

## 22. Les défis de l'énergie

### 22.1 - Énergie et changements climatiques

#### *Partie 2 – L'effet de serre*

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

*Département de génie mécanique*

Thomas Lamalle, M. Ing

Frédéric Coulombe

# Plan de la présentation

- **Introduction et objectifs**
- L'effet de serre
- Les gaz à effet de serre (GES)
- Les objectifs de réduction
- Les grands émetteurs
- Conclusion



# Introduction et objectifs

- Comme on l'a vu antérieurement dans ce cours, depuis au moins 1824, on s'inquiète quant aux émissions de CO<sub>2</sub> et de sa trop forte concentration dans l'atmosphère;
- Cette capsule tente d'illustrer et d'expliquer le mécanisme qui est dérégulé par un accroissement des ces émissions;
- Puis, on discute des gaz qui causent cet effet indésirable avant d'aborder les mesures, objectifs et politiques de réduction de ces émissions;
- La capsule se termine en présentant quelques exemples de grands émetteurs anthropogènes.

# Introduction et objectifs

- Objectifs de cette présentation
  - Comprendre le réchauffement climatique;
  - Énoncer les conséquences de ce réchauffement;
  - Démontrer l'ampleur des émissions anthropiques.

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- ***L'effet de serre***
- Les gaz à effet de serre (GES)
- Les objectifs de réduction
- Les grands émetteurs
- Conclusion

# L'effet de serre

- Dans vos mots, qu'est-ce que l'effet de serre?

# Question

- L'effet de serre est ...
  - A. Indispensable à la vie sur terre;
  - B. Dû à la pollution humaine en faible proportion;
  - C. Principalement dû à la vapeur d'eau atmosphérique;
  - D. Un concept théorique inventé par les alarmistes ;
  - E. Un phénomène nié par plusieurs dirigeants de pays;
  - F. A, B, C, E sont vraies
  - G. Aucune de ces réponses.

# Question

- Quelle est la température moyenne de la terre **avec** effet de serre?
  - A. 9°C
  - B. 11°C
  - C. 15°C
  - D. 18°C
  - E. Aucune de ces réponses.

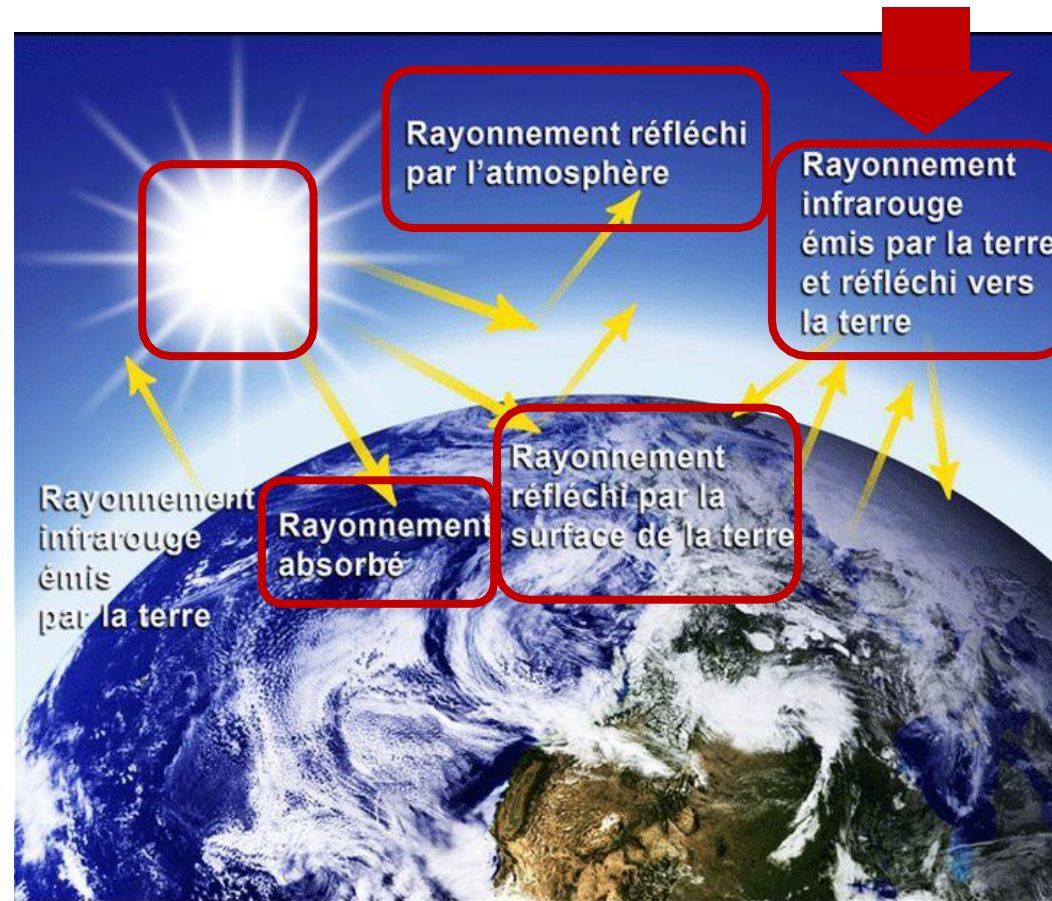


# Question

- Quelle serait la température moyenne de la terre **sans** effet de serre?
  - A.  $-9^{\circ}\text{C}$
  - B.  $-11^{\circ}\text{C}$
  - C.  $-15^{\circ}\text{C}$
  - D.  $-18^{\circ}\text{C}$
  - E. Aucune de ces réponses.

# L'effet de serre

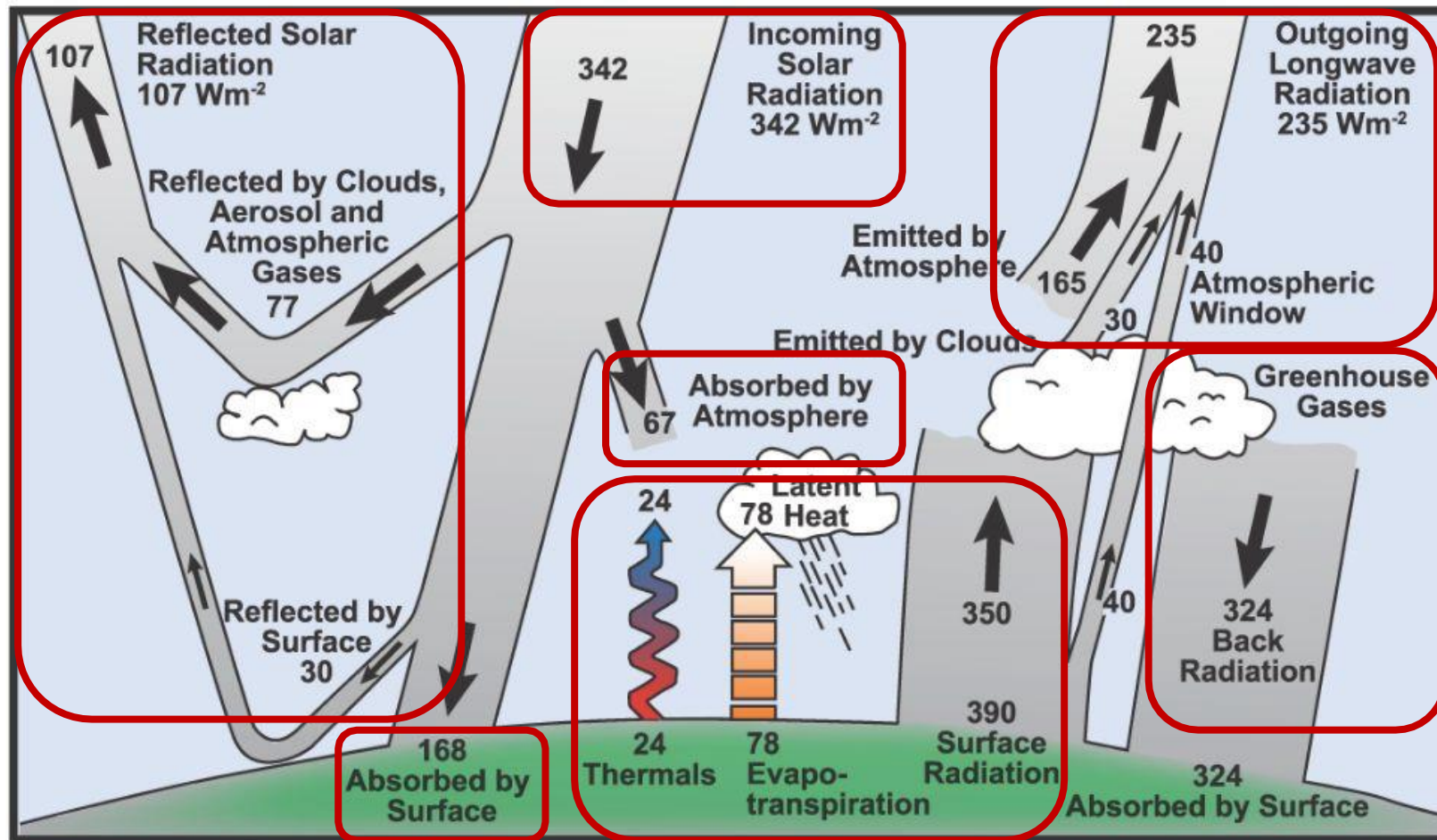
- Qu'est-ce que l'effet de serre?



<http://www.statcan.gc.ca/pub/16-201-x/2007000/10542-fra.htm>

# L'effet de serre

- Qu'est-ce que l'effet de serre?

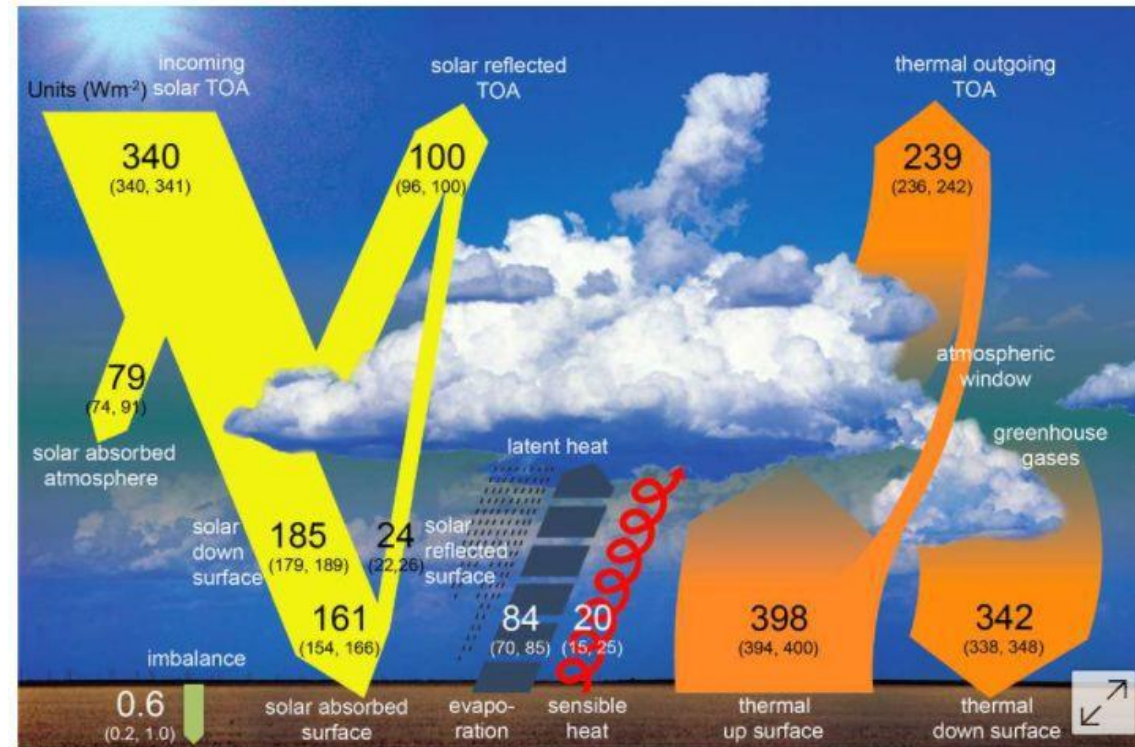


Bilan énergétique moyen sur terre



# L'effet de serre

- Qu'est-ce que l'effet de serre?



Bilan énergétique et échanges d'énergie à l'échelle globale dans les conditions actuelles. Les flux d'énergie sont indiqués en W/m<sup>2</sup>, tout en restant dans les limites de leur marge d'incertitude, ils sont ajustés de façon à clore les bilans individuels. Les marges d'incertitude déduites des observations sont précisées entre parenthèses. (Figure adaptée de Wild et al (2013) Wild, M., D. Folini, C. Schär, N. Loeb, E. G. Dutton, and G. König-Langlo, 2013: The global energy balance from a surface perspective. Clim. Dyn., 40, 3107-3134). © IPCC Report Graphics - DR

## Bilan énergétique moyen sur terre (bis)

# L'effet de serre

- Qu'est-ce que l'effet de serre?
  - Actuellement, la constante solaire, soit l'énergie que contient le rayonnement solaire, est de  $G_s = 1\,367 \text{ W/m}^2$ .
  - Cependant, la puissance unitaire du rayonnement reçu et réparti sur l'ensemble du globe à un instant donné est d'environ  $G = 342 \text{ W/m}^2$ .
  - Expliquez cette différence.

