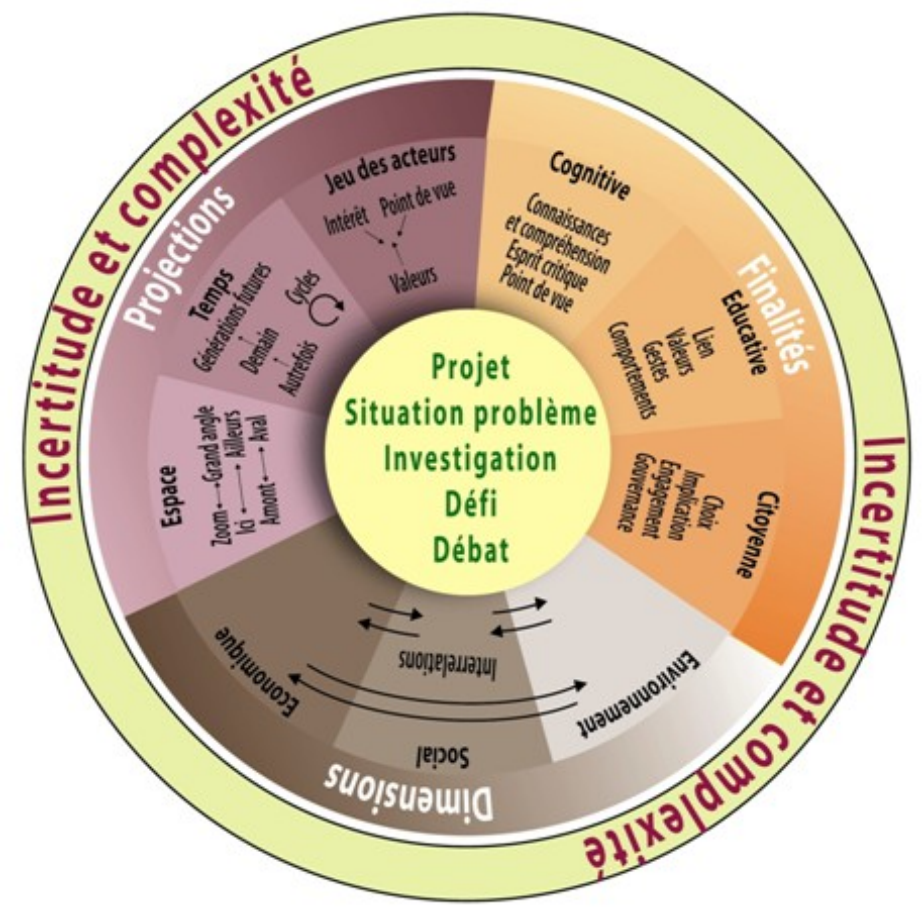
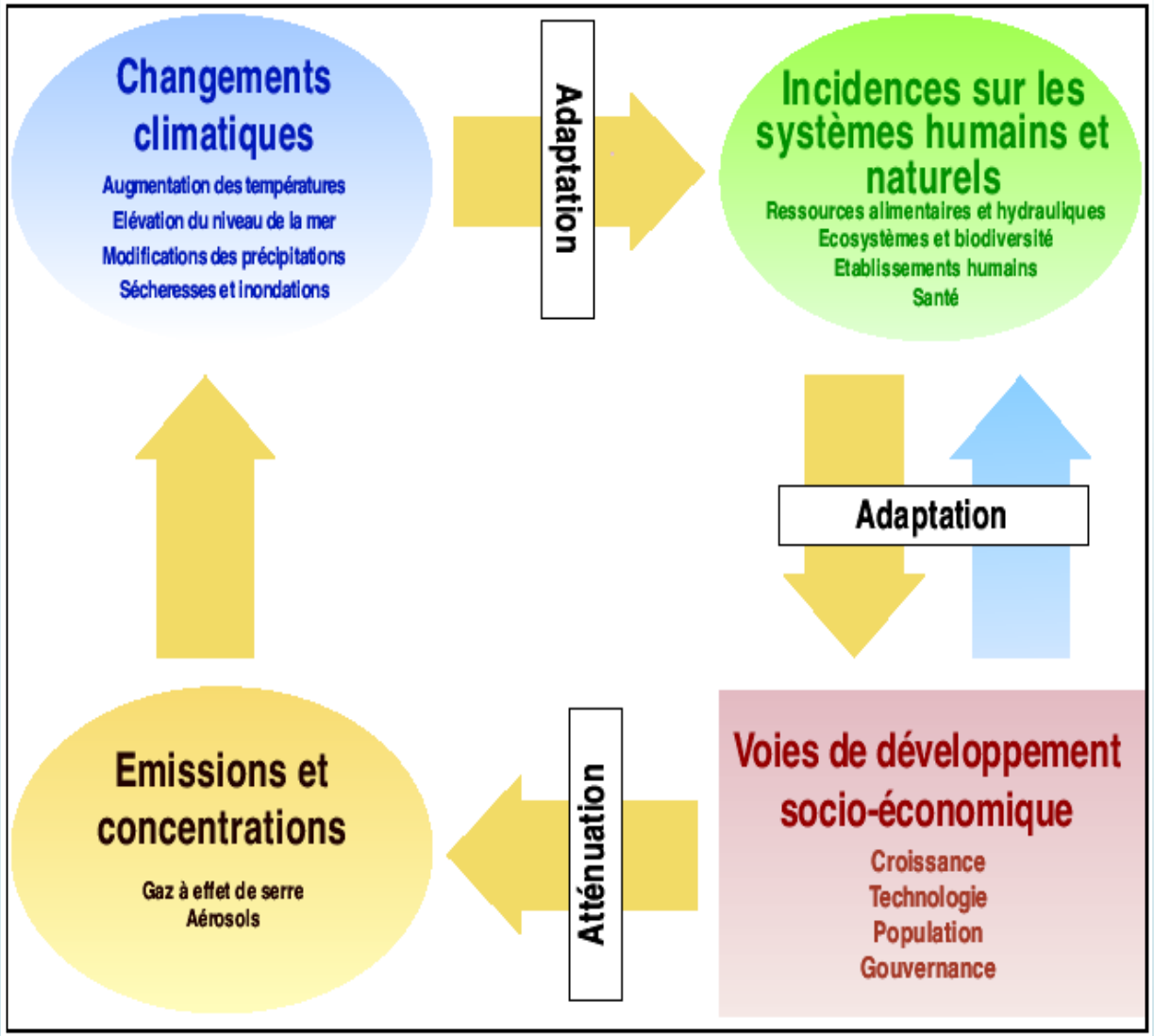
Changement climatique à l'ère de l'anthropocène

Entre risque d'effondrement et opportunité de changement ?

Béatrice QUENAULT, MCF en économie,
ESO Rennes (UMR CNRS 6590)
Université Rennes 2
beatrice.quenault@univ-rennes2.fr

Le changement climatique, un enjeu clé du développement durable

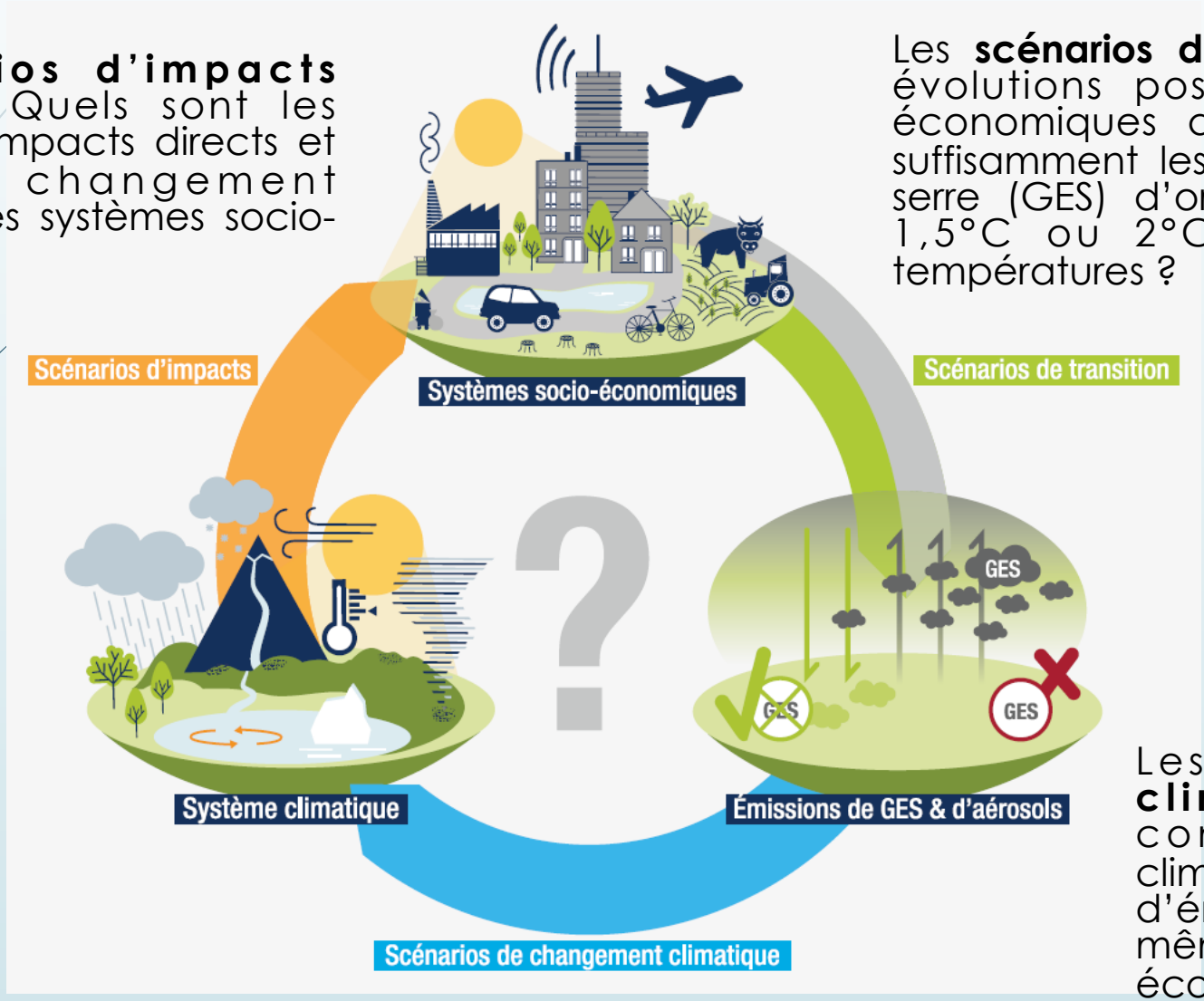




LES INTERACTIONS CLIMAT/SYSTÈMES SOCIO-ÉCONOMIQUES et LES TROIS FAMILLES DE « SCÉNARIOS LIÉS AU CLIMAT »

Les **scénarios d'impacts climatiques** : Quels sont les possibles futurs impacts directs et indirects du changement climatique sur les systèmes socio-économiques ?

Les **scénarios de transition** : Quelles sont les évolutions possibles des systèmes socio-économiques qui permettraient de réduire suffisamment les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine humaine pour limiter à 1,5°C ou 2°C la hausse globale des températures ?

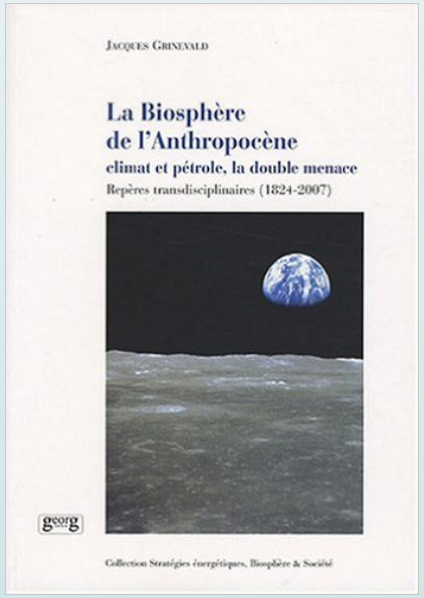


Les **scénarios de changement climatique** : Quelles sont les conséquences sur le système climatique de différentes trajectoires d'émissions de GES représentant elles-mêmes différentes trajectoires socio-économiques ?

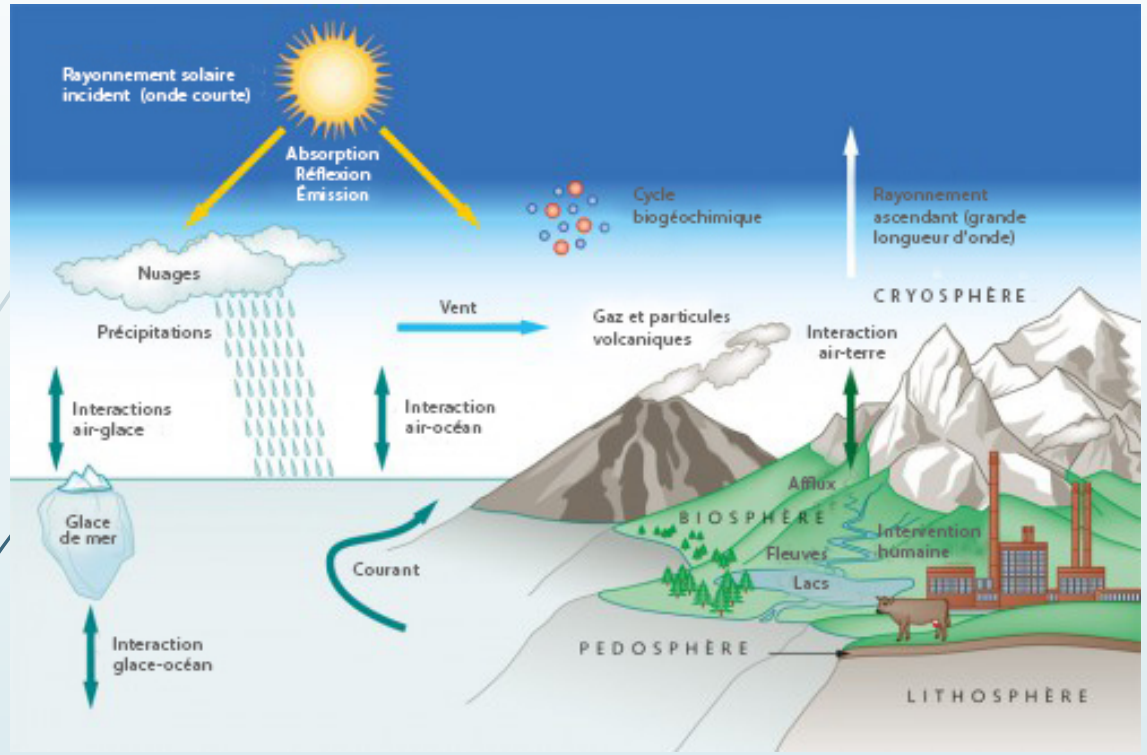
Source : I4CE, 2019

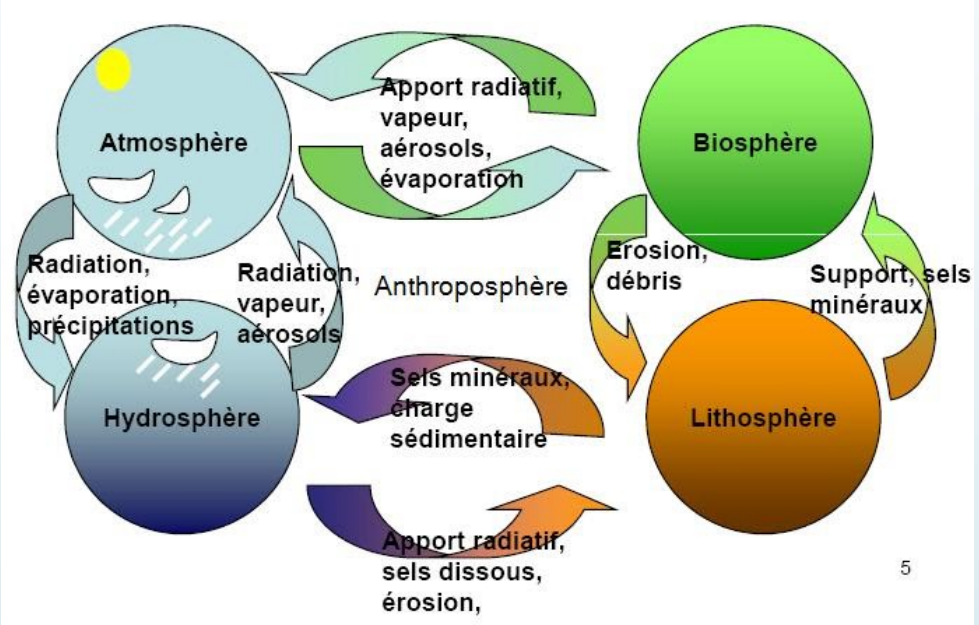
I. L'ANTHROPOCÈNE : VERS UN CHANGEMENT DE RÉGIME CLIMATIQUE ?

I.1. De l'Holocène à l'Anthropocène : vers un changement d'ère géologique ?



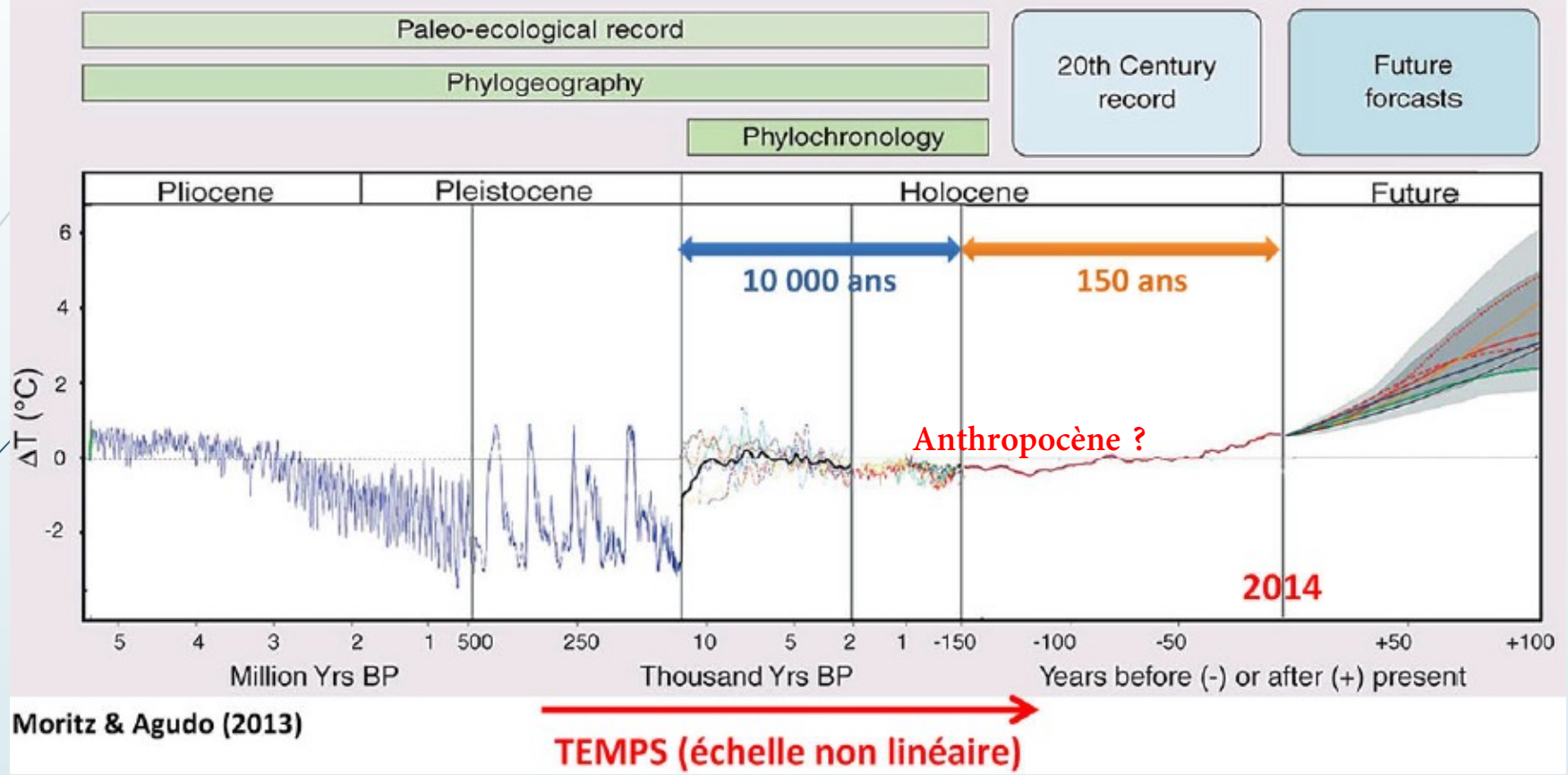
La « nouvelle » science du Système Terre





- La « science du système Terre » (Earth System Science) issue de la systémique étudie les interactions des différentes composantes de la planète Terre : biosphère, atmosphère, lithosphère, hydrosphère, et cryosphère.
- Elle cherche à définir les conditions nécessaires au maintien de l'état d'équilibre dynamique du système Terre depuis les débuts de l'holocène.

