Des Exoplanètes au P.I.B. : les limites de la croissance ?

Café In,
23 janvier 2020

Aurélien CRIDA

Maître de Conférences
à l'**U**niversité **C**ôte d'**A**zur
et l'**O**bservatoire de la **C**ôte d'**A**zur

Observatoire de la CÔTE d'AZUR
Membre de UNIVERSITÉ CÔTE D'AZUR

1) Exoplanètes

2) Paradoxe de Fermi

3) L'exponentielle

4) La croissance

5) Situation actuelle

6) Alors, que faire ?

Exoplanètes

Le **Soleil** est une **étoile** comme les autres.

Le **Système Solaire** est l'ensemble des objets qui tournent autour du Soleil : 8 planètes, leurs satellites, astéroïdes, comètes, poussières…

La **Voie Lactée** est notre **galaxie** :
un ensemble lenticulaire de ~200 milliards d'étoiles, dont les ~6000 visibles à l'œil nu.

Une galaxie

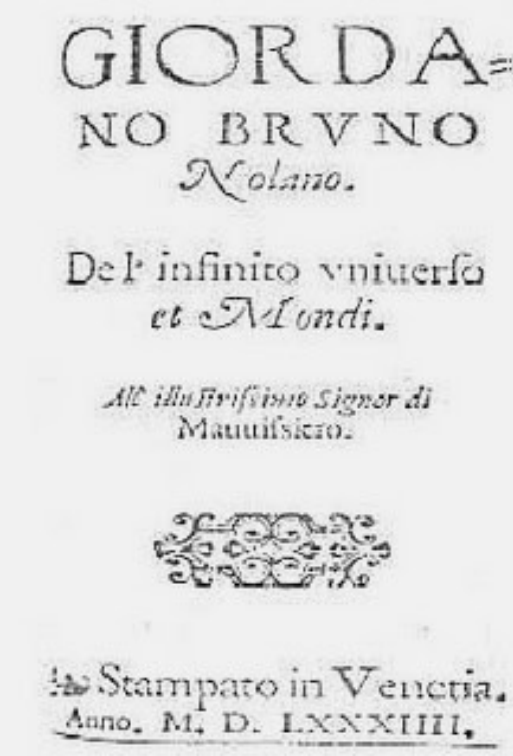
<u>Échelles :</u> La lumière du Soleil met **8'20"** à nous parvenir, **4 ans** à arriver à l'étoile la plus proche, **100 000 ans** à traverser la Voie Lactée.

Exoplanètes

« Il y a d'innombrables soleils et d'innombrables terres toutes tournant autour de leur soleil comme le font les sept planètes de notre système.

Nous n'en voyons que les soleils parce qu'ils sont les plus grands et les plus lumineux, mais leurs planètes nous restent invisibles parce qu'elles sont petites et peu lumineuses.

Les innombrables mondes de l'univers ne sont pas pires et moins habités que notre Terre. »


GIORDA=
NO BRVNO
Nolano.

De l' infinito vniuerso
et Mondi.

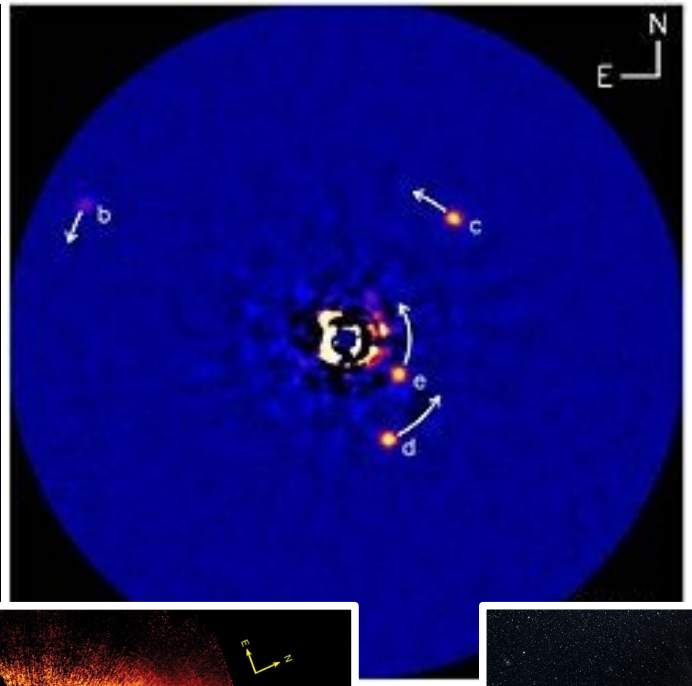
All' illustrissimo Signor di
Mauuisicro.

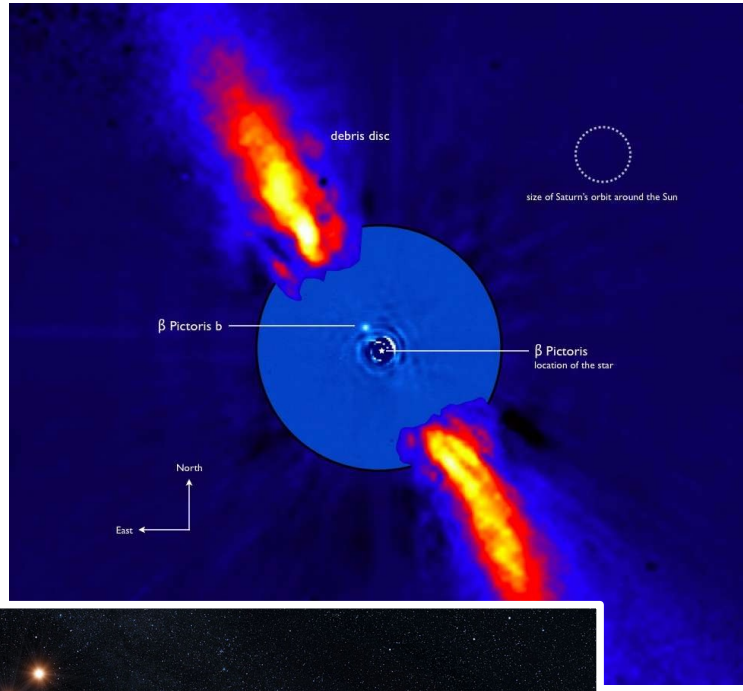
Stampato in Venetia.
Anno. M. D. LXXXIIII.

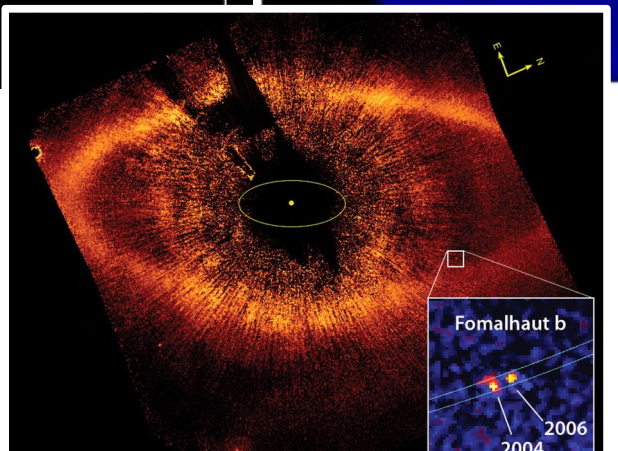
Giordano Bruno,
De l'infinito universo e mondi
(1574)

Exoplanètes

Depuis 1995, on sait que beaucoup d'autres étoiles ont des planètes : les **planètes extra-solaires** ou **exoplanètes**.