# L'effet de serre

- Qu'est-ce que l'effet de serre?
  - Si on considère un modèle SANS couche mince, c'est-à-dire sans atmosphère quel serait le bilan d'énergie, schéma et équation, de la Terre ? Quel serait alors la température de surface de la Terre ? (en K et en °C, arrondir à l'entier).

# L'effet de serre

- Qu'est-ce que [l'effet de serre](#)?

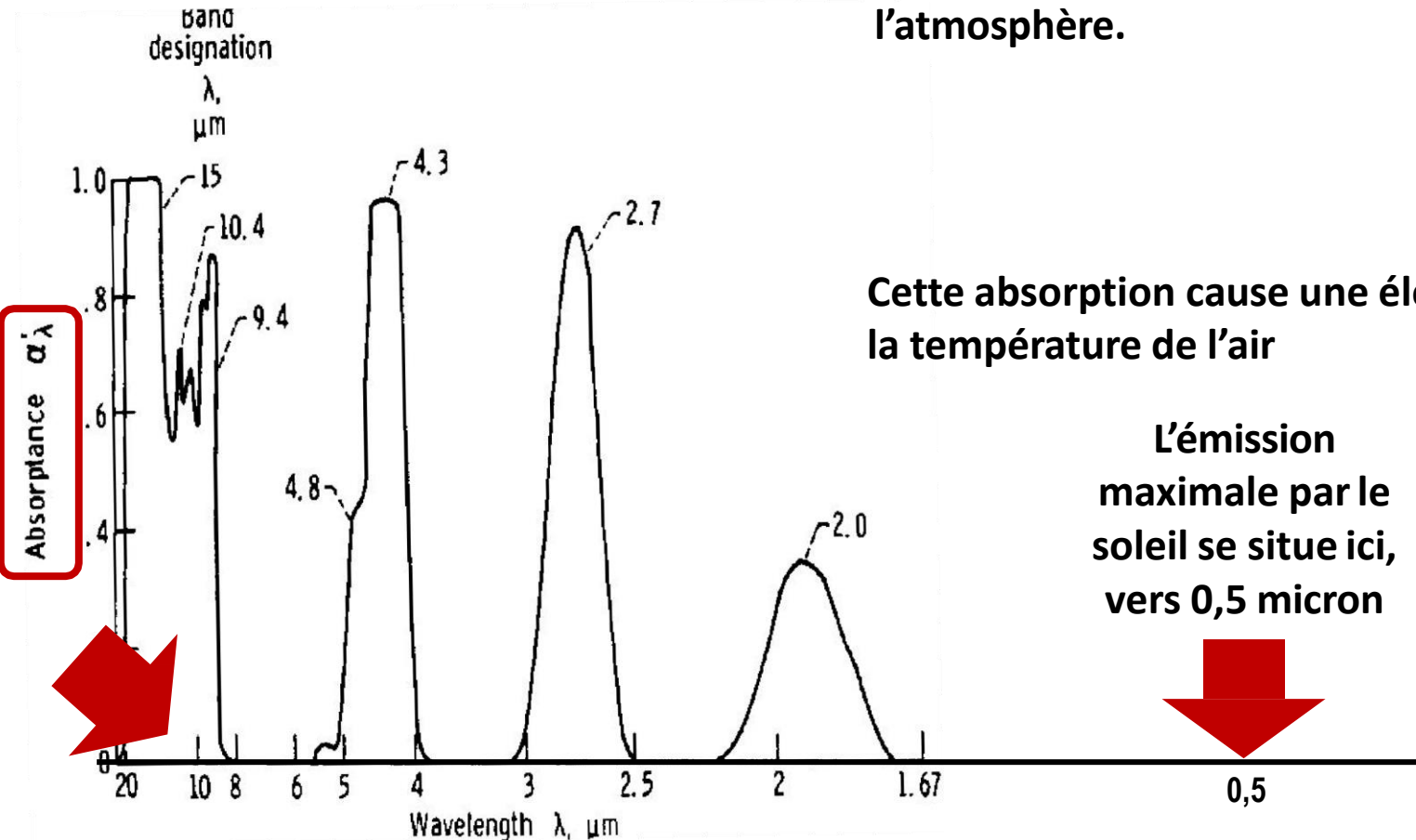


Comprendre le réchauffement climatique en 4 minutes  
LE MONDE | 23.09.2014 à 12h01 • Mis à jour le 04.11.2016 à 16h57  
Par [Olivier Clairouin](#), [Stéphane Foucart](#), [Elisa Bellanger](#) et [Marianne Boyer](#)

# L'effet de serre

- Qu'est-ce que l'effet de serre?

Dans les bandes de haute absorptance, les ondes électromagnétiques ayant cette fréquence sont hautement absorbées par l'atmosphère.



L'émission maximale par la surface terrestre se situe plutôt ici, vers 10 microns

Cette absorption cause une élévation de la température de l'air

L'émission maximale par le soleil se situe ici, vers 0,5 micron



# Question

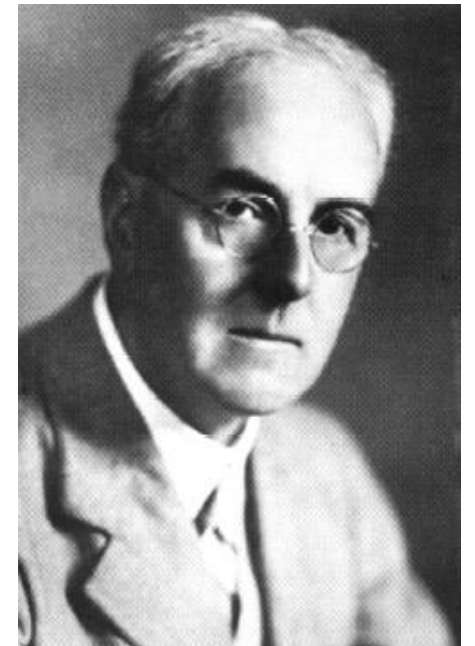
- Au Canada, depuis les 60 dernières années, les températures ont augmenté en moyenne de ...
  - a) 0,1 °C
  - b) 0,6 °C
  - c) 1,4 °C
  - d) 1,7 °C
  - e) Plus de 2,2°C

# Question

- À quand remontent les premières inquiétudes sur l'effet de l'émission de CO<sub>2</sub> sur le climat?
  - A. 2000 et plus
  - B. 1950 à 2000
  - C. 1900 à 1950
  - D. 1850 à 1900
  - E. Avant 1850

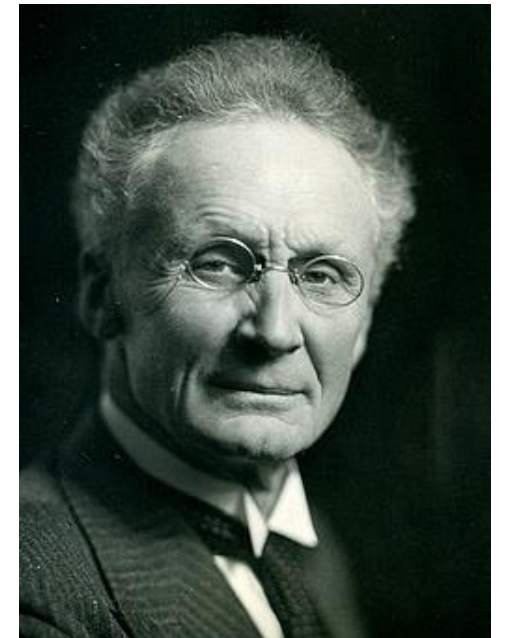
# Question

- À quand remontent les premières inquiétudes sur l'effet de l'émission de CO<sub>2</sub> sur le climat? 1922?
  - Lewis Fry Richardson, un mathématicien, météorologiste et psychologue britannique;
  - Expérience de modélisation du climat à partir des équations de la physique (sans ordinateur).
  - A donné son nom au nombre sans dimension de Richardson (turbulence).



# Question

- À quand remontent les premières inquiétudes sur l'effet de l'émission de CO<sub>2</sub> sur le climat? 1904?
  - Vilhelm Bjerknes, un géophysicien, mathématicien et physicien norvégien qui fonda l'Institut de géophysique de Bergen (Norvège) où il rassembla plusieurs chercheurs qui devinrent fameux pour le développement du modèle frontal en météorologie;
  - Il fut donc l'un des premiers météorologistes et aida à créer ainsi la première méthode moderne de prévision du temps.



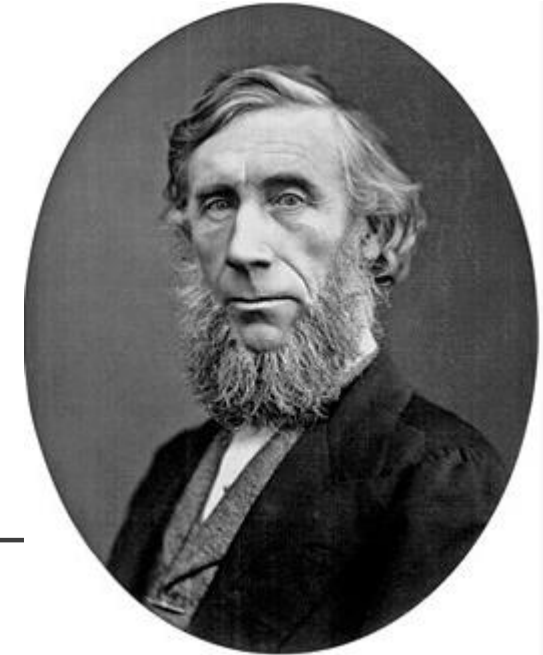
# Question

- À quand remontent les premières inquiétudes sur l'effet de l'émission de CO<sub>2</sub> sur le climat? 1896?
  - Svante Arrhenius, un chimiste suédois, pionnier dans de nombreux domaines. Il reçoit le prix Nobel de chimie en 1903;
  - Voulant comprendre et expliquer le cycle des glaciations, il a élaboré une théorie qui relie l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique à une augmentation des températures terrestres en raison d'un « effet de serre » dû à la vapeur d'eau et à l'acide carbonique;
  - « Les combustibles fossiles engendreront un réchauffement climatique, 4°C si la concentration de CO<sub>2</sub> double dans l'air.
    - Assez proche des prédictions du GIEC un siècle plus tard.



# Question

- À quand remontent les premières inquiétudes sur l'effet de l'émission de CO<sub>2</sub> sur le climat? 1859?
  - Joseph Tyndall, est un scientifique et alpiniste irlandais.
  - Dans son laboratoire sans fenêtres, il s'appliqua à vérifier les hypothèses de Pouillet (pages suivantes) par l'expérience.
  - Le 10 juin, devant une salle de l'Institut royal pleine à craquer, il démontra que certains gaz étaient plus efficaces que d'autres pour emprisonner la chaleur — et parmi eux, le dioxyde de carbone.



# Question

- À quand remontent les premières inquiétudes sur l'effet de l'émission de  $\text{CO}_2$  sur le climat? 1856?
  - Eunice Newton Foote, une scientifique amatrice
  - À l'aide d'une pompe à air et de plusieurs thermomètres au mercure, elle avait placé successivement de l'air humide, du  $\text{CO}_2$  et de l'hydrogène dans deux cylindres de verre avant de les laisser exposés au soleil.
  - Conclusions : l'air humide devient plus chaud que l'air sec, mais surtout le dioxyde de carbone piégé dans le cylindre devient bien plus chaud et met bien plus de temps à refroidir que les autres gaz lorsqu'il cesse d'être exposé au soleil.
  - *“Une atmosphère [composée] de ce gaz donnerait à notre Terre une température élevée”.*





# Question

- À quand remontent les premières inquiétudes sur l'effet de l'émission de CO<sub>2</sub> sur le climat? 1838?
  - Claude Pouillet, est un physicien et homme politique français.
  - Il réalisa, grâce à l'invention du pyréliomètre, les premières mesures quantitatives de la chaleur émise par le soleil. La valeur qu'il obtient pour la constante solaire est de 1228 W/m<sup>2</sup>, valeur assez proche de l'estimation actuelle, qui est de 1367 W/m<sup>2</sup>.
  - Il formula l'hypothèse que certains gaz seraient meilleurs que d'autres pour « emprisonner » la chaleur.
    - Il y a près de 200 ans, on savait.





# Question

- À quand remontent les premières inquiétudes sur l'effet de l'émission de CO<sub>2</sub> sur le climat? 1824?
  - Joseph Fourier, un mathématicien et physicien français;
  - Décomposition d'une fonction quelconque en une série trigonométrique convergente. De telles fonctions sont appelées séries de Fourier. Celles qui donnent des mots de tête...
  - Les planètes reçoivent l'énergie sous forme de rayonnement à partir d'un certain nombre de sources — la chaleur lumineuse — mais en perdent également par radiation infrarouge — la chaleur obscure.
  - « [Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires](#) »; la température du sol est conditionnée par l'action de l'atmosphère.
    - Ce mémoire fut écrit il y a deux siècles, consultez-le, 36 p.