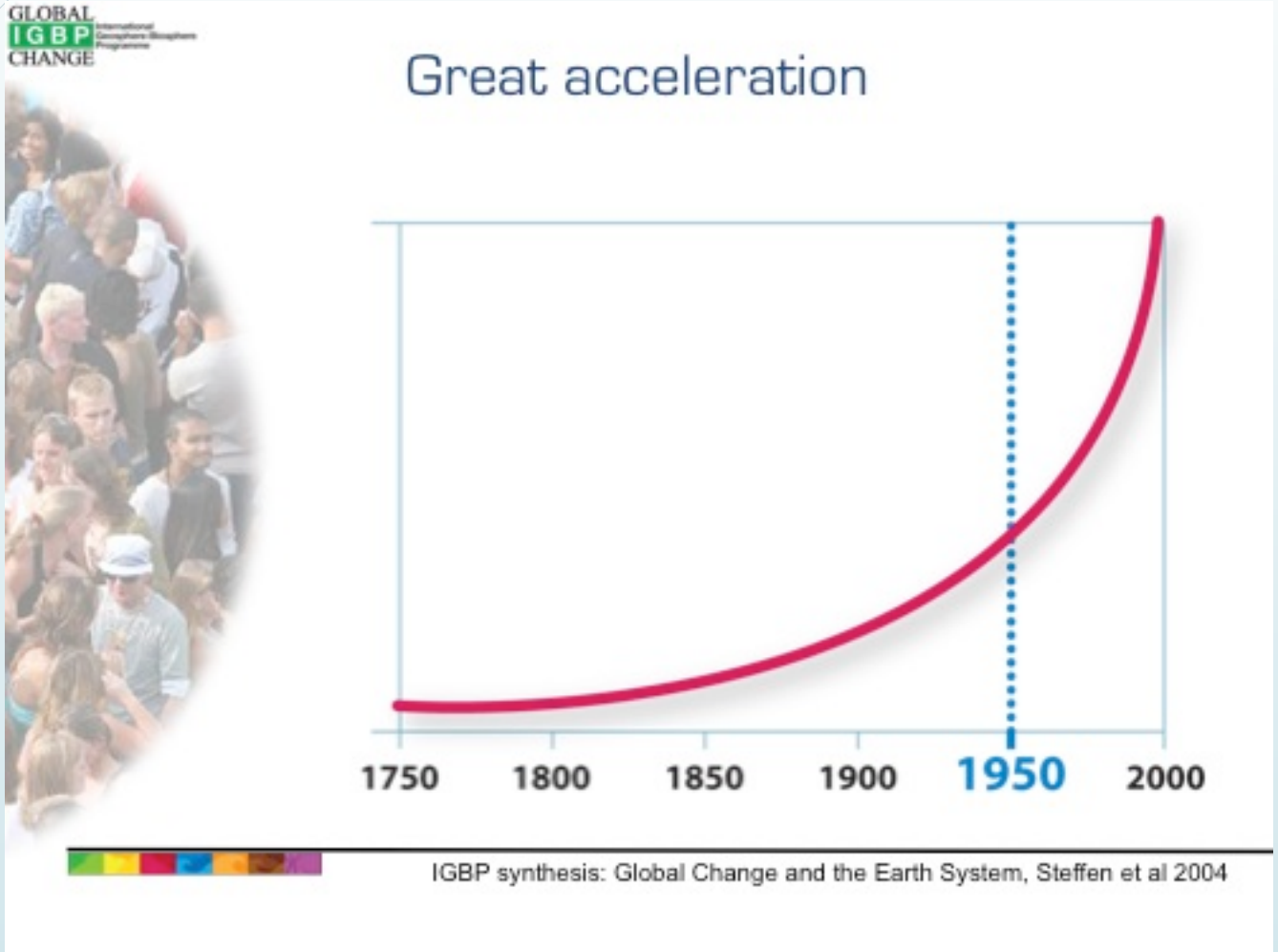
L'holocène, période de référence du climat



« Le terme "anthropocène" (...) suggère que la Terre est désormais sortie de son ère géologique naturelle, la période contemporaine interglaciaire appelée l'"holocène". Les activités humaines sont devenues tellement envahissantes et intenses qu'elles concurrencent les forces de la nature et entraînent la planète vers une terra incognita […]»

Will Steffen, Paul. J. Crutzen, John R. McNeill, « The Anthropocene : Are humans now overwhelming the great forces of nature ? », *Ambio*, vol. 36, n° 8, Stockholm, décembre 2007

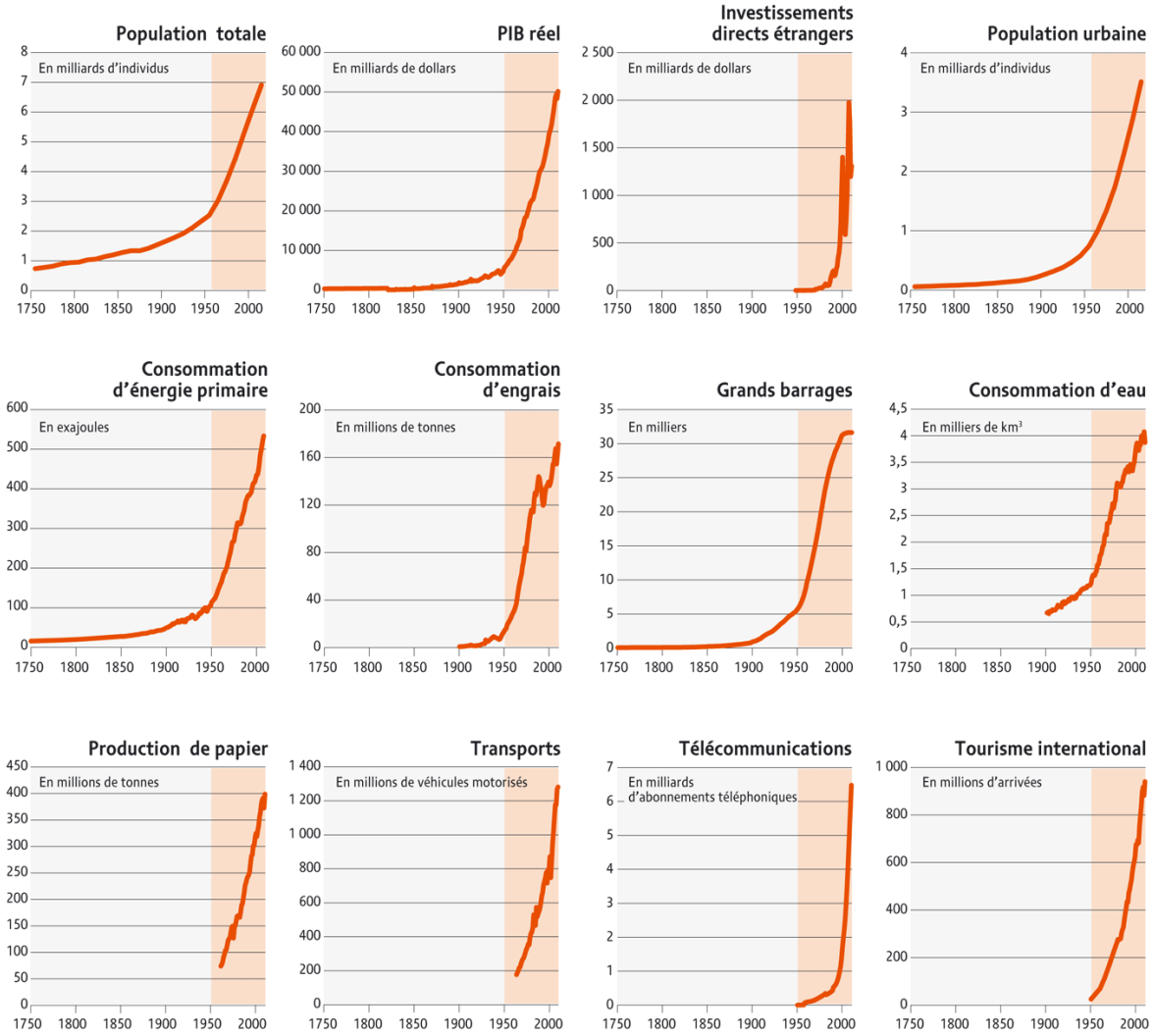
La « grande accélération » (Steffen et al., 2004)



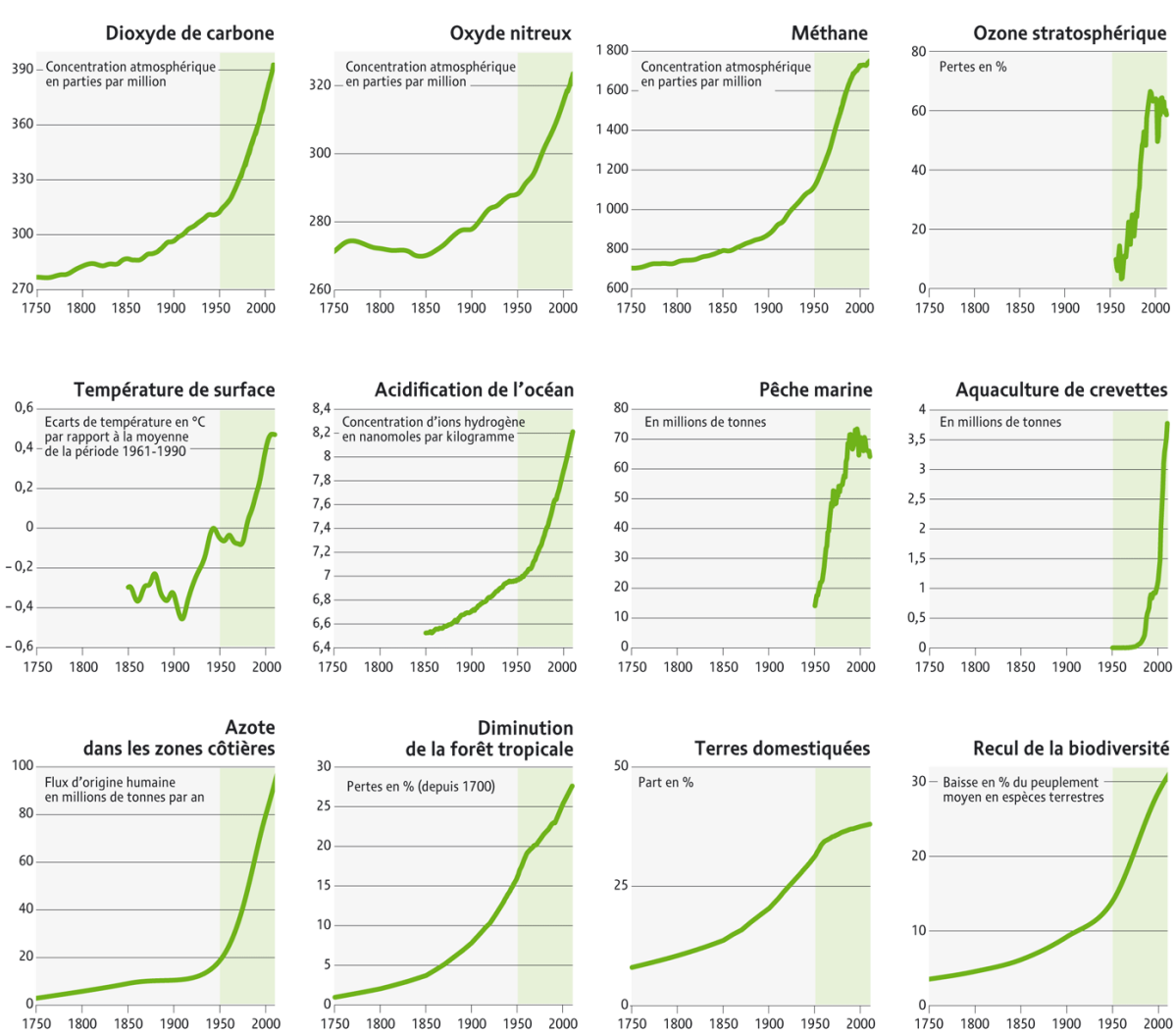
Steffen W., et al., 2015. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. The Anthropocene Review.

La grande accélération ou le tournant productiviste de l'après 1945

Développement socio-économique

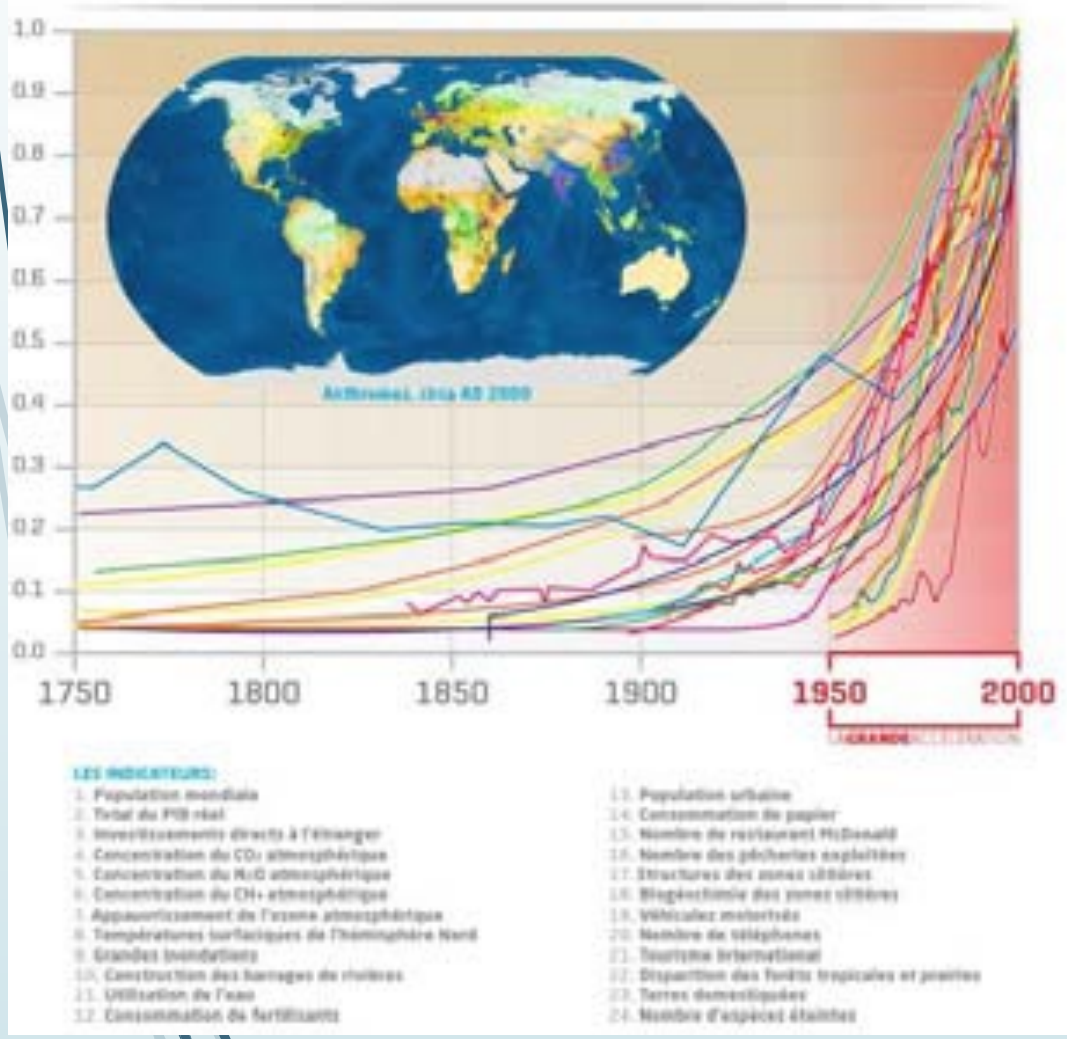


Evolution du système Terre



Source : Will Steffen, Wendy Broadgate, Lisa Deutsch, Owen Gaffney et Cornelia Ludwig, « The trajectory of the Anthropocene : the Great Acceleration », *The Anthropocene Review*, 2015 (données : International Geosphere-Biosphere Programme et Stockholm Resilience Centre).

La surexploitation des énergies fossiles et l'hyper-anthropocène



Selon James Hansen *et al. (2015), « Même si l'on considère que l'anthropocène a commencé il y a des millénaires, la surexploitation des énergies fossiles au XXe siècle a déclenché une* ***phase fondamentalement différente****, que l'on pourrait qualifier d'****hyper-anthropocène****.*

L'impact des forces humaines dépasse désormais celui des forces naturelles. »

James Hansen *et al.*, « Ice melt, sea level rise and superstorms », *Atmospheric Chemistry and Physics*, juillet 2015

I.2. Des déterminants planétaires au franchissement des limites

Les neuf déterminants biophysiques des grands équilibres écologiques planétaires (Röckstrom *et al.* (2009) et Steffen *et al.*, (2015])

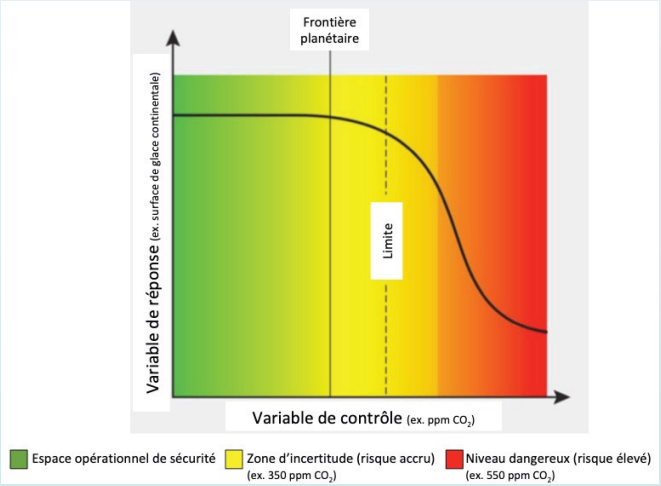
- Neuf déterminants biophysiques sont considérés indispensables pour le maintien des grands équilibres écologiques mondiaux.
- Trois sont susceptibles de présenter des risques de rupture ou de dysfonctionnement à l'échelle planétaire : changement climatique, acidification des océans et affaiblissement de la couche d'ozone stratosphérique.
- Les six autres ont des impacts jusqu'ici essentiellement locaux ou régionaux mais qui, en s'agrégeant ou en interagissant, peuvent aussi avoir des effets à l'échelle planétaire (Ex. l'érosion de la biodiversité réduit la résilience du système Terre aux pressions comme le CC).
- Pour chacun des limites ont été fixées au-delà desquelles les conditions qui ont permis l'épanouissement de la vie humaine ne sont plus garanties.

Steffen W. et al. ,2015. "Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet", Science, pp. 1259855.