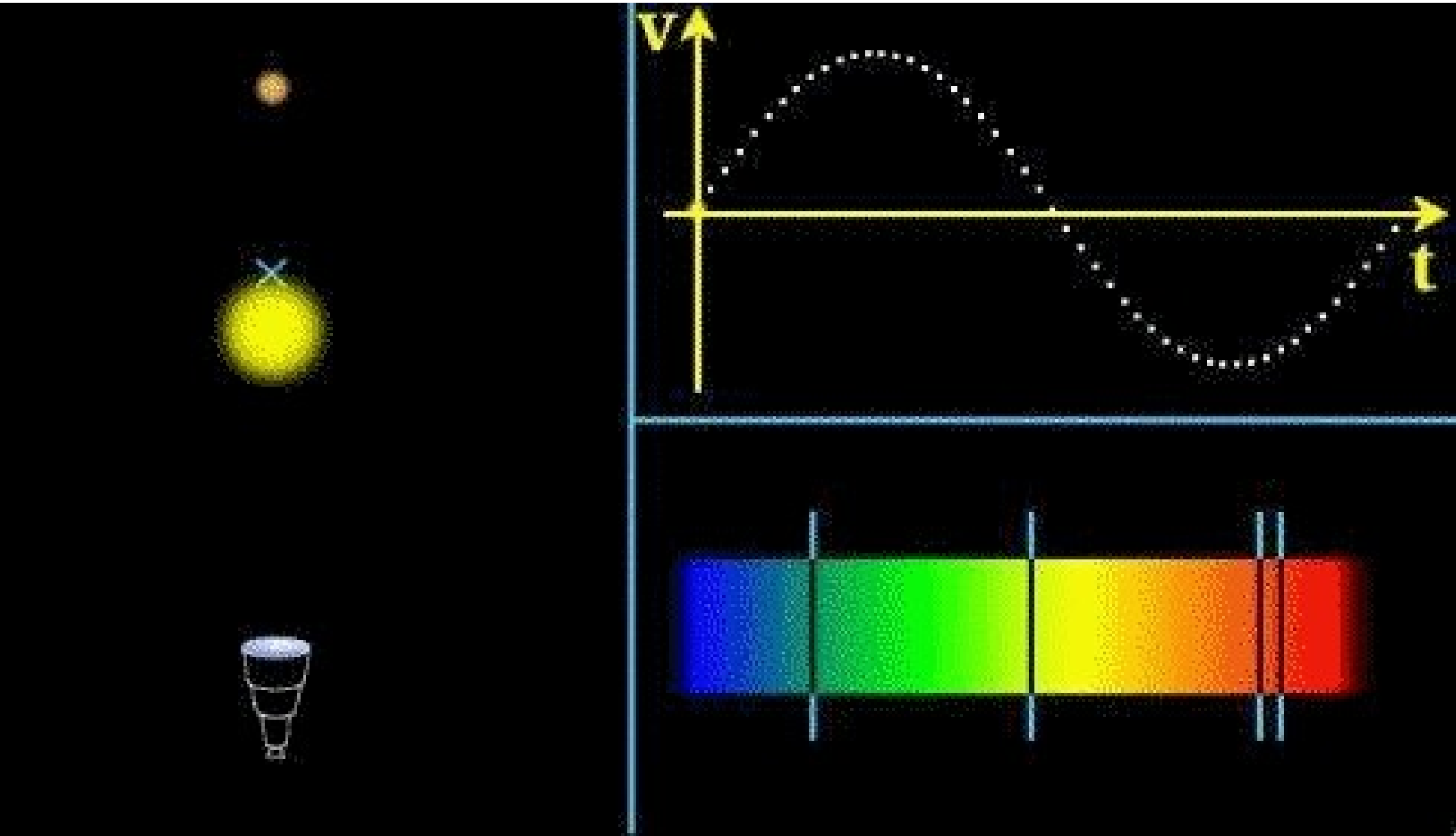






Détection d'exoplanètes

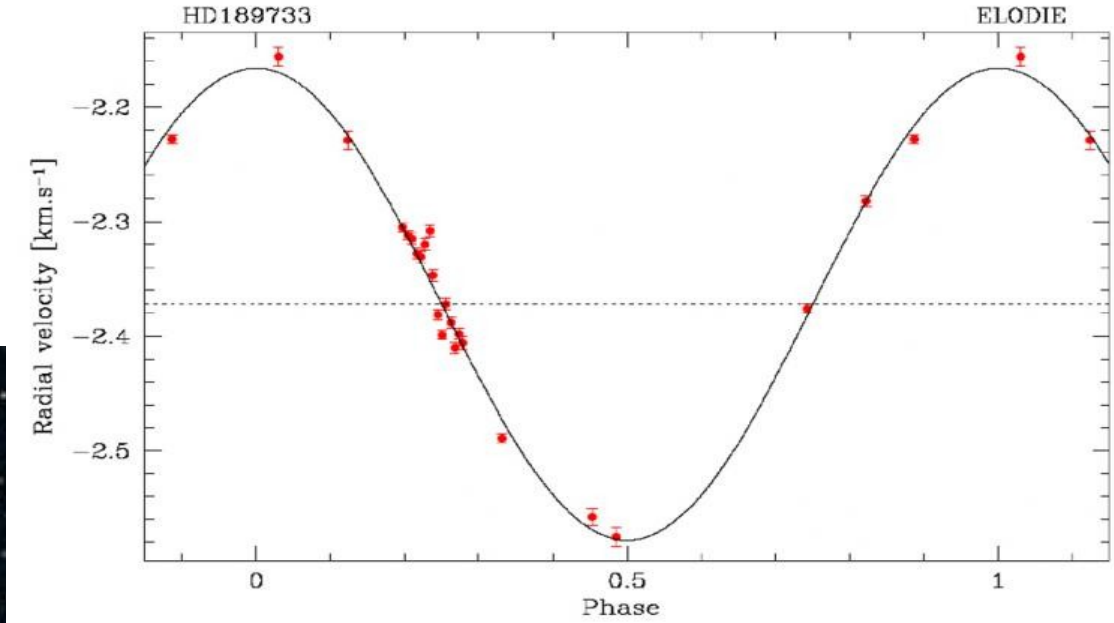
1) Méthode de vélocimétrie

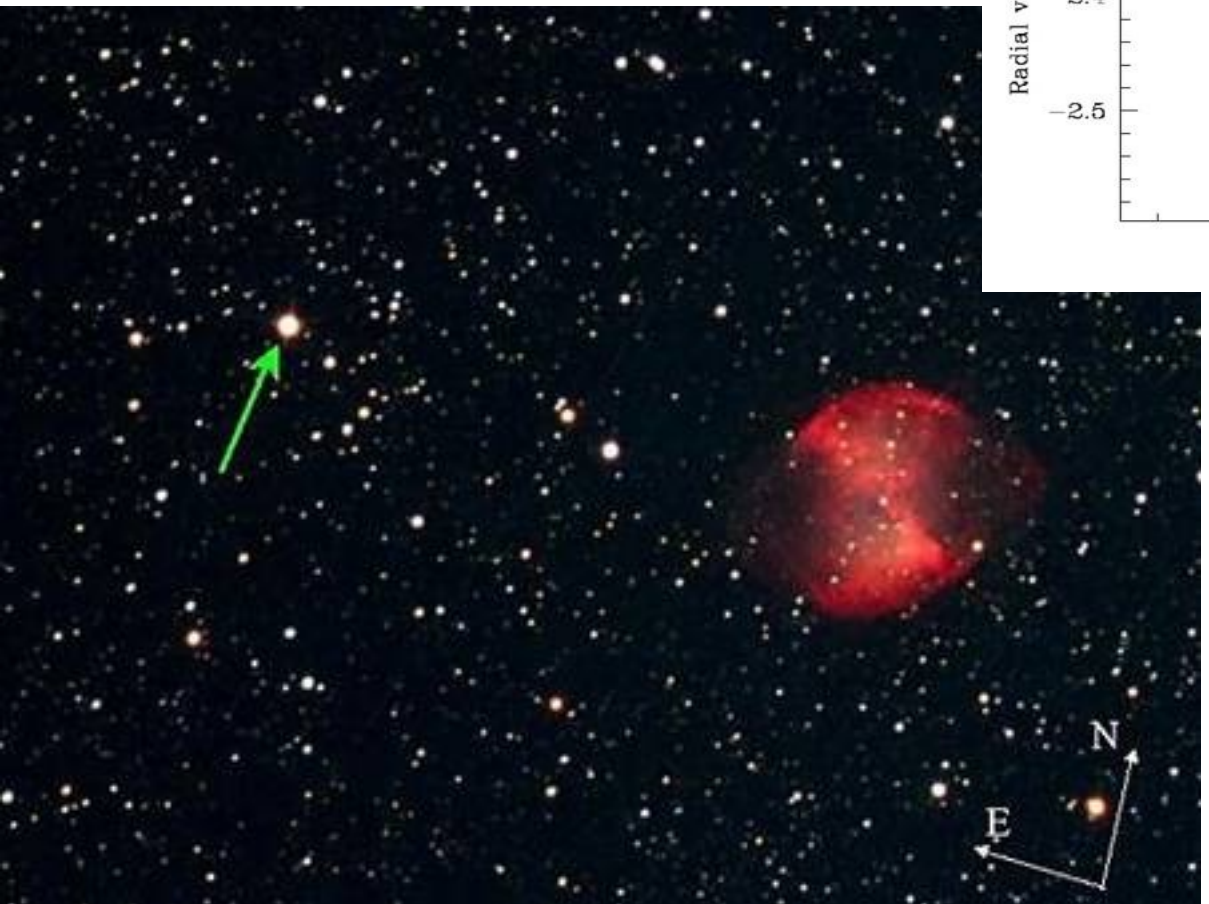


Détection d'exoplanètes

1) Méthode de vélocimétrie

Exemple : HD189733

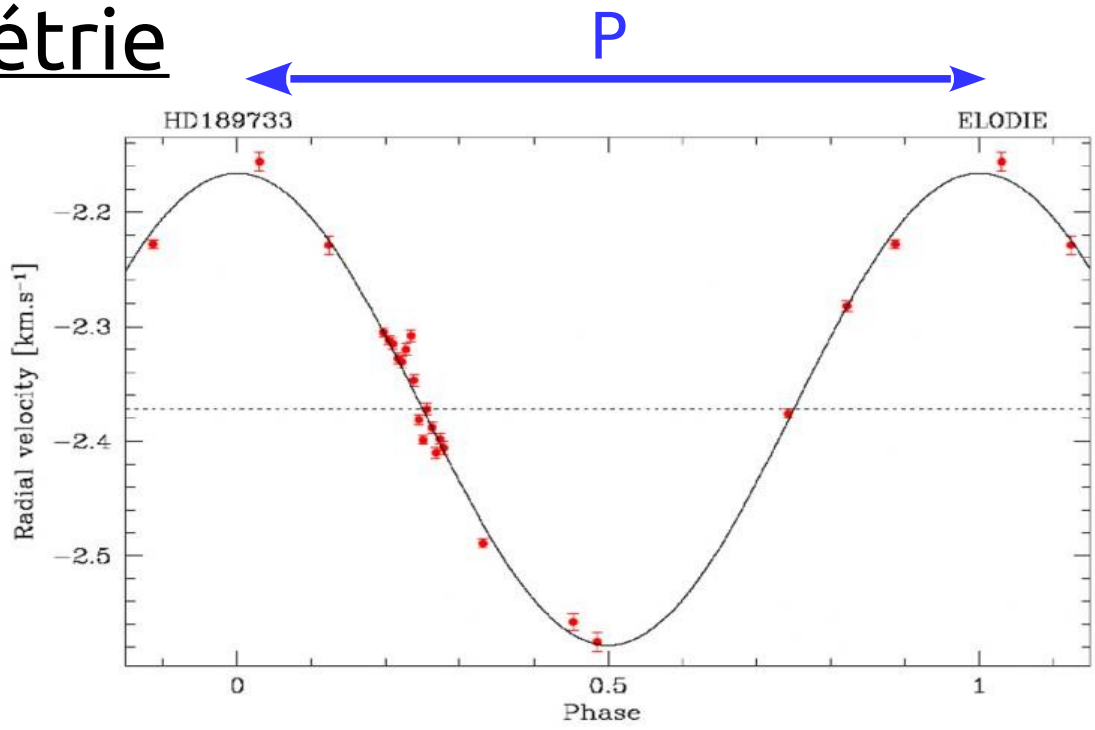




Détection d'exoplanètes

1) Méthode de vélocimétrie

Exemple : HD189733



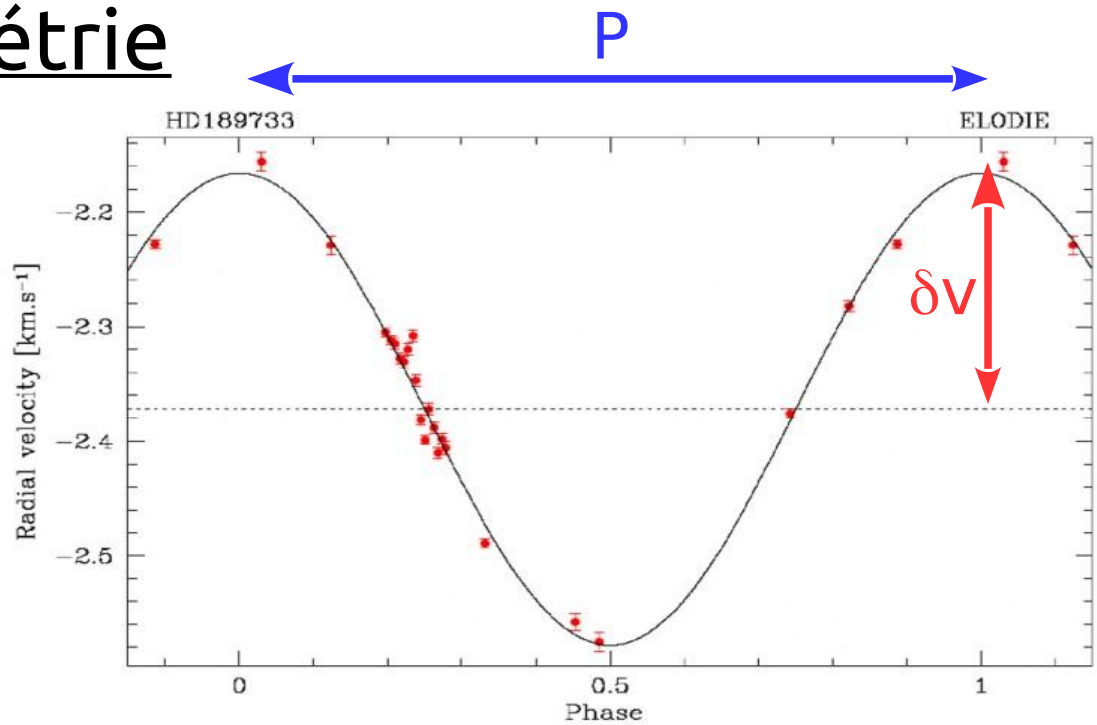
Le **rayon de l'orbite** *a* est donné par la période P, via la *Loi de Képler* :

$$P^2 = (4\pi^2/GM_*)\, a^3$$

Détection d'exoplanètes

1) Méthode de vélocimétrie

Exemple : HD189733



Le **rayon de l'orbite** *a* est donné par la période P, via la *Loi de Képler* :

$$P^2 = (4\pi^2/GM_*)\, a^3$$

La **masse $q=M_p/M_*$** est donnée par l'amplitude δv .

Plus la planète est massive, plus elle fait bouger l'étoile.

Ici, on trouve :

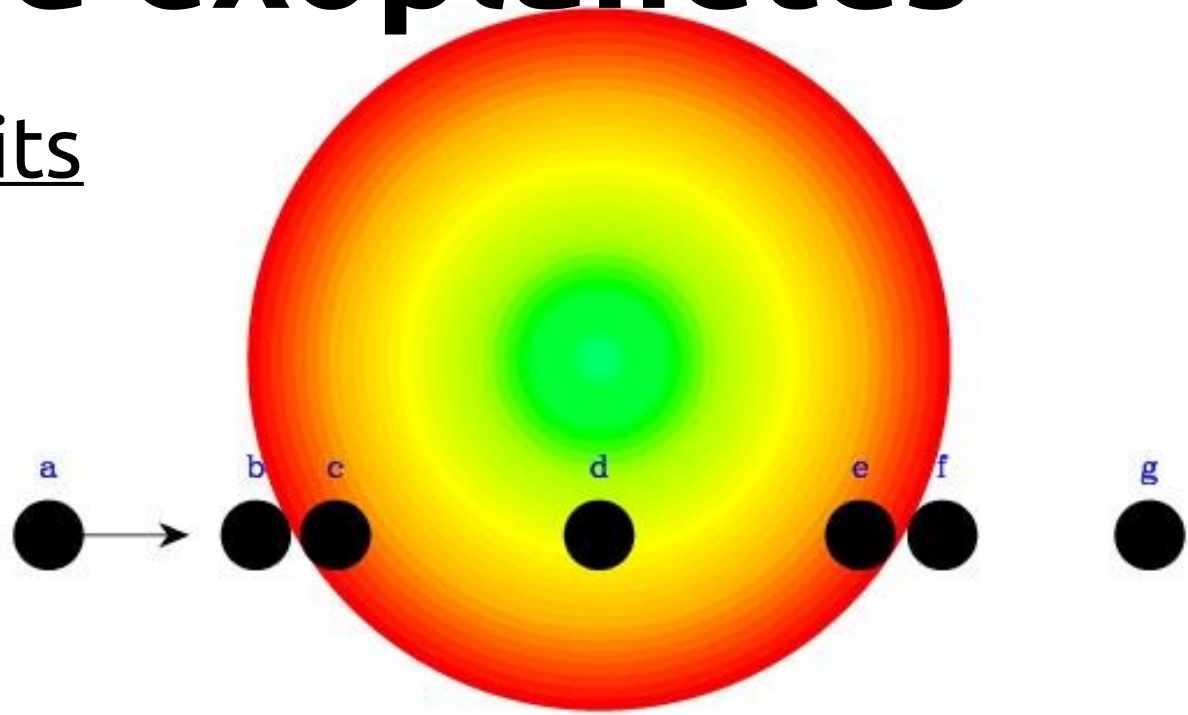
a = 0,031 UA, M_p = 1,1 $M_{Jupiter}$: c'est un Jupiter chaud !

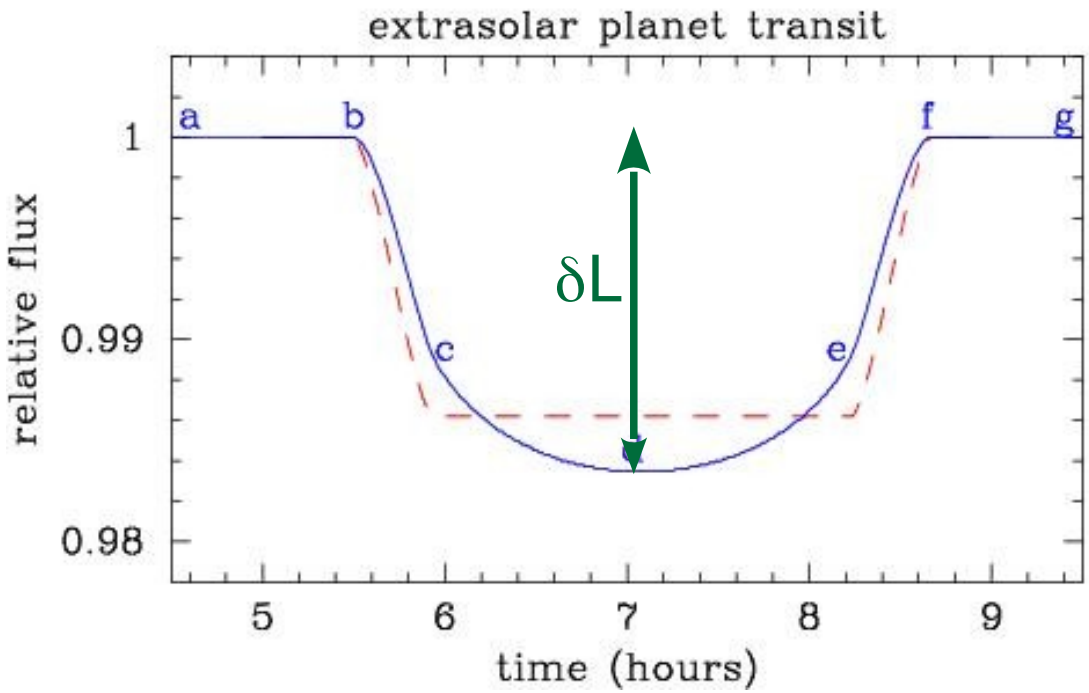
Détection d'exoplanètes

2) Méthode des transits

Quand / Si la planète passe devant son étoile, elle bloque une fraction de sa lumière.

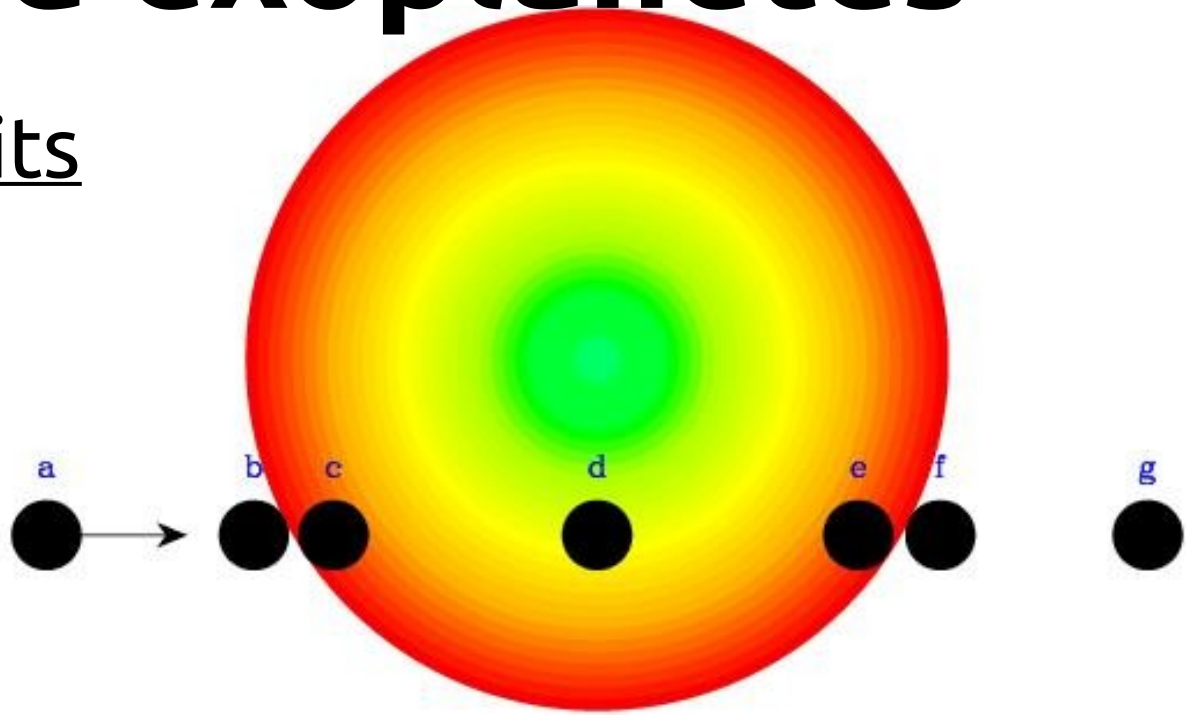
L'amplitude δL du transit donne alors le **rayon** de la planète.





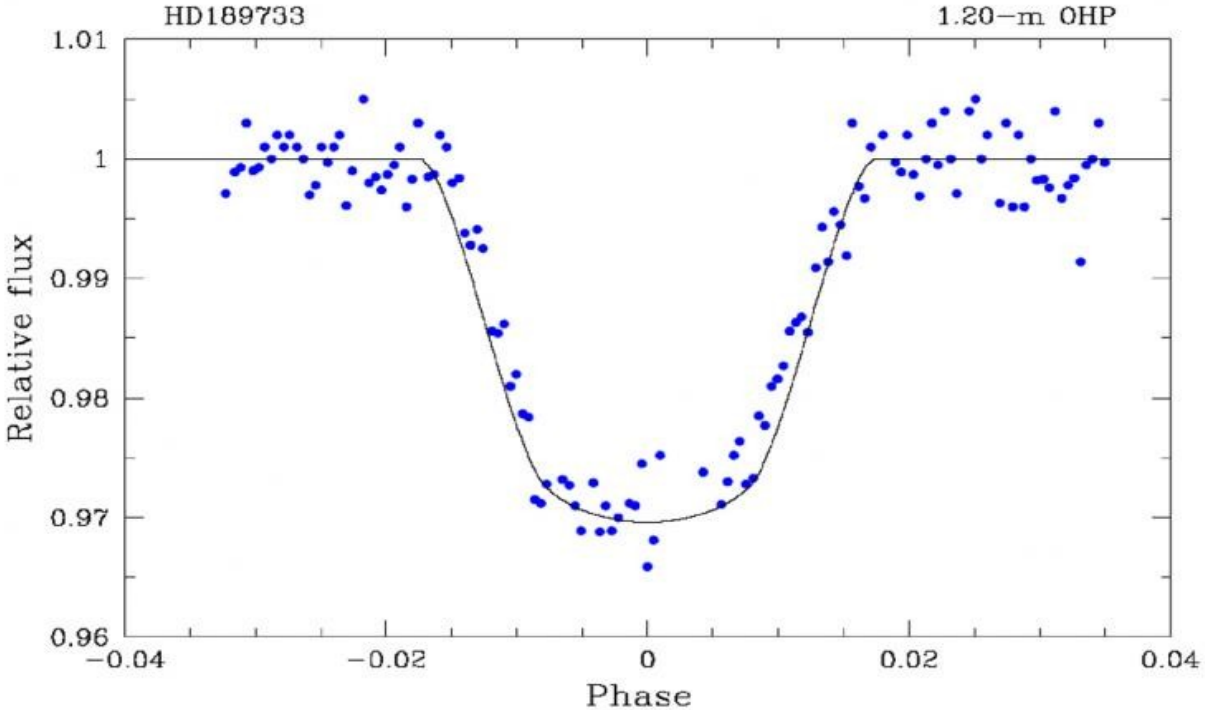
Détection d'exoplanètes

2) Méthode des transits



Quand / Si la planète passe devant son étoile, elle bloque une fraction de sa lumière.

L'amplitude δL du transit donne alors le **rayon** de la planète.