# Plan de la présentation

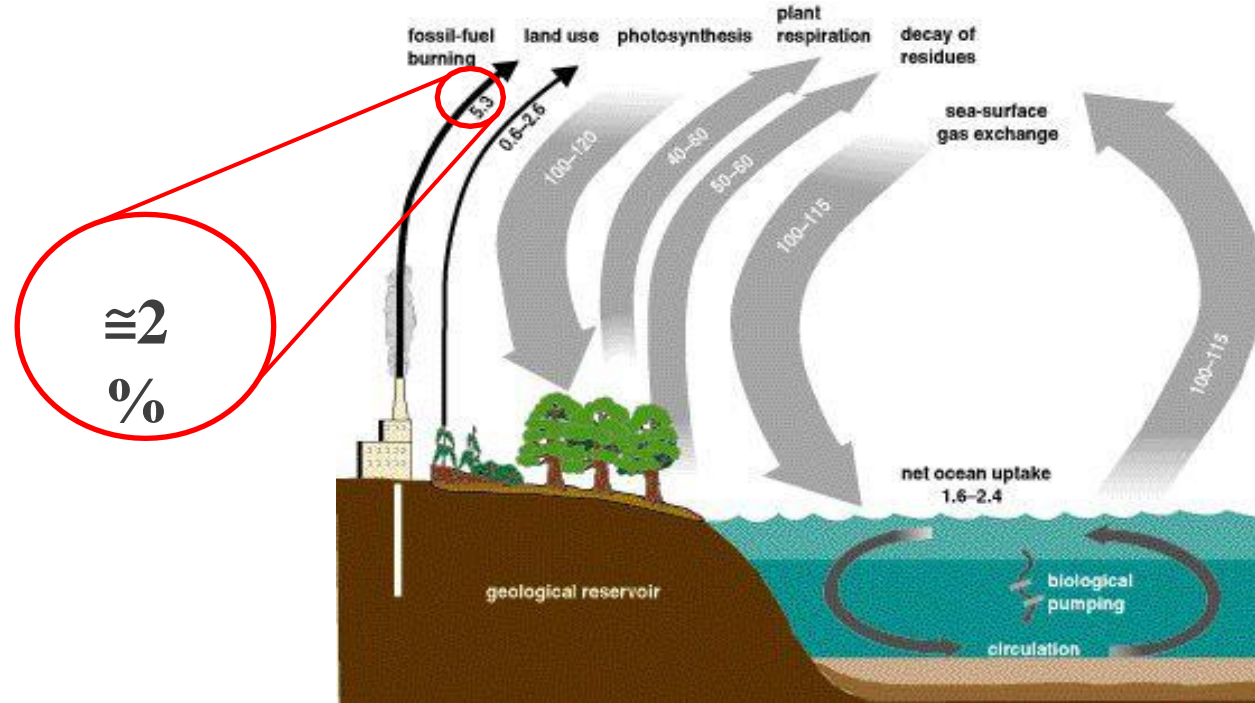
- Introduction et objectifs
- L'effet de serre
- ***Les gaz à effet de serre (GES)***
- Les objectifs de réduction
- Les grands émetteurs
- Conclusion

# Question

- Quelle est la fraction des émissions de carbone atmosphérique imputable à la combustion des énergies fossiles?
  - a) 0 à 5%
  - b) 6 à 10%
  - c) 11 à 20%
  - d) 20 à 30%
  - e) 31% et +

# Les émissions de GES

- Quelle est la fraction des émissions de carbone atmosphérique imputable à la combustion des énergies fossiles?

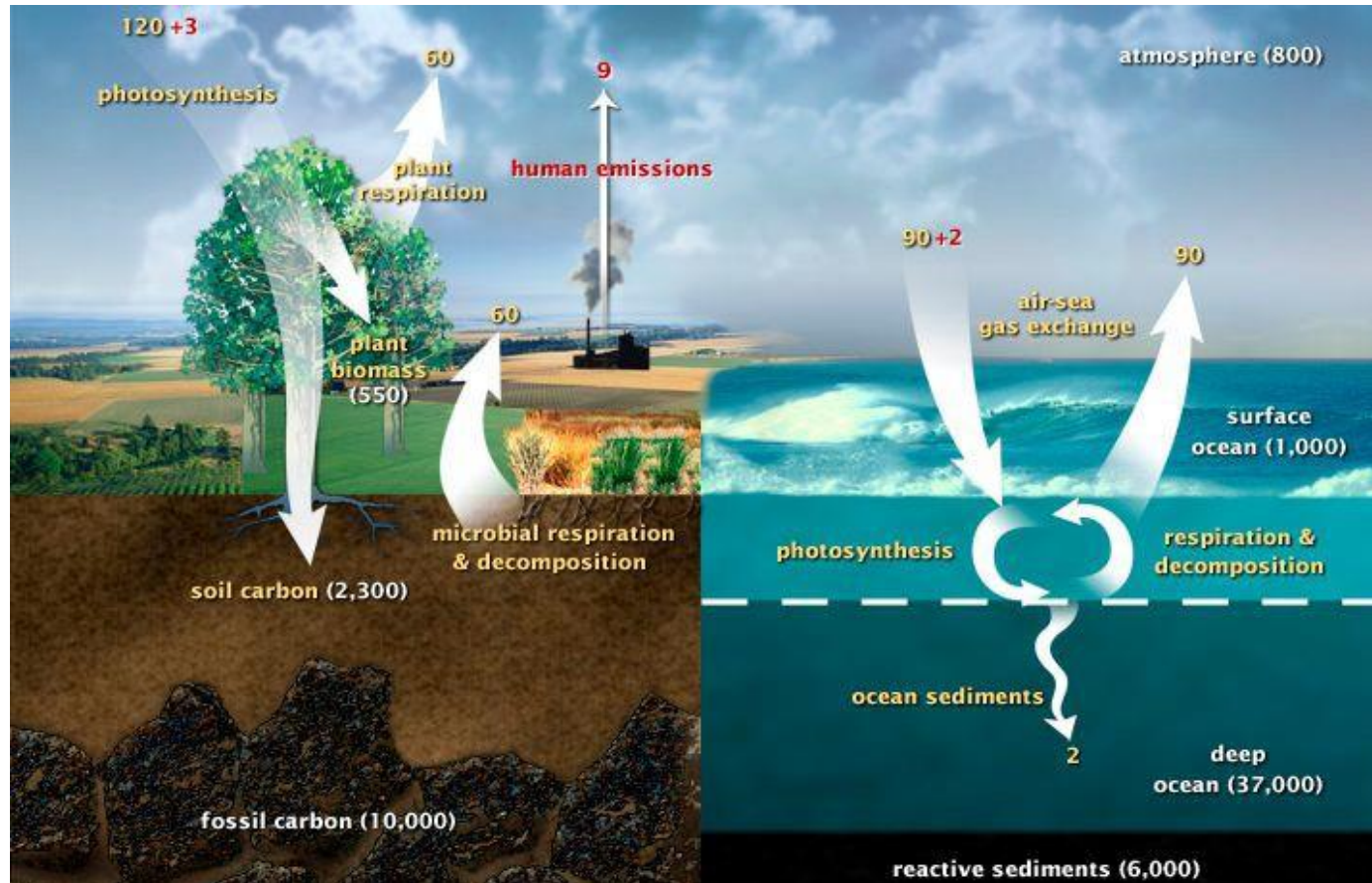


Oak Ridge National Lab

Post, W. M., T.H. Peng, W. R. Emanuel, A. W. King, V. H. Dale, and D. L. DeAngelis. 1990. The global carbon cycle. American Scientist 78:310-26.

# Les émissions de GES

- Quelle est la fraction des émissions anthropogénique?

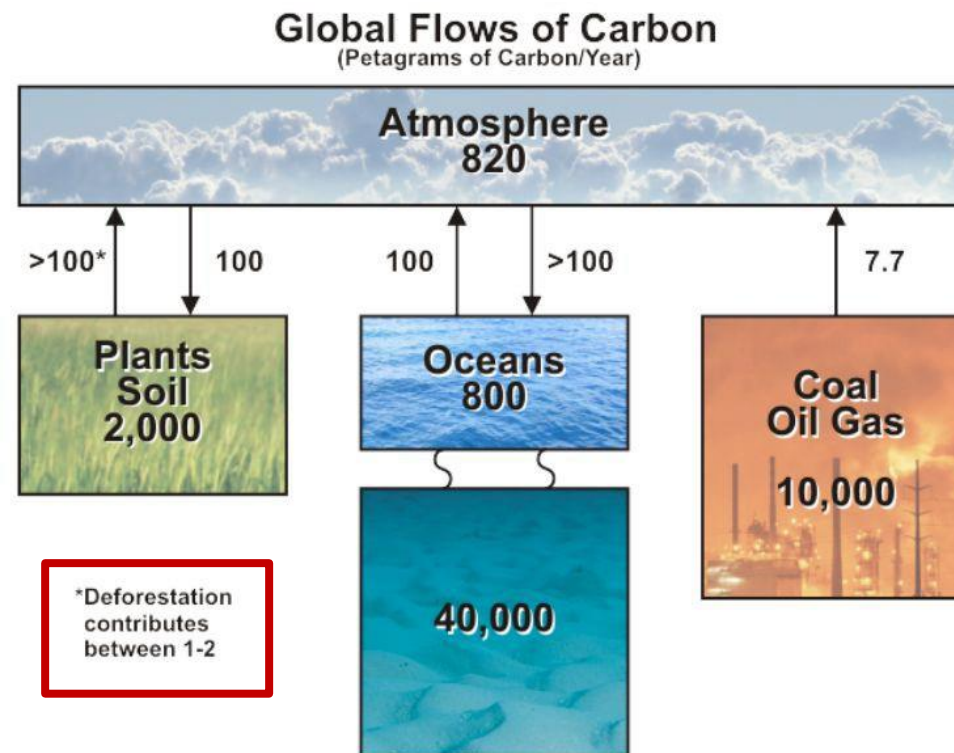


<https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>



# Les émissions de GES

- Quelle est la fraction des émissions de carbone atmosphérique imputable à la combustion des énergies fossiles?



< 4%

[http://cdiac.ornl.gov/carbon\\_cycle.html](http://cdiac.ornl.gov/carbon_cycle.html)

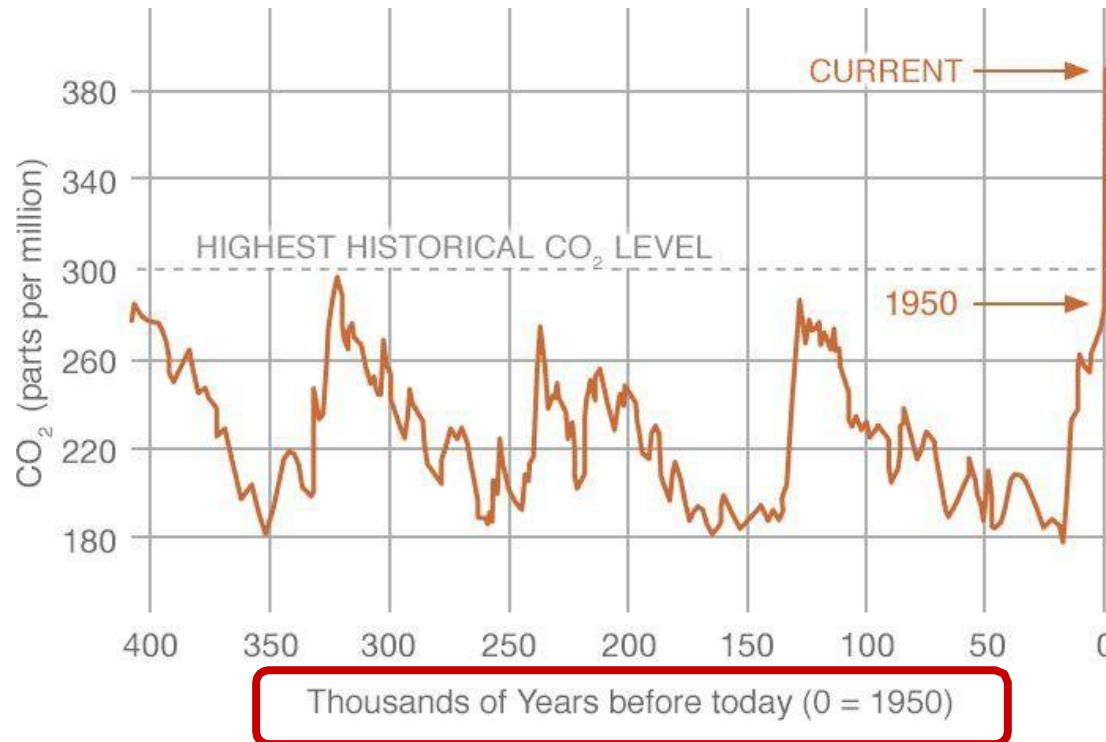
# Question

- Quelle est la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'Atmosphère terrestre aujourd'hui (en ppm)?
  - a) 0 à 150 ppm
  - b) 151 à 300 ppm
  - c) 301 à 450 ppm
  - d) 451 à 600 ppm
  - e) Aucune de ces réponses

# Les émissions de GES

- Ce qui est certain!
  - Concentration préindustrielle de CO<sub>2</sub>: 290 ppm
  - Concentration actuelle : ≈ 409-419ppm.

