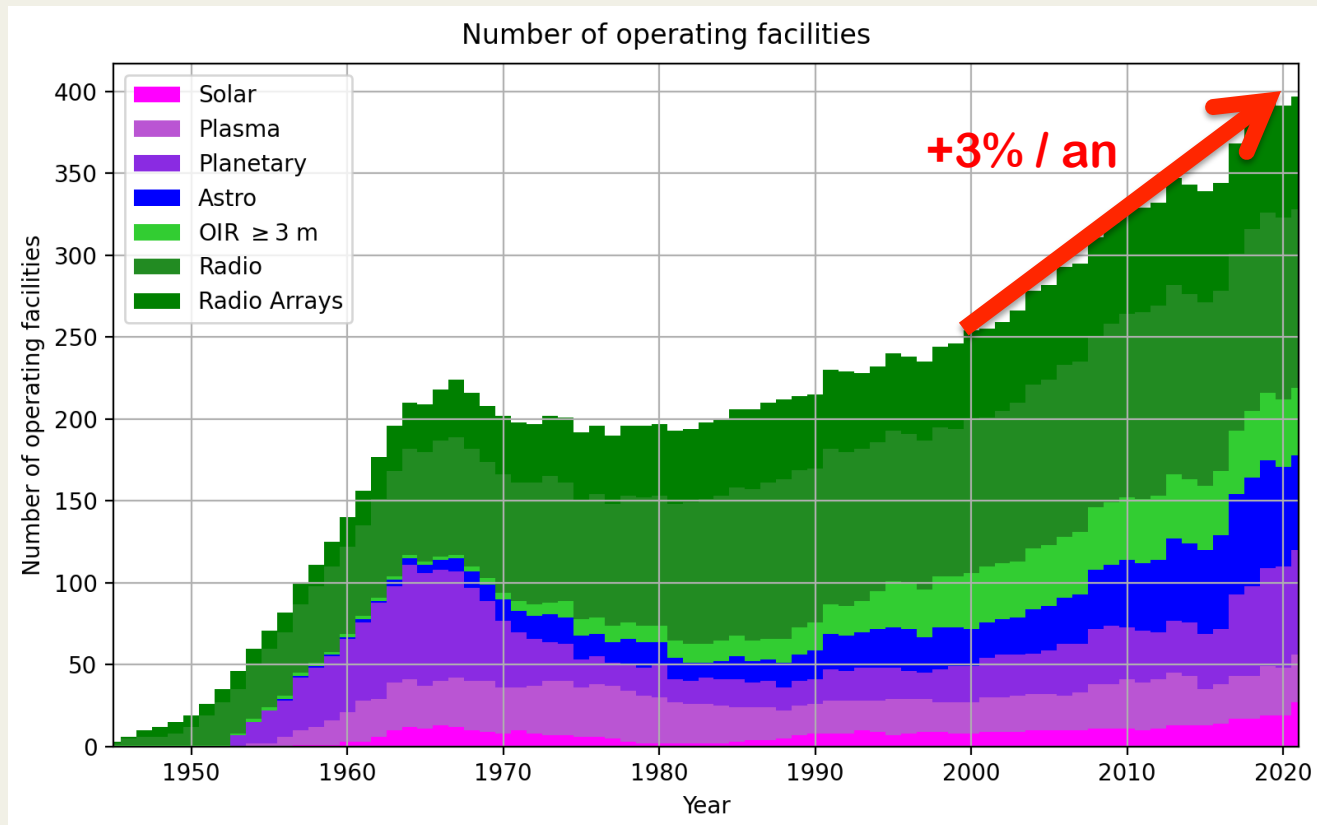


Est-ce que l'on va dans la bonne direction ?



Knödlseider et al., en préparation

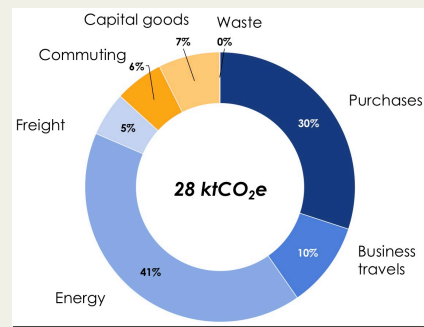
Est-ce que l'on va dans la bonne direction ?



Knödseder et al., en préparation

Est-ce possible de réduire l'empreinte des observatoires ?

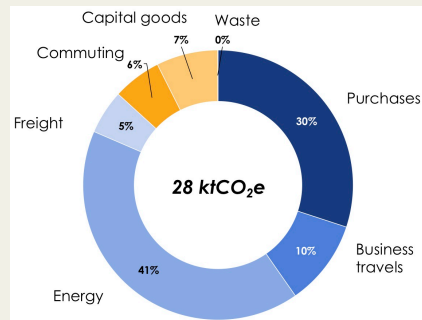
L'exemple de l'ESO (<https://www.eso.org/public/france/about-eso/green/>)



2018

Est-ce possible de réduire l'empreinte des observatoires ?