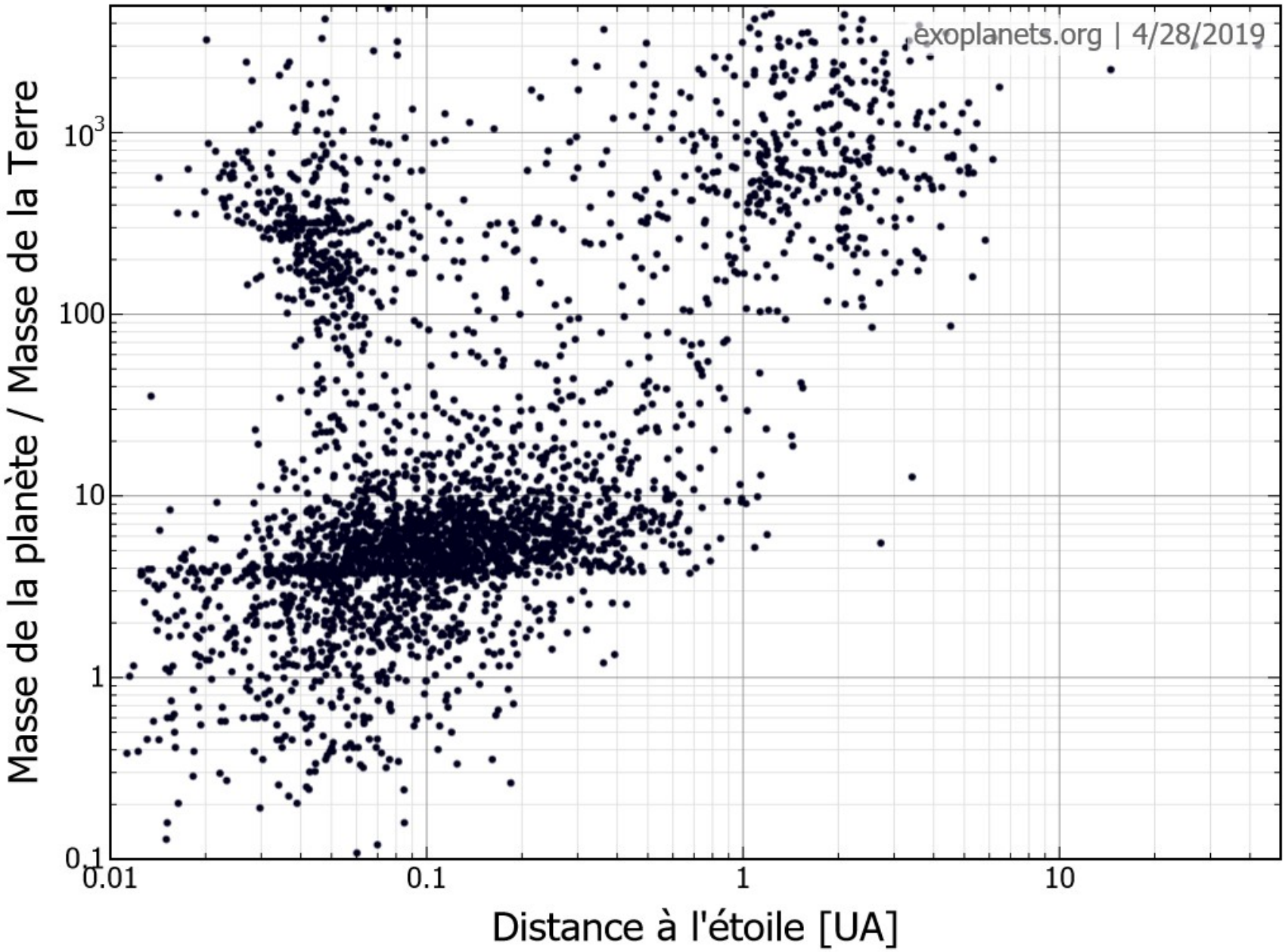
Exemple : HD189733 b

Rayon = 80000 km

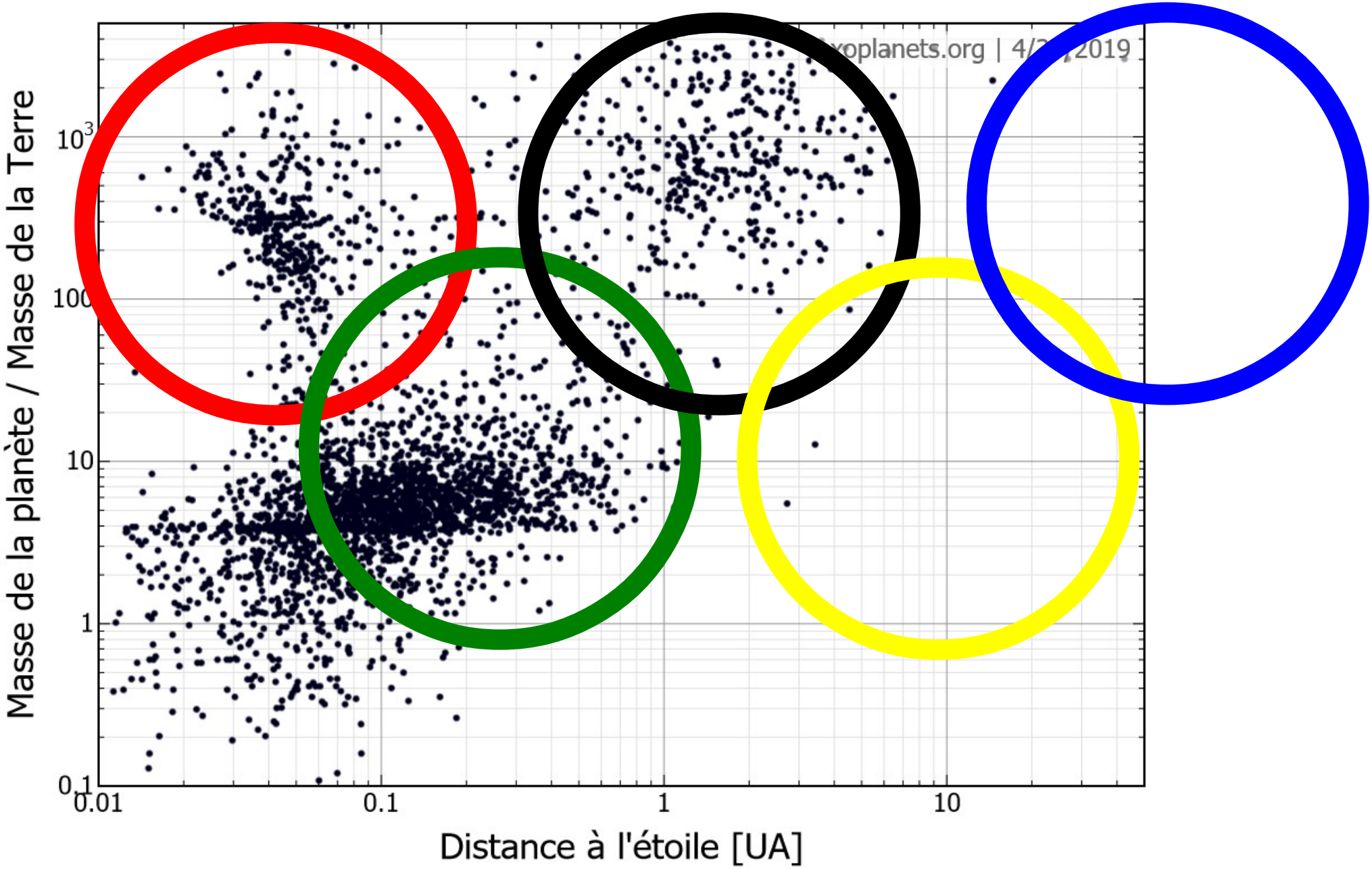
→ Densité = 1040 kg/m^3

→ Géante gazeuse.

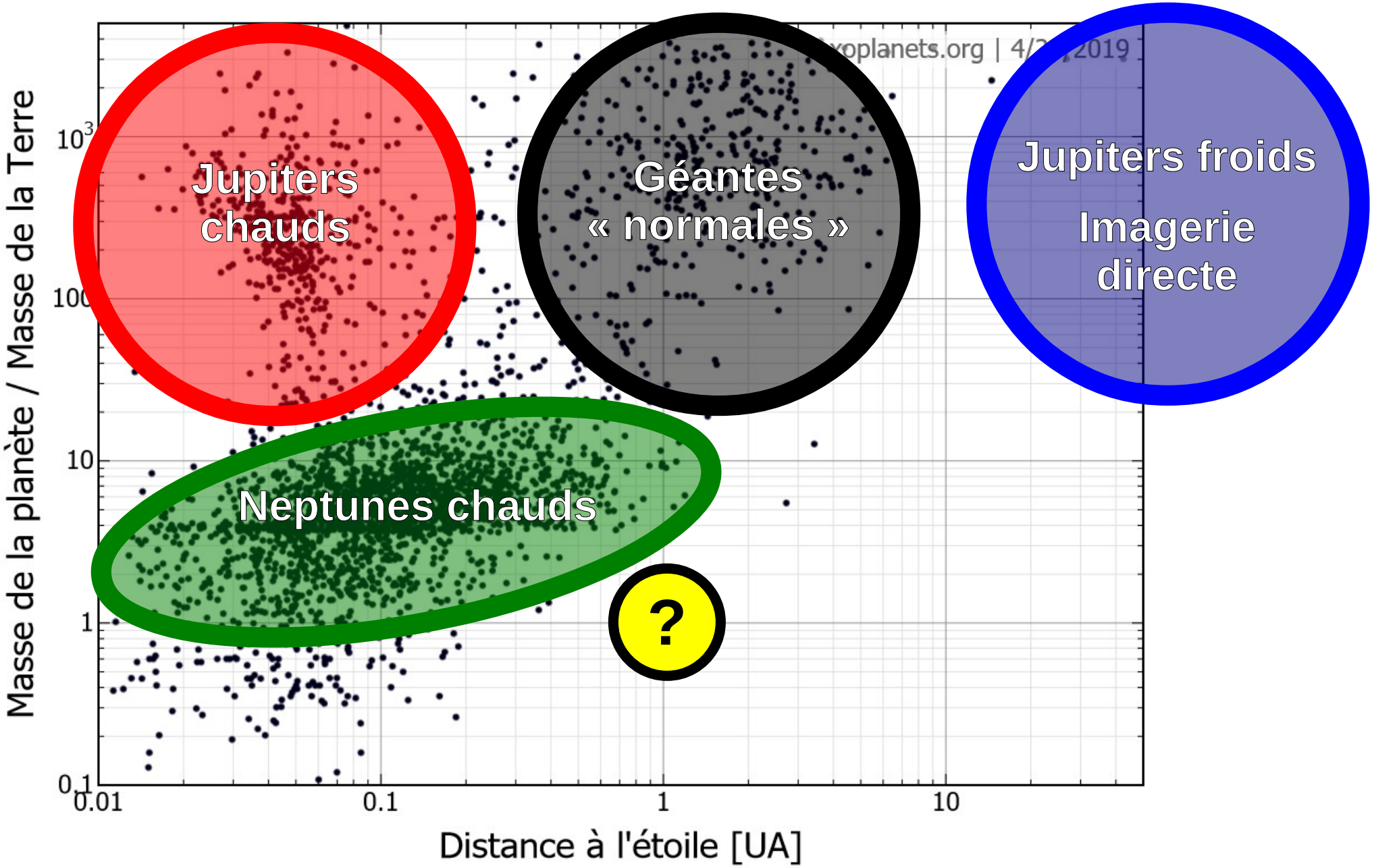
Exoplanètes



Exoplanètes



Exoplanètes



Exoplanètes

Depuis 1995, on sait que beaucoup d'autres étoiles ont des planètes : les **planètes extra-solaires** ou **exoplanètes**.

→ 5% des étoiles ont une planète géante gazeuse

→ 6,5% ont une planète de type Neptune (10 à 30 fois la masse de la Terre)

→ ~12% ont une planète de 3 à 10 fois la Terre

→ ~25% ont une planète de type terrestre

Existe-t-il une autre civilisation dans notre Voie Lactée avec laquelle communiquer ?

Café In, 23 janvier 2020

1) Exoplanètes

2) Paradoxe de Fermi

3) L'exponentielle

4) La croissance

5) Situation actuelle

6) Alors, que faire ?

Aurélien CRIDA

Formule de Drake

nombre ***N*** de civilisations, ayant développé une technologie électromagnétique, actuellement présentes dans notre galaxie:

$$N = R \times f \times L$$

R = rythme annuel moyen de formation d'étoiles de type solaire dans la Voie Lactée

f = fraction des étoiles de type solaire de la Galaxie abritant un système planétaire, abritant une vie intelligente, ayant développé des moyens de télécommunications électromagnétiques

L = durée durant laquelle ces civilisations restent détectables

$R \approx 1/\text{an}$; $L > 100$ ans ; f ???

Formule de Drake

f = fraction des étoiles de type solaire de la Galaxie abritant un système planétaire, abritant une vie intelligente ayant développé des moyens de télécommunications électromagnétiques.

$$f = f_{planètes} * n_{habitables} * f_{vie} * f_{intel} * f_{com}$$

On divise notre ignorance...

R, f_p, n_{hab} = facteurs astronomiques, mieux connus.

f_{vie}, f_{intel} = facteurs biologiques.

f_{com}, L = facteurs sociologiques...

Formule de Drake

$$N = R \times f_p \times n_{hab} \times f_v \times f_i \times f_c \times L$$

Formule de Drake

$$\boxed{N = R \times f_p \times n_{hab} \times f_v \times f_i \times f_c \times L}$$

Autre écriture : $\boxed{N = N_p \times \varepsilon}$

où $\varepsilon = f_v \times f_i \times f_c \times f_t$ (avec f_t = L / temps d'existence planète)

N_p nombre de planètes telluriques ≈ 50 000 000 000

Or $N \geq 1$, donc $\varepsilon > 0{,}000\ 000\ 000\ 02$...

Et si $\varepsilon = 0{,}000\ 000\ 000\ 04$? Alors $N>2$!

Il semble très peu probable que la vie intelligente ne soit apparue qu'une fois.

Et $N_p \times f_v >> N_p \times \varepsilon \geq 1$. Il y aurait de la vie partout !

Chronologie de la vie

14 milliards d'années :	Big Bang, naissance de l'Univers.
4,5 milliards d'années :	**Formation de la Terre.**
3,8 milliards d'années :	Première forme de vie (unicellulaire)
3,0 milliards d'années :	Photosynthèse.
1,2 milliards d'années :	1ère forme de vie pluri-cellulaire.
0,6 milliards d'années :	Explosion cambrienne.
480 millions d'années :	**Premières plantes terrestres.**
220 millions d'années :	Premiers mammifères.
65 millions d'années :	**Fin des dinosaures.**
3 millions d'années :	**Australopithèques**
400 000 ans :	**maîtrise du feu.**

Chronologie des transports

1906 : Premier vol en avion.

1909 : Blériot traverse la Manche.

1927 : Lindbergh traverse l’Atlantique.

1947 : Franchissement du mur du son.

1961 : L’homme dans l'espace.

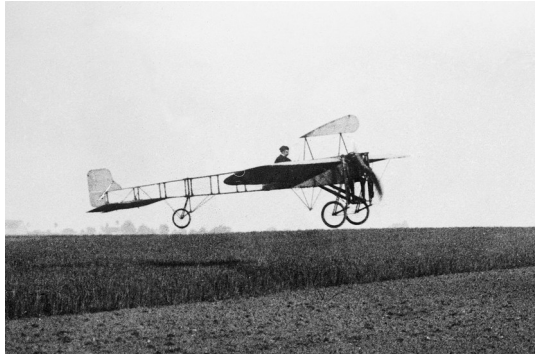
1969 : L'homme sur la Lune.

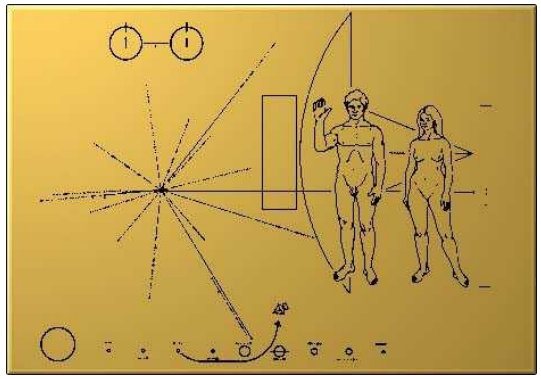
1975 : *Viking* sur Mars.

2004 : *Cassini* en orbite autour de Saturne.

2012 : *Voyager* quitte le système solaire.

2100 : L'homme conquiert la Galaxie ???





Chronologie des transports

1906 : Premier vol en avion.

1909 : Blériot traverse la Manche.

1927 : Lindbergh traverse l'Atlant

1947 : Franchissement du mur du

1961 : L'homme dans l'espace.

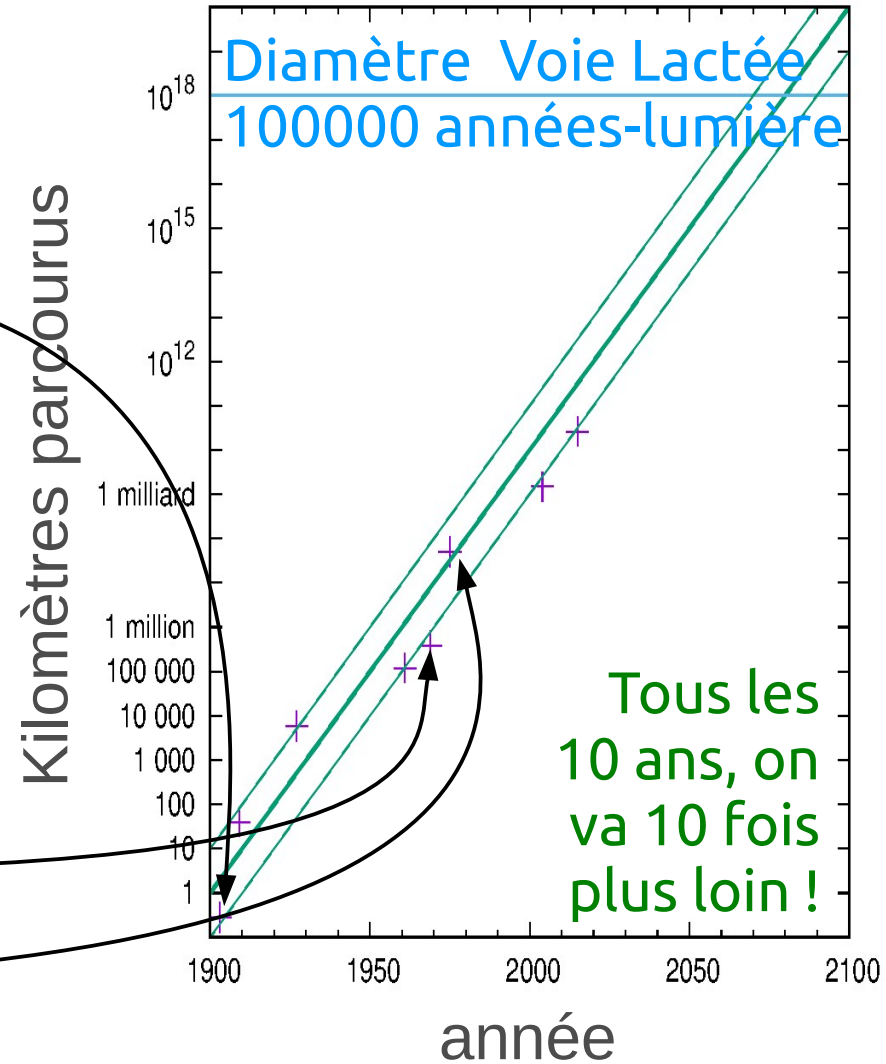
1969 : L'homme sur la Lune.

1975 : *Viking* sur Mars.

2004 : *Cassini* en orbite autour de Saturne.

2012 : *Voyager* quitte le système solaire.

2100 : L'homme conquiert la Galaxie ???



Paradoxe de Fermi

À l'échelle de l'Univers, nous aurons conquis
la Voie Lactée en un claquement de doigts,
si nous continuons notre développement.

Pourquoi parmi les 50 milliards de planètes terrestres
n'y en a-t-il pas une qui a 100 ans d'avance sur nous ?
Formée il y a 4,5000001 milliards d'années ?

Où sont-ils ?

Y a-t-il une faille dans
le raisonnement ?

Paradoxe de Fermi

À l'échelle de l'Univers, nous aurons conquis
la Voie Lactée en un claquement de doigts,
si nous continuons notre développement.

Pourquoi parmi les 50 milliards de planètes terrestres
n'y en a-t-il pas une qui a 100 ans d'avance sur nous ?
Formée il y a 4,5000001 milliards d'années ?

Où sont-ils ?

Y a-t-il une faille dans
le raisonnement ?