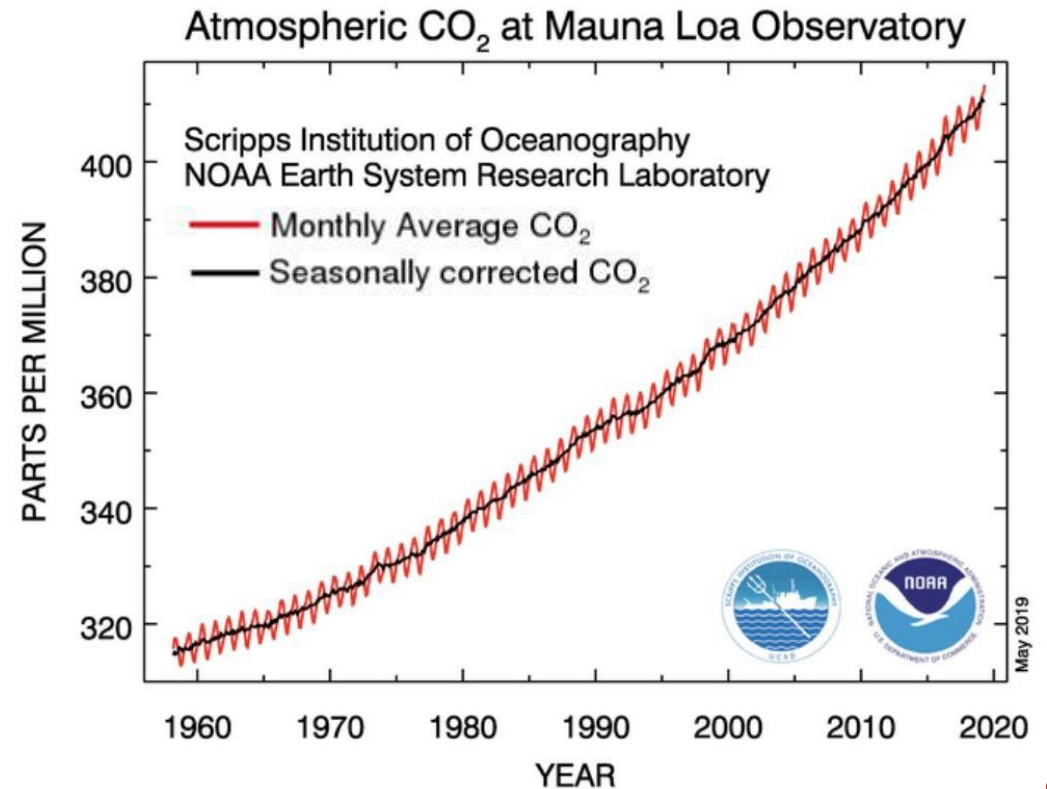
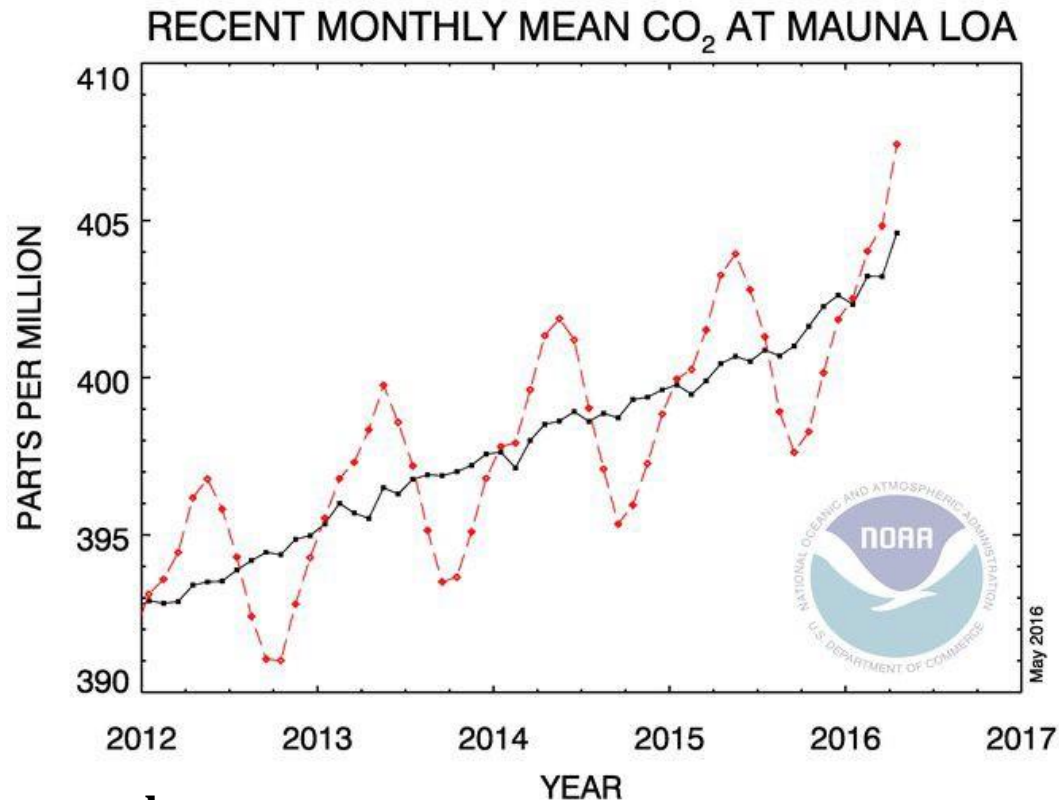
La concentration actuelle se situe désormais hors du graphique





# Les émissions de GES

- Pourquoi y a-t-il une oscillation annuelle de la concentration de carbone dans l'atmosphère?



[research.noaa.gov](https://research.noaa.gov)

# Question

- Pourquoi y a-t-il une oscillation annuelle de la concentration de carbone dans l'atmosphère?
  - A. La pollution atmosphérique moyenne fluctue;
  - B. Le couvert végétal respire sur une très longue période de temps en semaines;
  - C. La majorité des forêts se trouvent dans l'hémisphère nord et dorment en hiver septentrional;
  - D. La forêt amazonienne en est la responsable;
  - E. Aucune de ces réponses

# Les émissions de GES

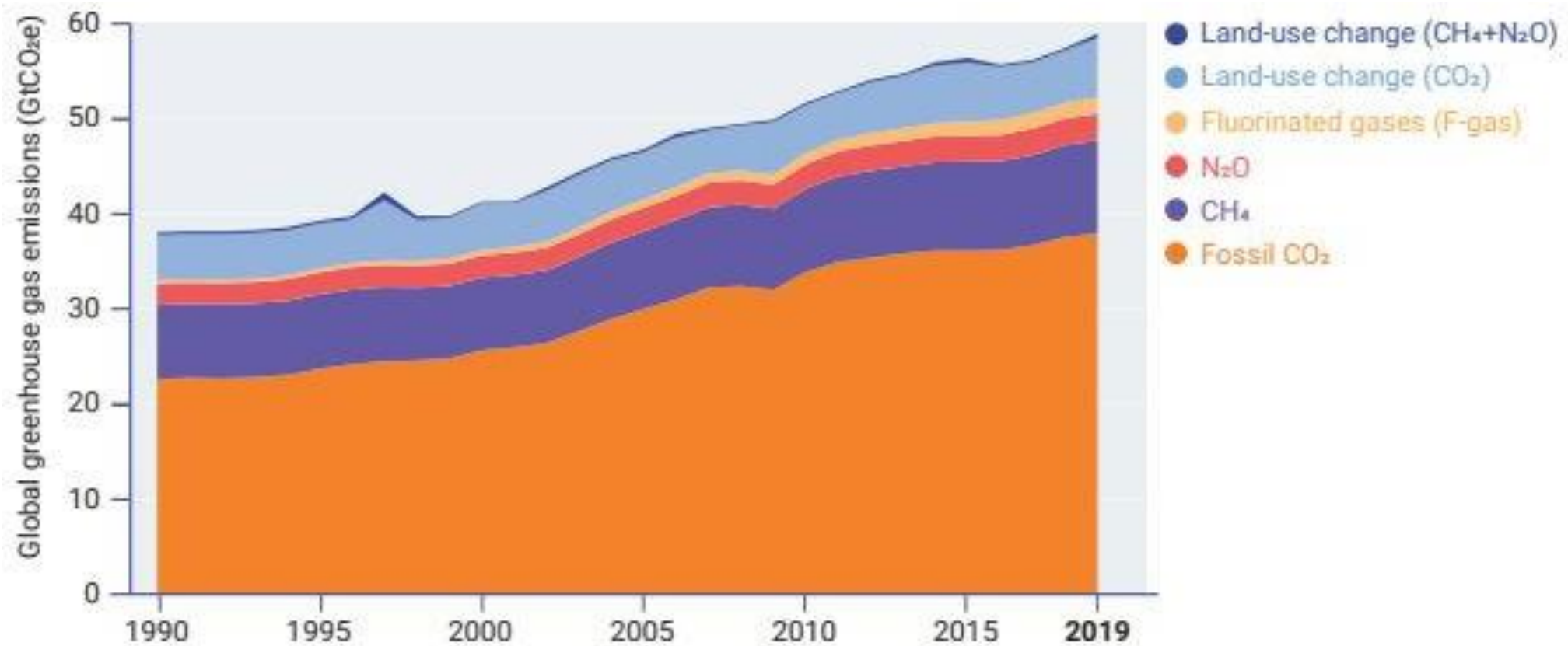
- Potentiel de réchauffement climatique des différents gaz à effet de serre

GIEC, 2007	Gaz	Durée de séjour (années)	PRG selon la période considérée		
			20 ans	100 ans <sup>8</sup>	500 ans
	Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	100 <sup>6</sup>	1	1	1
	Hydrogène (H <sub>2</sub> ) <sup>9</sup>	2	32	11	
	Méthane (CH <sub>4</sub> )	12	72	25	7,6
	Protoxyde d'azote (N <sub>2</sub> O)	114	289	298	153
	PFC-14 (tétrafluorure de carbone, CF <sub>4</sub> )	50 000	5 210	7 390	11 200
	HFC-23 (trifluorométhane, CHF <sub>3</sub> )	260	9 400	12 000	10 000
	Hexafluorure de soufre (SF <sub>6</sub> )	3 200	15 100	22 200	32 400

PRG : Potentiel de Réchauffement Global

# Les émissions de GES

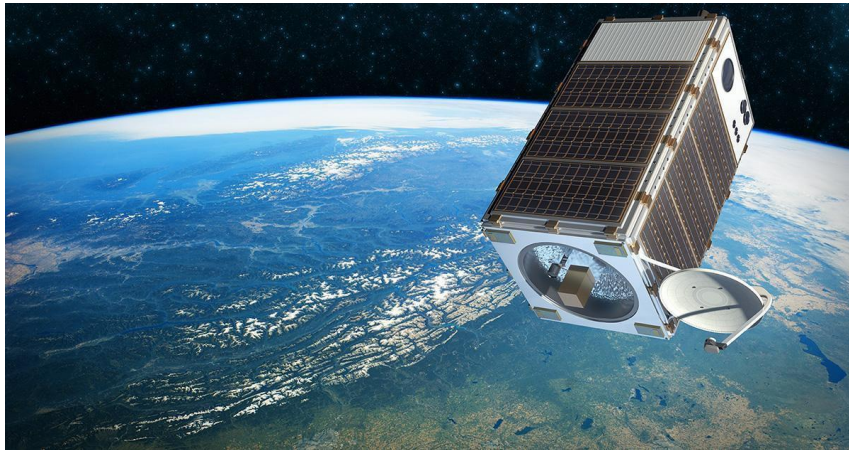
- Quel gaz cause le plus de dégâts ?



The emission gap report 2020 - UNEP

# Vidéo

- MethaneSAT, le satellite qui localise et mesure les fuites de méthane provenant des industries du pétrole et du gaz :



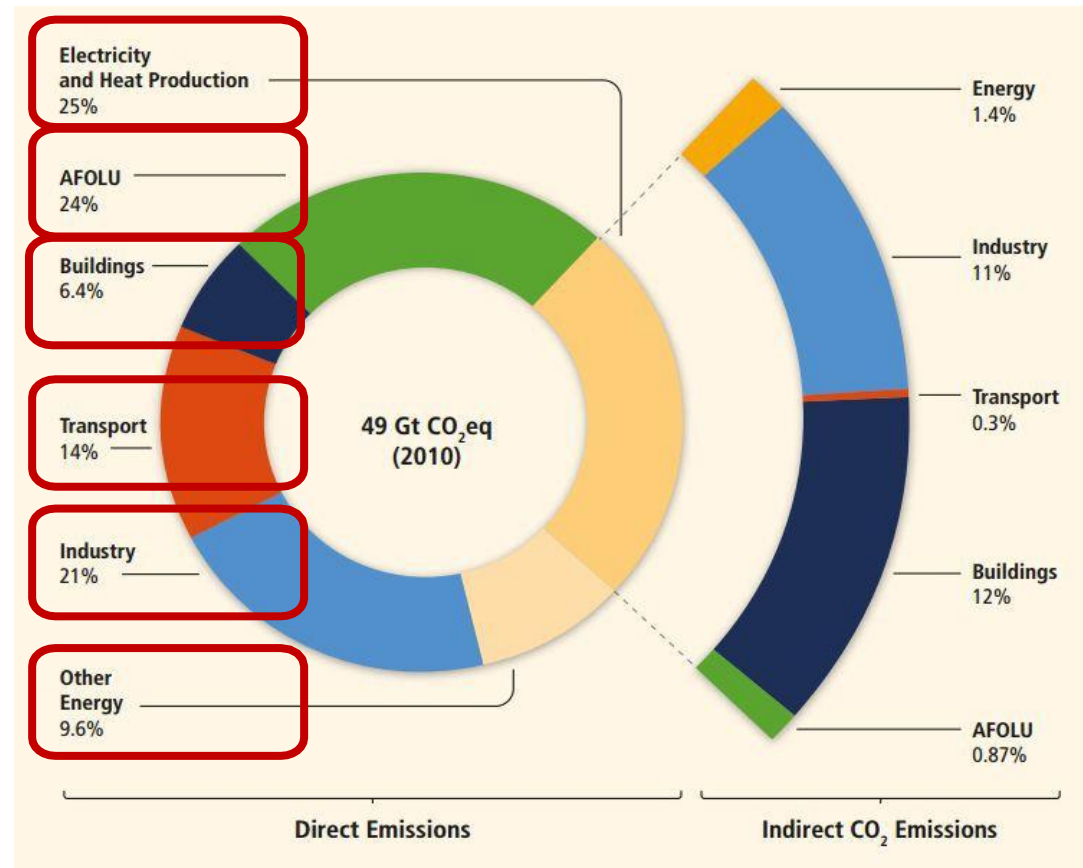
**Lancement** : prévu en octobre 2023

**Objectif** : réduire les émissions de méthane des industries pétrolière et du gazière de **45% d'ici 2025** = même bénéfice climatique sur 20 ans que la fermeture immédiate de **1 300 centrales au charbon**

[https://youtu.be/H9IoW\\_Y3e58](https://youtu.be/H9IoW_Y3e58)

# Les émissions de GES

- Quel secteur cause le plus de dégâts ?