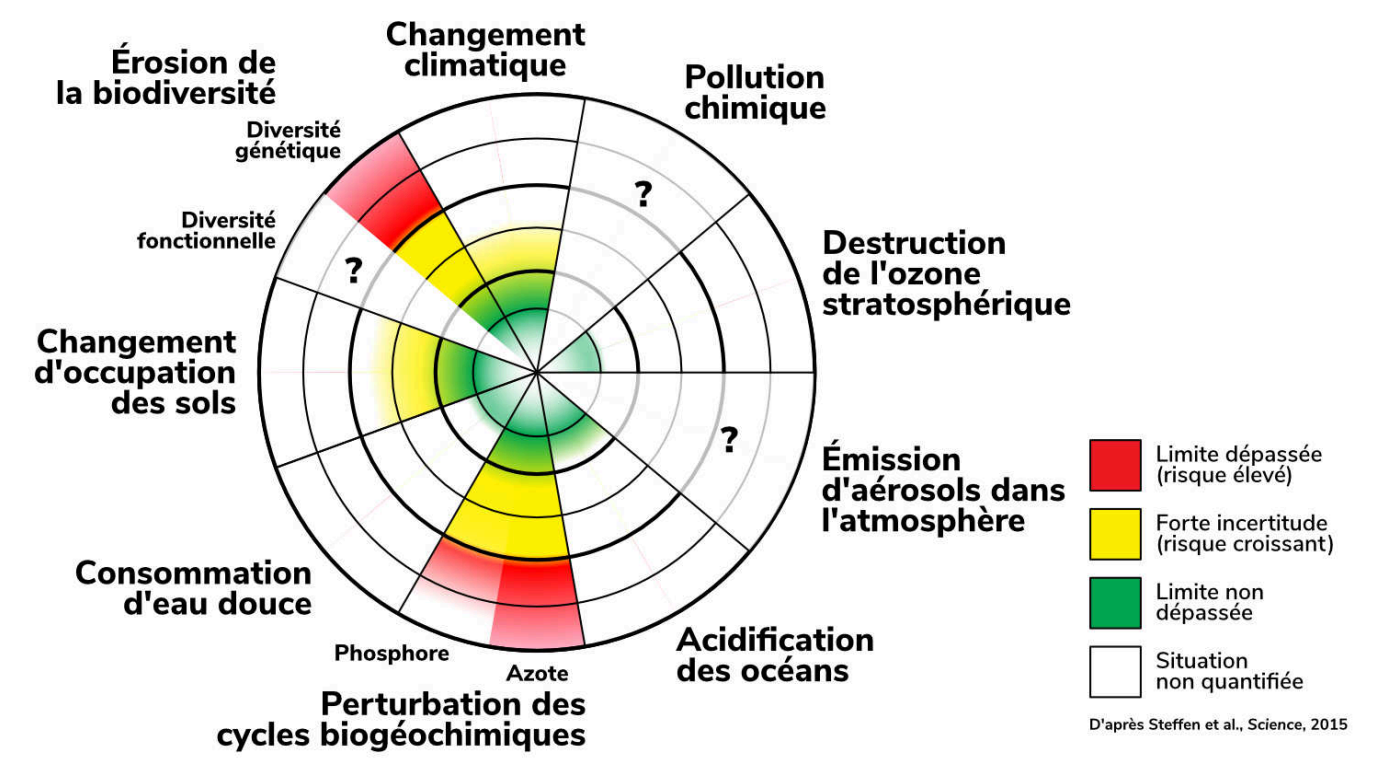
Les 9 limites planétaires critiques

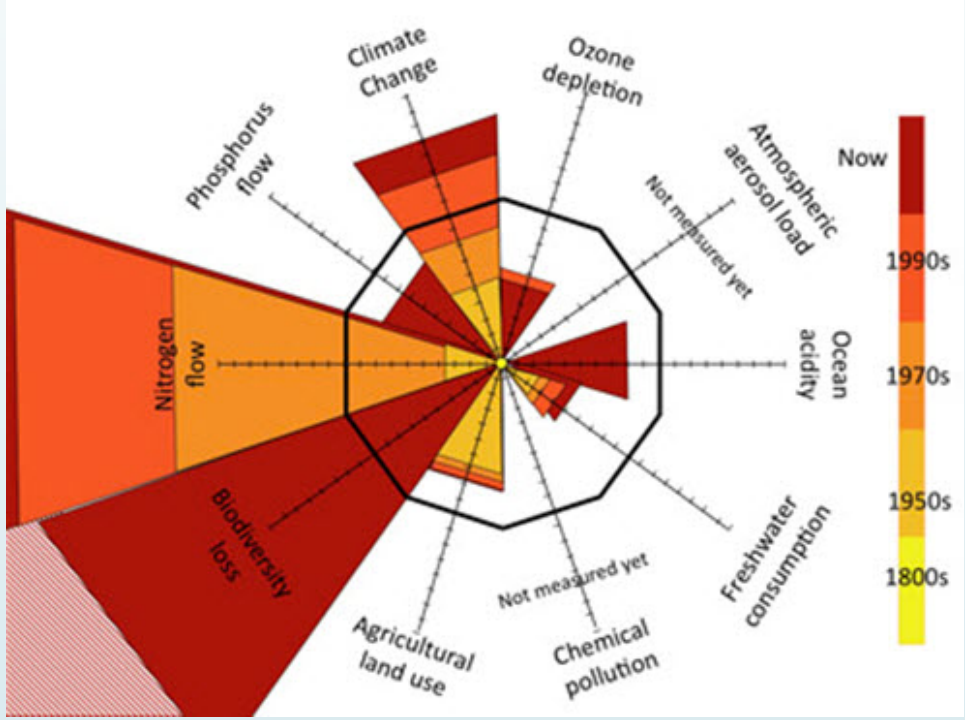
Processus de la biosphère		Indicateur	Limites proposées[1]	Valeur actuelle[1]	Valeur pré-industrielle[1]
Érosion de la biodiversité		Rythme d'extinction des espèces [nombre d'espèces disparues par million d'espèces et par an] [2]	10	> 100	0,1-1
Changement climatique		Concentration atmosphérique de CO_2 [ppmv] [3]	350	387	280
		Forçage radiatif [W/m^2] [3]	1	1,5	0
Cycles biogéochimiques	Azote	Quantités de N_2 retirée de l'atmosphère pour les activités humaines [millions de tonnes/an]	35	121	0
	Phosphore	Quantité de P déversé dans les océans [millions de tonnes/an]	11	8,5-9,5	-1
Acidification des océans		État moyen de saturation de l'aragonite dans les océans [sans unité] [4]	2,75	2,90	3,44
Trou de la couche d'ozone		Concentration en ozone stratosphérique [unité Dobson] [5]	276	283	290
Surconsommation de l'eau douce [6]		Consommation en eau douce [km^3/an]	4 000	2 600	415
Changement de vocation des terres		Pourcentage de terres converties en terres agricoles	15	11,7	Faible
Présence d'aérosols atmosphériques		Concentration globale de particules	Indéterminé		
Pollution chimique		Quantité déversée (ou concentration dans l'environnement) de • Polluants organiques • Matières plastiques • Perturbateurs endocriniens • Métaux lourds • Déchets nucléaires	Indéterminé		

Pour chaque domaine, une limite à ne pas franchir est définie, pour se prémunir des risques de basculement, aux conséquences potentiellement catastrophiques.



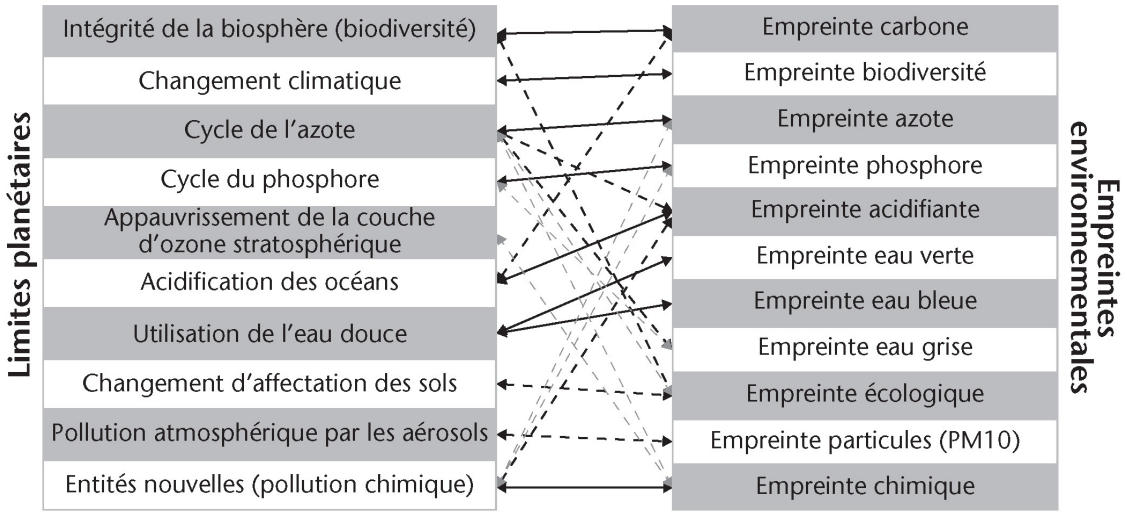
Le « terrain de jeu planétaire » : L'état actuel des variables de contrôle pour sept des frontières planétaires



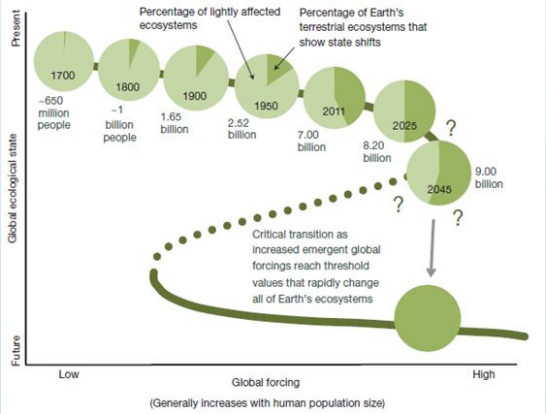


Aujourd'hui 3 limites planétaires ont déjà dépassé un seuil où il risque de se produire des basculements potentiellement irréversibles. Ces trois limites sont : Le changement climatique, l'appauvrissement de la biodiversité et le flux d'azote (adapté de röckstrom et al., 2009, & steffen et al., 2015)

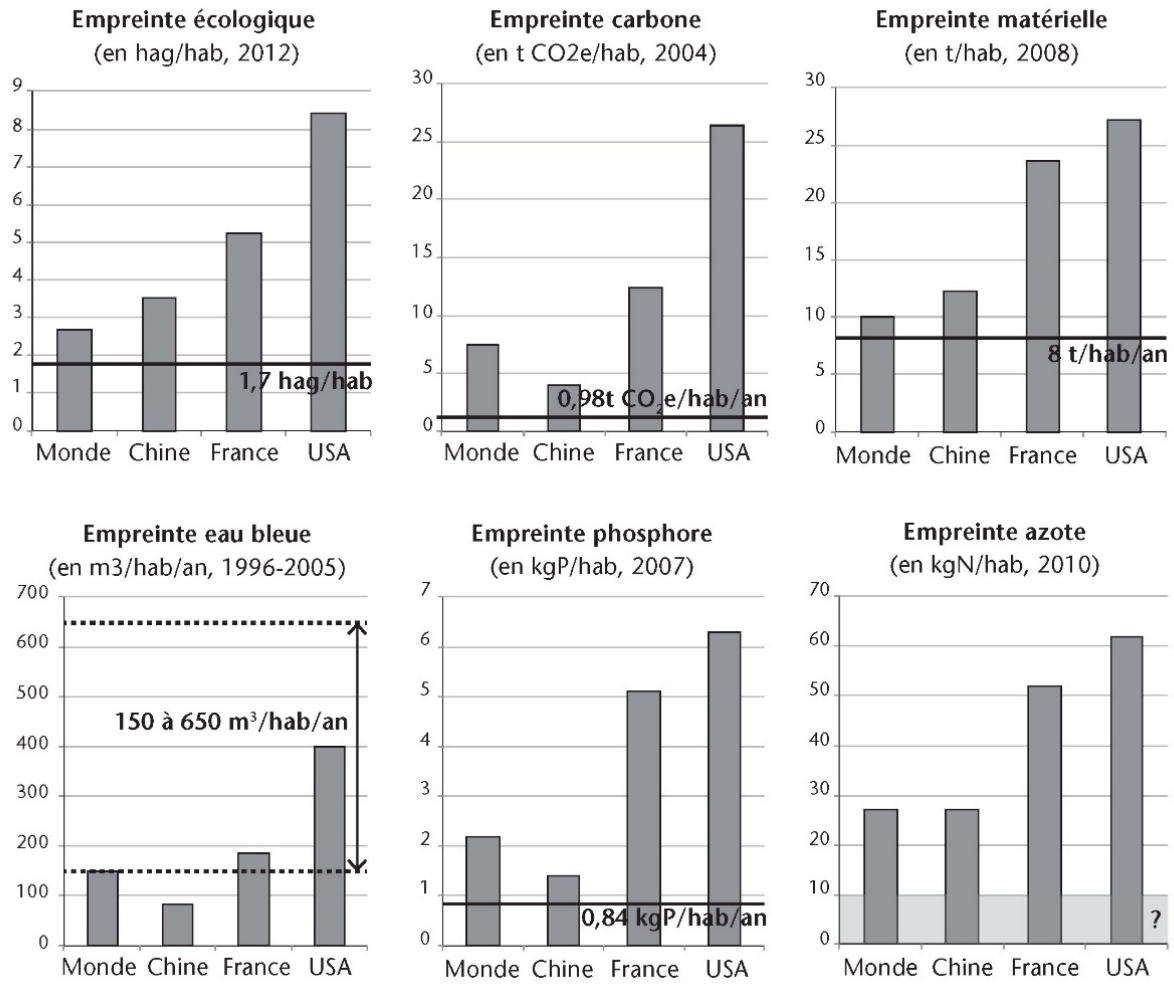
Correspondances entre limites planétaires et empreintes environnementales et seuils de durabilité



Lecture : les flèches pleines renvoient à une correspondance directe, les flèches en tirets à une correspondance partielle et les flèches en tirets gris clair à une correspondance indirecte et partielle. *Source* : repris de Fang *et al.* [2015].



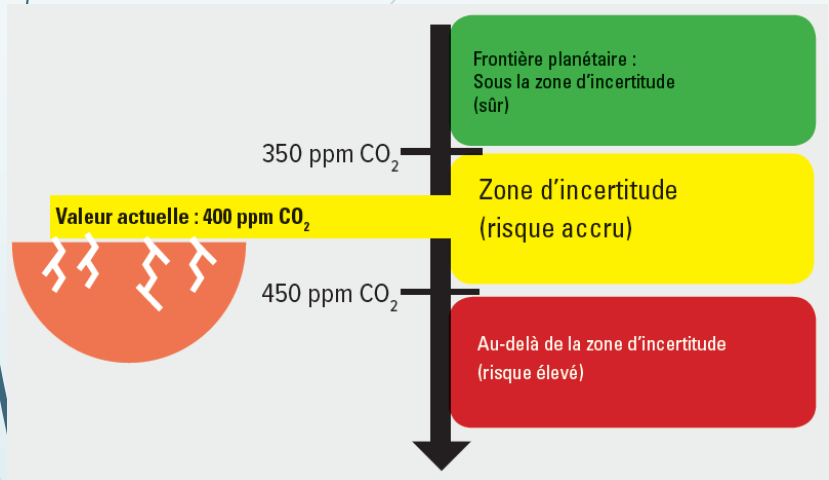
[(Barnosky *et al.*, 2012, 55)]

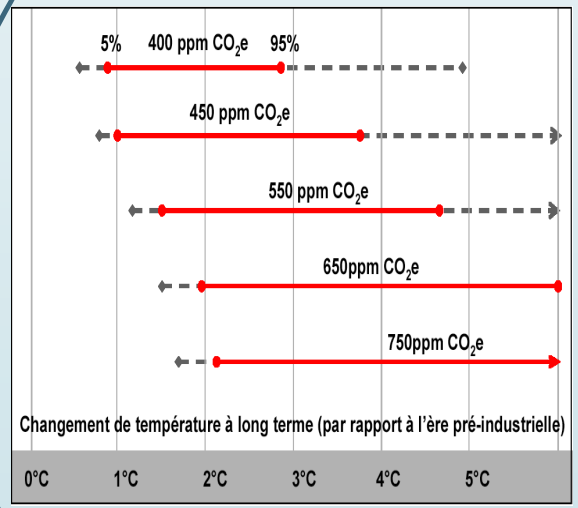


Les seuils proposés sont tirés de Hoekstra et Wiedmann [2014] pour les empreintes écologique, eau bleue et matérielle. Les seuils pour les empreintes carbone et phosphore sont tirés de Bjørn et Hauschild [2015] qui proposent également des éléments pour l'azote, non transposables en l'état.

I.3. Les risques de catastrophe climatique

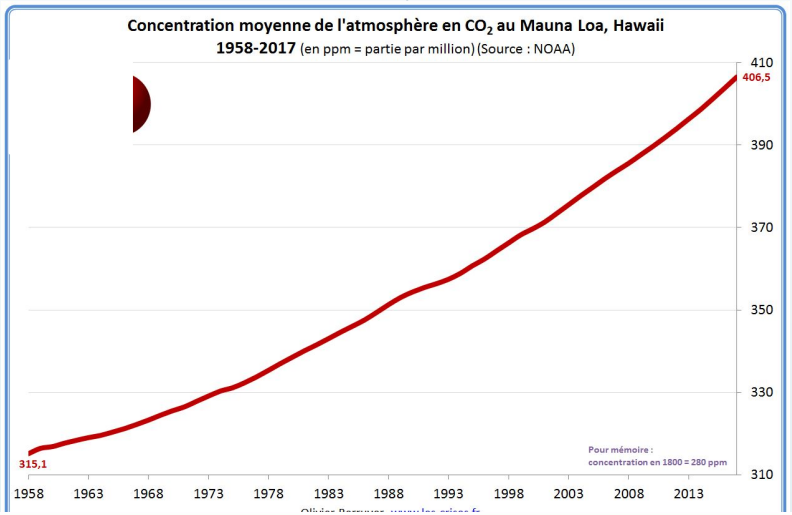
Le franchissement de la frontière planétaire du CC: vers un risque accru

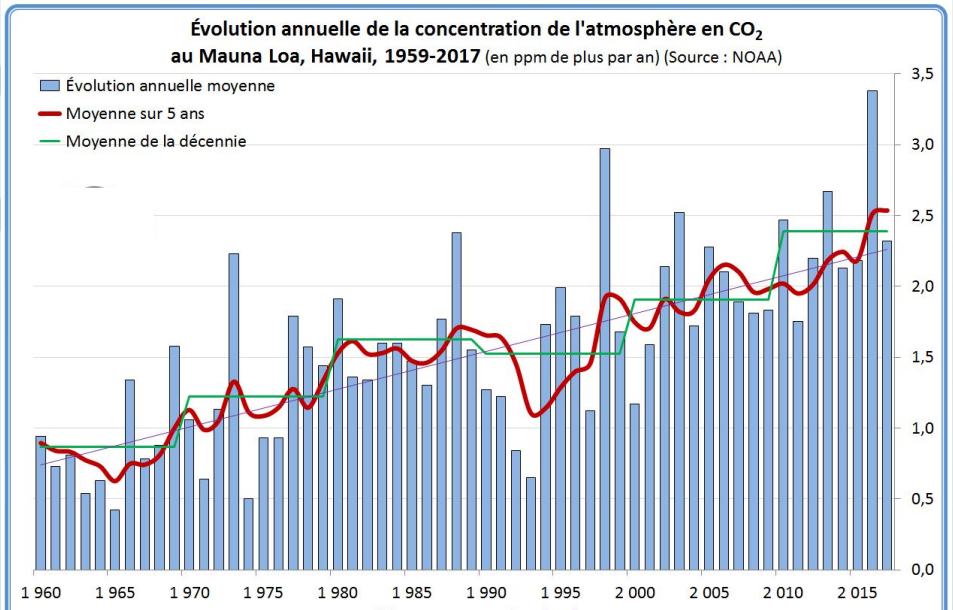


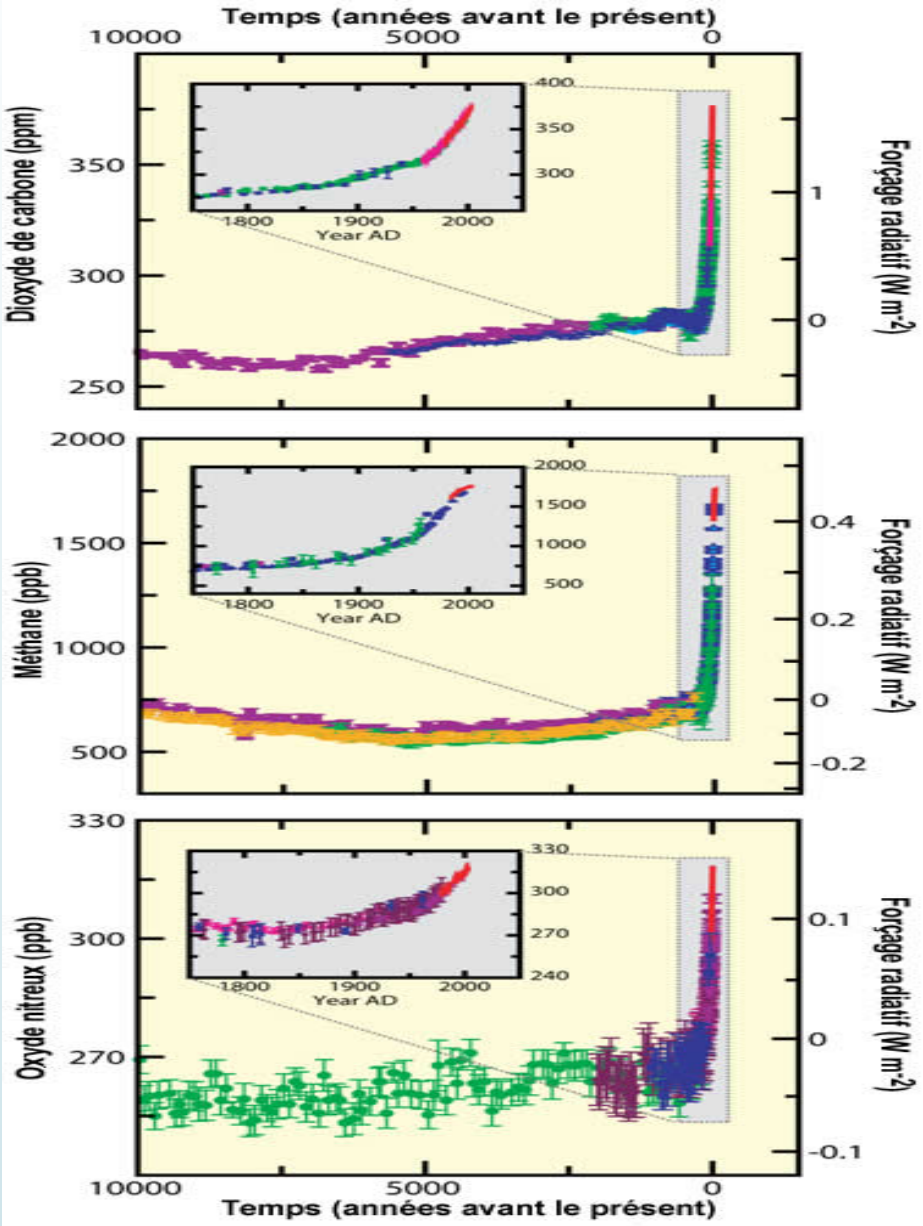


- Pour le CO2, une **valeur seuil de 350 ppm** a été proposée avec une **zone de danger** pour l'équilibre planétaire **entre 350 et 550 ppm**, **révisée à 450 ppm** pour la limite supérieure (Steffen et al., 2015).
- Pour le **forçage radiatif**, une valeur **d'1 W/m2** au-delà du seuil préindustriel est proposée pour la limite inférieure de la zone de danger.
- Les limites et frontières pour ces deux indicateurs sont délicates à produire et se basent sur le **consensus politique** qui s'est progressivement établi **autour de l'objectif des +2°C** à ne pas franchir à la fin du XXIe siècle par rapport à l'ère préindustrielle.