Café In, 23 janvier 2020

1) Exoplanètes

2) Paradoxe de Fermi

3) L'exponentielle

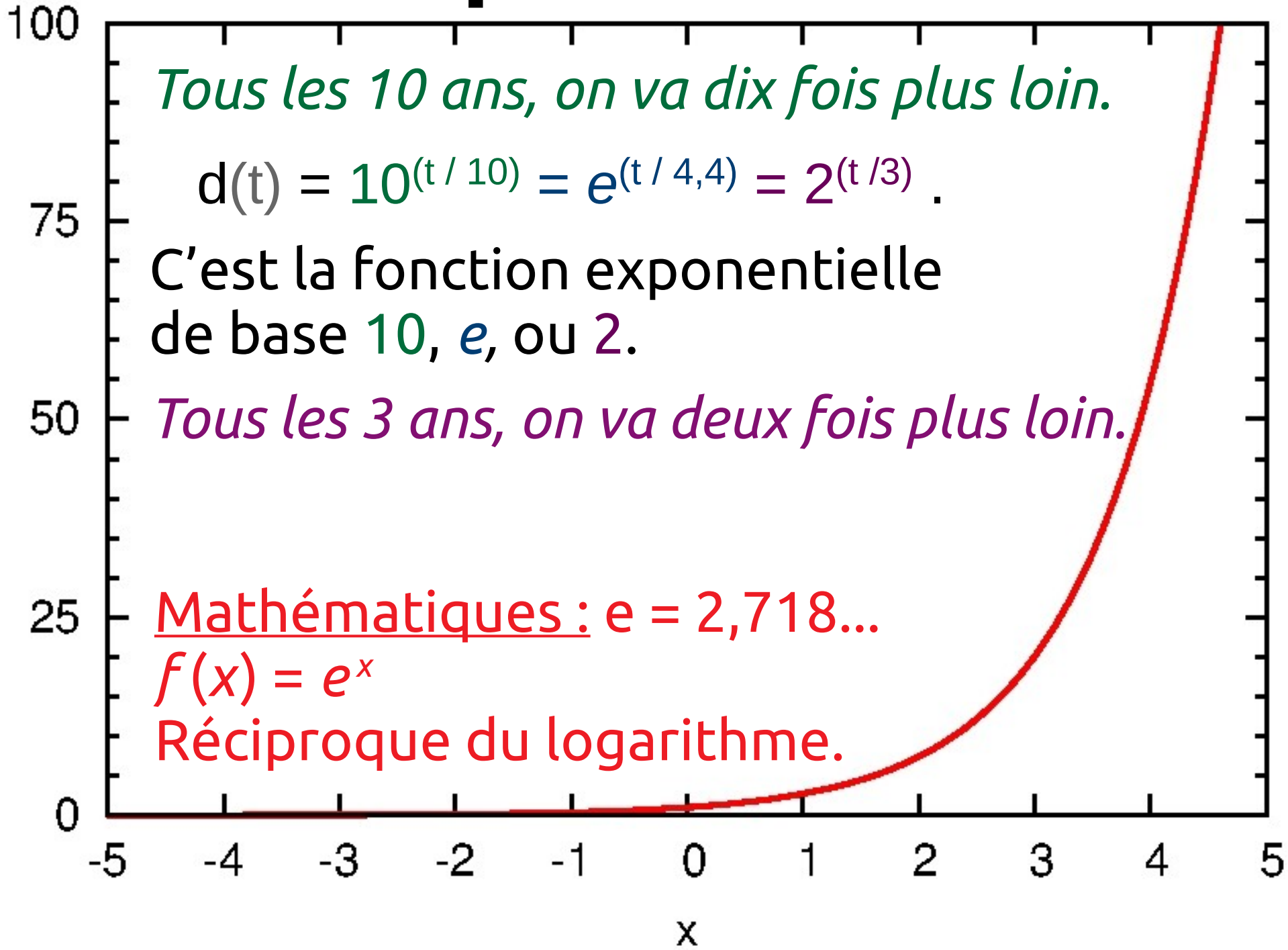
4) La croissance

5) Situation actuelle

6) Alors, que faire ?

Aurélien CRIDA

L'exponentielle



Tous les 10 ans, on va dix fois plus loin.

$d(t) = 10^{(t / 10)} = e^{(t / 4,4)} = 2^{(t /3)}$.

C'est la fonction exponentielle de base 10, *e*, ou 2.

Tous les 3 ans, on va deux fois plus loin.

Mathématiques : e = 2,718...

$f(x) = e^x$

Réciproque du logarithme.

L'exponentielle

<u>Rappel :</u> $q^{a+b} = q^a \times q^b$.
→ Passer de x à x+1 = multiplier par la base q.

<u>Suite géométrique :</u> $u_{n+1} = q \times u_n$

→ $u_n = q^n \times u_0$

Exemple : q = 2 ; u_0 =1.
Comptons ensemble !

L'exponentielle

<u>Rappel :</u> $q^{a+b} = q^a \times q^b$.
→ Passer de x à $x+1$ = multiplier par la base q.

<u>Suite géométrique :</u> $u_{n+1} = q \times u_n$

→ $u_n = q^n \times u_0$

Exemple : $q = 2$; $u_0 = 1$.
Comptons ensemble !

$u_0 = 1$; $u_1 = 2$; $u_2 = 4$; $u_3 = 8$; $u_4 = 16$; $u_5 = 32$;
$u_6 = 64$; $u_7 = 128$; $u_8 = 256$; $u_9 = 512$; $u_{10} = 1024$;
$u_{11} = 2048$; $u_{12} = 4096$; $u_{13} = 8192$; $u_{14} = 16384$;
$u_{15} = 32768$; $u_{16} = 65536$; $u_{17} = 131072$;
$u_{18} = 262144$; $u_{19} = 524288$; $u_{20} = 1\,048\,572$...

Échec et maths !

Le roi Belkib voulut le récompenser Sissa, inventeur du jeu d'échecs. Il ne demanda qu'1 gain de riz sur la première case, 2 sur la deuxième, 4 sur la troisième, et ainsi de suite...

2^{n-1} grains sur la $n^{\text{ième}}$ case...

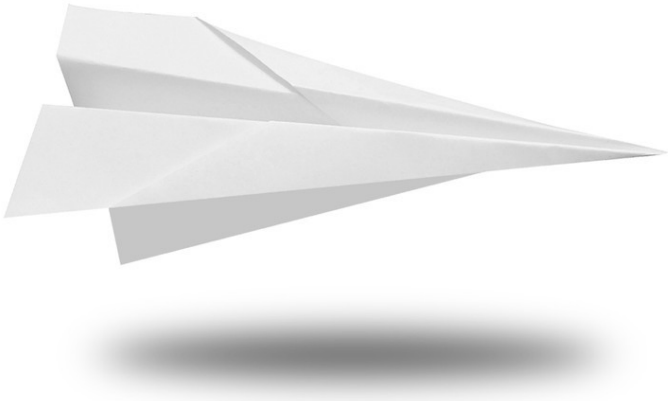
2^{63} = 9 223 372 036 854 775 808

= 500 fois la production mondiale de riz de 2012, ou 15 fois le PIB mondial de 2014, au prix du riz.

Plions, plions !

Prenons une simple feuille de papier.
Chacun-e la plie en 2, puis la passe à son-sa voisin-e, qui la replie en 2 et la fait passer.

Quelle sera l'épaisseur de la feuille au fond de la salle ?



Plions, plions !

Prenons une simple feuille de papier.
Chacun-e la plie en 2, puis la passe à son-sa voisin-e, qui la replie en 2 et la fait passer.

Quelle sera l'épaisseur de la feuille au fond de la salle ?

Impossible de plier en 2 une feuille A3 + de 8 fois !

Si on pouvait la plier 42 fois, son épaisseur serait la distance Terre-Lune !

(0,1mm $\times 2^{42}$ = ~400 000 km)

Doublage – Exponentielle

Impossible de compter jusqu' à 2^{15}...

Impossible de fournir les grains de riz...

Impossible de plier une feuille plus de 7 fois...

→ les processus exponentiels atteignent très vite leurs limites.

Chaque nouvelle étape représente autant que tout ce qui a été fait avant : on double le nombre de plis, de grains, d'effort obtenus jusqu'alors...

+ 1 étape = x 2 = somme de tout le passé.

Café In, 23 janvier 2020

1) Exoplanètes

2) Paradoxe de Fermi

3) L'exponentielle

4) La croissance

5) Situation actuelle

6) Alors, que faire ?

Aurélien CRIDA

Pourcentage

Augmentation par pourcentage = suite géométrique (r% → q=1+r/100).

Augmentation proportionnelle à ce qu'on a déjà, donc ça s'amplifie, c'est *exponentiel*.

<u>Règle des 70 :</u>

+ r% par an → ×2 tous les ~(70/r) ans.

→ Raisonnons en temps de doublement.

<u>Ex :</u> Nos livrets A : 0,5% par an → ×2 en 140 ans.

Fonds de pension à 14% par an → ×2 en 5 ans.

Pourcentage

Ex : 2% de croissance (du PIB) par an.

100 → 102 → 104,04 → 106,16 → 108,24 → 110,41 → 112,62 → 114,87 → 117,17 → 119,51 → 121,90 = 21,9% en 10 ans

→ 200% (x 2) en 35 ans (règle des 70).

En 100 ans ? 100 → 121,9 → 148,6 → 181 → 221 → … → 724,46 !

En 200 ans ? x 50.

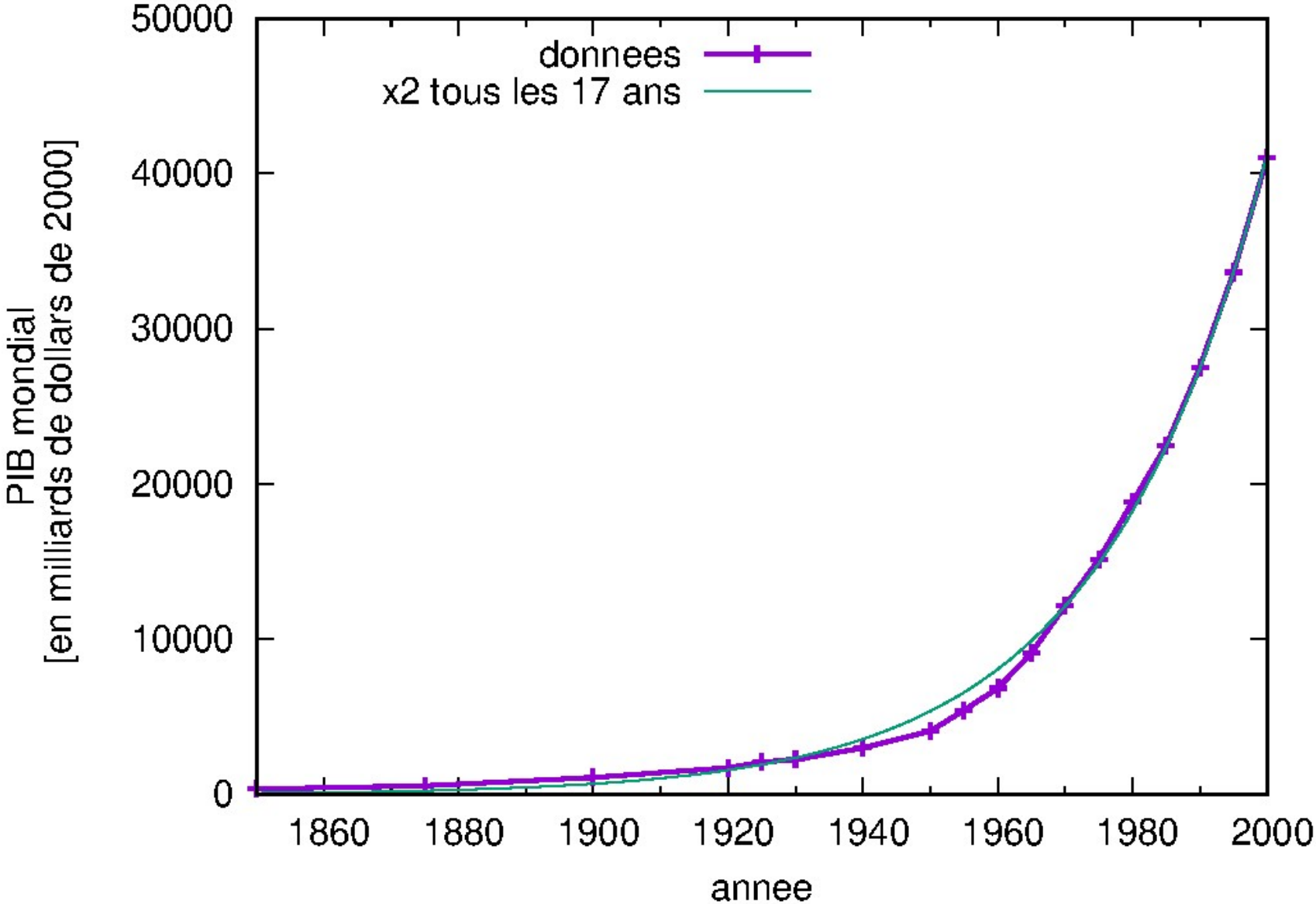
En 350 ans ? x 1000.

En 1000 ans ? x 400 millions.

En 1047 ans → x 1 milliard !

Croissance économique

Temps de doublement du PIB mondial : 17 ans !



Croissance économique

PIB mondial en 1900 = 1100 milliards de $

En 2000 = 41000 milliards de $ (x40 !).

En 2018 = 84000 milliards de $ (~ x2 en 17 ans).

Autrement dit, **100 %** du PIB de 1900 équivalent à **2,5%** du PIB de 2000 ou **1,3 %** du PIB de 2018 !

Croissance économique

PIB mondial en 1900 = 1100 milliards de $

En 2000 = 41000 milliards de $ (x40 !).

En 2018 = 84000 milliards de $ (~ x2 en 17 ans).

Autrement dit, **100 %** du PIB de 1900 équivalent à **2,5%** du PIB de 2000 ou **1,3 %** du PIB de 2018 !

x40 chaque siècle ?

Alors PIB mondial = 10 000 $ en 1400, pour ~350 millions d'habitants → ???

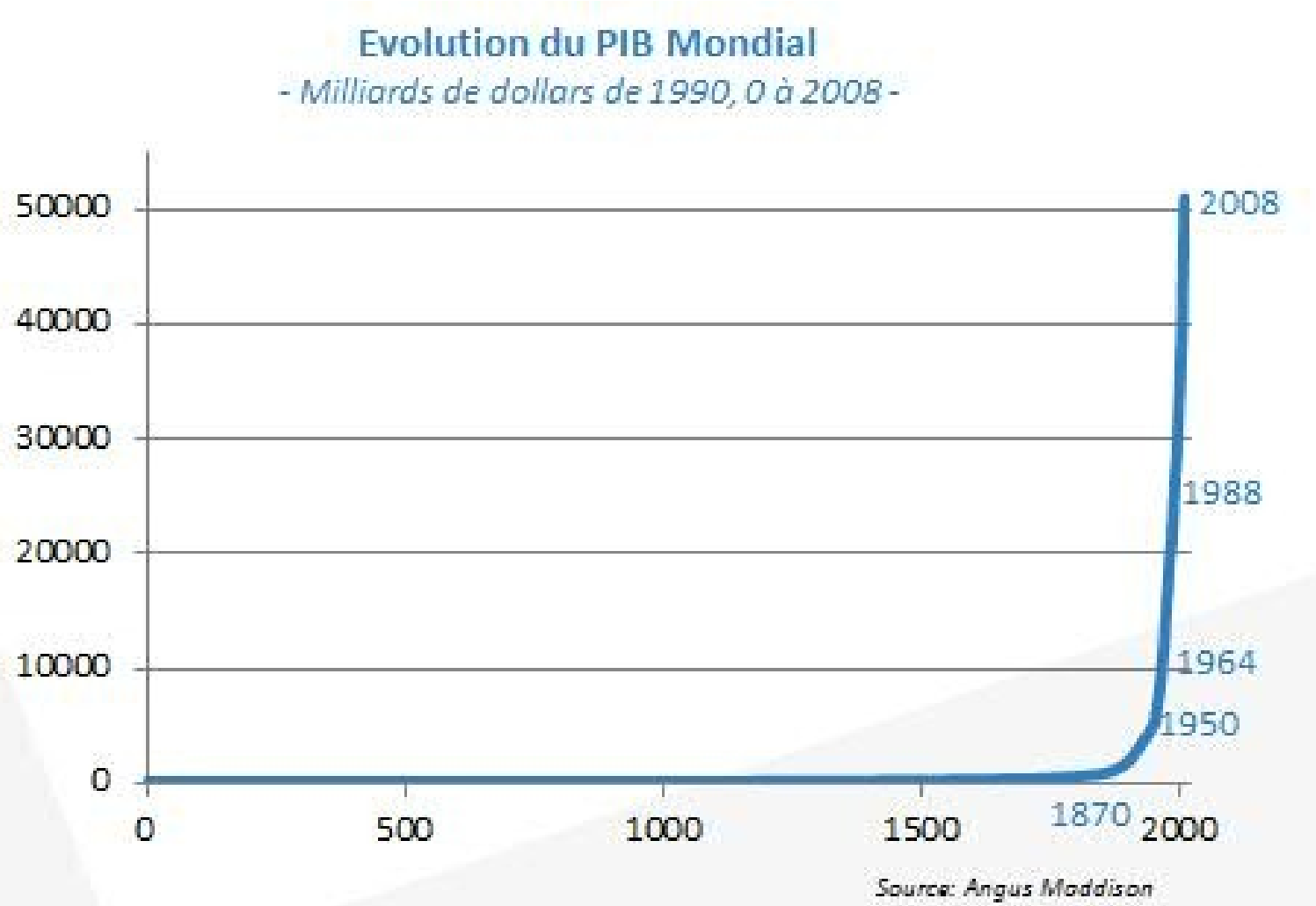
Et 6,25 $ en 1200...