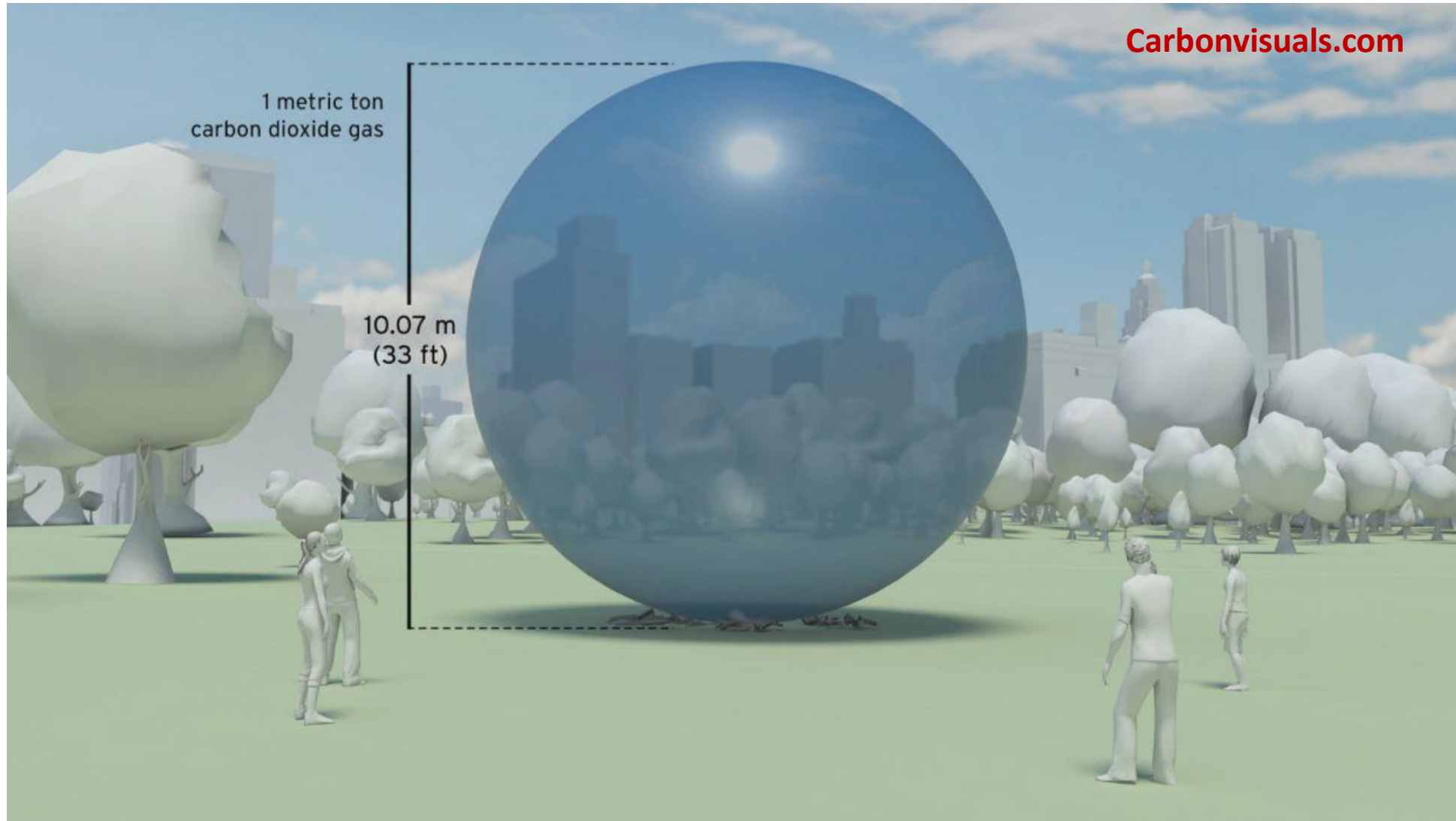
Greenhouse Gas Emissions by Economic Sectors. Fig. TS.3, IPCC AR5 WGIII, Mitigation of Climate Change, Technical Summary, 2014



# Les émissions de GES



# Les émissions de GES





# Les émissions de GES

- Methane isn't just cow farts; it's also cow burps (and [other weird facts](#) you didn't know about this potent greenhouse gas)
  - Une présentation TED qui observe la génération de méthane sous un autre angle

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- L'effet de serre
- Les gaz à effet de serre (GES)
- ***Les objectifs de réduction***
- Les grands émetteurs
- Conclusion

# Les objectifs de réduction d'émission de GES

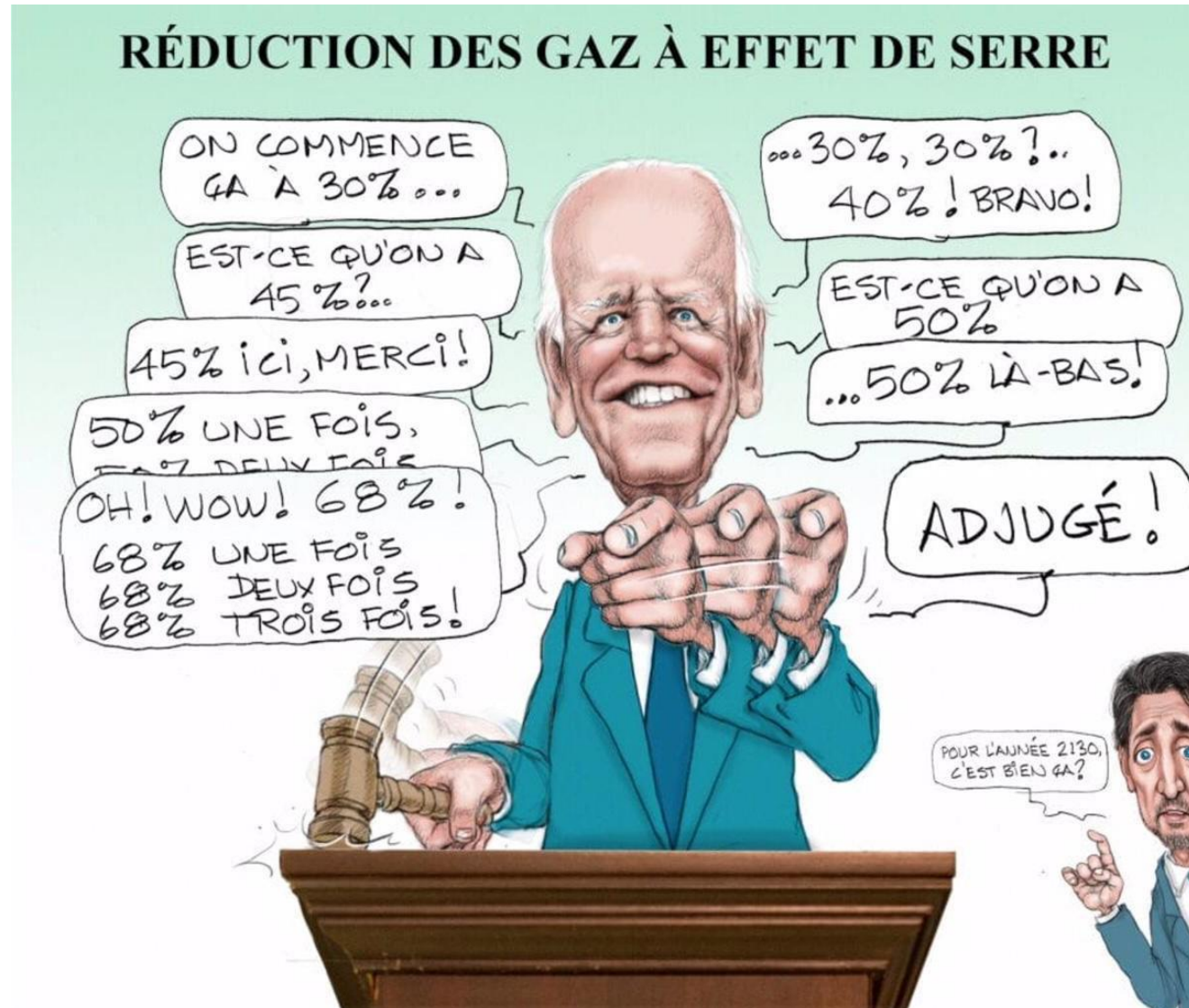
- Émission de GES dans l'UE
  - Objectif -20% pour 2020 fut atteint;
  - On songeait à l'augmenter à -30% avec impact positif sur le PIB;
  - Suggestion -40% à l'horizon 2030 et de -80% d'ici à 2050.

**COMMUNICATION DE LA COMMISSION AU PARLEMENT EUROPÉEN, AU CONSEIL, AU COMITÉ ÉCONOMIQUE ET SOCIAL EUROPÉEN ET AU COMITÉ DES RÉGIONS**

**Feuille de route vers une économie compétitive à faible intensité de carbone à l'horizon 2050**

**Bruxelles, 08 mars 2011**

# Les objectifs de réduction d'émission de GES



# Question

- Que se passerait-il si on diminuait notre consommation d'énergie fossile par deux à l'avenir?
  - A. La concentration de CO<sub>2</sub> fléchirait immédiatement
  - B. La concentration de CO<sub>2</sub> retournerait à sa moyenne d'avant 1950 en 50 ans
  - C. La concentration de CO<sub>2</sub> retournerait à sa moyenne d'avant 1950 en 100 ans
  - D. La concentration de CO<sub>2</sub> retournerait à sa moyenne d'avant 1950 en 150 ans
  - E. Aucune de ces réponses

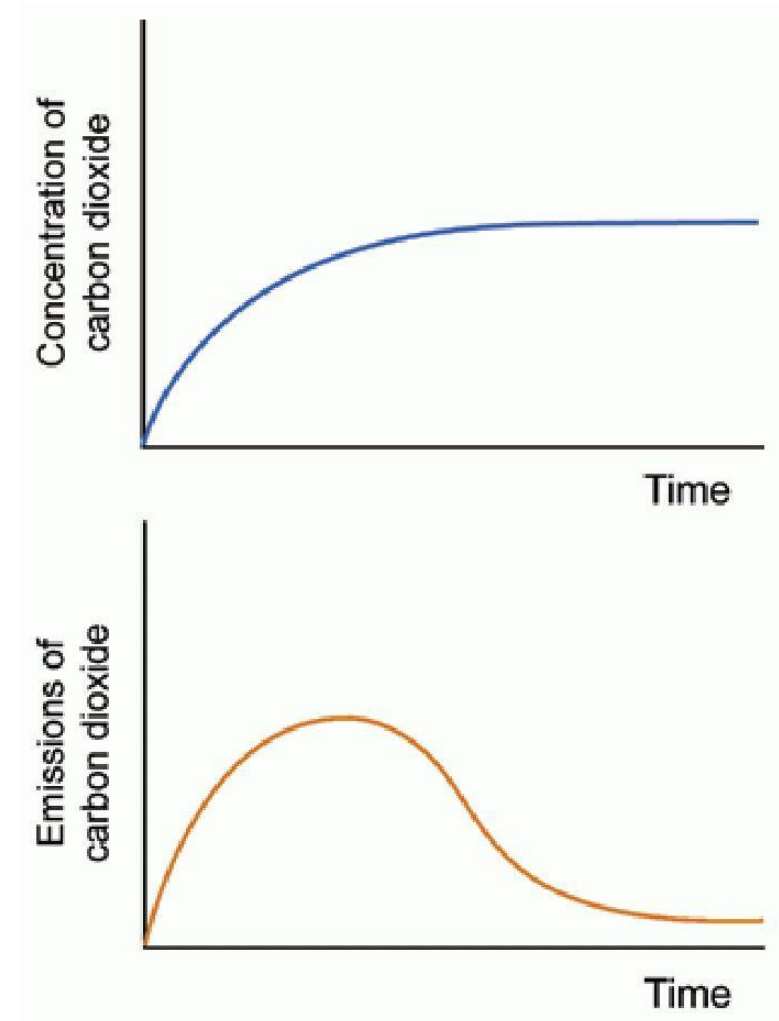
# Les objectifs de réduction d'émission de GES

- Que se passerait-il si on diminuait notre consommation d'énergie fossile par deux à l'avenir?
  - La durée des réserves doublerait!
  - La quantité de CO<sub>2</sub> émis diminuerait annuellement d'autant!
  - Mais au global, on consommerait la **même** quantité d'énergie fossile et on émettrait la **même** quantité de GES... sur une période deux fois plus longue.
  - 100 ans plutôt que 50 ans, environ
  - Or, le CO<sub>2</sub> émis en 2025 restera dans l'atmosphère pendant un siècle à 40%...