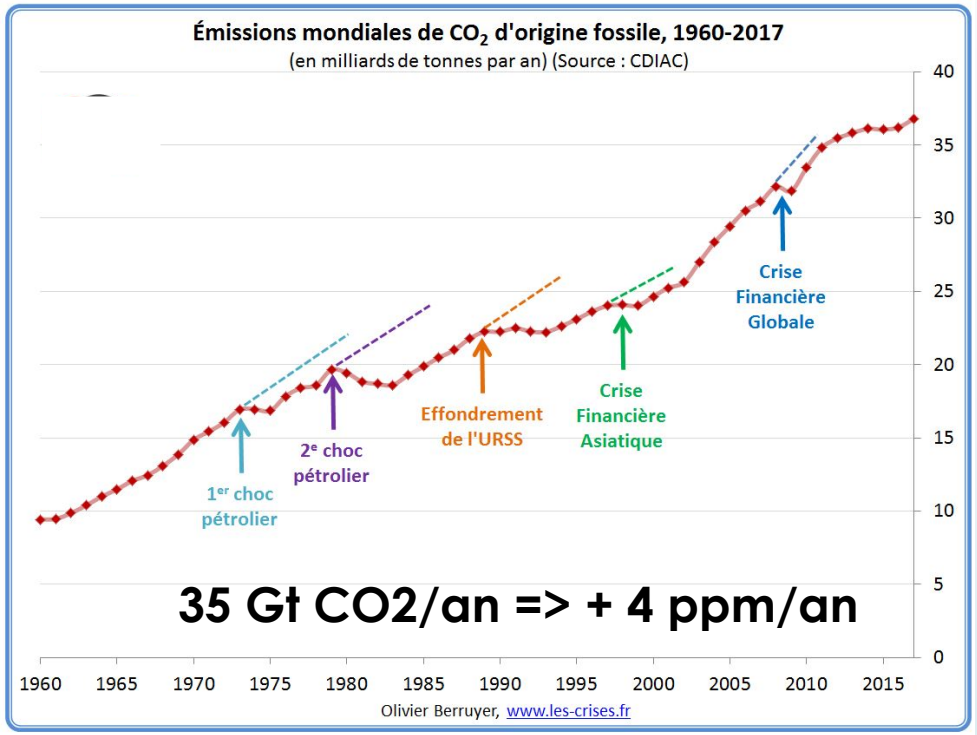
Quelle est la valeur actuelle des indicateurs de CC : 400 ppm Co2

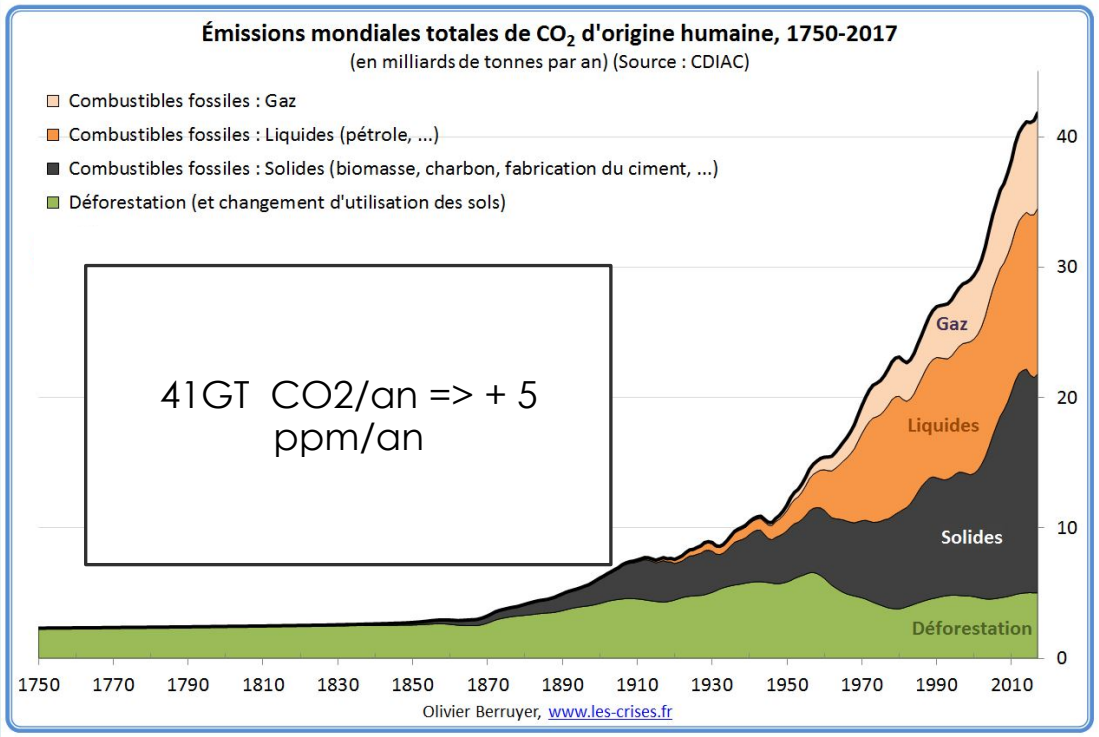






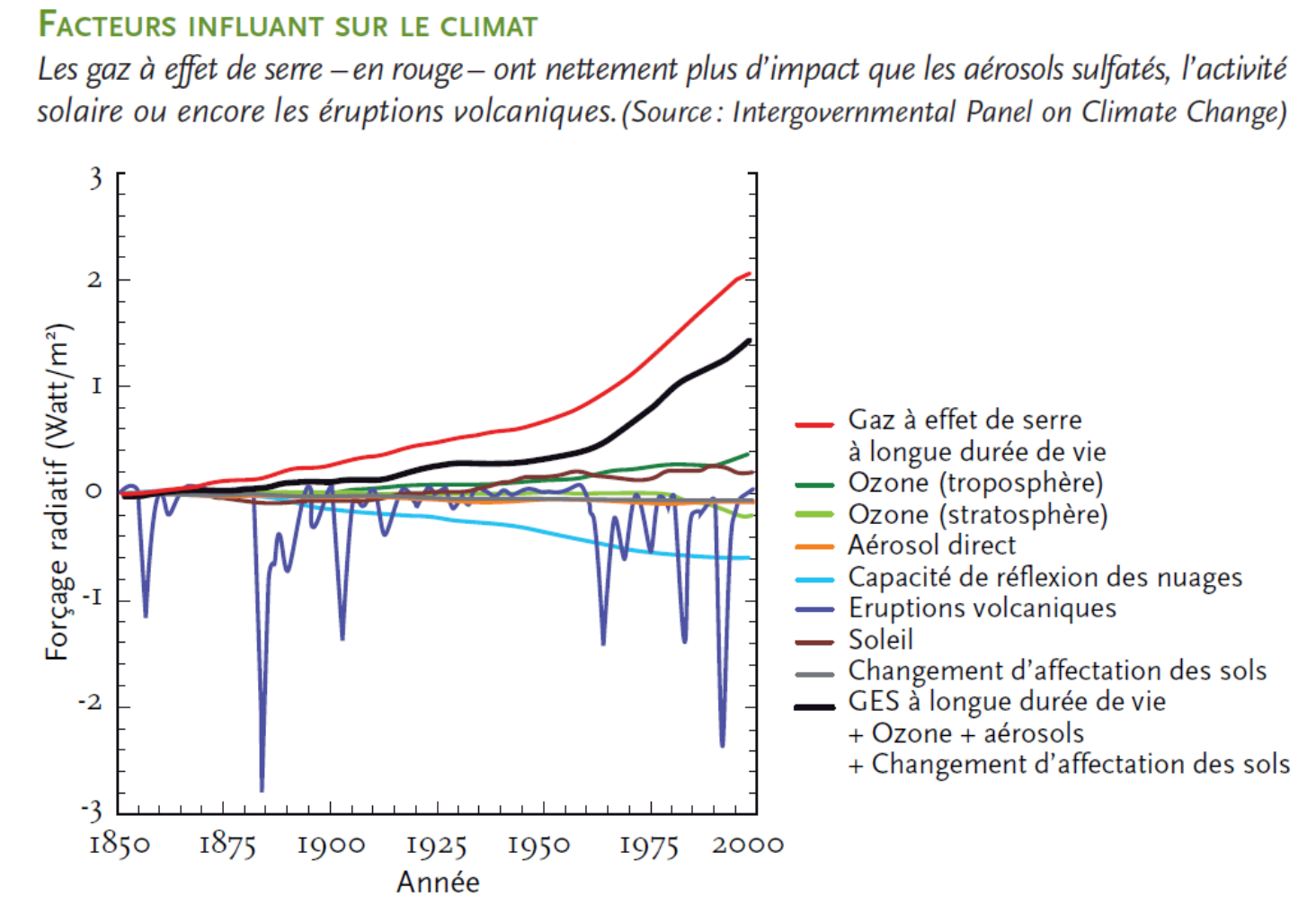
Les émissions anthropiques de CO2





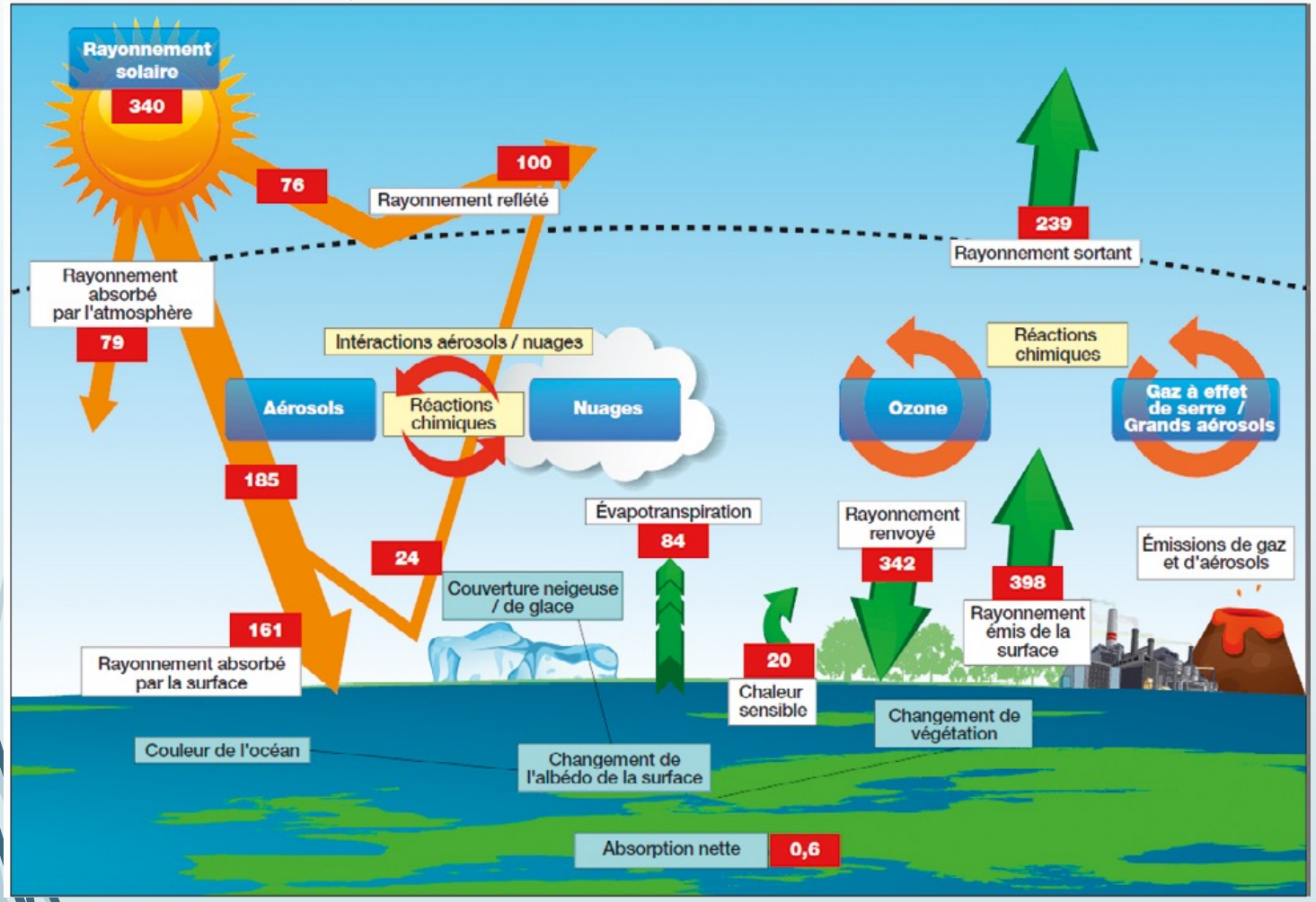
Le réchauffement climatique observé entre 1880 et 2012 a été de 0,85°C. Il a été provoqué, depuis l'ère industrielle, par la combustion des énergies fossiles, la production de ciment, les changements d'exploitation et d'affectation des sols et par la déforestation.
La consommation des énergies fossiles représente un équivalent de 37 milliards de litres de pétrole par jour (1 piscine olympique toutes les 6 secondes). 1 litre de pétrole produisant, environ, 2,5 kilos de CO_2, on a environ **35 milliards de tonnes (Gt) de CO_2 rejetés par an**. Heureusement, plus de la moitié de ces émissions de CO_2 a été absorbée par les océans et les sols.

Le renforcement du forçage radiatif anthropique



Le bilan penche aujourd'hui très nettement en faveur du renforcement du forçage radiatif d'origine anthropique, qui s'explique majoritairement par les émissions de GES (CO2, méthane, halocarbones (hydrofluorocarbures, perfluorocarbure, hexafluorure de soufre) et enfin du protoxyde d'azote
(GIEC, 2007).

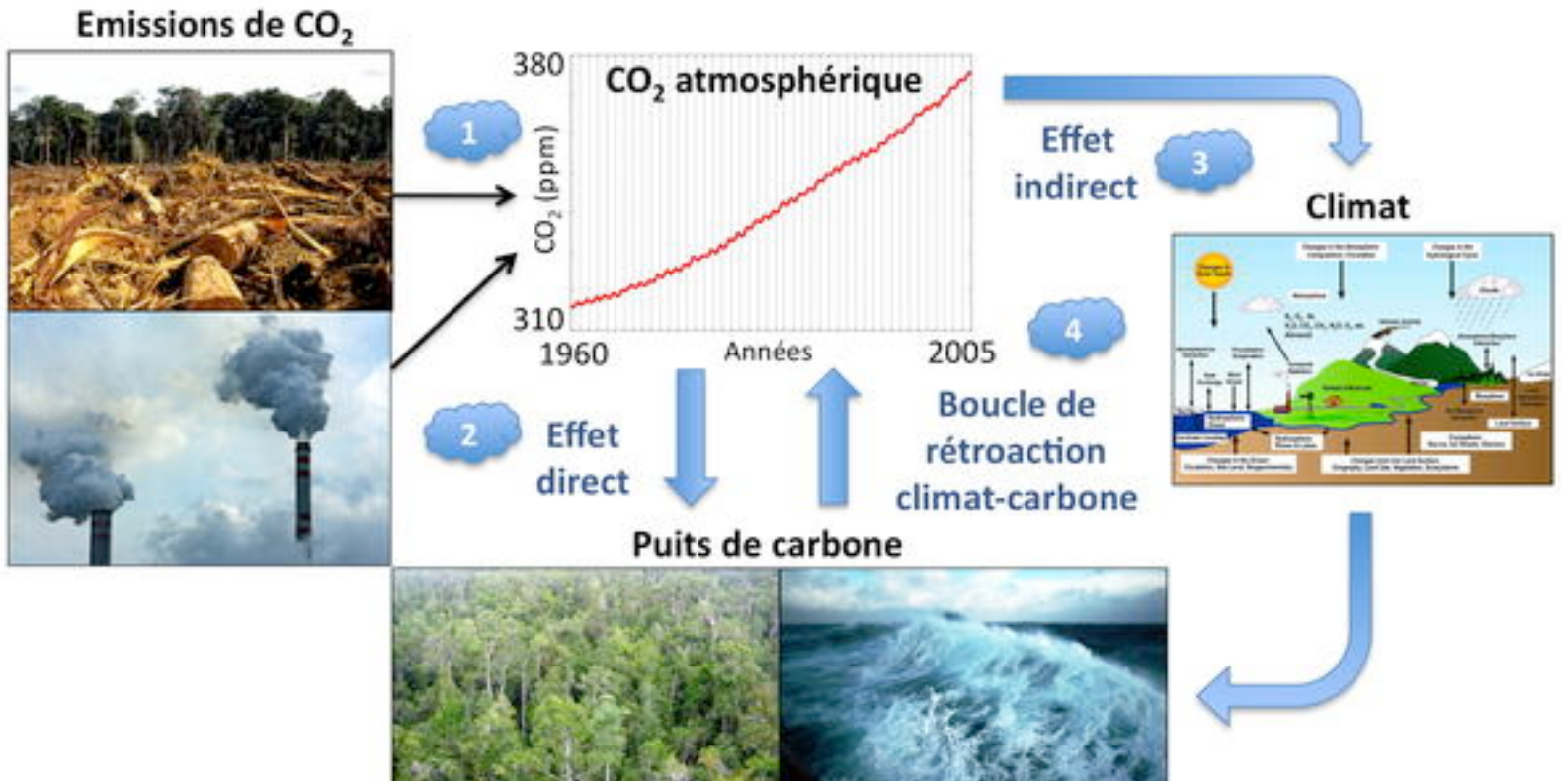
PERTURBATIONS DE L'EFFET DE SERRE NATUREL PAR LES ACTIVITÉS HUMAINES : +2,55 W/m2



L'ensemble du forçage radiatif d'origine anthropique s'élève à **+ 2,55 (± 1,1) W/m² en 2013 par rapport à 1750**, soit très au-dessus de la limite de risque accru (pas de limite de risque élevé mentionnée pour cet indicateur).

Rockström et ses collègues en concluent que le climat contemporain « est en train **de sortir de l'enveloppe de la variabilité de l'Holocène, accroissant le risque de changement climatique dangereux**. »

Effets des émissions de CO_2 sur les puits de carbone



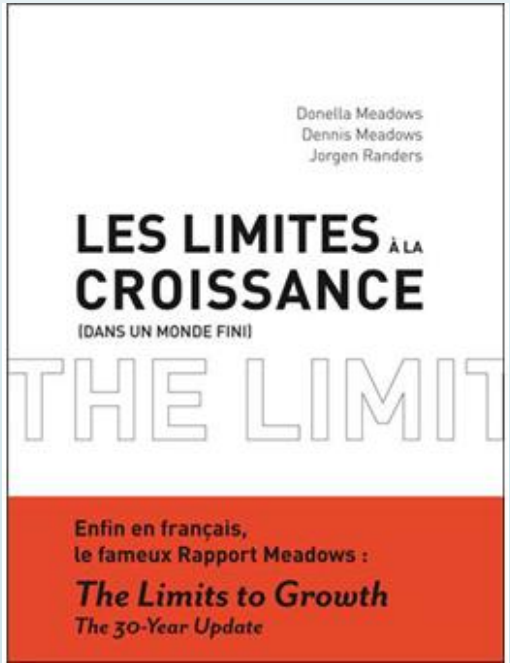
Boucle de rétroaction climat-carbone.

© IPSL et données atmosphériques de l'Observatoire du pôle Sud (NOAA).