L'exemple de l'ESO (<https://www.eso.org/public/france/about-eso/green/>)



2018

Prochaines
années

- 15%

- 4.4 ktCO₂e / yr

Alimentation en électricité renouvelable (-7.5%)

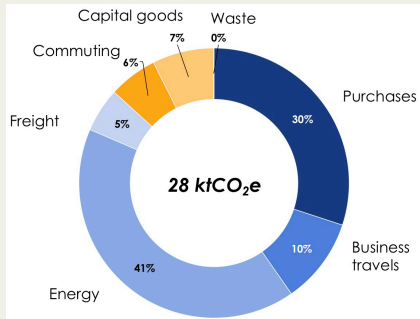
Privilégier le fret maritime à l'aérien (-5.0%)

Réduire les déplacements professionnels (-2.9%)

Prolonger la durée de vie des ordinateurs (-0.0%)

Est-ce possible de réduire l'empreinte des observatoires ?

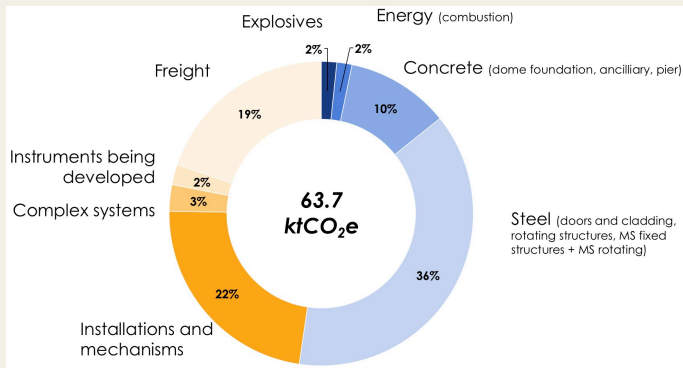
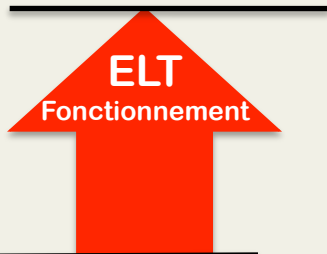
L'exemple de l'ESO (<https://www.eso.org/public/france/about-eso/green/>)



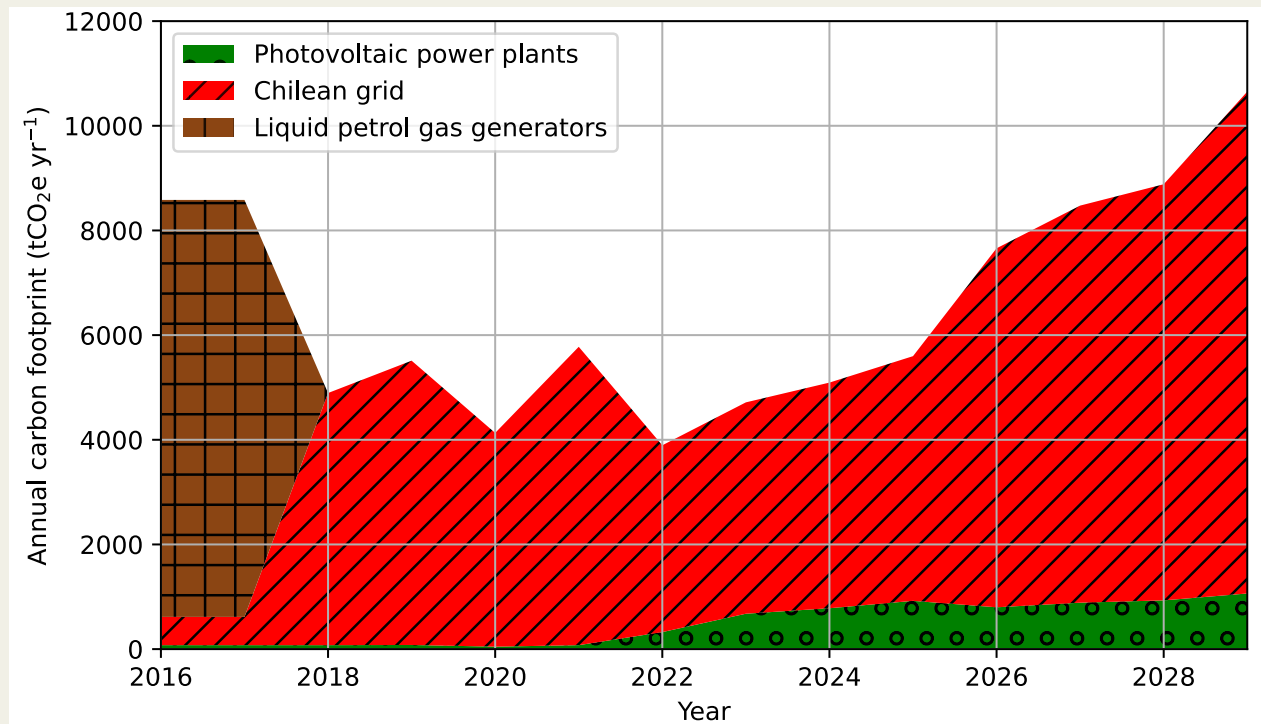
Prochaines années

- 15%

- 4.4 ktCO₂e / yr



Est-ce possible de réduire l'empreinte des observatoires ?