# Les objectifs de réduction d'émission de GES

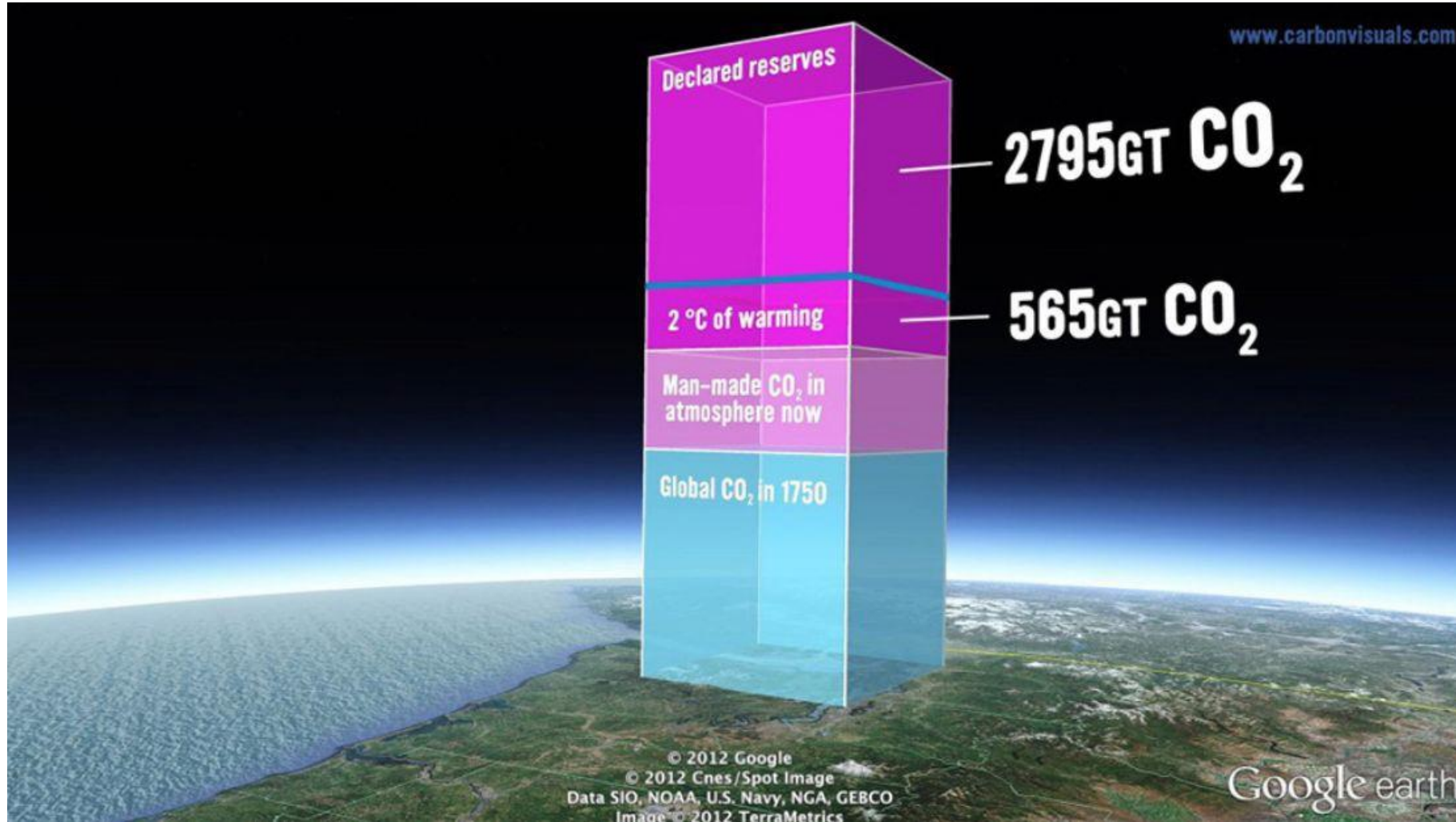
- Réduire les émissions pour stabiliser la concentration
- On envisage même d'extraire le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère à l'échelle planétaire...

U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research,  
Granger Morgan, H., Dowlatabadi, M.





# Les objectifs de réduction d'émission de GES



# Les objectifs de réduction d'émission de GES

- Pourquoi cibler un maximum de 2 degrés d'augmentation?
  - Limiter le réchauffement climatique à une augmentation moyenne des températures de 2 degrés est un objectif qui est souvent répété. Pourquoi ?

<http://www.climatecentral.org/news/climate-goal-2-degrees-misguided-18121>

<http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0081648>

# Les objectifs de réduction d'émission de GES

- De combien doit-on réduire ?
  - Diminution de 85% des émissions d'ici 2050, soit - 4%/an
  - 1 tonne CO<sub>2</sub>/personne

=

Probabilité de 9-26%  
d'un réchauffement >2°C

[http://withouthotair.com/c1/page\\_15.shtml](http://withouthotair.com/c1/page_15.shtml)

(Dr Paul Baer with Dr Michael Mastrandrea, 2006)

# Les objectifs de réduction d'émission de GES

- Jamais sans la Chine et l'Inde

Figure 29 A. Historical CO<sub>2</sub> emissions (1990-2016) and emissions reduction targets (2020, 2025, 2030) for the top ten emitting Parties, excluding China and India

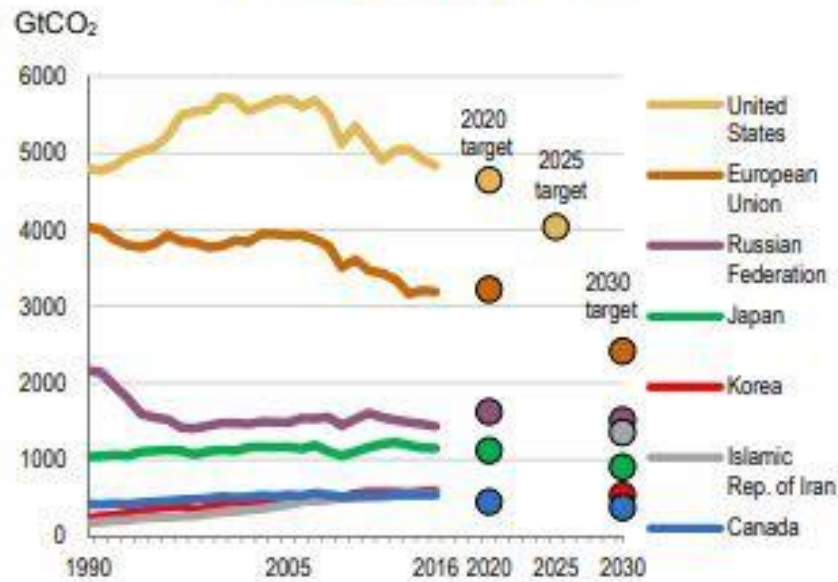
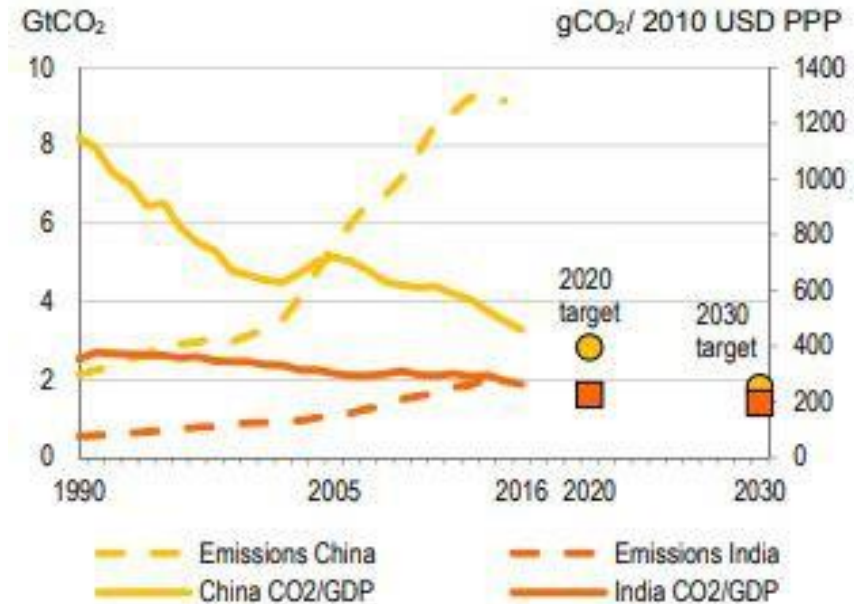


Figure 29 B. Historical CO<sub>2</sub> emissions (1990-2016) and emission-intensity reduction targets (2020, 2030) for China and India, 1990-2016



IEA, CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion, Highlights, 2016

# Les objectifs de réduction d'émission de GES

- In brief

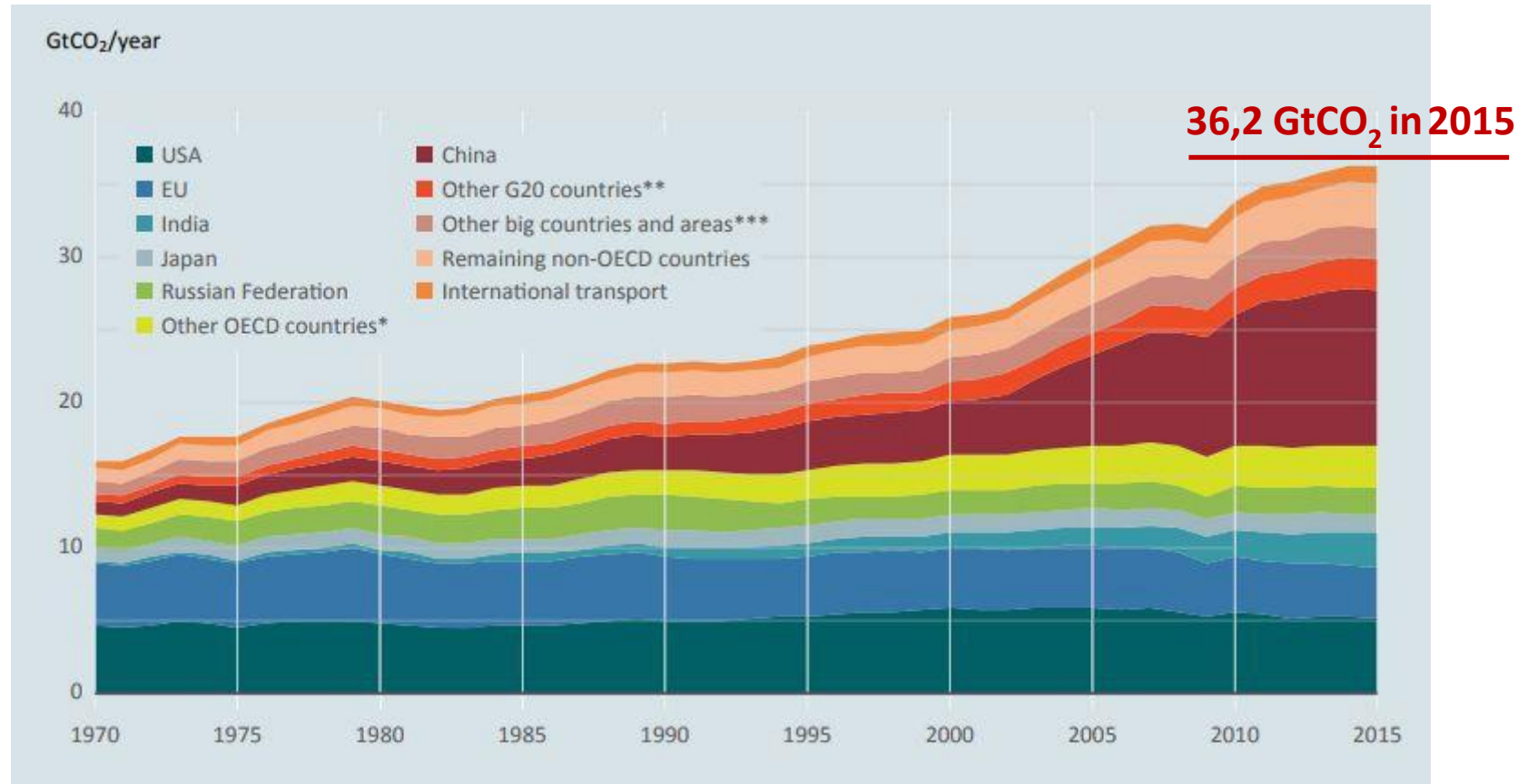
- “Collectively, G20 members are projected to overachieve their modest 2020 Cancun Pledges, but they are not on track to achieve their NDC commitments. Nine G20 members are on track to achieve their 2030 NDC commitments, five members are not on track, and for two members there is a lack of sufficient information to determine this.”
- “The emissions gap has not been narrowed compared with 2019 and is, as yet, unaffected by COVID-19. By 2030, annual emissions need to be 15 GtCO<sub>2</sub>e (range: 12–19 GtCO<sub>2</sub>e) lower than current unconditional NDCs imply for a 2°C goal, and 32 GtCO<sub>2</sub>e (range: 29–36 GtCO<sub>2</sub>e) lower for the 1.5°C goal. Collectively, current policies fall short 3 GtCO<sub>2</sub>e of meeting the level associated with full implementation of the unconditional NDCs.”