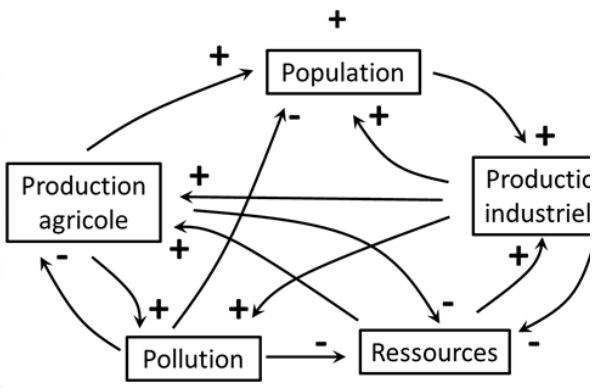
Légende : Les émissions de CO_2 dues à l'utilisation de combustibles fossiles et à la déforestation font augmenter le CO_2 atmosphérique (repère 1). Le CO_2, en augmentation dans l'atmosphère, impacte directement les puits de carbone (repère 2) mais aussi indirectement, via le changement climatique (repère 3). En retour, l'évolution des puits de carbone peut modifier la concentration du CO_2 dans l'atmosphère (repère 4) en accélérant son augmentation (rétroaction positive) ou en la ralentissant (rétroaction négative)

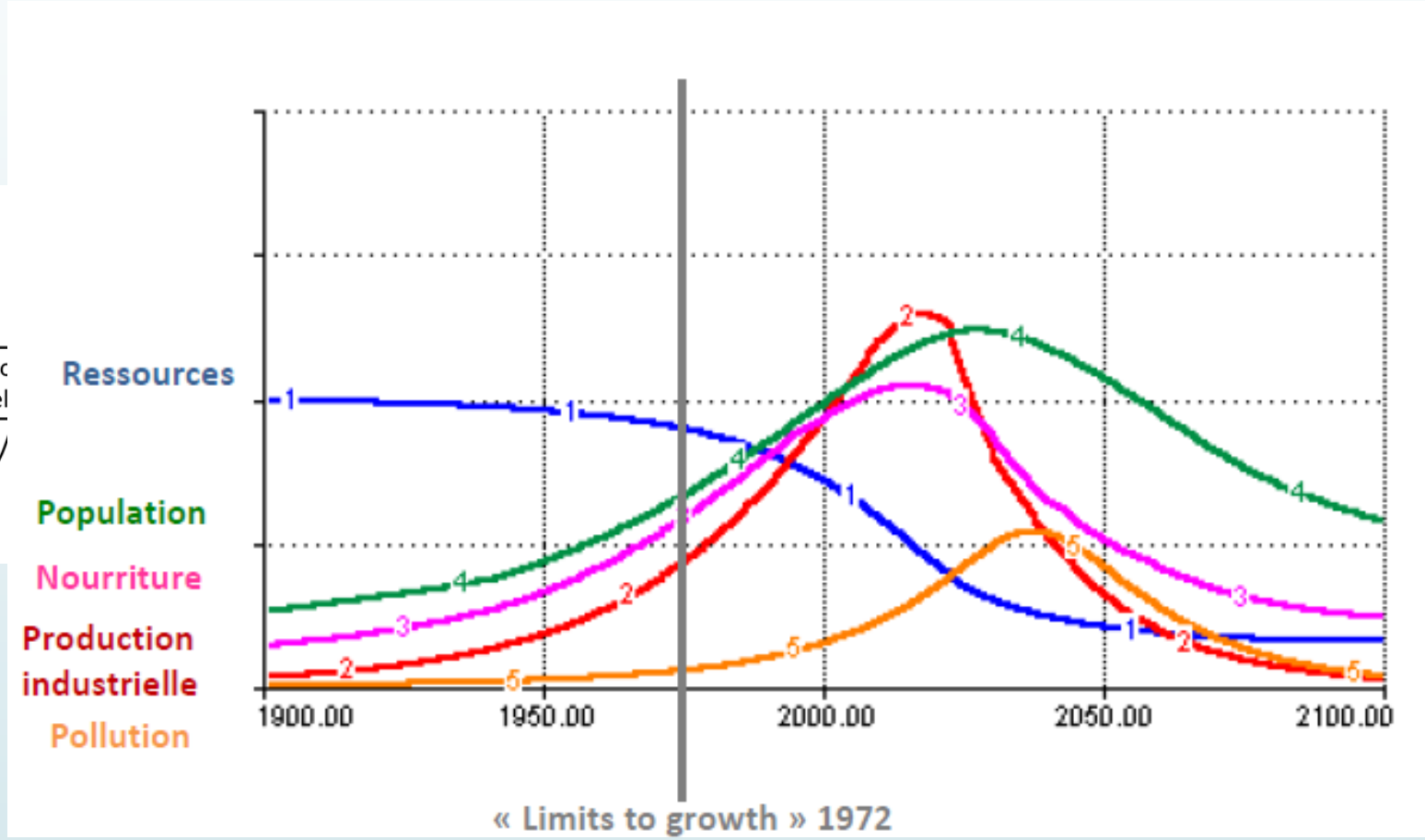
II. DU DÉPASSEMENT DES LIMITES AU RISQUE D'EFFONDREMENT

II.1. Des limites à la croissance au risque de surchauffe



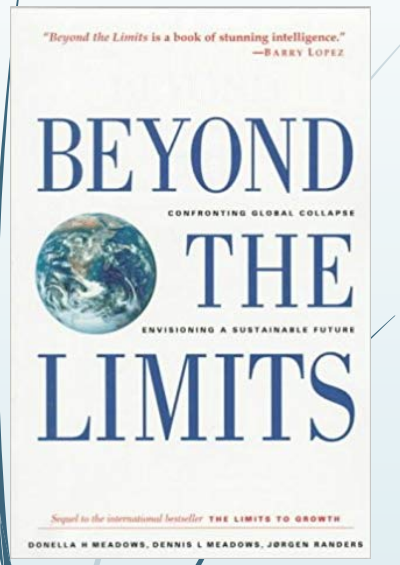
Le 1er Rapport du Club de Rome (1972) et le modèle intégré économie-environnement (World 3)

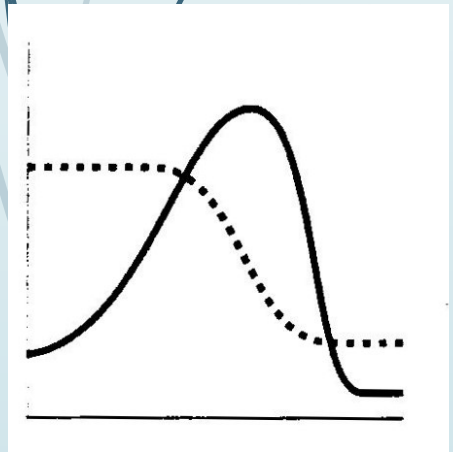




Les risques de pénuries de RN non renouvelables représentent des limites à la poursuite de la croissance et un risque d'effondrement !

Le 2e Rapport du Club de Rome (1992) : Au-delà des limites ou le risque de surchauffe (overshoot)



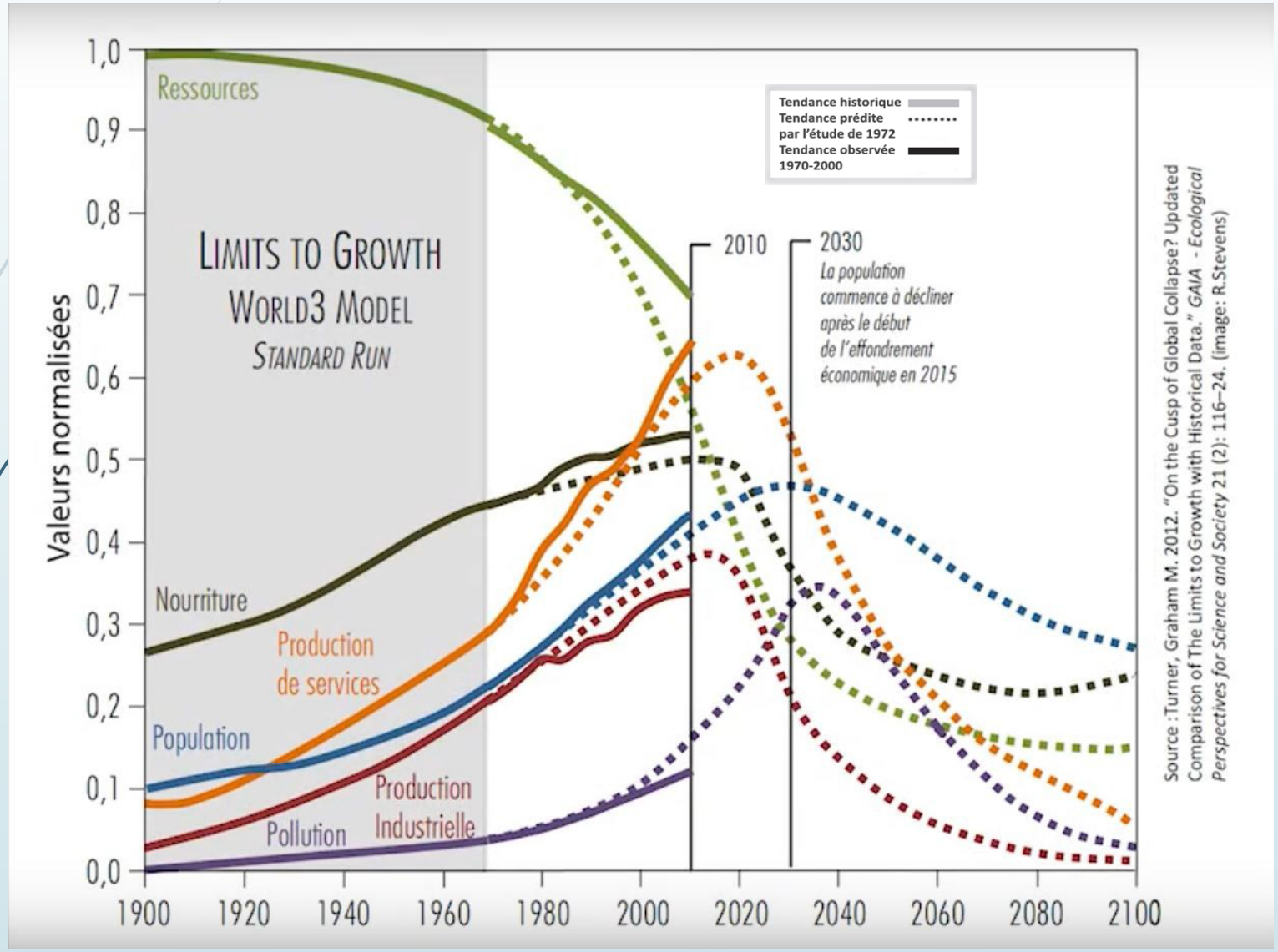


- **L'overshoot** (i.e aller trop loin, aller au-delà des limites, par accident et sans en avoir l'intention) vient de la **combinaison de 3 facteurs** :
  1. un **changement rapide**,
  2. l'existence de **limites ou** de **barrières** à ne pas franchir,
  3. des **difficultés à percevoir ces limites** et **à contrôler le changement** (inattention, données erronées, rétroaction différée, information inadéquate, réponse lente ou retardée).

Le dépassement peut être suivi d'un effondrement si :

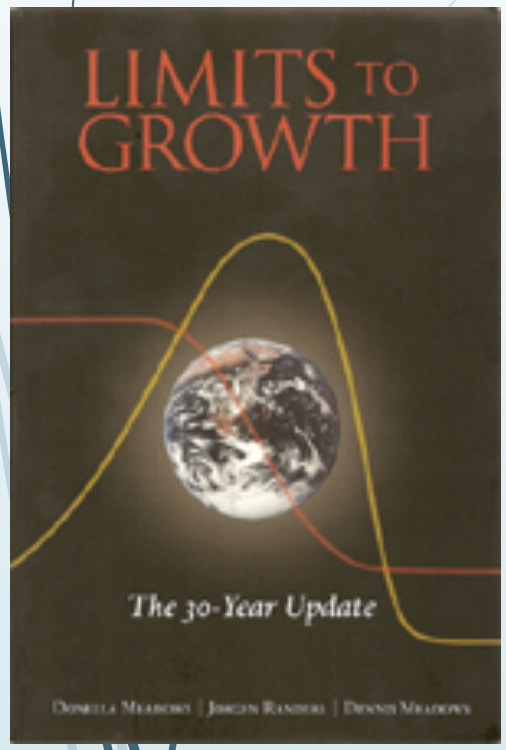
- Les signaux ou la réponse sont différés et
- Les limites sont érodables (irréversiblement dégradées lorsque dépassées)

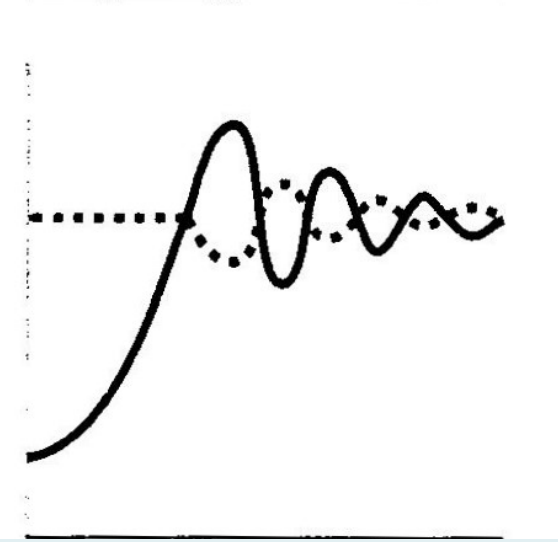
Confrontation du scénario de référence de World 3 aux données observées (Turner, 2014)



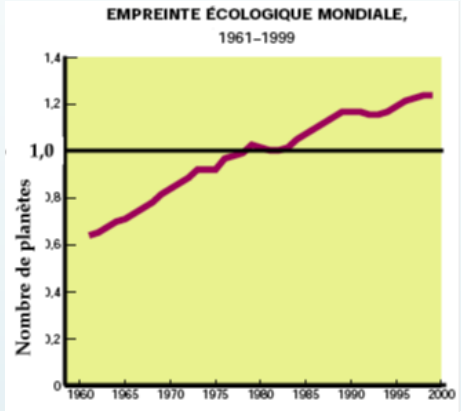
Le scénario tendanciel montre que la démographie n'atteindra au maximum que 7,8 milliards, car sa croissance cessera en 2030 et diminuera ensuite fortement (d'environ un demi-milliard par décennie) pour s'écrouler en 2100 à 4,43 milliards (niveau de 1980), soit une hécatombe de la population mondiale : 3,3 milliards d'humains mourraient par manque de nourriture entre 2030 et 2100, soit près de 43% de la population !

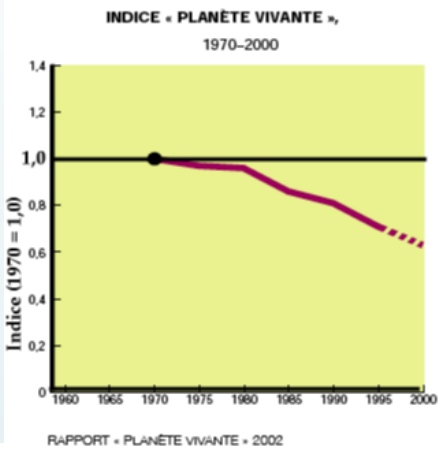
Les limites une fois franchies, l'atterrissage en douceur est-il encore possible ?

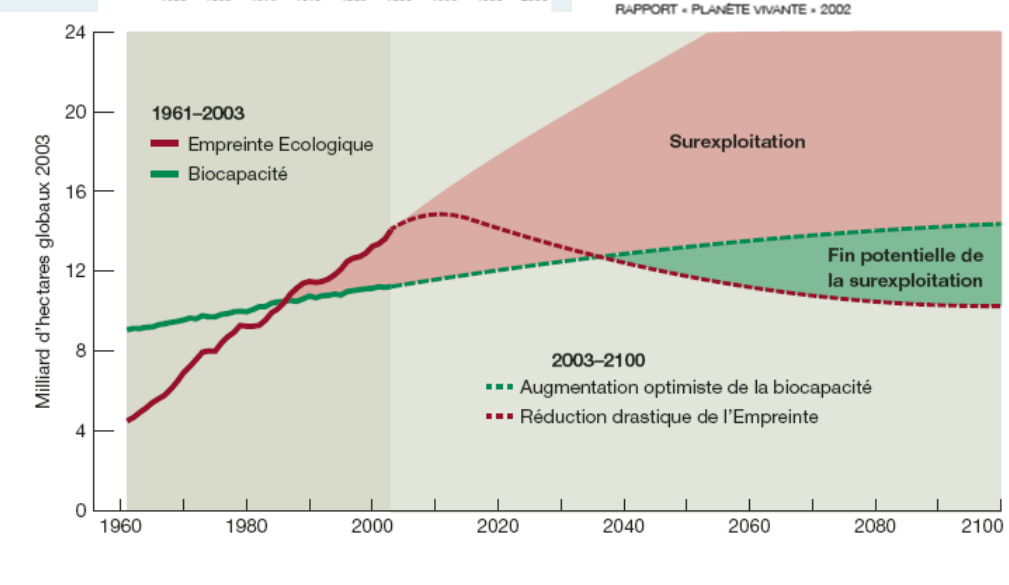




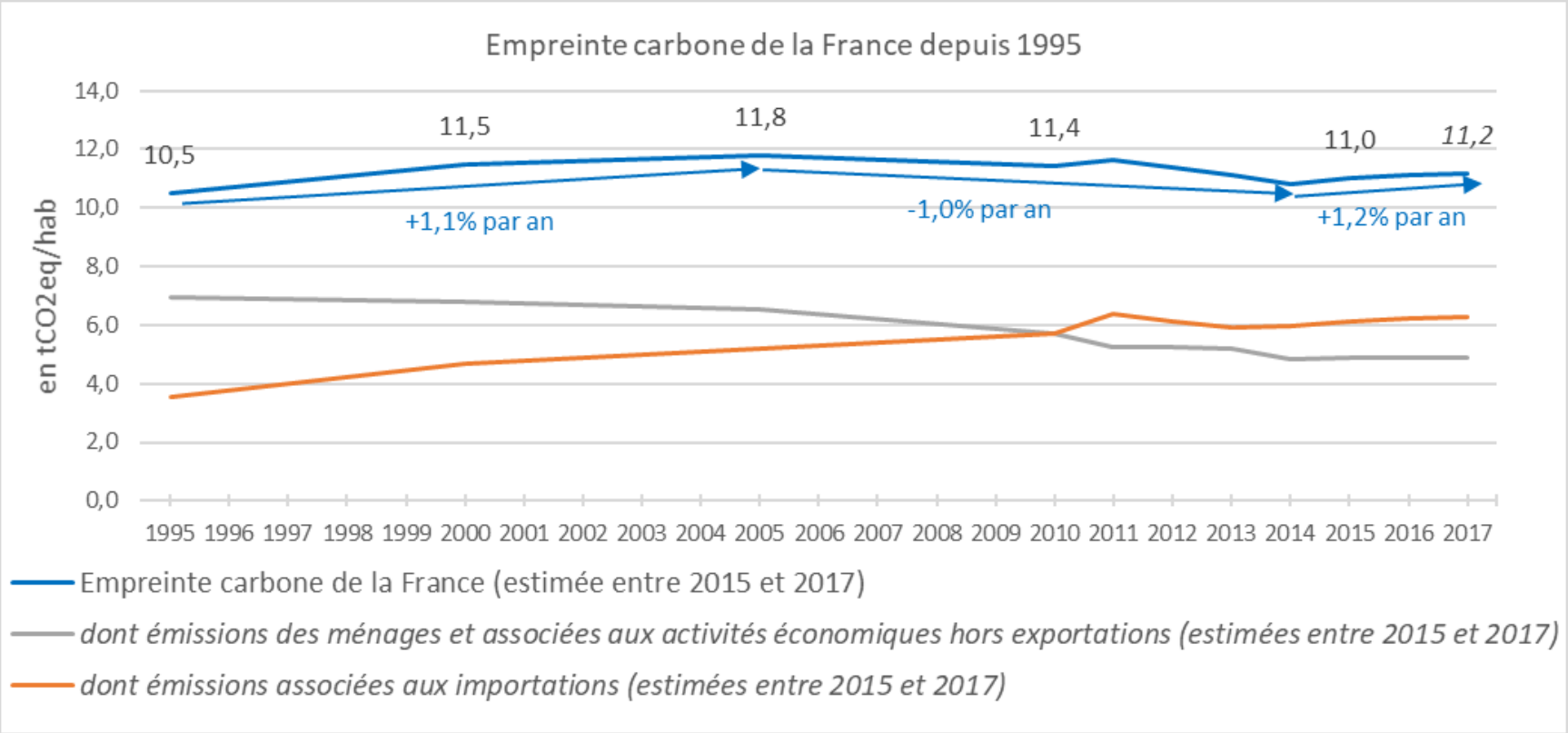
C) un dépassement et des oscillations autour de la limite se produisent si :
- Les signaux ou la réponse sont différés et
- Les limites sont inaltérables ou capables de récupérer rapidement après leur érosion



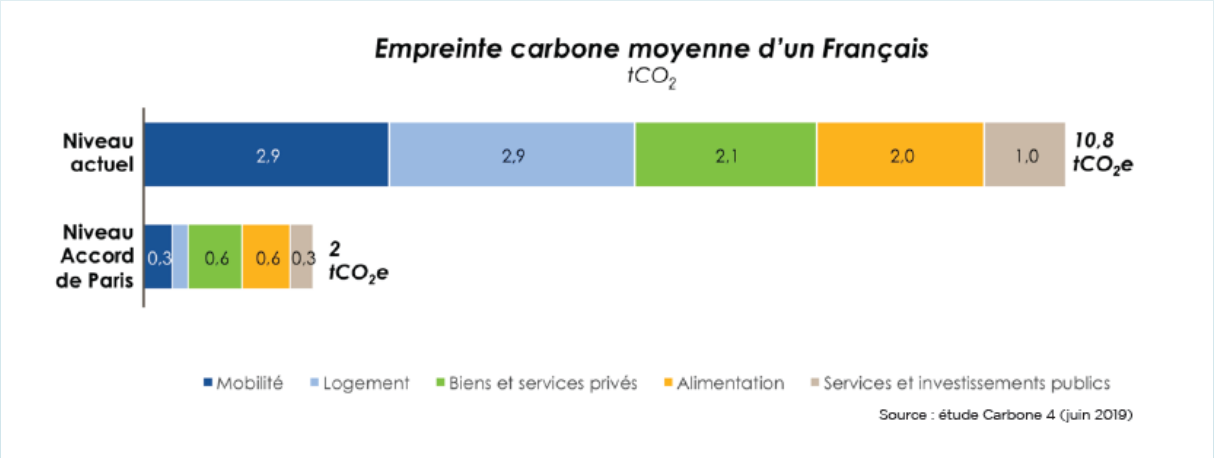




Scénarios d'une économie avec franchissement des limites



Alors que les émissions nationales diminuent en France, notre empreinte carbone augmente en raison de la croissance de nos émissions importées