Croissance économique

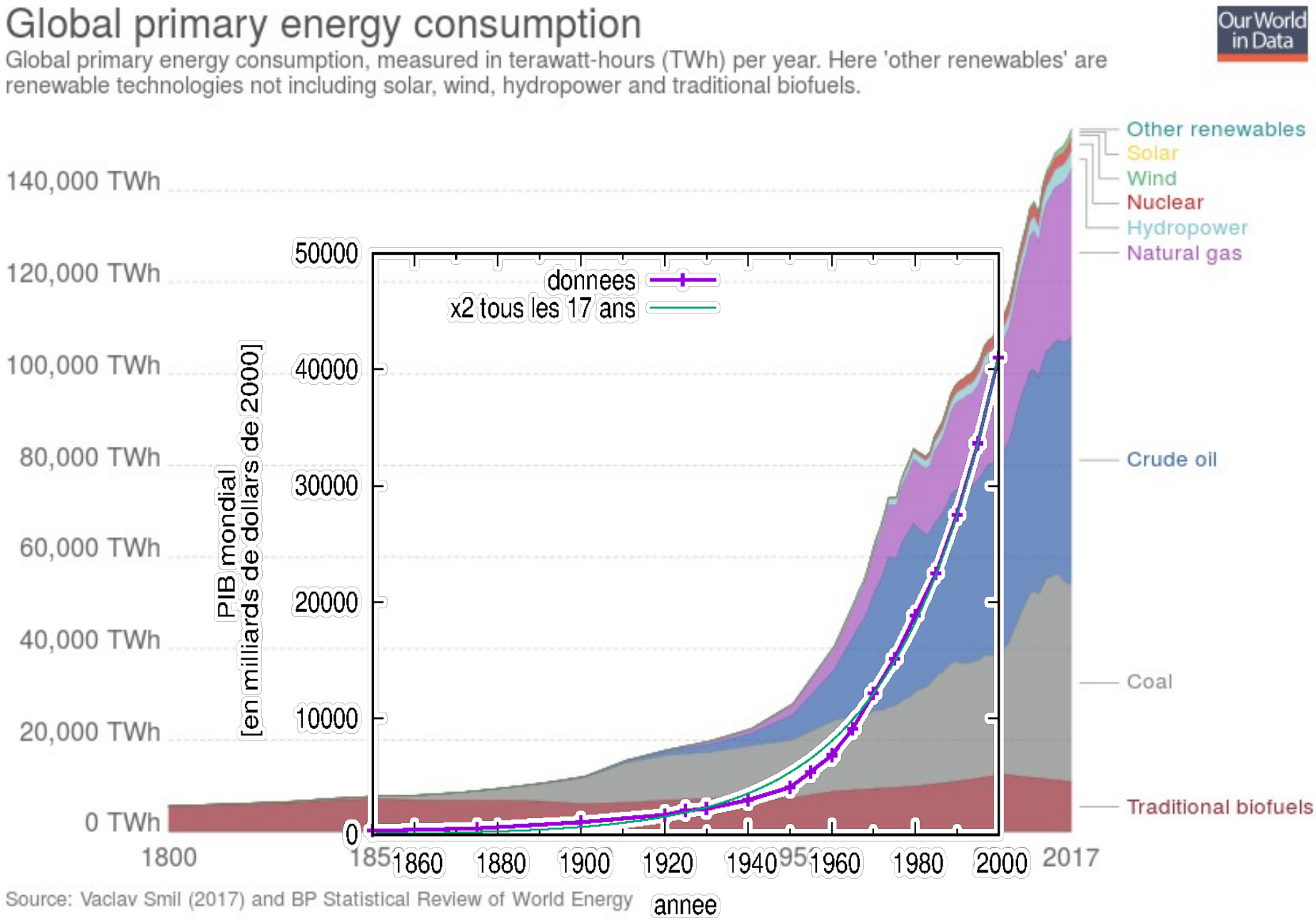
Phénomène nouveau.
Le PIB stagnait avant la révolution industrielle.

Est-il durable ?

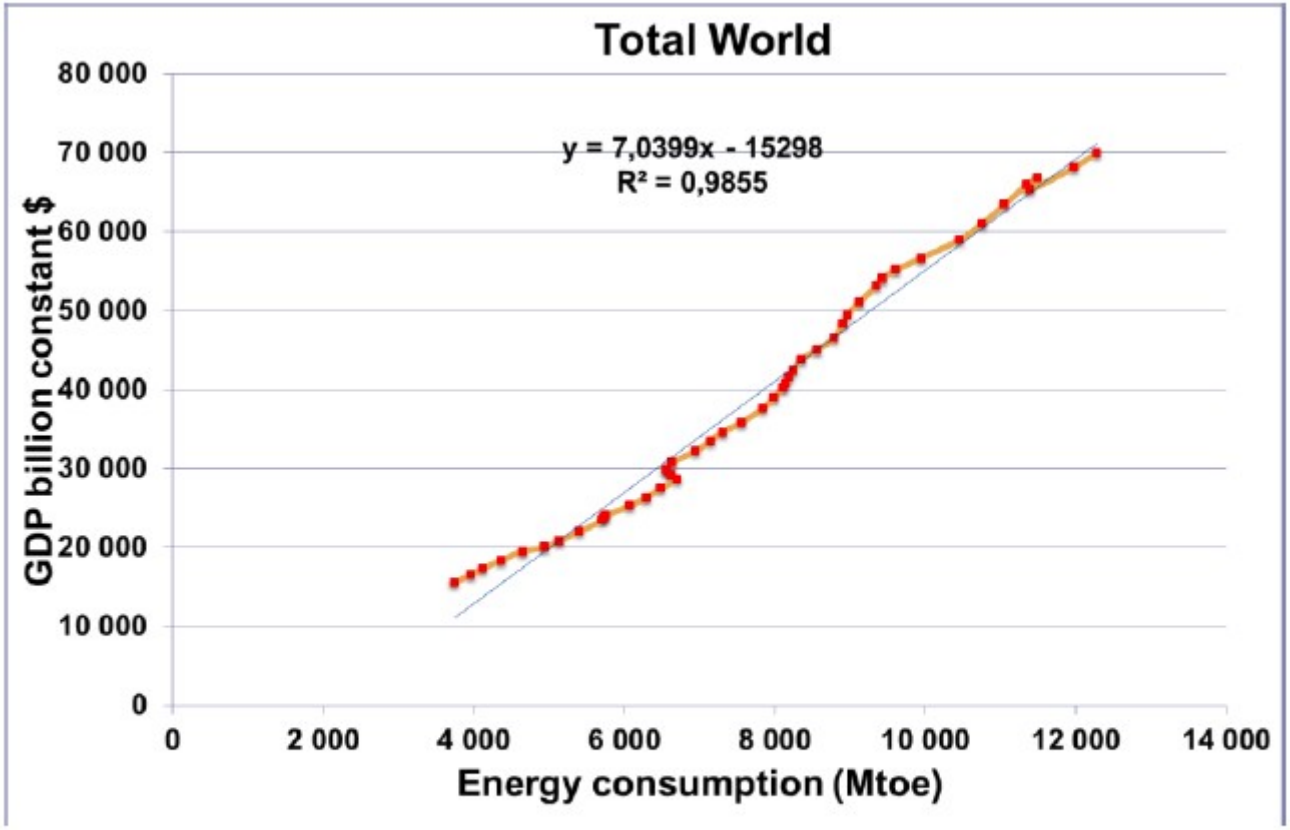
Qu'est-ce que la croissance implique et nécessite ?



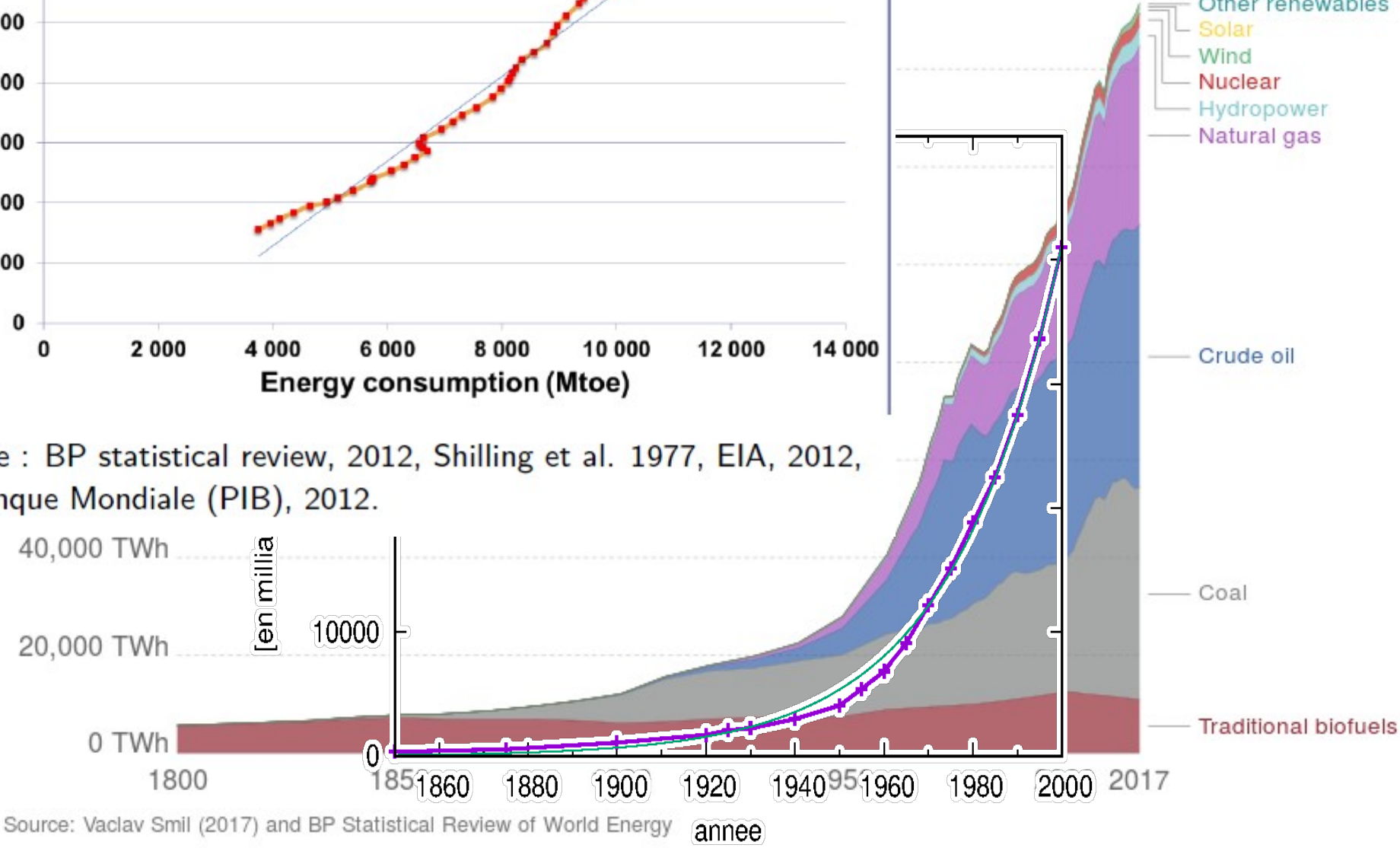
Croissance & énergie



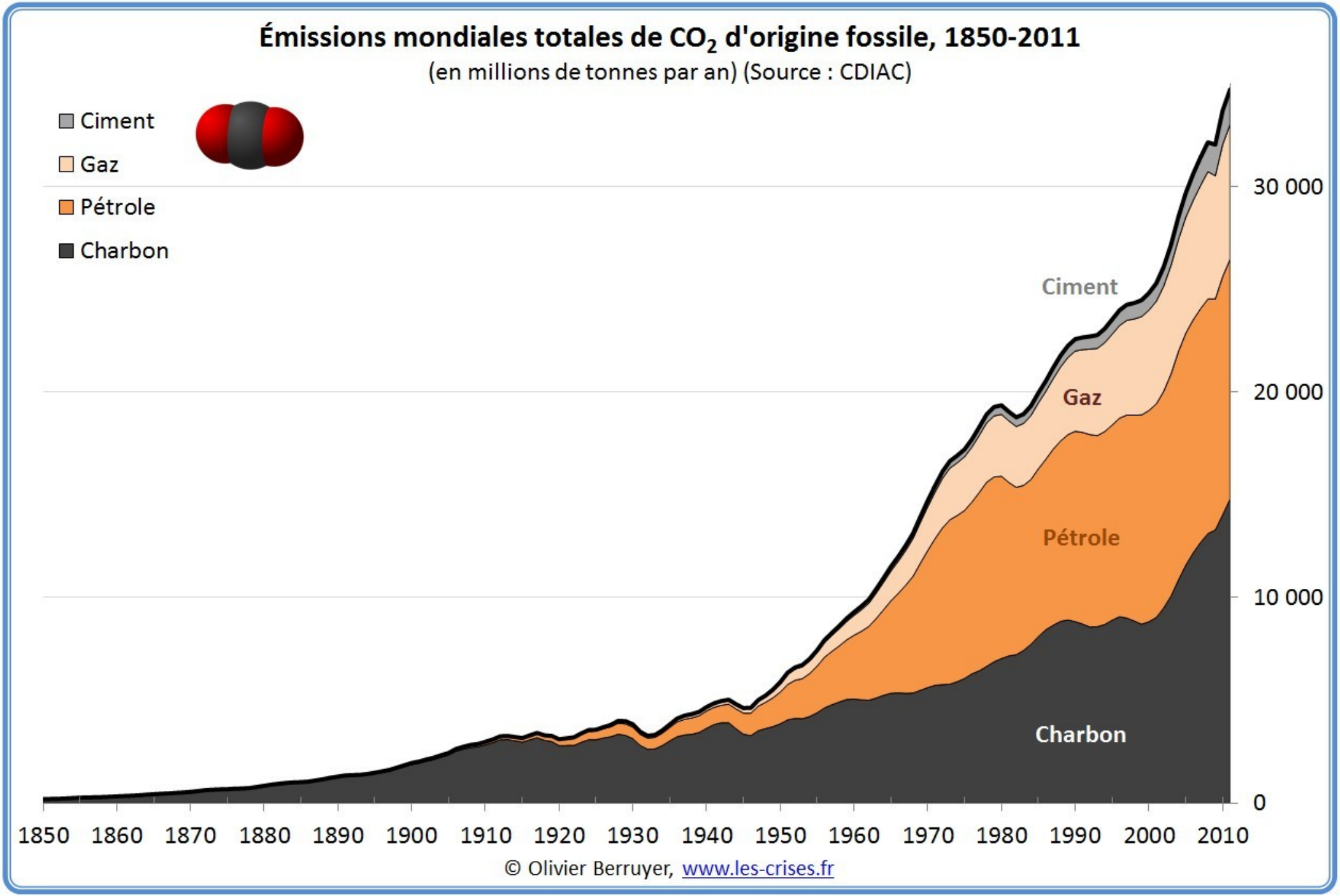
Croissance & énergie



Source : BP statistical review, 2012, Shilling et al. 1977, EIA, 2012, et Banque Mondiale (PIB), 2012.



Croissance et CO_2



Café In, 23 janvier 2020

1) Exoplanètes

2) Paradoxe de Fermi

3) L'exponentielle

4) La croissance

5) Situation actuelle

6) Alors, que faire ?

Aurélien CRIDA

Urgence ?

Un nénuphar sur un étang double chaque jour le nombre de ses feuilles. En 30 jours, il a couvert la moitié de l'étang.

Combien de temps lui faut-il pour couvrir tout l'étang ?

2 mois ?

Urgence ?

Un nénuphar sur un étang double chaque jour le nombre de ses feuilles. En 30 jours, il a couvert la moitié de l'étang.

Combien de temps lui faut-il pour couvrir tout l'étang ?

~~2 mois ?~~ 1 mois ! 31 jours.

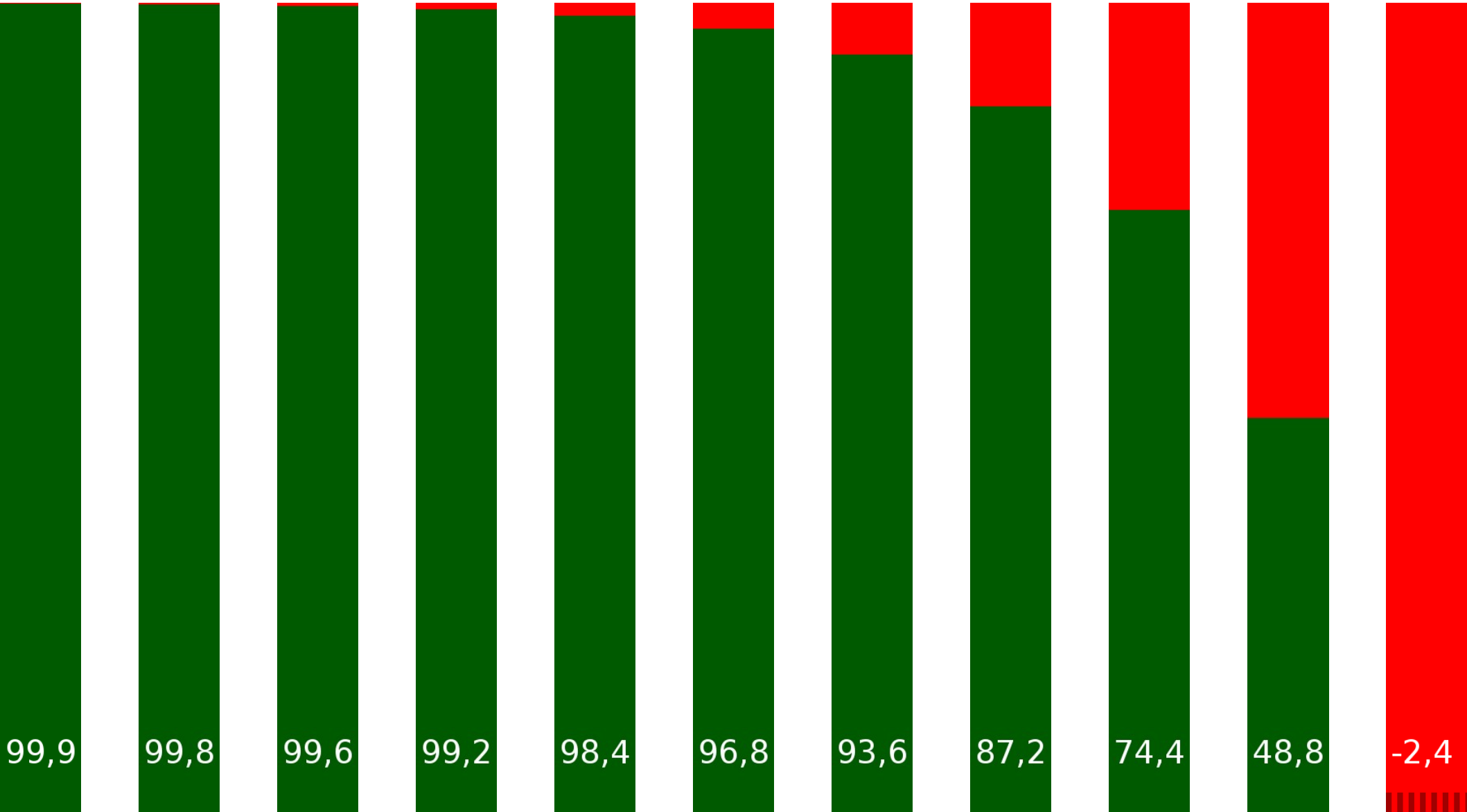
Le 29 du mois, une petite feuille a dit : « Hey, si on continue ainsi, on va recouvrir tout l'étang et l'asphyxier ! Il faut faire quelque chose. »

Les autres ont répondu :
« Mais non, il y a encore plein de place, les 3/4 de l'étang sont libres ! »

Le 30, elle a dit :
« Non mais là ça craint : si on continue comme ça on est fichus demain ! »
« Arrête de nous embêter, on a toujours doublé notre nombre
et ça s'est toujours bien passé, alors hein...
Make the Nénuphar Great Again ! »

Urgence ?