The emission gap report 2020 - UNEP



# Les objectifs de réduction d'émission de GES

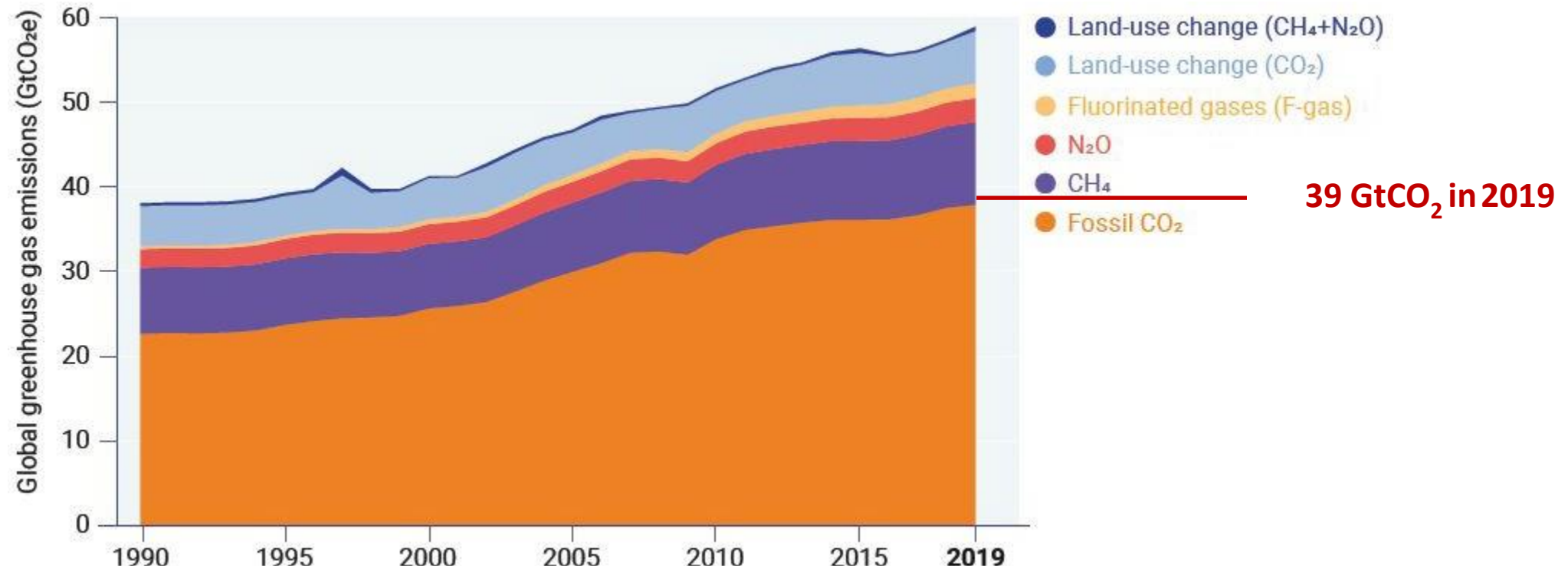
- Carbon dioxide emissions from fossil-fuel use and industry



The emission gap report 2016 - UNEP

# Les objectifs de réduction d'émission de GES

- Carbon dioxide emissions from all sources

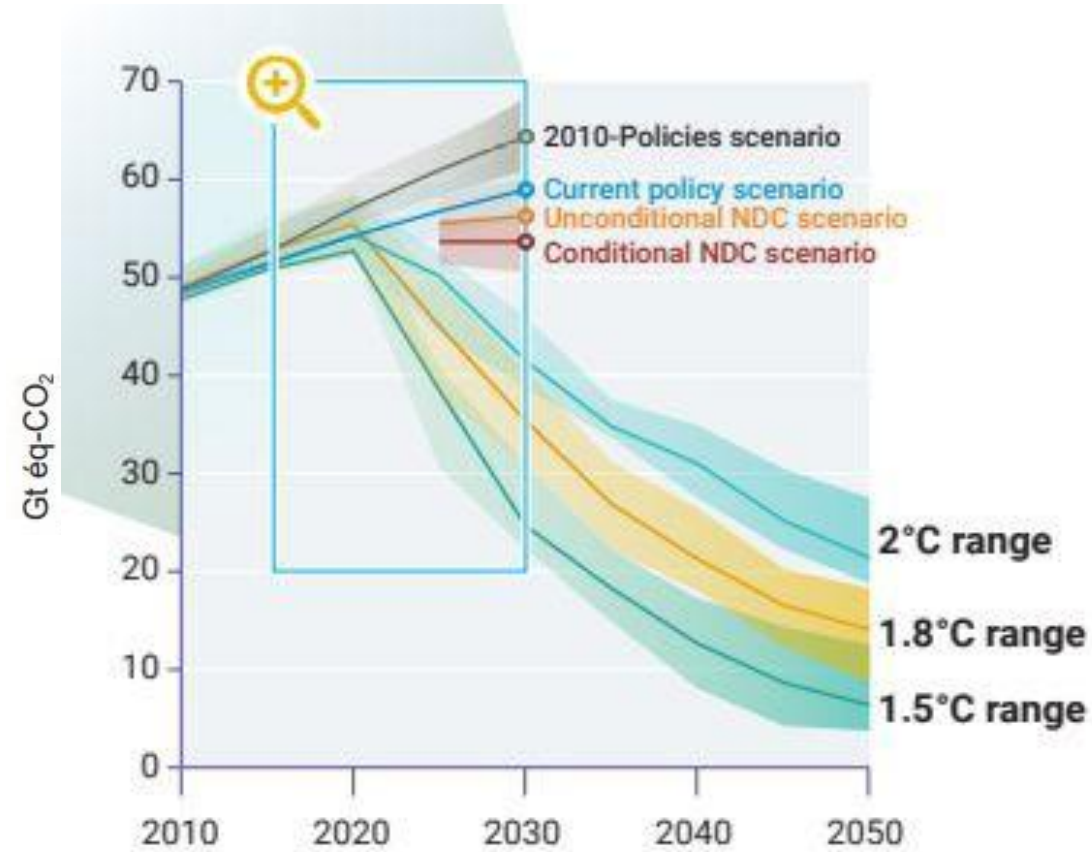


The emission gap report 2020 - UNEP



# Les objectifs de réduction d'émission de GES

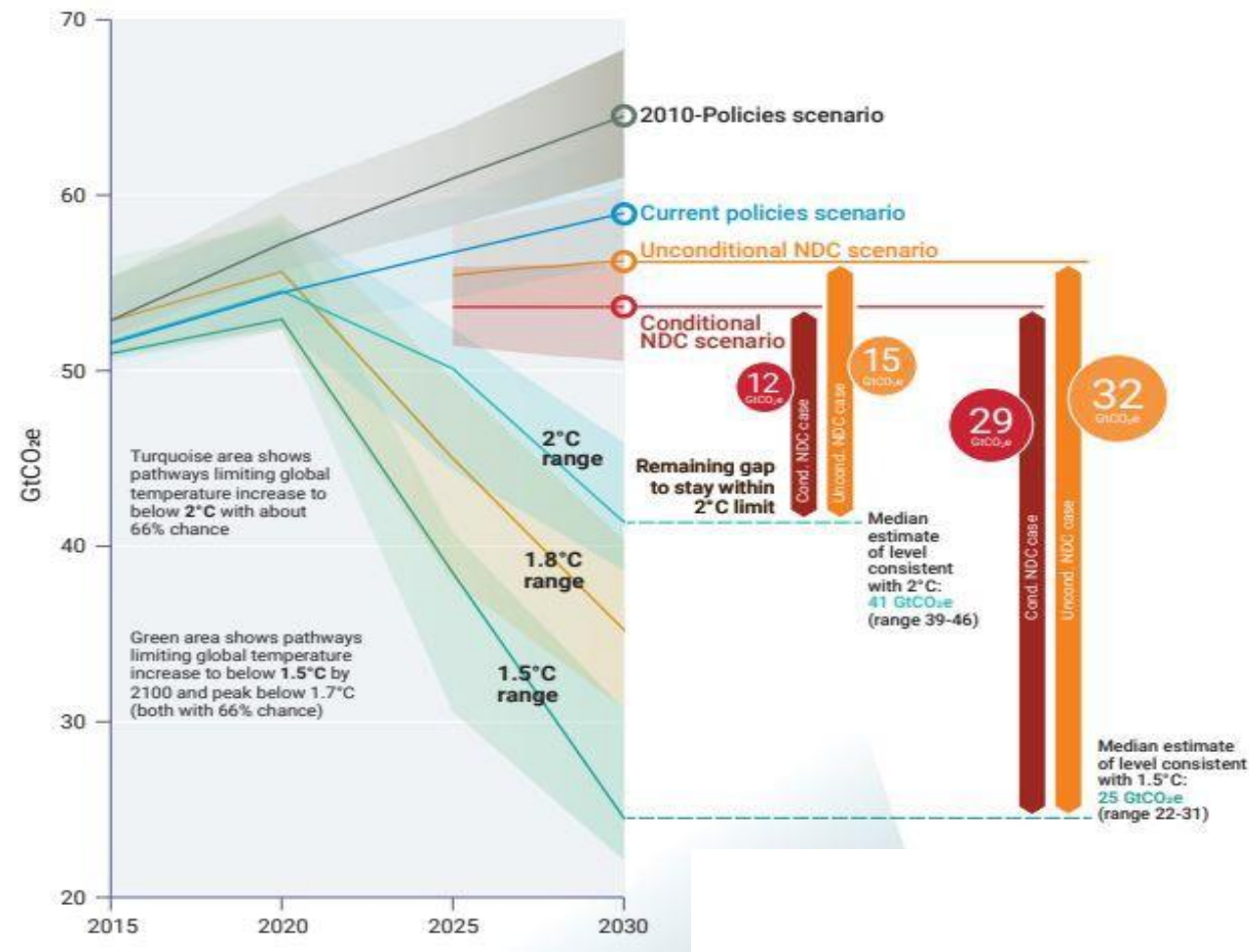
Global greenhouse gas emissions under different scenarios



The emission gap report 2020 - UNEP

# Les objectifs de réduction d'émission de GES

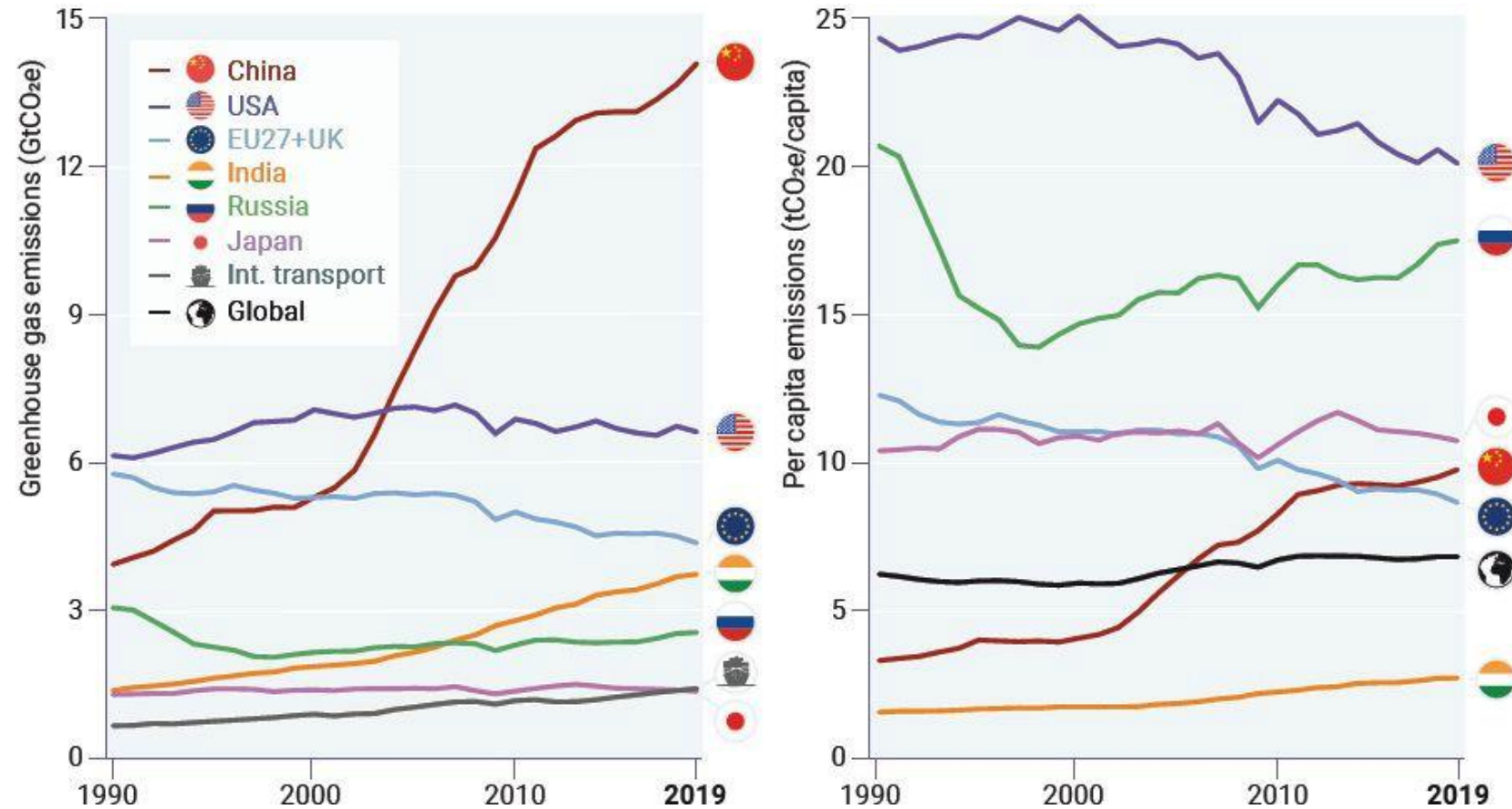
Global greenhouse gas emissions under different scenarios