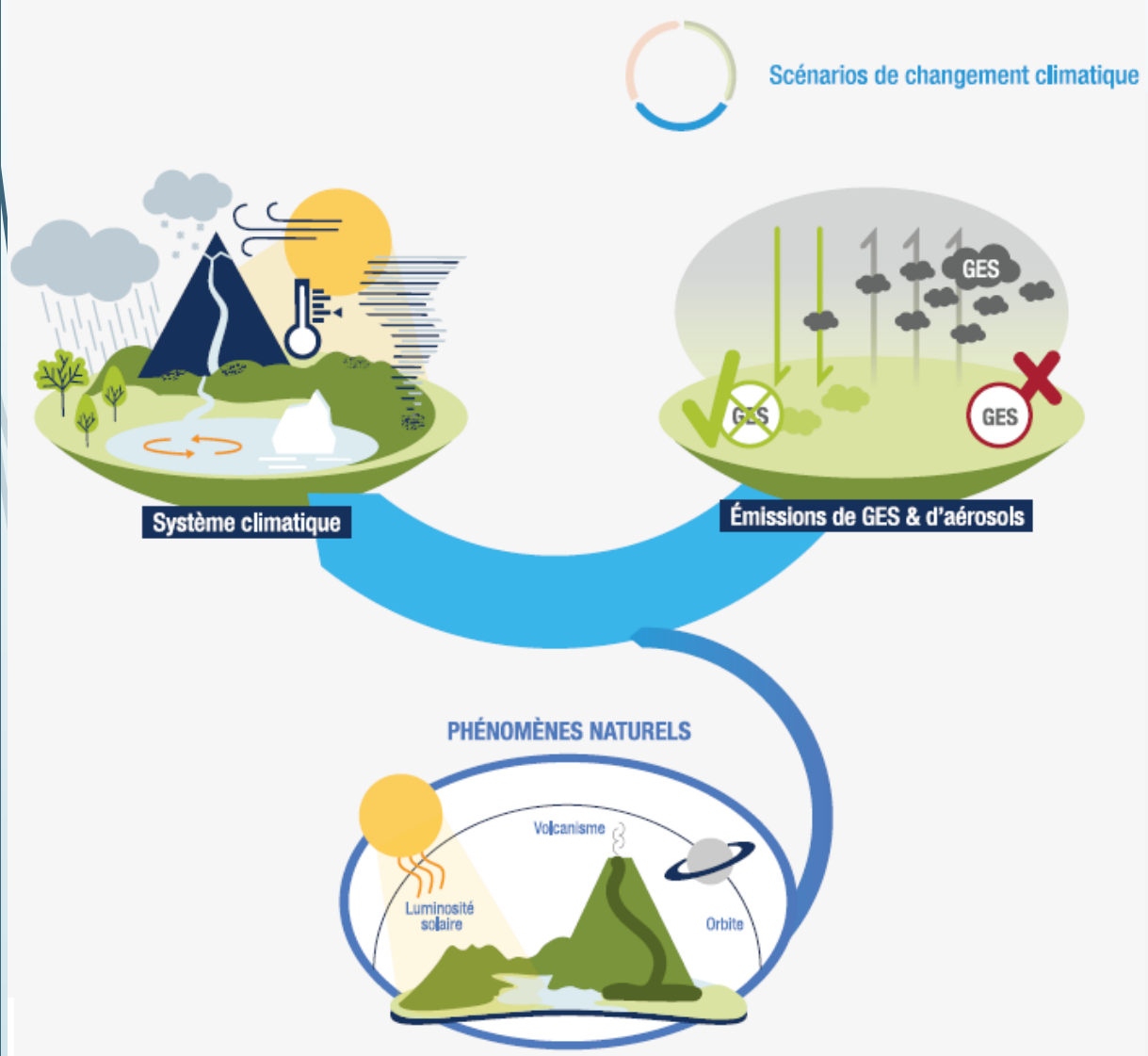


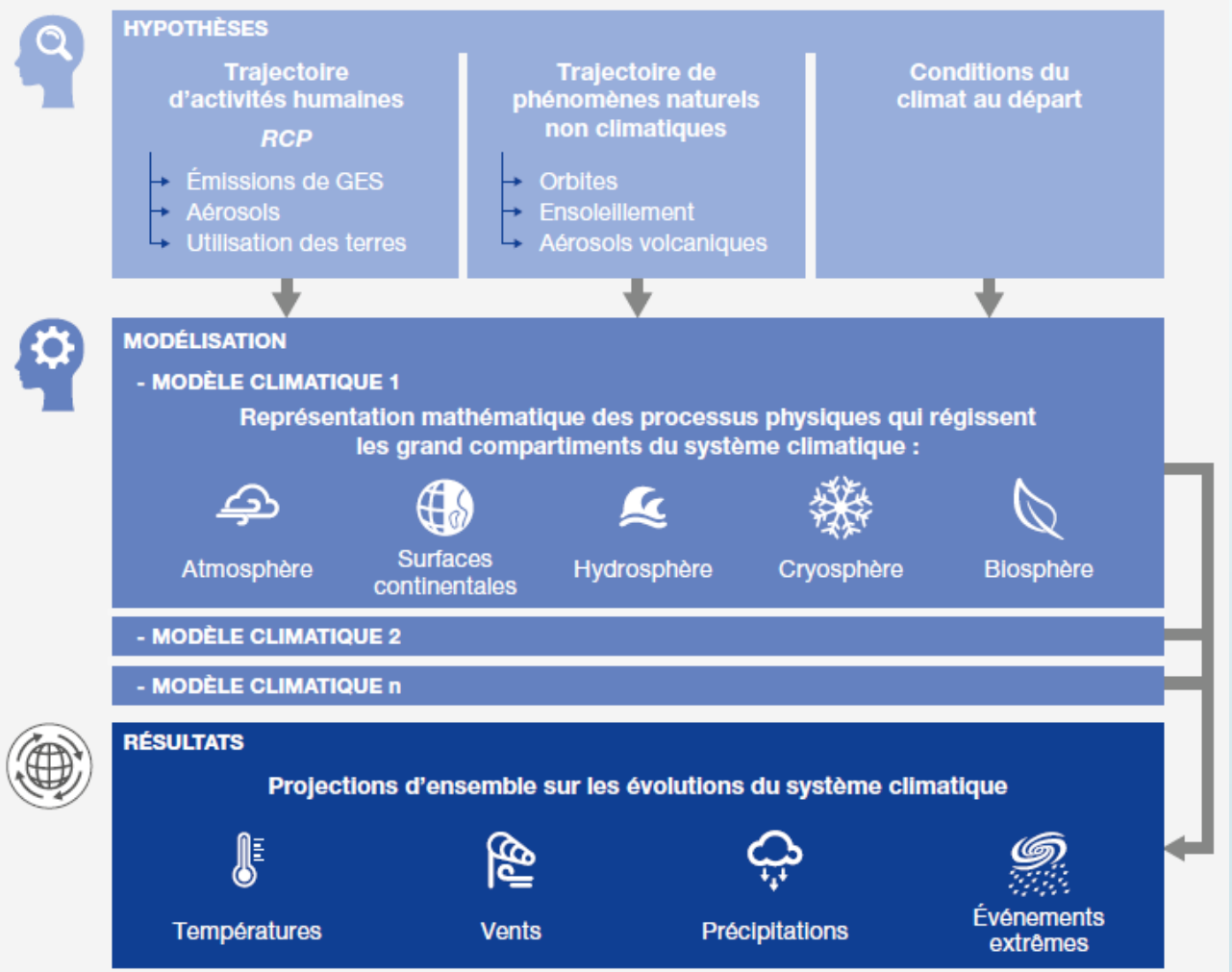
II.2. Comment éviter le scénario catastrophe ?

La Fin du monde, tableau de John Martin (1853).

III.1. Les scénarios de changement climatique

L'INFLUENCE DE PHÉNOMÈNES NATURELS ET D'ORIGINE HUMAINE SUR LE SYSTÈME CLIMATIQUE EXPLORÉE PAR LES SCÉNARIOS DE CC



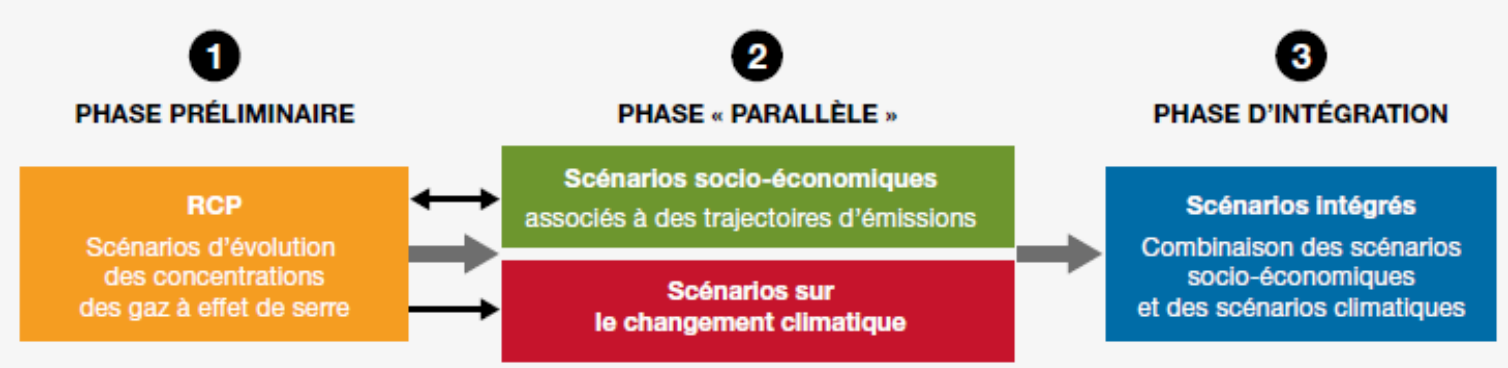


Les RCP (*Representative Concentration Pathways*)et *l'élaboration des scénarios de CC*

	Forçage radiatif	Concentration de GES (en CO_2eq)	Augmentation de la température globale	Evolution des concentrations en GES*
RCP 8.5	8,5 W.m-2	1350 ppm	~ 4,3°C (3,2 – 5,4°C)	Augmentation continue et soutenue jusqu'en 2100
RCP 6	6 W.m-2	850 ppm	~ 2,8°C (2,0 – 3,7°C)	Augmentation puis stabilisation à la fin du siècle
RCP 4.5	4,5 W.m-2	650 ppm	~ 2,4°C (1,7 à 3,2°C)	Légère augmentation puis diminution à l'horizon 2050 et stabilisation à la fin du siècle
RCP 2.6	2,6 W.m-2	450 ppm	~ 2°C (0,9 à 2,3°C)	Pic à l'horizon 2020 puis diminution constante
RCP 1.9	1,9 W.m-2	< 450 ppm	~ 1,5°C	Diminution rapide et soutenue jusqu'à la fin du siècle

Source : I4CE, 2019, d'après Vuuren et al. (2011) et GIEC (2018)

* Evolution variant selon l'ampleur du recours aux émissions négatives.



Source : I4CE, 2019, d'après Guivarch et Rozenberg (2013) et Moss (2010)

Menaces et incertitudes liées au CC

	Observations		Estimations						
	Mécanisme causant ou atténuant le réchauffement climatique	Emissions cumulées 1750-2011, GtC (moyenne) [2] [B1]	Scénario d'émissions de gaz à effet de serre (GES)		Emissions cumulées 2012-2100 GtC [B2]	Réchauffement projeté (1986-2005) à (2081–2100) [A3]		Total réchauffement projeté (1850-1900) à (2081–2100) [I]	
			Type	Nom	Moyenne	Moyenne	Plage	Moyenne	Plage
Sources de CO2 atmosphérique (555 GtC)	Combustion des énergies fossiles et production de ciment	375	Accord climat : réduction des émissions	RCP 2,6	270	1	0,3 à 1,7	1,6	0,9 à 2,3
	Changement d'utilisation des sols et déforestation	180							
Facteurs diminuant le CO2 atmosphérique (315 GtC)	Flux sol-atmosphère (puits terrestre)	-160	Stabilisation des concentrations atmosphérique des GES	RCP 4,5	780	1,8	1,1 à 2,6	2,4	1,7 à 3,2
	Flux océan-atmosphère (puits océanique)	-155		RCP 6,0	1060	2,2	1,4 à 3,1	2,8	2 à 3,7
	Total (augmentation atmosphérique)	240	Fortes émissions	RCP 8,5	1685	3,7	2,6 à 4,8	4,3	3,2 à 5,4

Emissions cumulées de CO2 observées de 1750 à 2011 — **Emissions et réchauffement projetés de 2012 à 2100**

Notes :

[I] Réchauffement observé de 1850-1900 à 1986-2005 : 0,6° [A1]

Réchauffement observé de 1880 à 2012 : 0,85° [A2]

Sources :

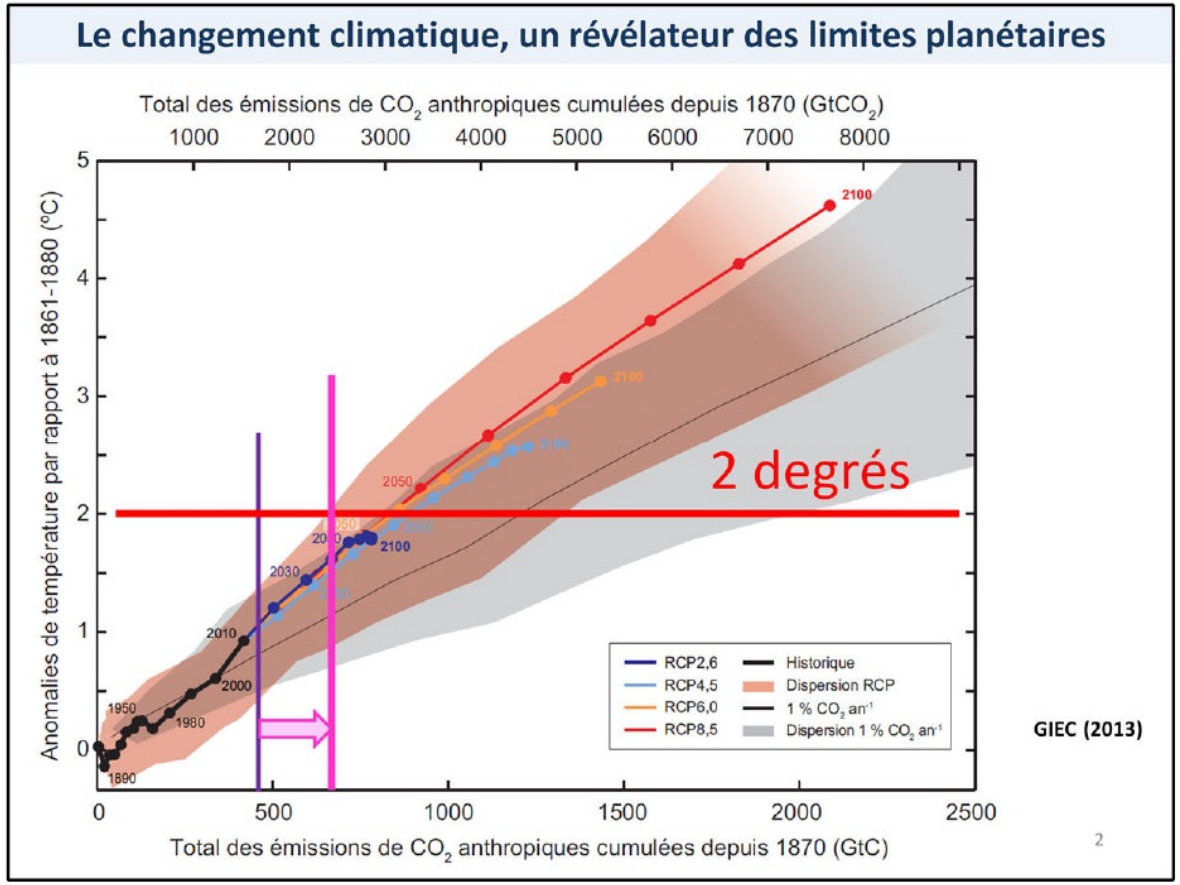
[A1] GIEC, 5è rapport GT2, 2014, figure RID.4

[A2] GIEC, 5è rapport GT1, RID, 2013, page 5

[A3] GIEC, 5è rapport GT1, 2013, tableaux RID 2

[B1] GIEC, 5è rapport GT1, 2013, rapport complet, chapitre 6 page 486 tableau 6,1

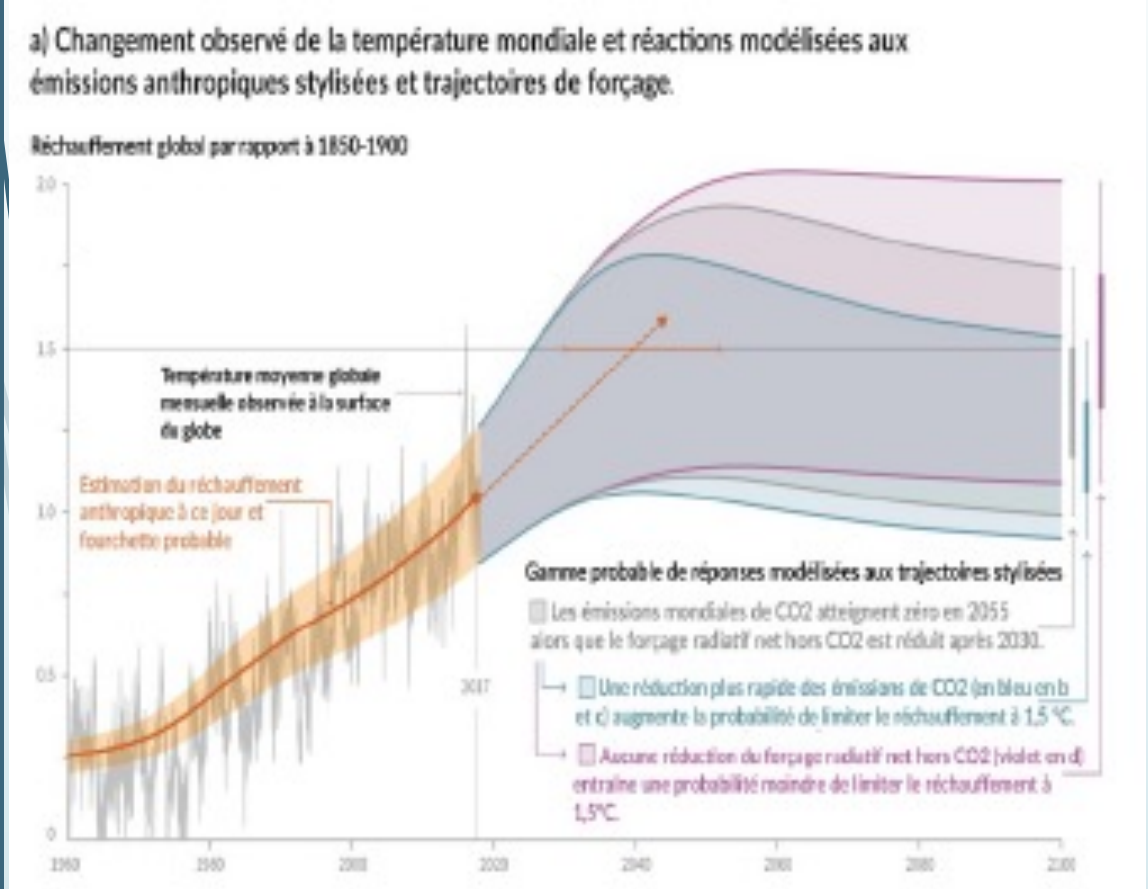
[B2] GIEC, 5è rapport GT1, 2013, tableaux RID 3

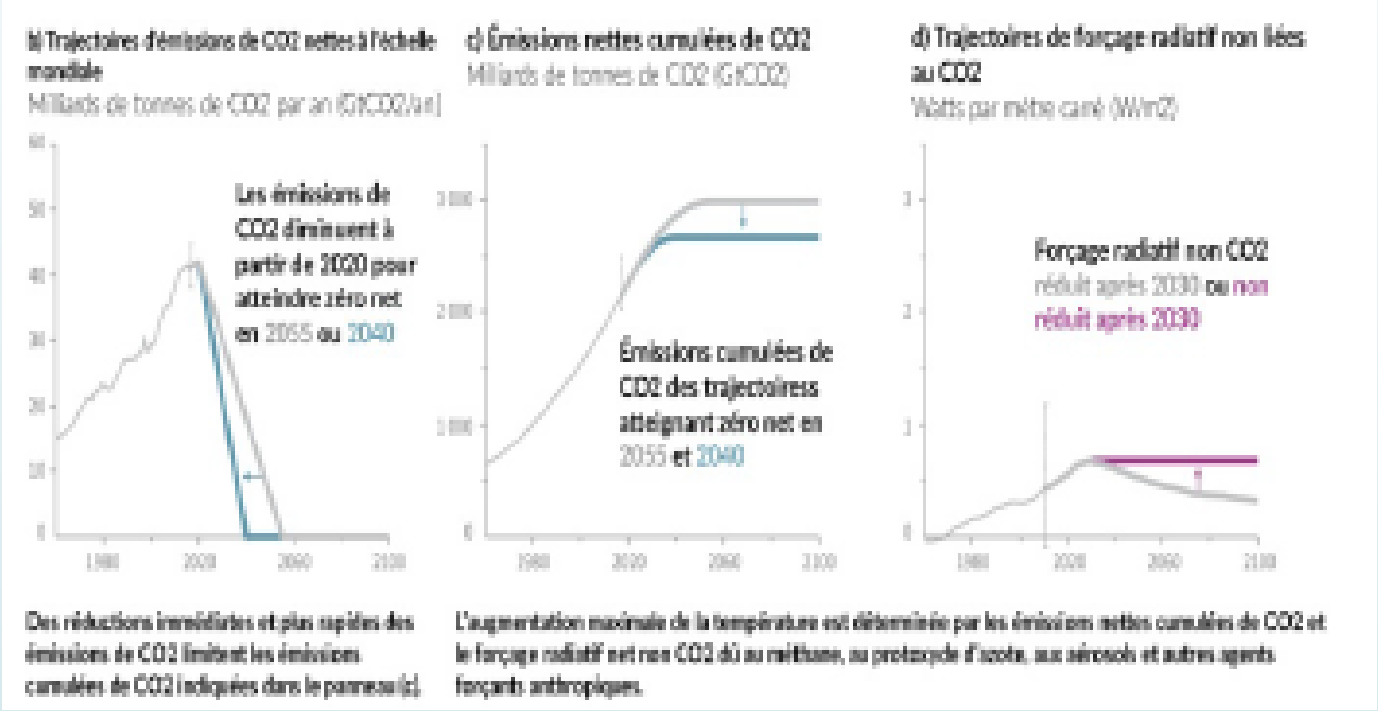


GIEC (2013)

La zone en brun indique l'amplitude des hausses de T° en réponse aux RCP (trajectoires d'émissions de CO2) i.e l'ampleur de l'incertitude. Pour maximiser les chances de rester en deçà de + 2°c, il faudrait limiter les émissions des prochaines décennies à 200 GtC, soit moins de la moitié de ce qui a déjà été émis (500 GtC), soit une vingtaine d'années au rythme des émissions actuelles.