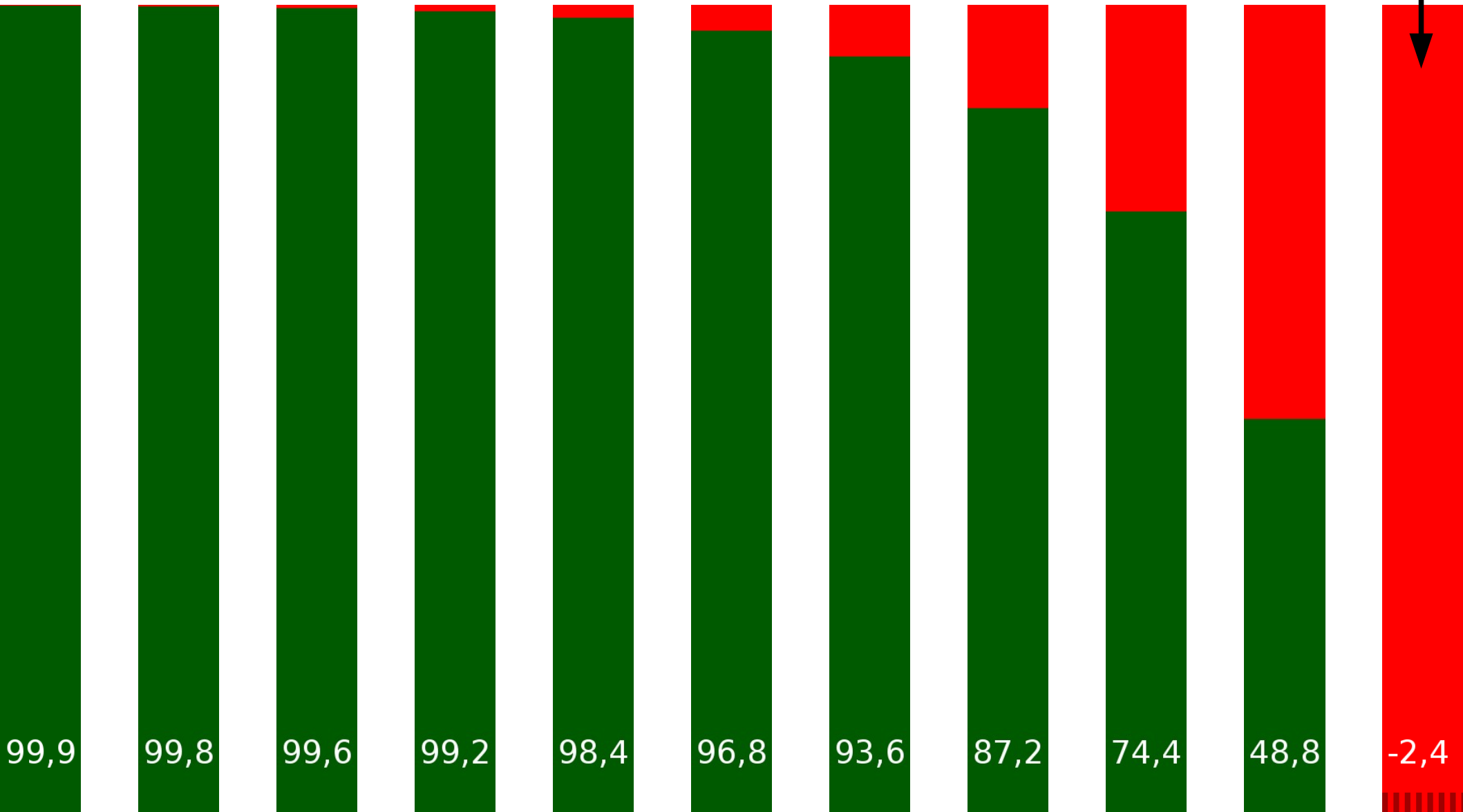
Pourquoi est-ce critique maintenant et ne peut-on pas continuer ?



Urgence ?

Pourquoi est-ce critique maintenant et ne peut-on pas continuer ?

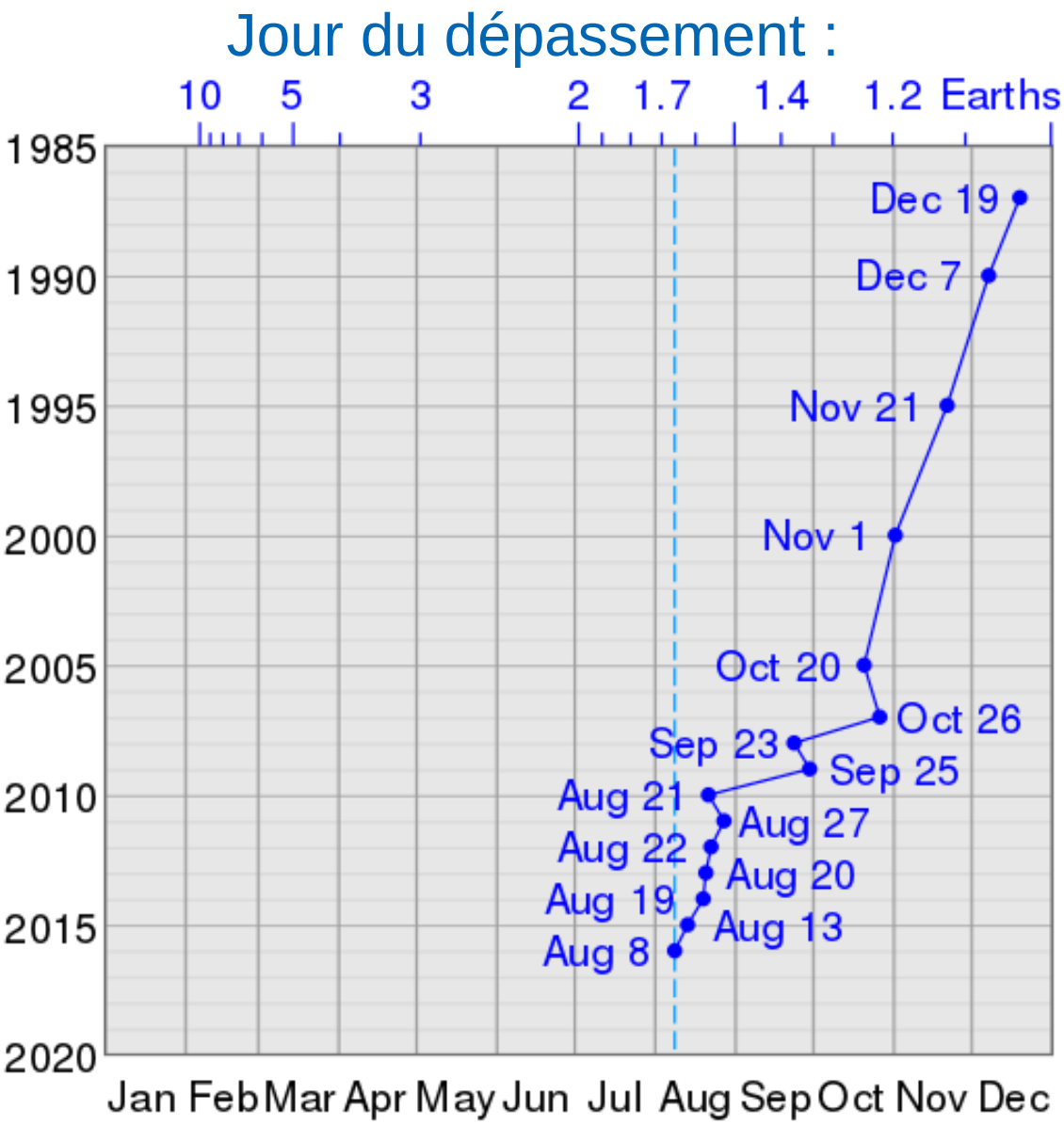
Parce qu'on est le 31e jour, on est là.

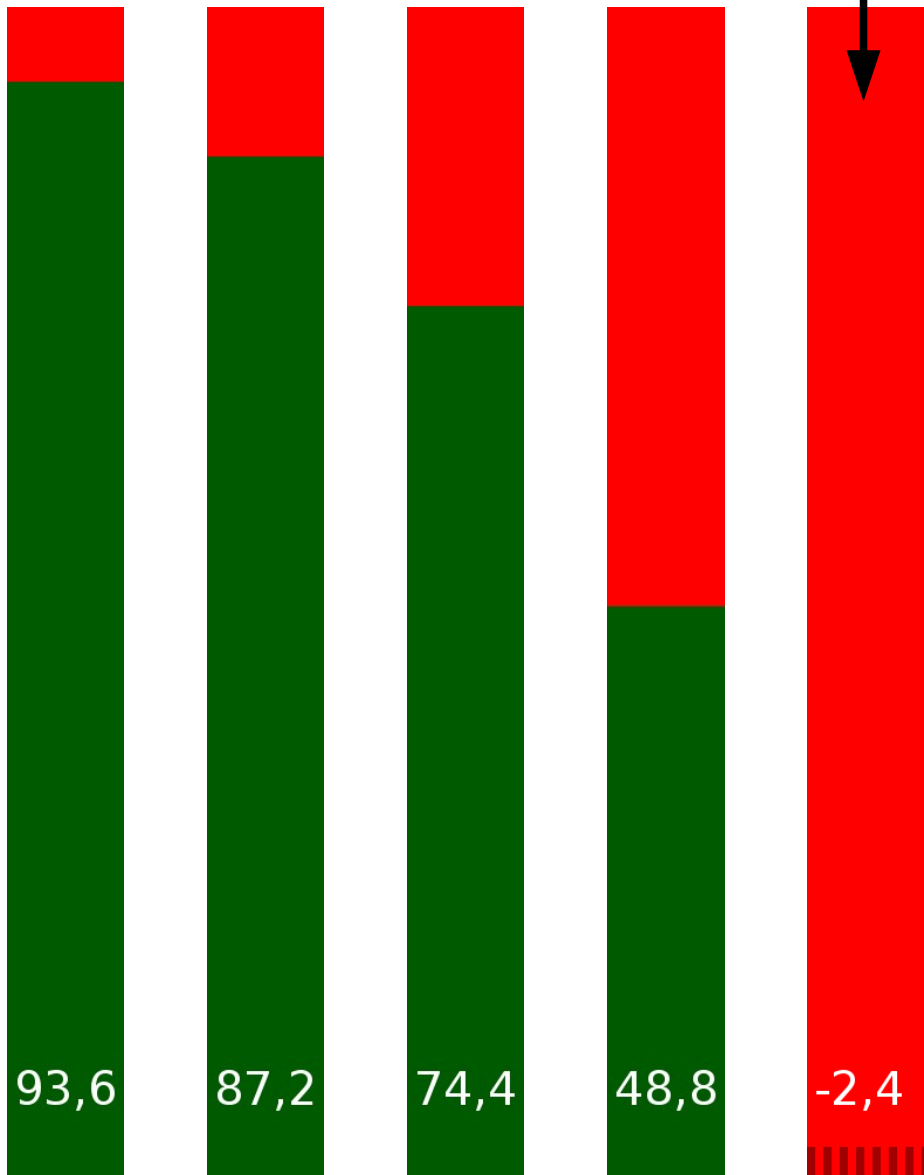


Urgence ?

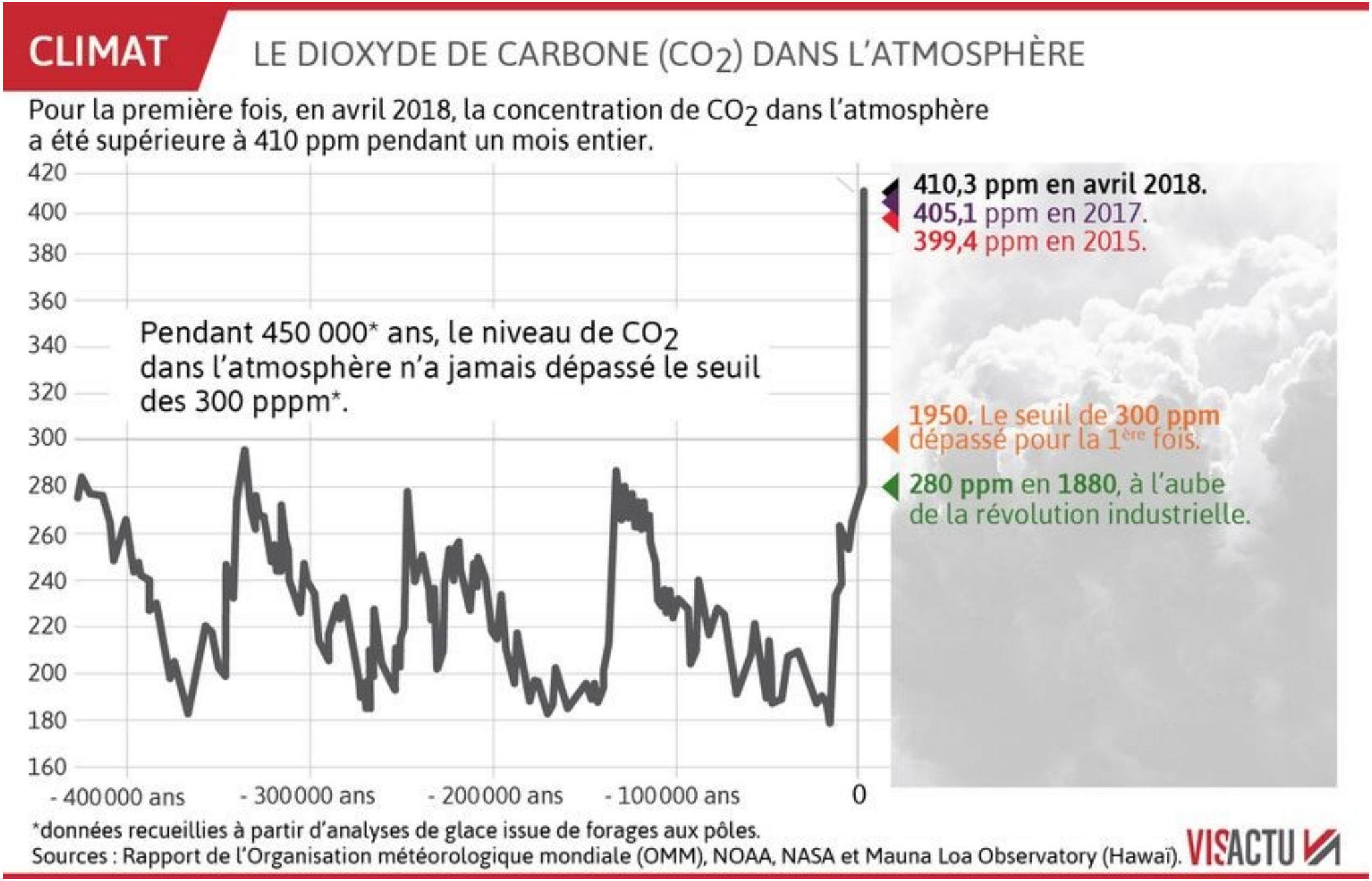
Pourquoi est-ce critique maintenant et ne peut-on pas continuer ?

Parce qu'on est le 31e jour, on est là.





Urgence ?


CLIMAT
LE DIOXYDE DE CARBONE (CO_2) DANS L'ATMOSPHÈRE
Pour la première fois, en avril 2018, la concentration de CO_2 dans l'atmosphère a été supérieure à 410 ppm pendant un mois entier.
420
400
380
360
340
320
300
280
260
240
220
200
180
160
Pendant 450 000* ans, le niveau de CO_2 dans l'atmosphère n'a jamais dépassé le seuil des 300 pppm*.
410,3 ppm en avril 2018.
405,1 ppm en 2017.
399,4 ppm en 2015.
1950. Le seuil de 300 ppm dépassé pour la 1ère fois.
280 ppm en 1880, à l'aube de la révolution industrielle.
- 400000 ans
- 300000 ans
- 200000 ans
- 100000 ans
0
*données recueillies à partir d'analyses de glace issue de forages aux pôles.
Sources : Rapport de l'Organisation météorologique mondiale (OMM), NOAA, NASA et Mauna Loa Observatory (Hawaï).
VISACTU

Café In, 23 janvier 2020

1) Exoplanètes

2) Paradoxe de Fermi

3) L'exponentielle

4) La croissance

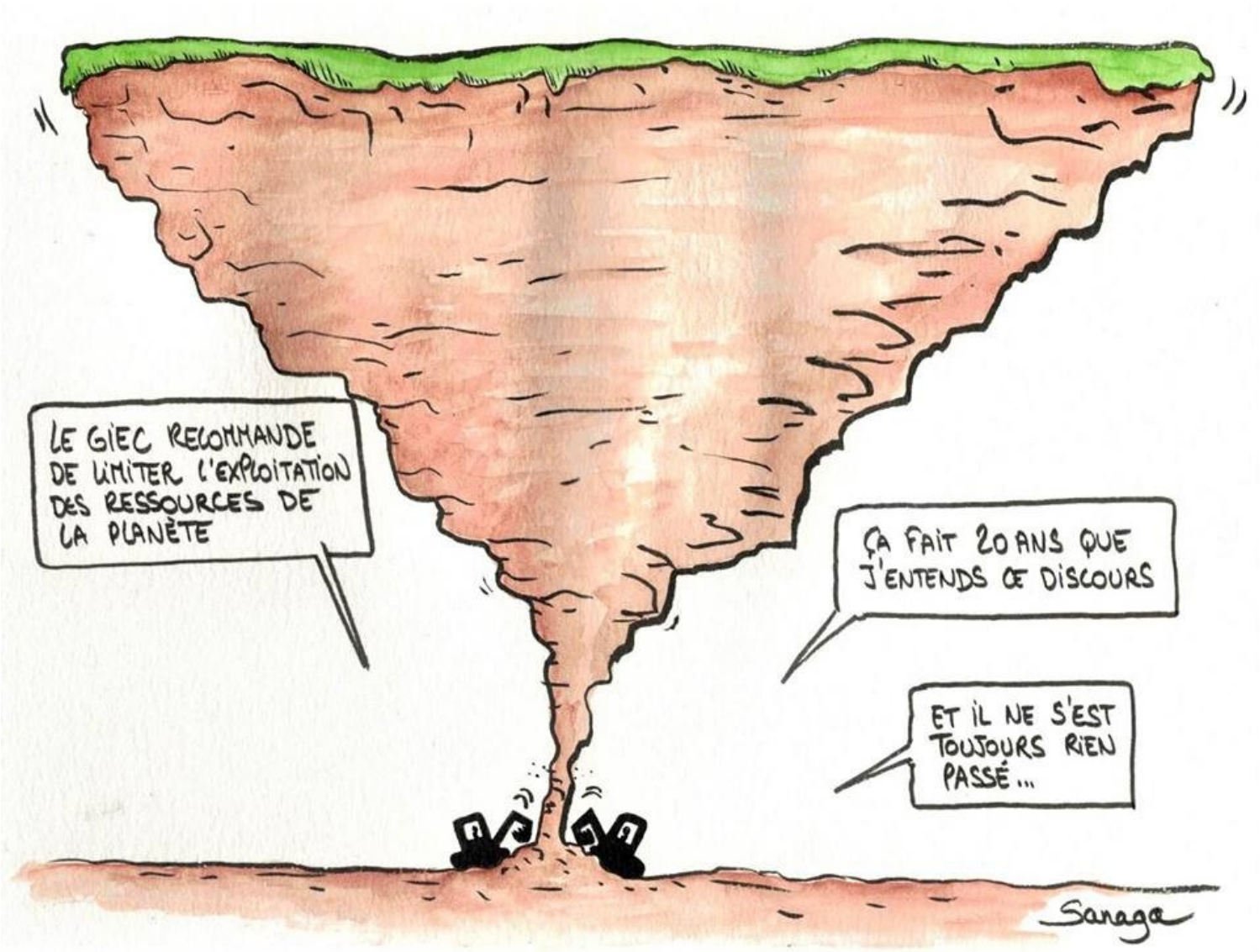
5) Situation actuelle

6) Alors, que faire ?