Données de Filippi et al. (2022), SPIE, 12182, 3

Empreinte carbone annuelle passée et prévue de la consommation d'électricité sur les sites d'observation de l'ESO à La Silla, Paranal et Armazones

Est-ce possible de réduire l'empreinte des observatoires ?

Une vérité qui dérange :

Il est extrêmement difficile de décarboner si on continue de monter en puissance !

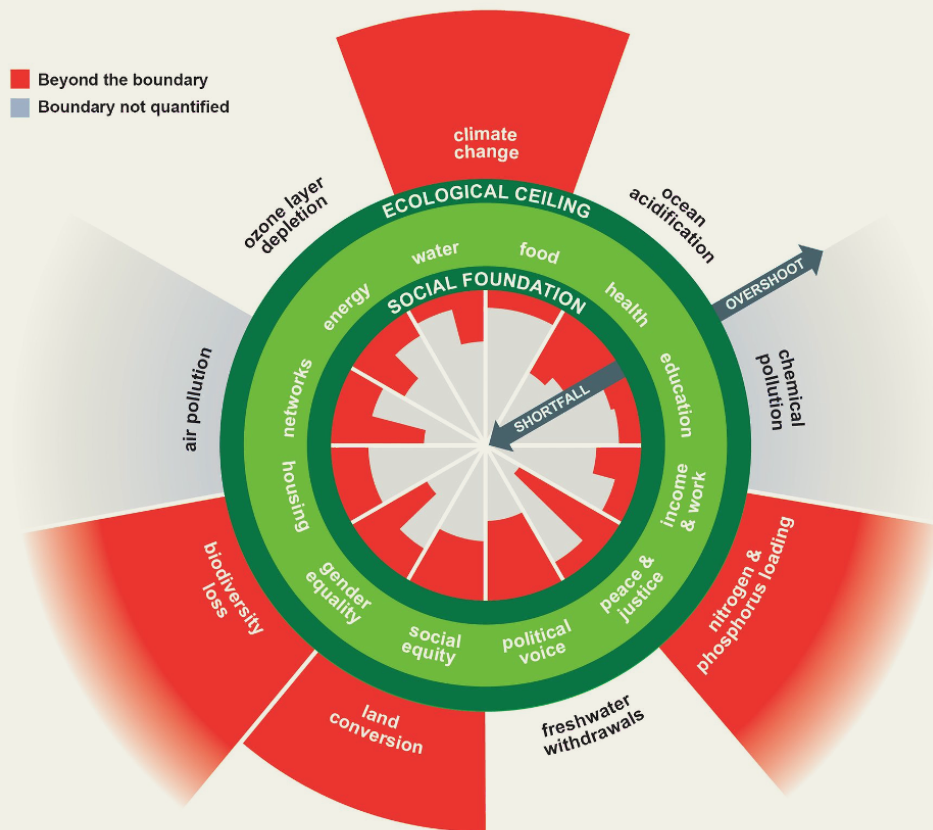
Nous avons besoin à la fois :

- d'une réduction de l'empreinte carbone de l'existant
- d'une réduction du rythme de déploiement de nouvelles infrastructures

Vers une astronomie soutenable

- Pour garder notre planète habitable, les sociétés humaines doivent passer à une voie socio-économique durable (cf. IPCC, IPBES)
- Cela concerne toutes les activités humaines, y compris la recherche (astronomique) (cf. inégalités)
- Cela implique (probablement) que nous devons faire de l'astronomie différemment (cf. transparents précédentes)
 - réduire les déplacements en avion
 - repenser nos activités (par exemple, plus de R&D, moins de développement d'instruments)
 - utilisation plus approfondie des données (abondantes) d'archives
 - faire de la décarbonation une priorité de financement
 - construire moins de nouvelles infrastructures
 - sortir de la compétition
- Cela implique (certainement) un changement systémique, comprenant les individus, les laboratoires, les organismes de recherche et de financement, les gouvernements
- En tant que communauté (de la recherche), nous devons reconnaître notre responsabilité et être exemplaires (cf. crédibilité)

S'inscrire dans les limites planétaires



Kate Raworth (2018), La théorie du donut