Les émissions cumulées de CO2 et le forçage radiatif futur déterminent la probabilité de limiter le réchauffement à 1,5 °C



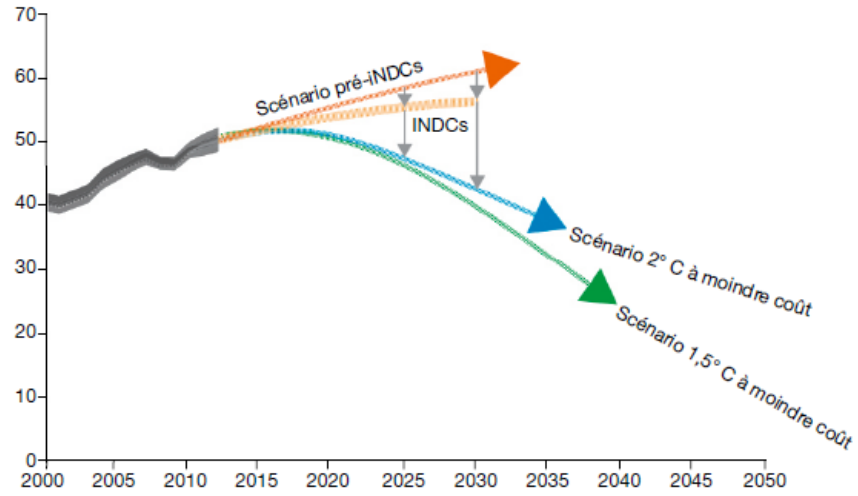


- Cadre a : Changement observé de la température moyenne mensuelle à la surface du globe (TMSG, ligne grise jusqu'en 2017) et réchauffement planétaire anthropique estimé (ligne continue orange jusqu'en 2017, la zone orange indiquant la plage *probable* estimée).

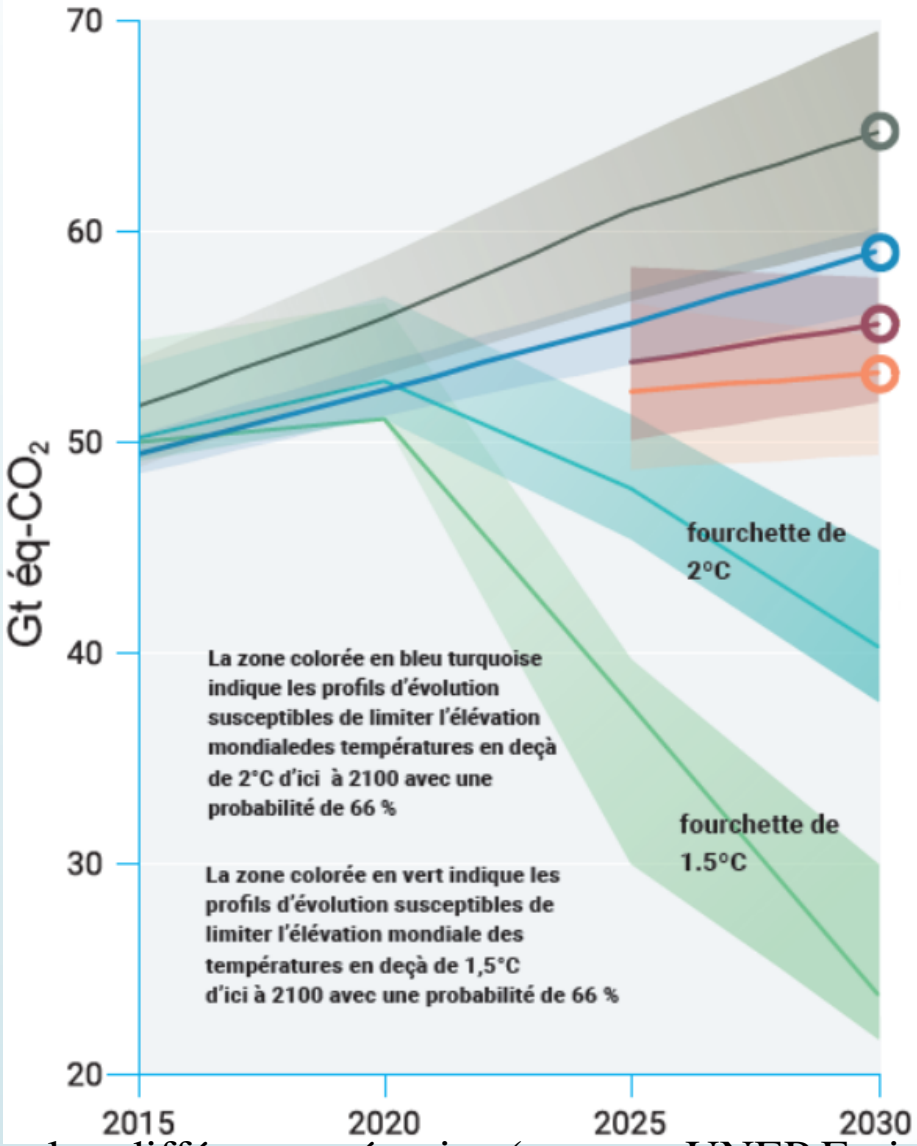
Des engagements d'atténuation très insuffisants pour tenir l'objectif climatique

Comparaison des niveaux d'émissions en 2025 et 2030 résultant de la mise en place des INDCs avec d'autres scénarios

En Gt CO_2 éq



Note : ces scénarios représentent une moyenne des fourchettes d'incertitude estimées, prenant en compte les incertitudes des impacts du changement climatique et la mise en œuvre des contributions nationales ; le scénario 2 °C correspond à un scénario à moindre coût avec 66 % de chance de rester en dessous des 2 °C ; le scénario 1,5 °C correspond à un scénario à moindre coût avec 50 % de chance de rester en dessous de 1,5 °C.
***Source :** rapport de synthèse de la CCNUCC, mai 2016*



Scénario de référence (en l'absence de toute nouvelle mesure) +4°C

Profil d'évolution actuel (avec les mesures déjà décidées) +3,5°C

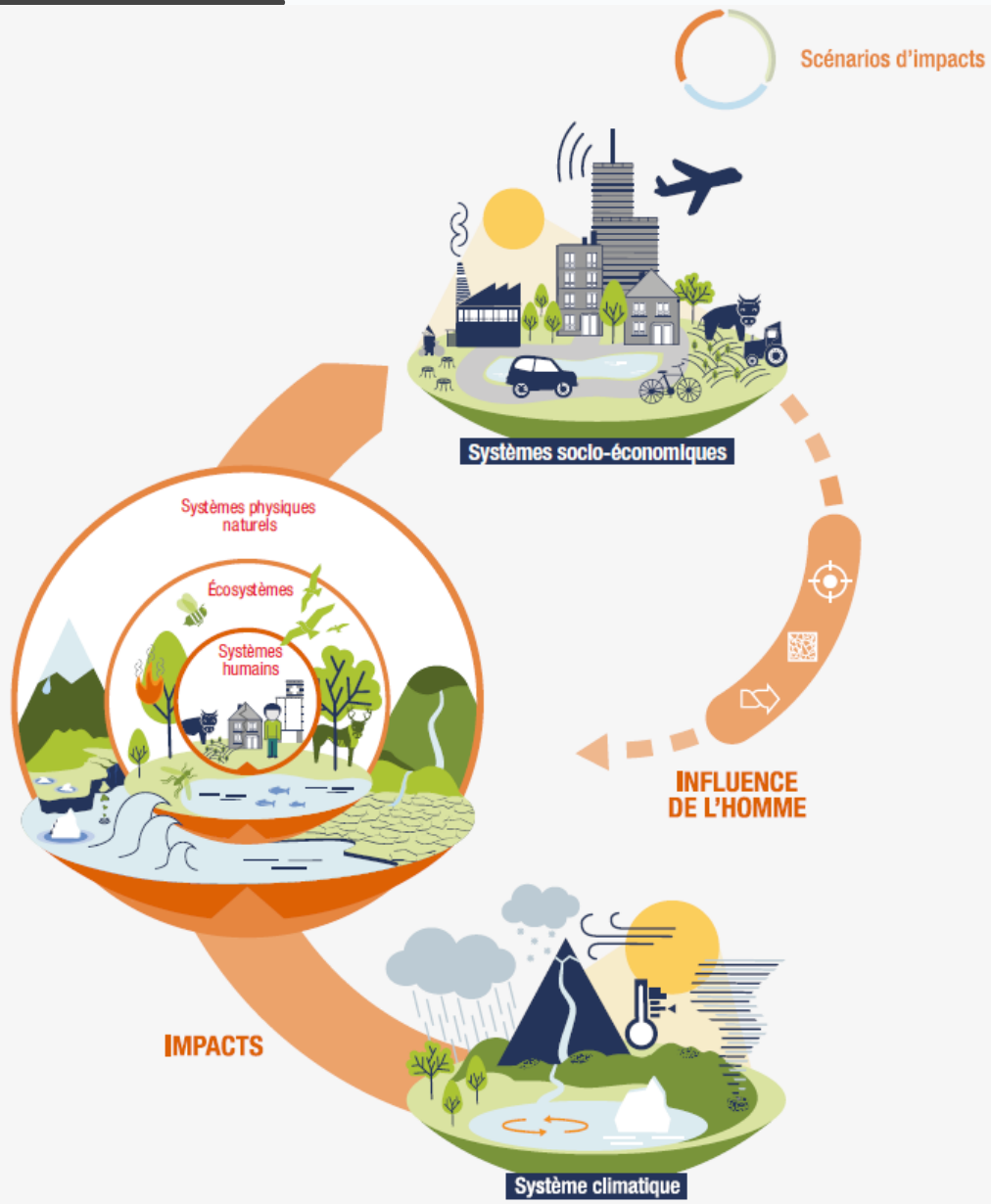
Trajectoire si les engagements actuels des États sont pleinement tenus +3°C

Avec les NDCs actuelles, les émissions de GES mondiales devraient augmenter de 34 à 53 % entre 1990 et 2030.
Dans leur forme actuelle, ces NDCs apparaissent très insuffisantes pour respecter l'objectif de l'Accord de Paris de limiter le changement climatique à 1,5 °-2 °C.

Émissions mondiales de GES selon différents scénarios (source : UNEP Emissions Gap Report 2018)

III.2. Les scénarios d'impacts climatiques

LES LIENS ENTRE LE SYSTÈME CLIMATIQUE ET LES SYSTÈMES SOCIO-ÉCONOMIQUES EXPLORÉS PAR LES SCÉNARIOS D'IMPACTS CLIMATIQUES



SÉLECTION DU PÉRIMÈTRE

- Choix du questionnement
- Choix et définition du ou des système(s)
- Choix des types d'impacts

HYPOTHÈSES

Hypothèses sur l'évolution du climat

→ Scénario de changement climatique

Hypothèses et données sur les systèmes naturels (physique et écosystèmes) et leur évolution

→ Scénario environnemental

→ et/ou données environnementales

Hypothèses sur les systèmes socio-économiques et leurs évolutions

→ Données sur la situation actuelle

→ ou scénario socio-économique

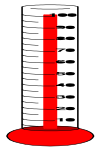
ANALYSE

- Méthodes qualitatives variées
- Méthodes quantitatives variées (différents types de modèles)

RÉSULTATS

- Impacts chiffrés/qualitatifs
- Cartographies
- Dommages
- Risques
- Coûts des dommages
- etc.

Changements Climatiques et impacts potentiels

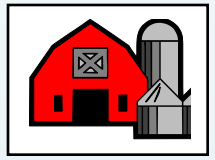


Températures

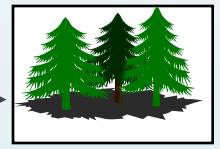
Précipitations

Niveau de la mer

Santé



Agriculture



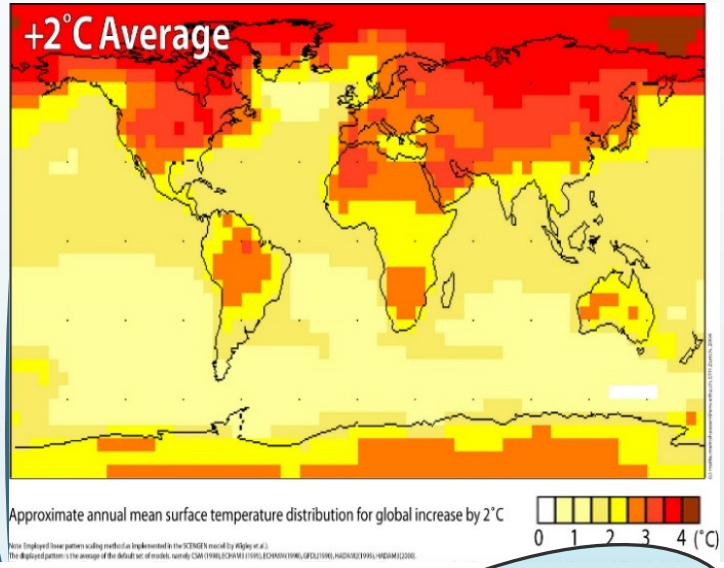
Fôrets

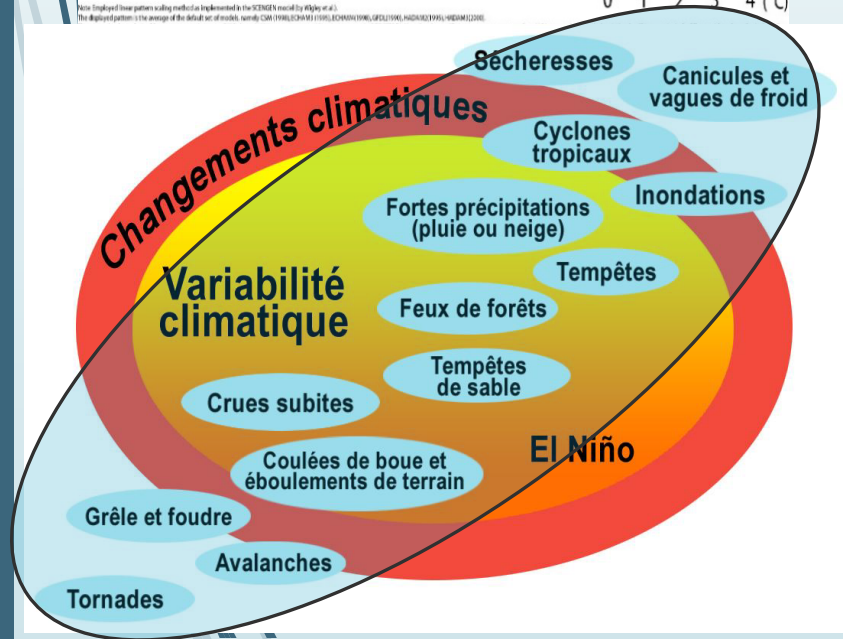
Eaux et vie aquatique

Zones côtières

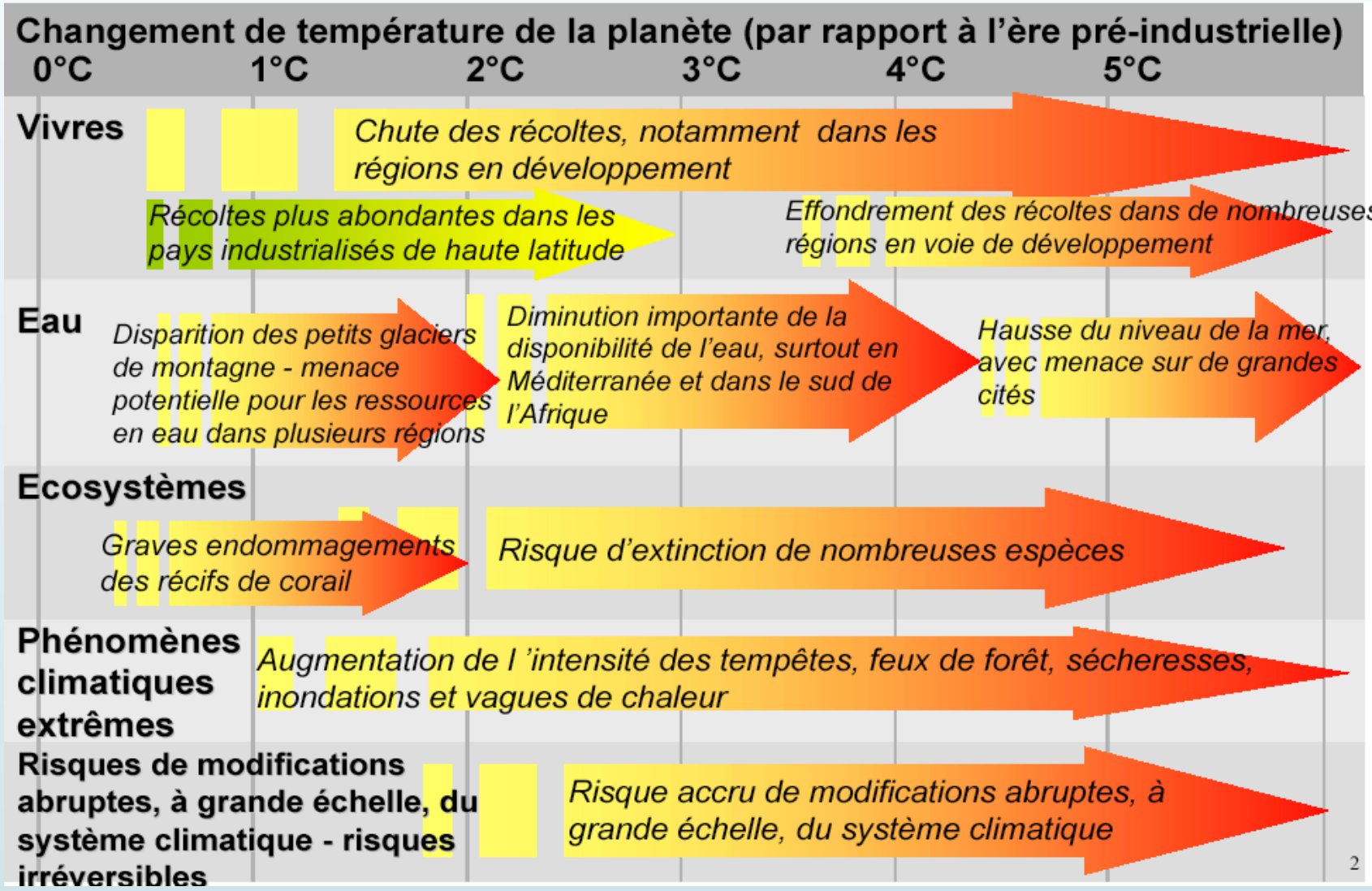
Espèces et espaces naturels

Des impacts redoutés du CC

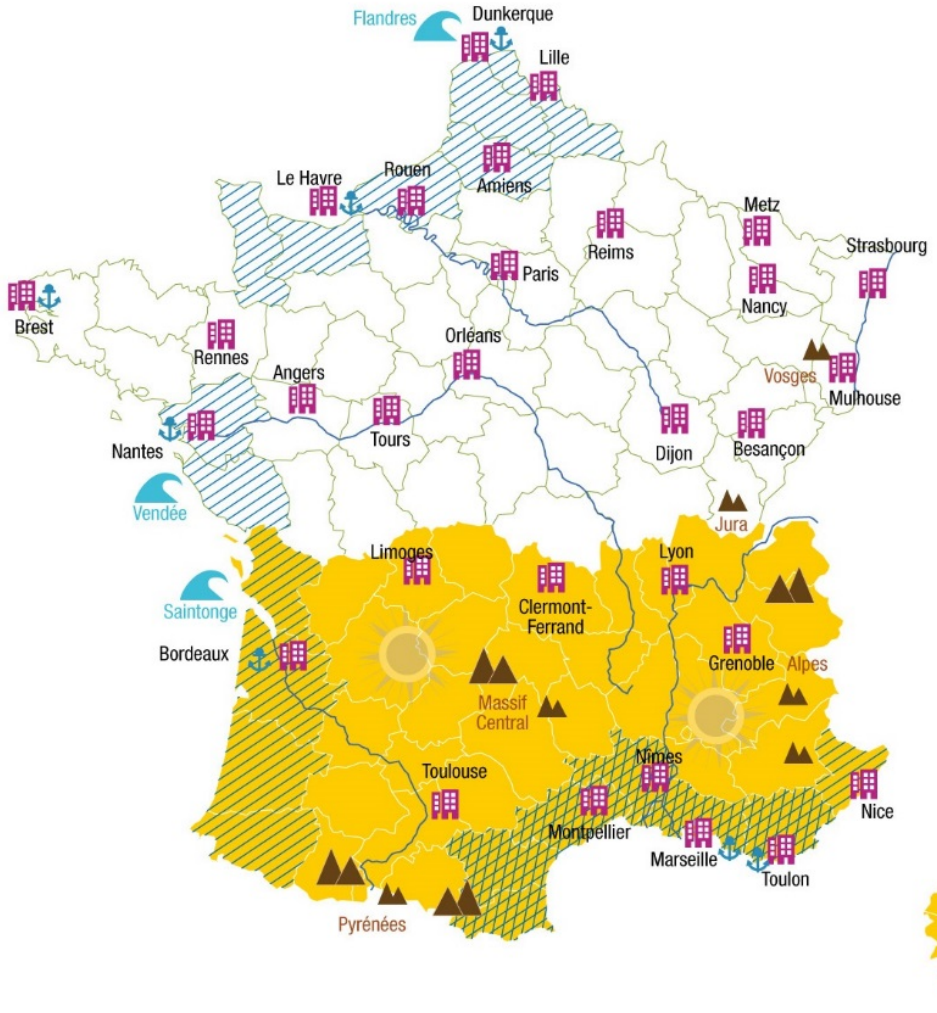




Source: IPCC, AR4



SE PRÉPARER AUX CONSÉQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE



GRANDE VILLE

> **Vagues de chaleur** : augmentation de la pollution locale, avec des conséquences sanitaires et dans la consommation d'énergie (rénovation du bâti nécessaire).