Aurélien CRIDA

Que faire ?

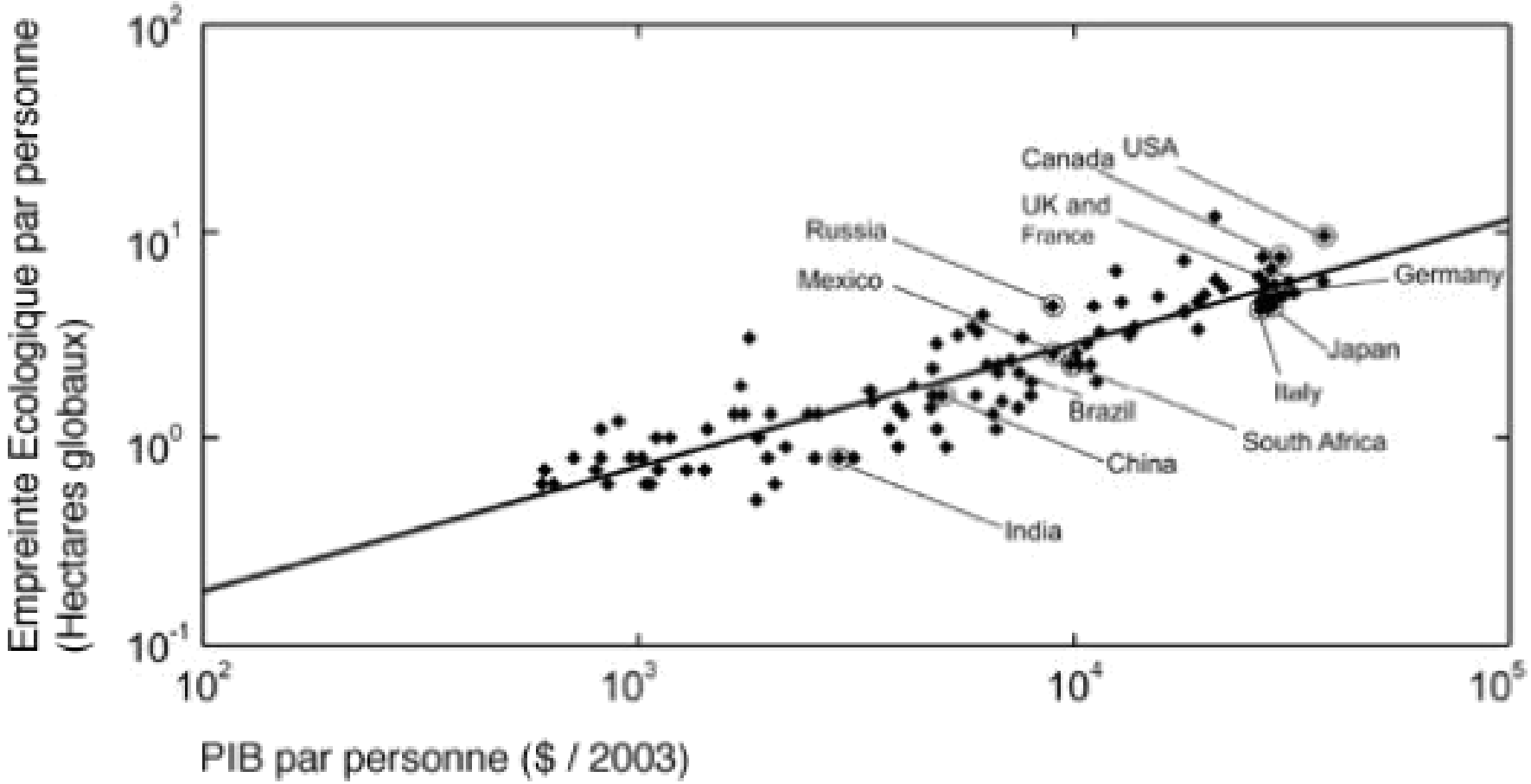
a) On continue, on trouvera une solution.
« Jusqu'ici, tout va bien. »



Réduire nos émissions de CO_2

Peut-on continuer avec la croissance économique ?

Corrélation Empreinte écologique / PIB par personne

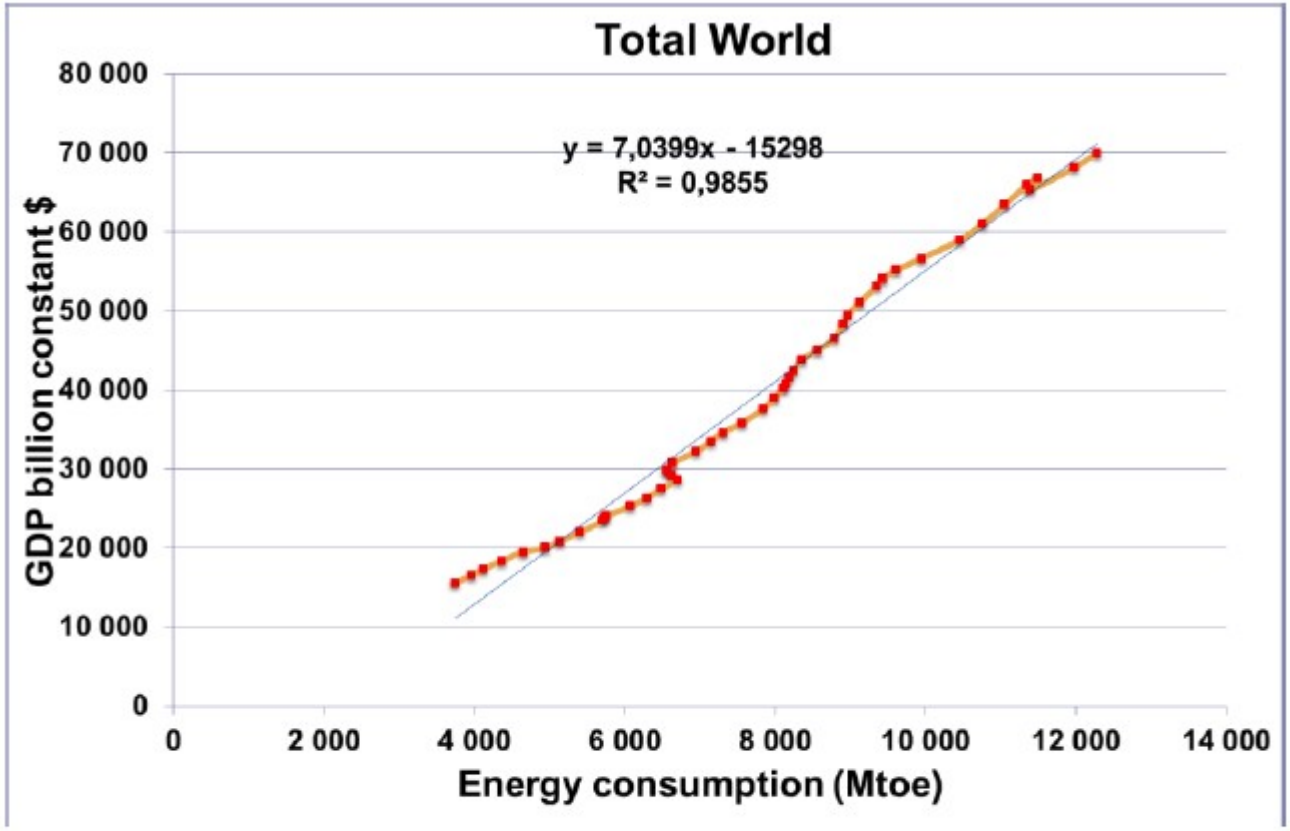


Croissance PIB → croissance pollution.

Réduire nos émissions de CO_2

Peut-on continuer avec la croissance économique ?

Corrélation PIB mondial / consommation d'énergie

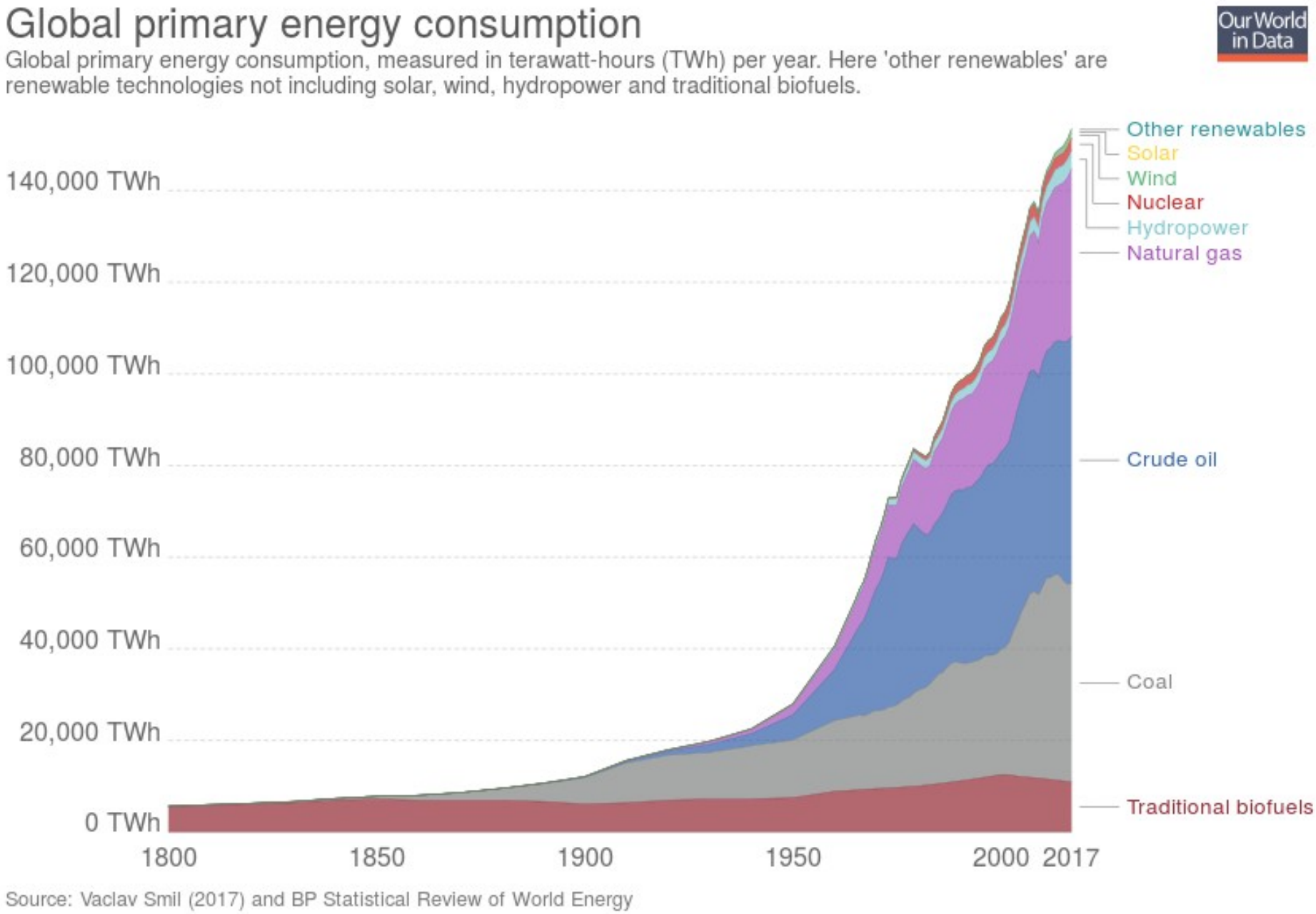


Source : BP statistical review, 2012, Shilling et al. 1977, EIA, 2012, et Banque Mondiale (PIB), 2012.

Énergie = PIB.
Énergie ≈ CO_2 .

→ solution = énergies renouvelables !

Énergie


Global primary energy consumption
Global primary energy consumption, measured in terawatt-hours (TWh) per year. Here 'other renewables' are renewable technologies not including solar, wind, hydropower and traditional biofuels.
Our World in Data
140,000 TWh
120,000 TWh
100,000 TWh
80,000 TWh
60,000 TWh
40,000 TWh
20,000 TWh
0 TWh
1800
1850
1900
1950
2000
2017
Other renewables
Solar
Wind
Nuclear
Hydropower
Natural gas
Crude oil
Coal
Traditional biofuels
Source: Vaclav Smil (2017) and BP Statistical Review of World Energy

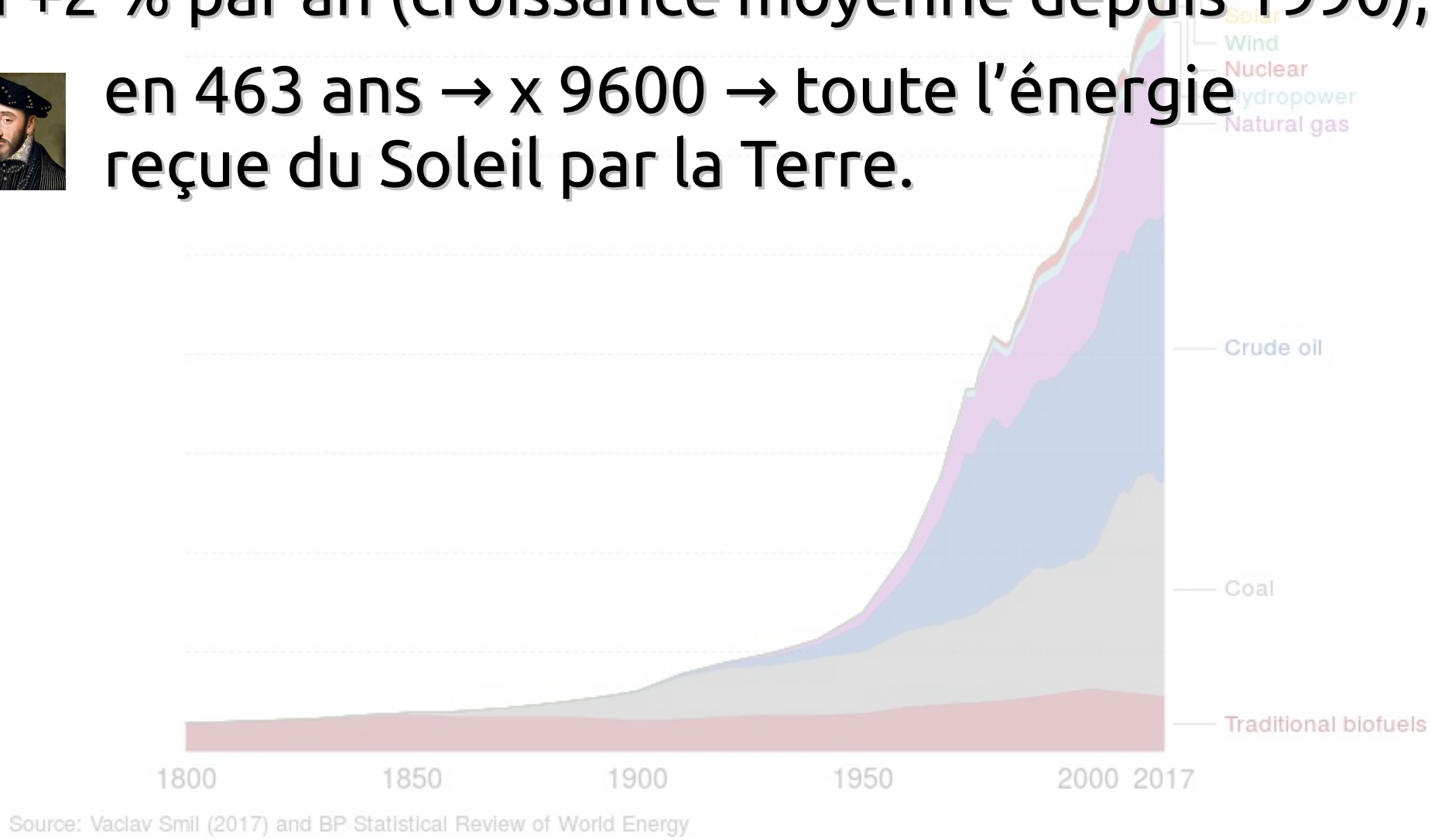
Énergie

<u>Consommation mondiale d'énergie en 2013 :</u>

$5{,}67 \times 10^{20}$ J = 158 000 TWh

Si +2 % par an (croissance moyenne depuis 1990),

en 463 ans → x 9600 → toute l'énergie reçue du Soleil par la Terre.