The emission gap report 2020 - UNEP

# Les objectifs de réduction d'émission de GES

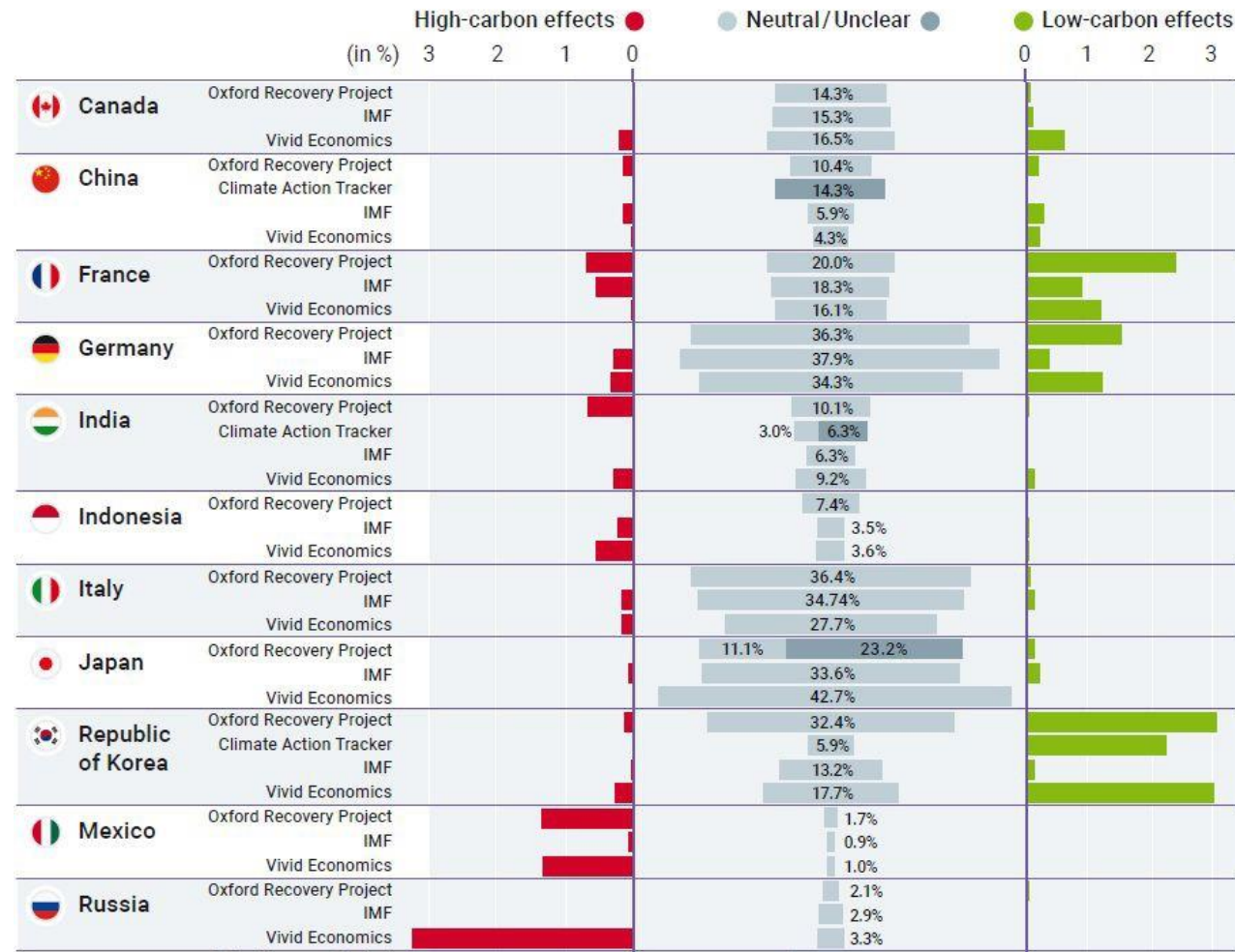
Absolute GHG emissions of the top six emitters



The emission gap report 2020 - UNEP

# Les objectifs de réduction d'émission de GES

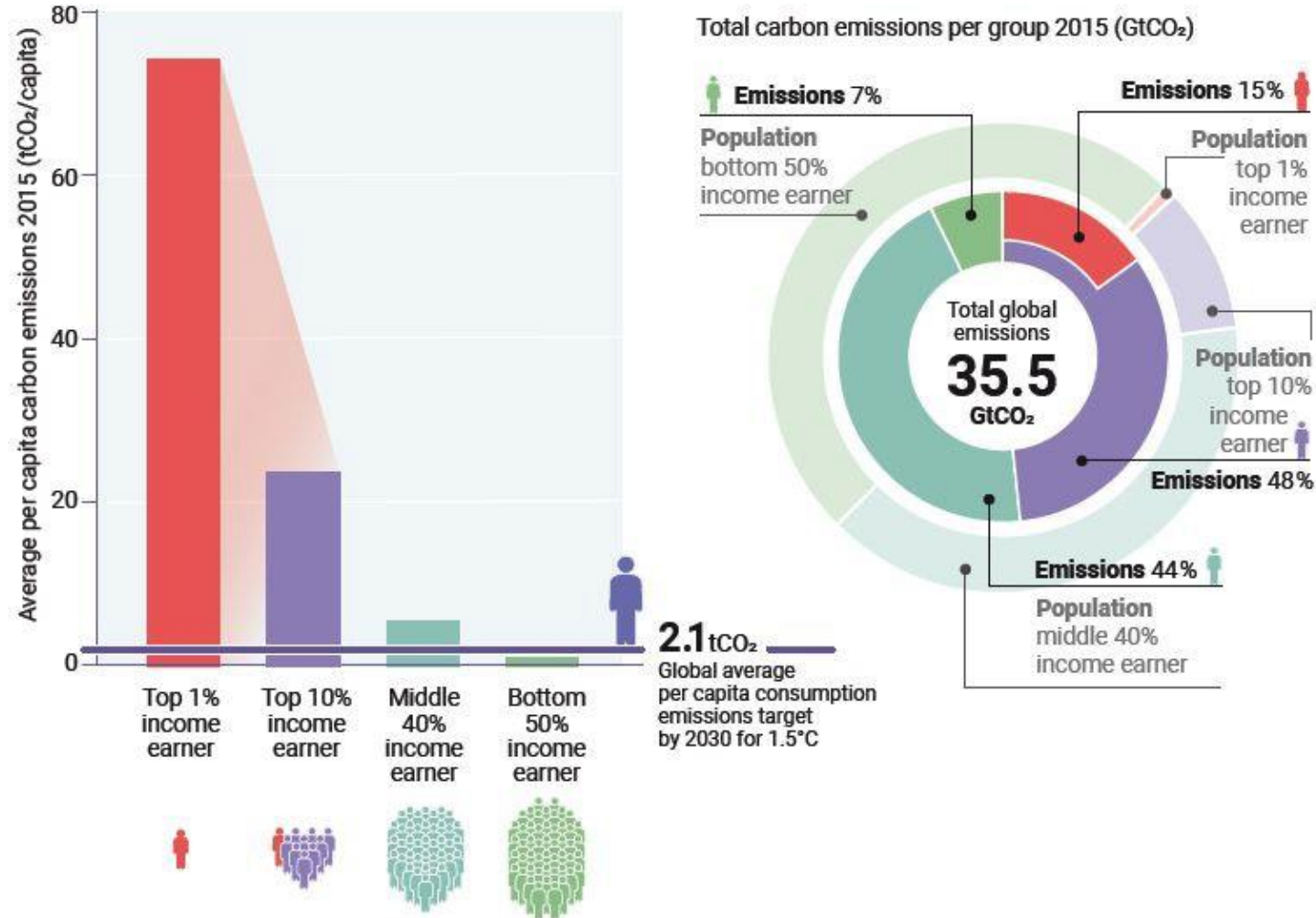
## COVID et mesures fiscales



The emission gap report 2020 - UNEP

# Les objectifs de réduction d'émission de GES

## Émissions par personne en fonction du revenu



The emission gap report 2020 - UNEP



# Question

- Les forêts canadiennes, qui représentent 10% du couvert forestier mondial et 30% de la forêt boréale de la planète, sont-elles un puits ou une source de carbone?
  - a) Un puits
  - b) Une source
  - c) Ni l'un, ni l'autre, elles sont en équilibre carbone
  - d) Parfois un puits, parfois une source, selon les années
  - e) Aucune de ces réponses



# Question

- Que peut-il y avoir de pire que le réchauffement de l'atmosphère planétaire?
  - a) Le réchauffement des océans;
  - b) L'acidification des océans;
  - c) Les migrations économiques;
  - d) Les inégalités sociales et économiques;
  - e) L'atomisation des sociétés nanties;
- Les choix sont nombreux...

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- L'effet de serre
- Les gaz à effet de serre (GES)
- Les objectifs de réduction
- ***Les grands émetteurs***
- Conclusion

# Les grands émetteurs

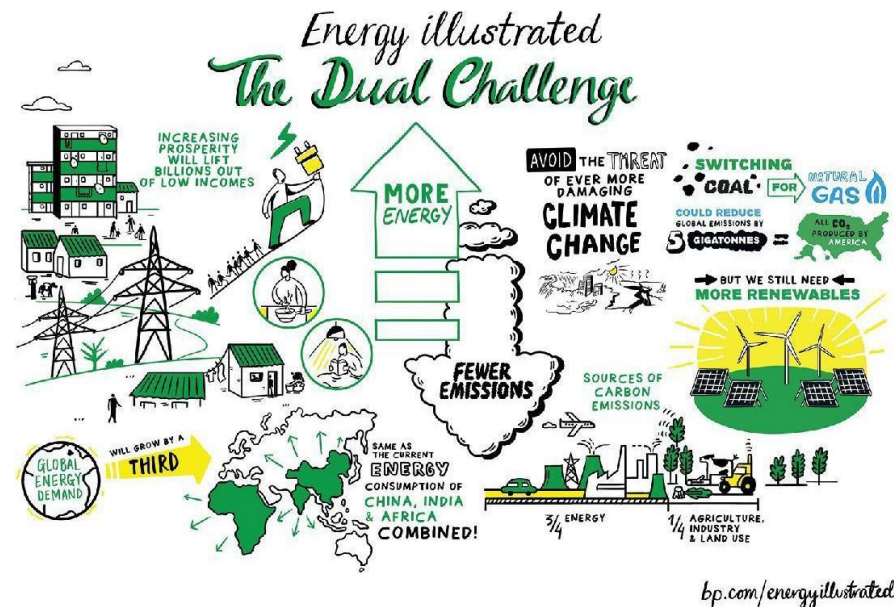
- Palmarès 2016 des émissions de GES

Rang par émissions total de CO2 en 2017	Pays	Émissions de CO2 dues à la combustion de carburant en 2017 (Mt)	Émissions de CO2 par habitants dues à la combustion de carburant en 2017 (Mt)
/	<i>Monde</i>	<i>32 840</i>	<i>4.37</i>
1	Chine	9 302	6.67
2	US	4 761	14.61
3	Inde	2 161	1.61
4	Russie	1 537	10.64
5	Japon	1 132	8.94

IEA, CO2 emissions from fuel combustion, 2019

# Les grands émetteurs

- Les émissions de GES par personne sont très variables selon les pays, et le légitime développement des pays les moins émetteurs risque d'augmenter encore les émissions.
  - BP's Energy Illustrated : [Episode 3. The Dual Challenge](#)



# Les grands émetteurs



La centrale électrique de Scherer à Juliet, en Géorgie, est la plus grande centrale électrique au charbon des États-Unis. Elle brûle 34 000 tonnes de charbon par jour, pompant plus de 25 millions de tonnes de dioxyde de carbone dans l'atmosphère chaque année.

<http://www.nationalgeographic.com/environnement/global-warming/methane/>

# Plan de la présentation

- Introduction et objectifs
- L'effet de serre
- Les gaz à effet de serre (GES)
- Les objectifs de réduction
- La captation
- Les grands émetteurs
- ***Conclusion***



# Conclusion

- Cette capsule a expliqué le mécanisme qui est dérégulé par un accroissement unidirectionnel, sauf capture et séquestration marginales, des émissions anthropiques à savoir l'effet de serre;
- Puis, les gaz qui causent cet effet indésirable ont été présentés;
- Ensuite, les mesures, objectifs et politiques de réduction de ces émissions ont été abordées (sans rire);
- Enfin, un bref survol des technologies de captation a été effectué avant de présenter quelques exemples de grands émetteurs anthropogènes.

# En résumé

- Quelques chiffres:
  - Depuis 1784, 500 Gtonnes de CO<sub>2</sub> ajoutées;
  - Niveau record depuis plus de 800 000 ans;
  - Le CO<sub>2</sub> reste une centaine d'années dans l'atmosphère;
  - Le N<sub>2</sub>O (émissions dues à l'agriculture, ≈6,2% du total) aussi sauf qu'il a un potentiel 300 x + important de réchauffement après 100 ans et de 150 x + après 500 ans.

**Croyez-vous que ce sera sans effet sur l'équilibre terrestre?**



**Merci de votre attention !**

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

# Période de questions