> **Inondations urbaines** : débordement des réseaux de drainage.

MONTAGNE

> **Réduction de la superficie des domaines skiables** : affaiblissement du tourisme.

> **Risques naturels accrus** : innondations, avalanches, glissements de terrain.

LITTORAL

Départements dont les littoraux sont les plus menacés par l'**érosion ou de submersion**.

Risque d'**immersion complète** des polders.

Ports et industries associées **menacés par les inondations.**

SUD DE LA LOIRE

> Risque majeur de **sécheresses plus intenses** : conséquences importantes sur l'agriculture.

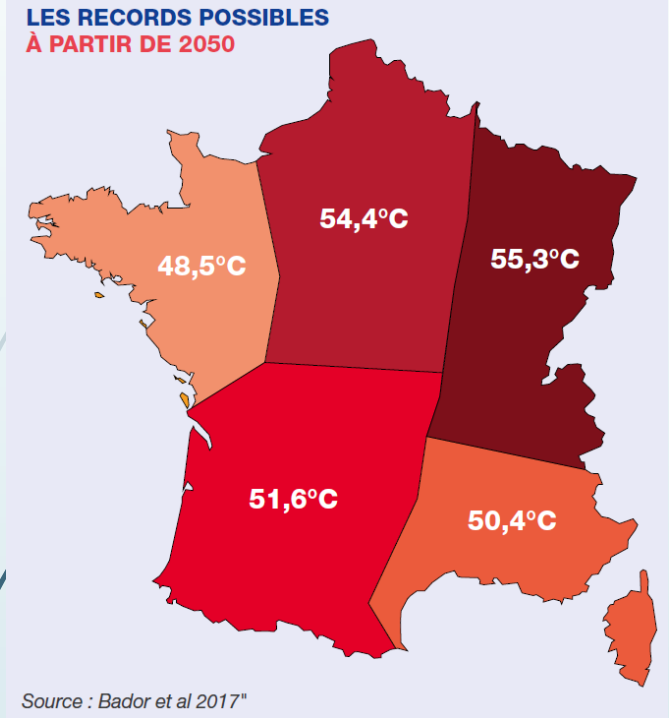
> **Feu de forêts** plus fréquents.

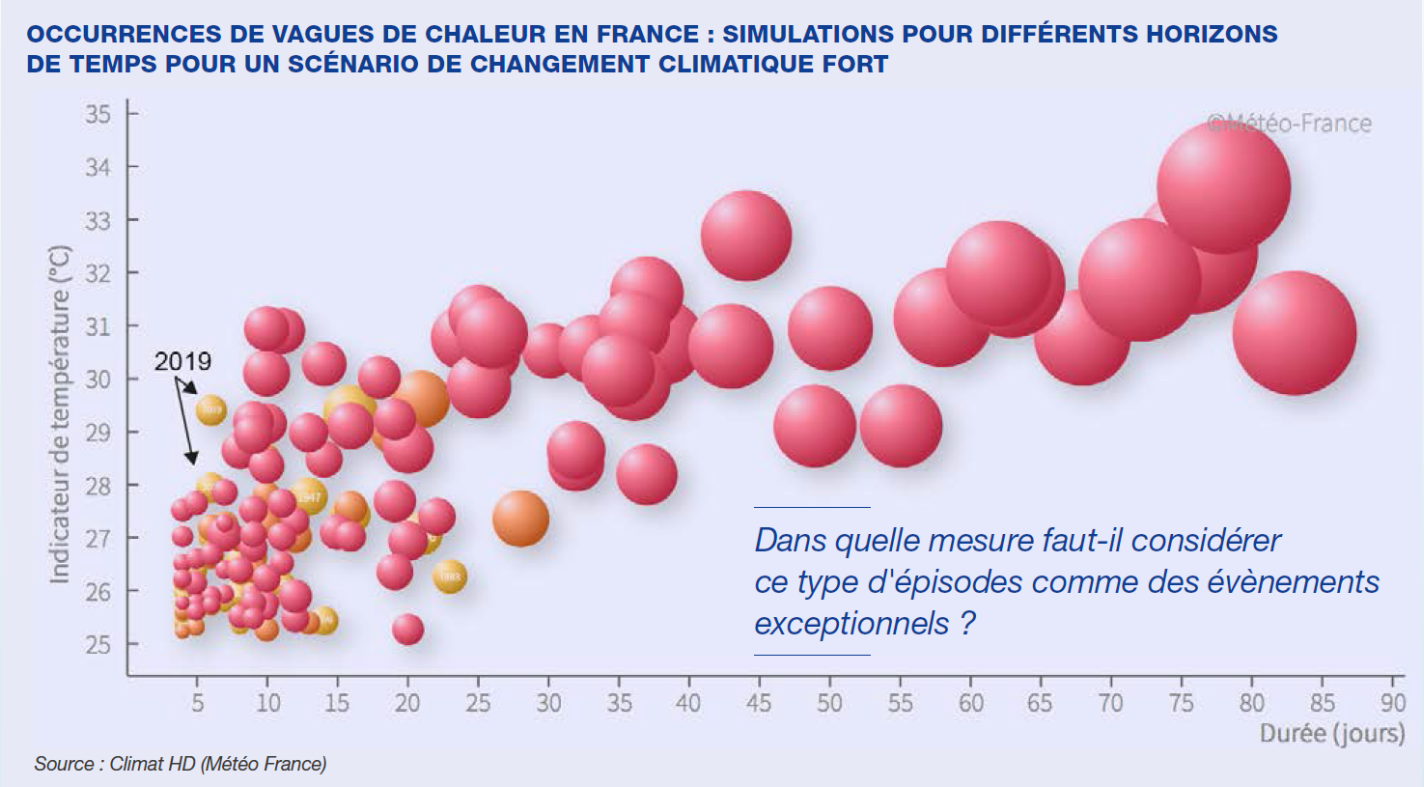
> Risque de **modification des événements cèvenols** (fortes précipitations et inondations).

UNE ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE PLANIFIÉE ET PRÉCOCE PEUT PERMETTRE D'ANTICIPER LES ÉVOLUTIONS ET METTRE LES TERRITOIRES OU LES ACTEURS ÉCONOMIQUES DANS UNE POSITION FAVORABLE AFIN D'ASSURER LEUR DÉVELOPPEMENT POUR UN AVENIR DURABLE.

Sources : CDC Climat Recherches, d'après le Giec- Météo France- OCDE- Conservatoire du littoral.

Des événements extrêmes plus fréquents en France

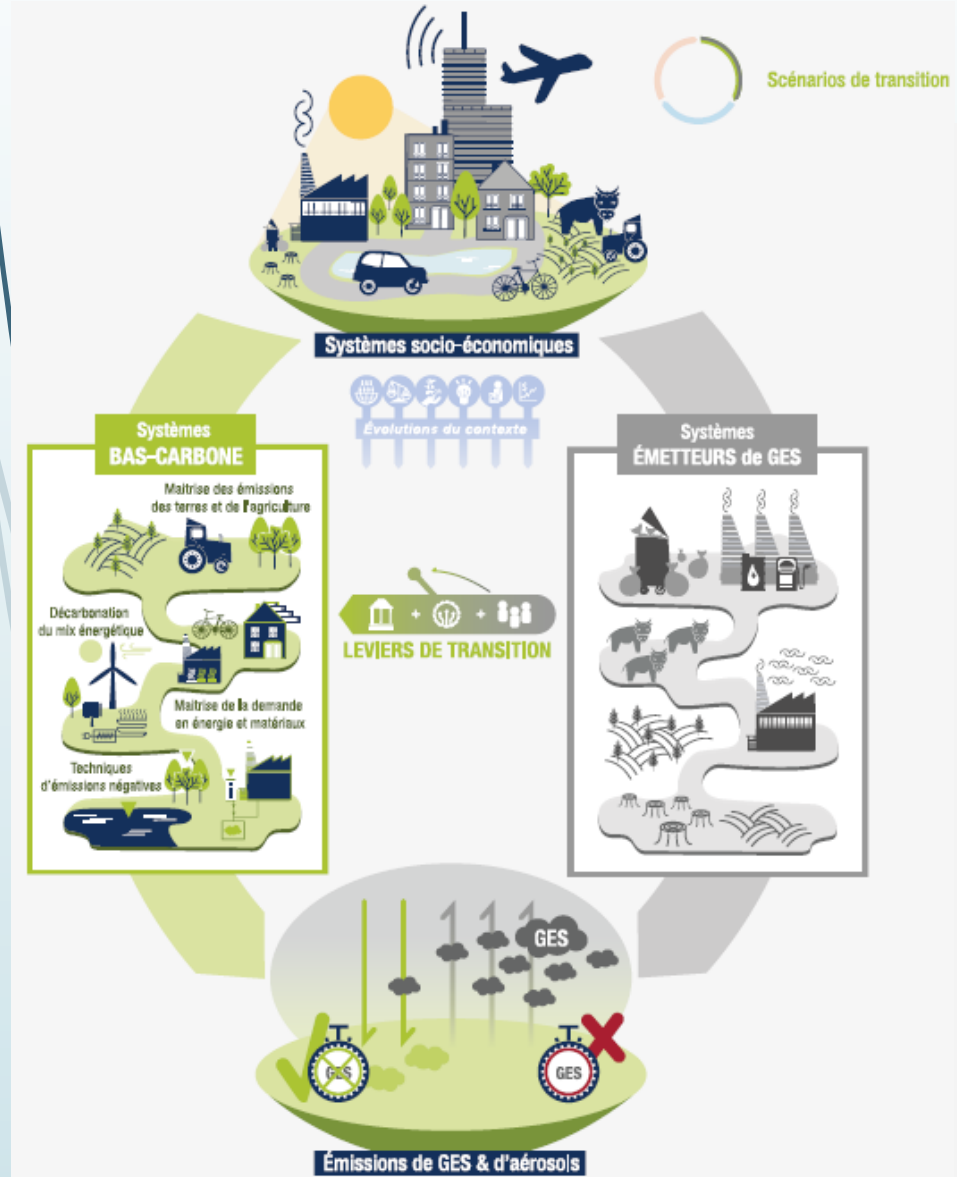




Ces situations climatologiques sont aussi souvent combinées à des pics de pollution à l'ozone auxquels sont particulièrement vulnérables les populations les plus fragiles (enfants, séniors, travailleurs).

III.3. Les scénarios de transition « bas carbone »

LES SCENARIO DE TRANSITION BAS-CARBONE



NARRATIF

Les évolutions du contexte socio-économique

Démographie	Institutions	Politiques
Modes de vie	Technologies	Économie

Objectif climatique 2°C / 1,5°C

Leviers de la transition

HYPOTHÈSES ET PARAMÈTRES QUANTIFIÉS

Macro-économiques	Technologiques	Politiques

Hypothèses politiques, technologiques et comportementales spécifiques

MODÉLISATION

Représentation abstraite et simplifiée du monde et de son évolution

MODELE

Système énergétique

Système économique

Système d'utilisation des sols (forêts, agriculture...)

RÉSULTATS DU SCENARIO

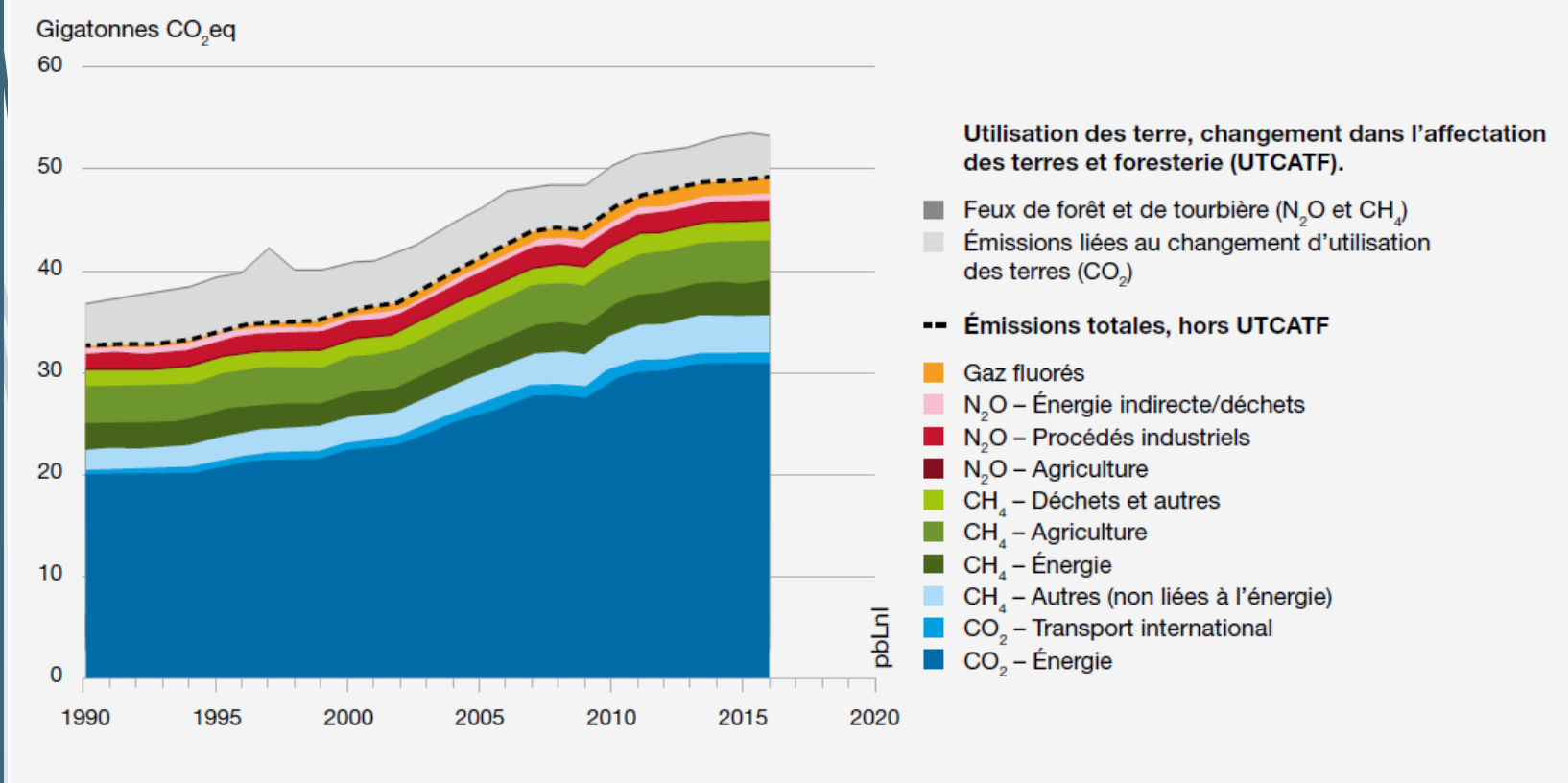
Solutions d'atténuation déployées et évolutions des systèmes économique, énergétique et d'utilisation des sols associées

Mise en récit des résultats avec les leviers de la transition

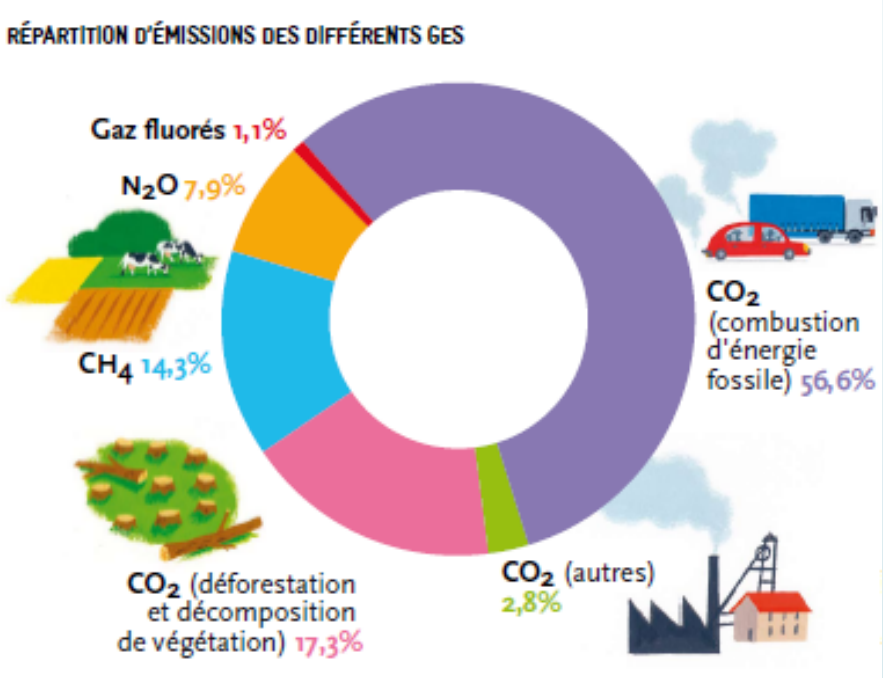
Trajectoire des émissions de gaz à effet de serre (et des aérosols)

Contrainte par

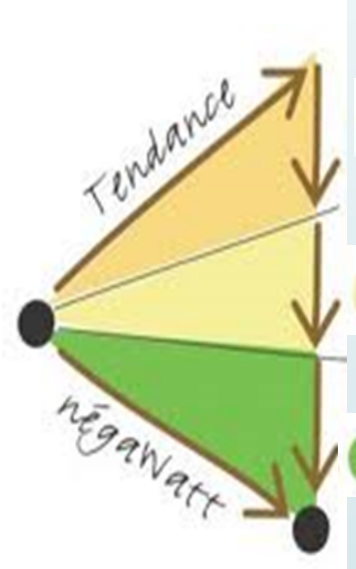
ÉMISSIONS GLOBALES DE GES, PAR SOURCE ET PAR TYPE DE GAZ



Source : Olivier J.G.J. et al. (2017), Trends in global CO_2 and total greenhouse gas emissions : 2017 report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague



Changer de trajectoire de développement socio-économique : ex transition énergétique



1. sobriété → Des besoins énergétiques modérés

2. efficacité → Des systèmes /services efficaces en termes d'énergie

3. renouvelables → Des sources d'énergie renouvelables

https://youtu.be/jXIaQLCVB2M