Énergie

<u>Consommation mondiale d'énergie en 2013 :</u>

$5{,}67 \times 10^{20}$ J = 158 000 TWh

Si +2 % par an (croissance moyenne depuis 1990),

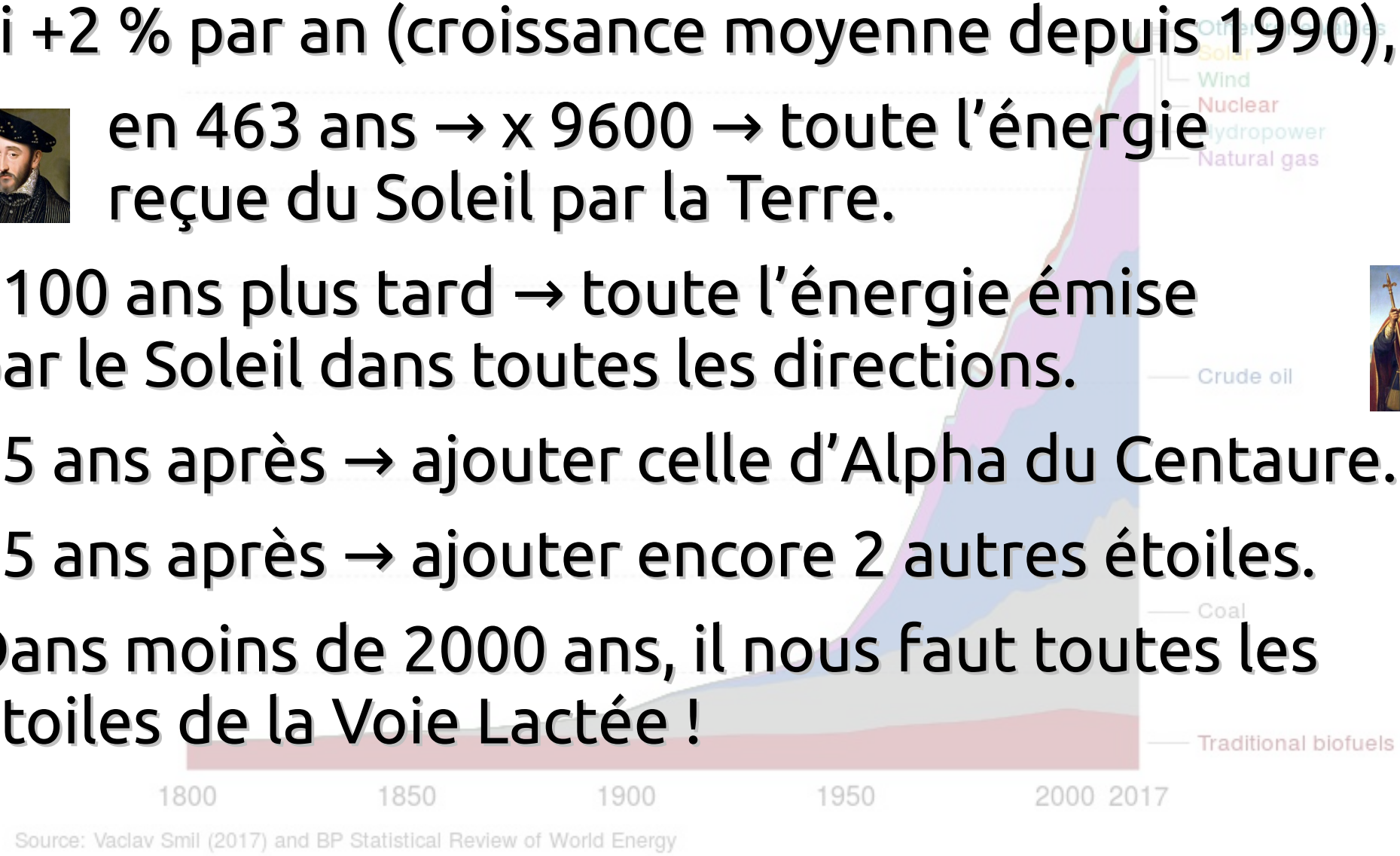
en 463 ans → x 9600 → toute l'énergie reçue du Soleil par la Terre.

1100 ans plus tard → toute l'énergie émise par le Soleil dans toutes les directions.

35 ans après → ajouter celle d'Alpha du Centaure.

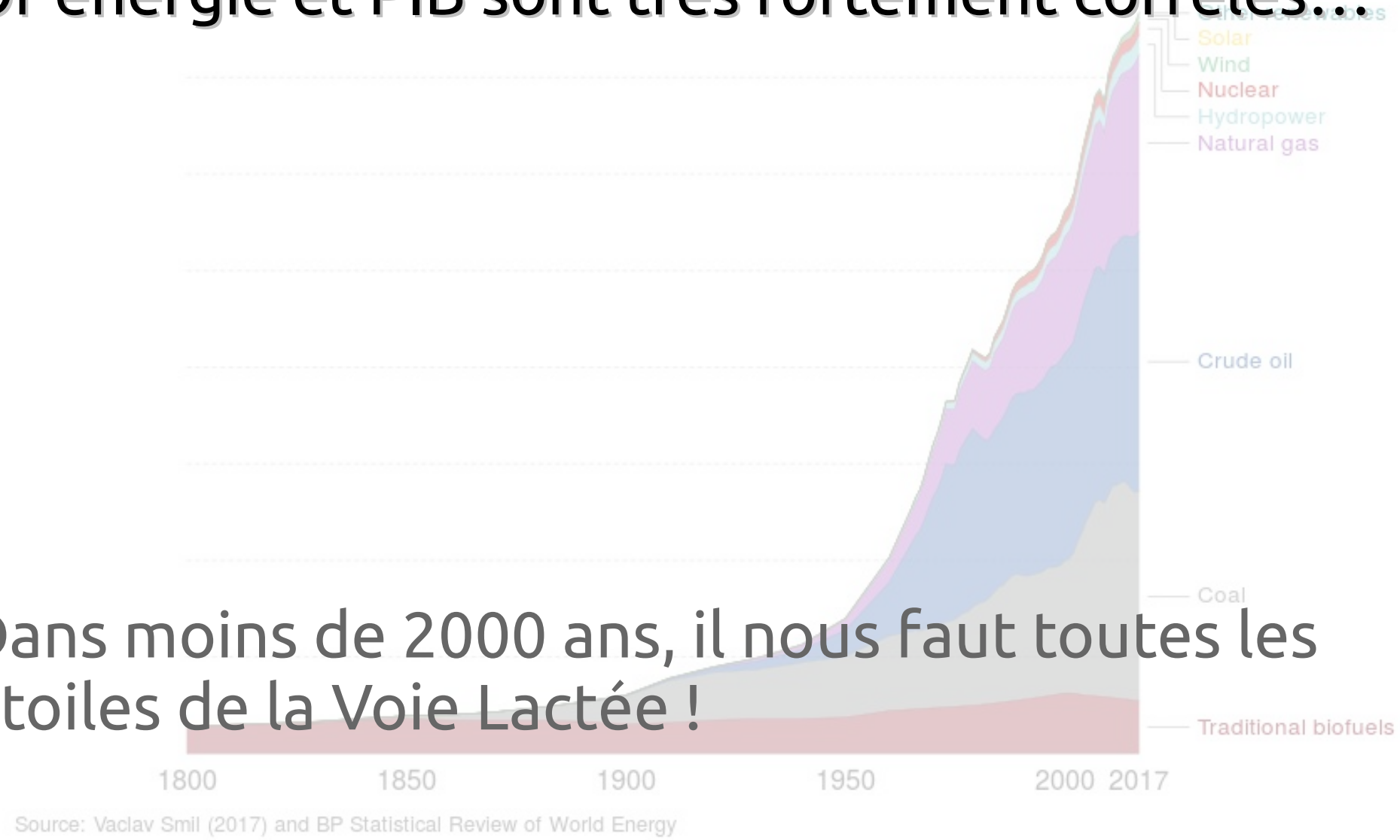
35 ans après → ajouter encore 2 autres étoiles.

Dans moins de 2000 ans, il nous faut toutes les étoiles de la Voie Lactée !



Énergie

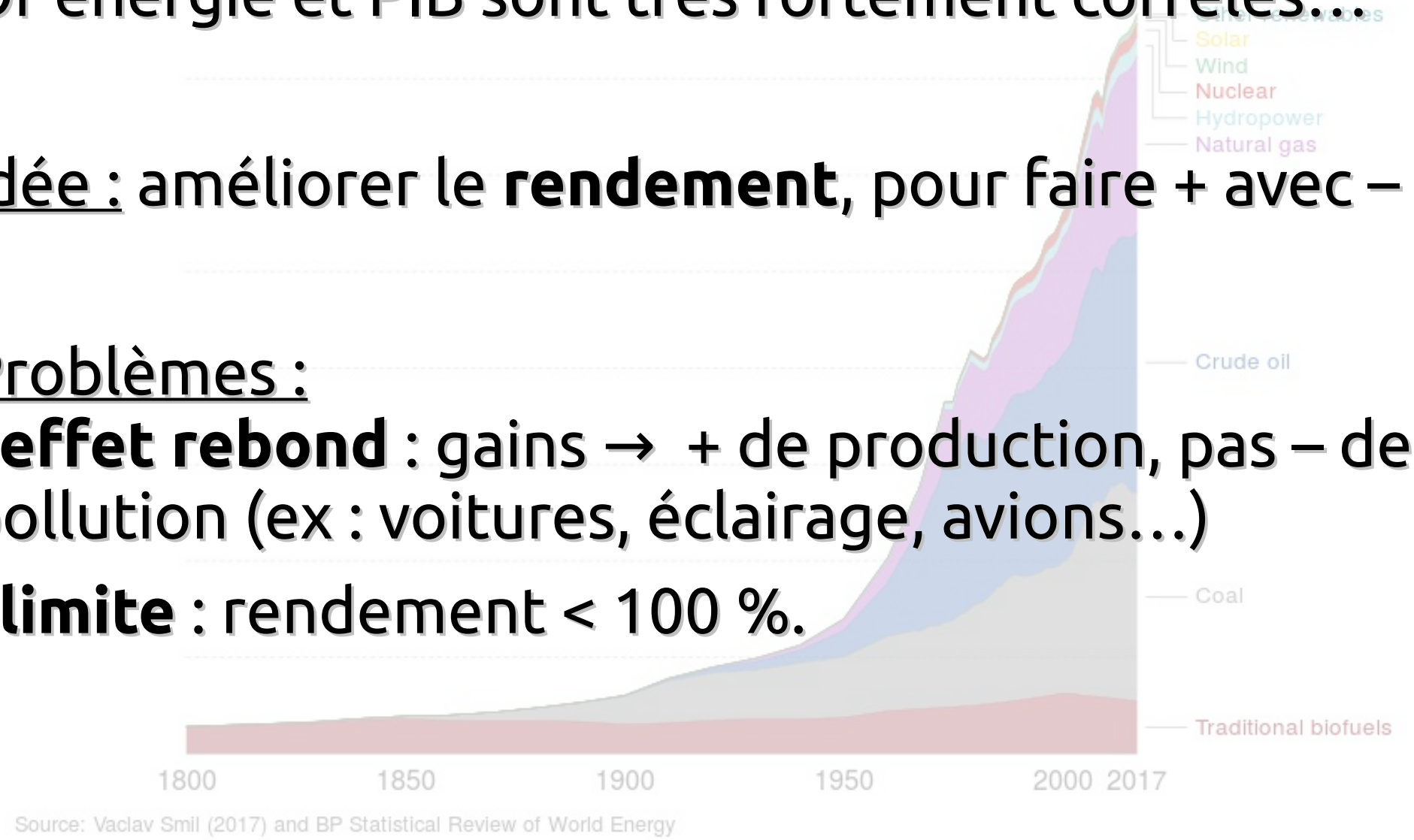
Une croissance de notre consommation d'énergie n'est donc pas tenable.
Or énergie et PIB sont très fortement corrélés…



Dans moins de 2000 ans, il nous faut toutes les étoiles de la Voie Lactée !

Énergie

Une croissance de notre consommation d'énergie n'est donc pas tenable.
Or énergie et PIB sont très fortement corrélés…



<u>Idée :</u> améliorer le **rendement**, pour faire + avec – .

<u>Problèmes :</u>

- **effet rebond** : gains → + de production, pas – de pollution (ex : voitures, éclairage, avions…)
- **limite** : rendement < 100 %.

Solution du paradoxe de Fermi

Si la croissance exponentielle indéfinie était possible, des extraterrestres seraient déjà là.
(Rappel : il y a 50 milliards de planètes terrestres, et nous ne sommes sûrement pas les premiers).

→ Soit ils ont essayé et ont détruit leur planète,

→ soit ils se sont arrêtés à temps et ont renoncé à la conquête spatiale.

C’est bel et bien impossible.
D’ailleurs, 100 000 années-lumière en 80 ans … !

Que faire ?

a) ~~On continue, on trouvera une solution.~~
~~« Jusqu'ici, tout va bien. »~~ → irresponsable

b) On arrête la croissance, on change plus rien.

Trop tard, pas assez efficace.

Et les pays pauvres ?
On leur interdit de se développer ?

Que faire ?

a) ~~On continue, on trouvera une solution. « Jusqu'ici, tout va bien. »~~ → irresponsable

b) ~~On arrête la croissance, on change plus rien.~~

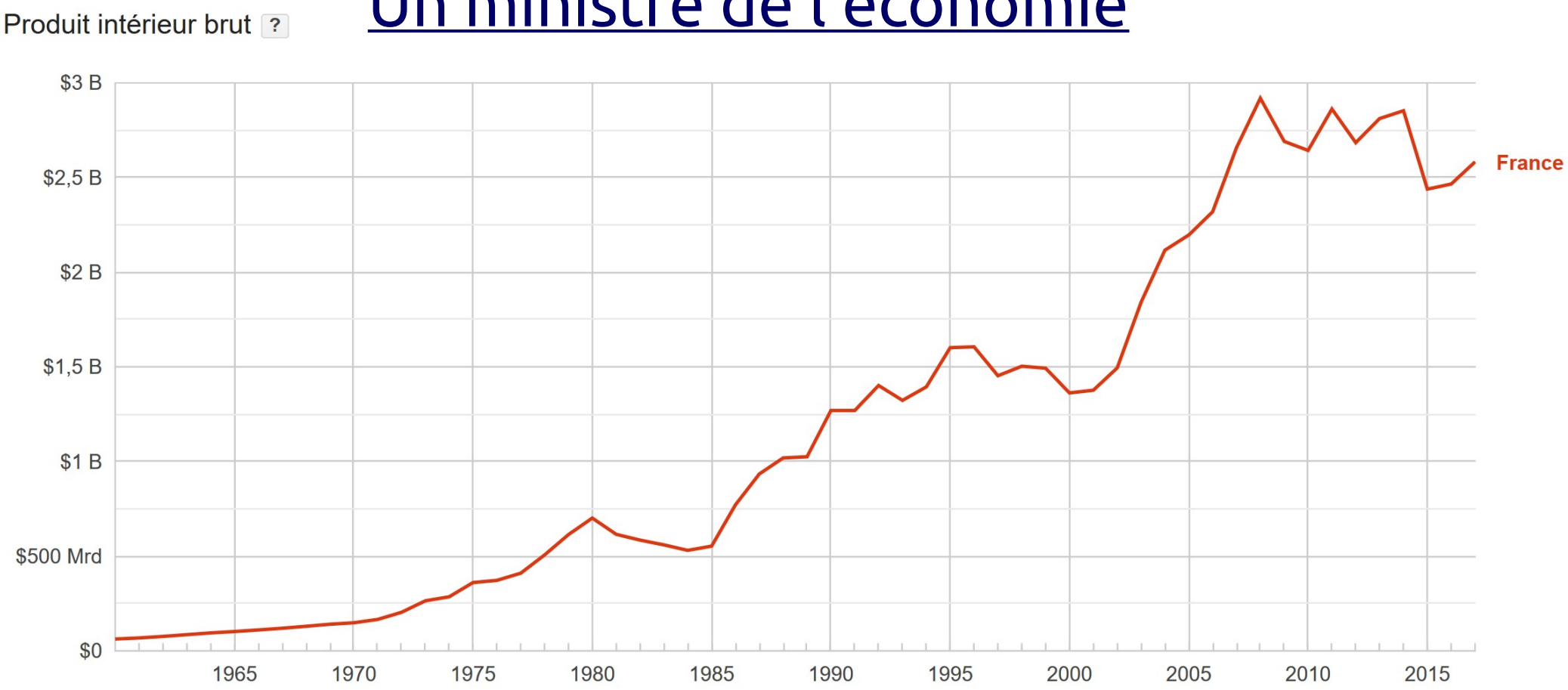
c) On **diminue** la consommation globale.

→ soit on dit à 3 milliards de personnes qu'on les laisse crever, soit on partage les ressources et les richesses.

Partager ?!

« Le premier problème économique français,
ce n'est pas la redistribution,
c'est la création de richesses »

Un ministre de l'économie



= discours typique de celui qui ne veut pas partager.

Que faire ?

a) ~~On continue, on trouvera une solution. « Jusqu'ici, tout va bien. »~~ → irresponsable

b) ~~On arrête la croissance, on change plus rien.~~

c) On **diminue** la consommation globale.

→ soit on dit à 3 milliards de personnes qu'on les laisse crever, soit on **partage** les ressources et les richesses.

→ Notre empreinte écologique doit baisser
→ notre niveau de confort, notre niveau de vie aussi.

Êtes-vous prêts ?

Que sacrifier ? Que peut-on s'autoriser ?

Quelques pistes

Consommer moins (d'énergie)

- Panneaux publicitaires lumineux à Nice (?!)
- Vols en avion. Ex : Paris-Nice
  - en train : 6h, 3,3 kg de CO_2 / passager
  - en avion : 1h30, 71 kg de CO_2 / passager
- Acheter utile et local.
- Internet : jeux en ligne, streaming, e-mail, cloud de données
  - un e-mail de 1Mo = 20 g de CO_2 .
  - film de 3 Go = 15 kWh = 1,1 kg de CO_2 .
- La 5G ? Vraiment ?
- Consommation de viande : 100 g de bœuf = ~4 kg de CO_2 .

Objectif : émettre < 2 tonnes de CO_2 par personne par an.
Français moyen aujourd'hui : 5 tonnes de CO_2 / an.

Quelques pistes

Action individuelle + organisation collective...

« *Nous considérons qu'un gouvernement qui ne ferait pas du sauvetage de ce qui peut encore l'être son objectif premier et revendiqué ne saurait être pris au sérieux.* »

Appel de 200 personnalités, 3 septembre 2018.

Quelques pistes

Action individuelle + organisation collective...

« *Nous considérons qu'un gouvernement qui ne ferait pas du sauvetage de ce qui peut encore l'être son objectif premier et revendiqué ne saurait être pris au sérieux.* »

Appel de 200 personnalités, 3 septembre 2018.

L'exponentielle, ça marche aussi pour le bien :

Si le nombre de personnes sensibilisées double chaque année, dans 10 ans, nous sommes 1000 fois plus nombreux !

Greta Thunberg arrive à mobiliser la jeunesse.

Résumé : En ayant la tête dans les étoiles, on retombe sur Terre...

1) Il y a des milliards de planètes, mais **aucune** espèce extra-terrestre n'a réussi à conquérir la Galaxie.

2) A l'échelle de l'Univers, de la Terre, et de l'humanité, la *croissance* est un phénomène **récent**, fugace.

3) Comme tous les processus *exponentiels*, ce n'est **pas durable**.
→ Il faut arrêter maintenant !

Trucs à retenir

Formule de Drake : $N = R \times f_p \times n_{hab} \times f_v \times f_i \times f_c \times L$

$N = N_p \times \varepsilon$ où $N_p = 50$ milliards.

Règle des 70 : +r %/an = x2 en 70/r ans.

2^{10} = mille ; 2^{20} = 1 million ; 2^{30} = 1 milliard.
(ex : feuille de papier, échecs...)

PIB = énergie.
2 % croissance → tout le Soleil en 1500 ans.

Café In, 23 janvier 2020

1) Exoplanètes

2) Paradoxe de Fermi

3) L'exponentielle

4) La croissance

5) Situation actuelle

6) Alors, que faire ?

Aurélien CRIDA