

# **RAPPORT SPÉCIAL DU GIEC 2018 ET DÉCROISSANCE**



**Problématique du climat et de l'énergie d'ici 2050**

Présentation de Bruno Detuncq  
Professeur à la retraite de  
l'École Polytechnique de Montréal  
membre du MEAC

Date : 2 décembre 2018

## LÉGENDE DE LA CRÉATION DU JEU D'ÉCHECS (figure-1)

Il était une fois, façon classique de commencer une histoire, un prince des Indes qui cherchait à tout prix à tromper son ennui. Il promit donc une récompense exceptionnelle à qui lui proposerait une distraction qui le satisferait.

Lorsqu'un sage lui présenta le jeu d'échecs, le souverain, enthousiaste lui demanda ce que celui-ci souhaitait en échange de ce cadeau extraordinaire. Humblement, le sage demanda au prince de déposer un grain de riz sur la première case, deux sur la deuxième, quatre sur la troisième, et ainsi de suite pour remplir l'échiquier en doublant la quantité de grain à chaque case.



Le prince accorda immédiatement cette récompense en apparence modeste, mais son conseiller lui expliqua qu'il venait de signer la mort du royaume, car les récoltes de l'année ne suffiraient pas à s'acquitter du prix du jeu. Le sage fut décapité sur l'ordre du prince !!

En effet, sur les 64 cases de l'échiquier, il faudrait déposer 18 446 744 073 709 551 615 grains, exprimé de façon plus compacte,  $18.446 \times 10^{18}$ , en laissant tomber la précision.

**Formule de calcul du nombre total est :  $2^{64}-1$**

C'est la particularité des évolutions exponentielles -----> Les économistes n'ont pas encore, ou ne veulent pas, comprendre les implications physiques de cette simple équation !!

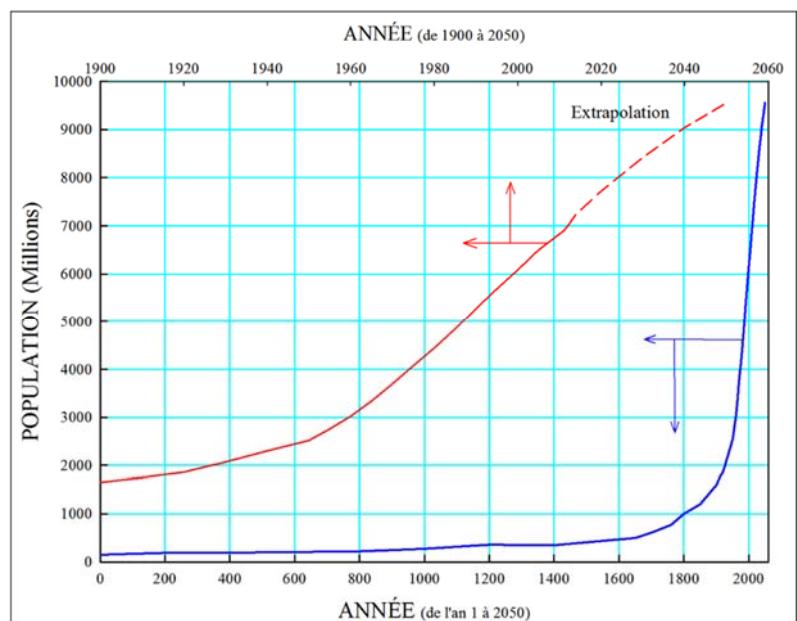
## VARIATION DE LA POPULATION MONDIALE (figure-2)

**Population en 2050, projection de l'ONU : 9,7 milliards de personnes**

- Et ce n'est pas la fin de la croissance de la population.
- Chaque nouvel humain a des besoins en nourriture, logement, locomotion, thermique, etc.
- Tout cela demande de l'énergie.
- Taux de croissance de la population :  
De 1951 à 1990 :  
Entre 1.6 % et 1.8 % par année  
En 2017 : 1.16 %

Note : la courbe rouge est en lien avec l'axe des X du haut et la bleue est reliée à celui du bas.

Le taux de croissance de la population diminue, mais de façon non uniforme



SOURCE : Données de [ONU https://population.un.org/wpp/DataQuery/](https://population.un.org/wpp/DataQuery/)  
Graphique de Bruno Detuncq

entre les différentes régions du globe, sauf en Afrique sud-saharienne où le taux de natalité est encore en hausse dans plusieurs pays. Lorsque ce taux mondial sera de zéro, alors la population mondiale se stabilisera. Selon L'ONU ce devrait arriver vers l'an 2100 et la population mondiale avoisinera alors les 11.5 milliard d'humains, si la tendance se maintient.

## ÉNERGIE PRIMAIRE CONSOMMÉE (figure-3)

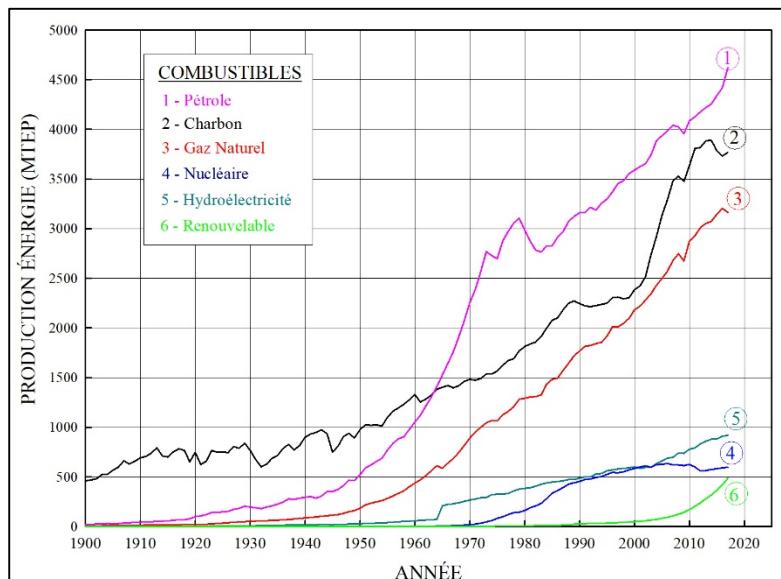
**L'énergie primaire** est l'énergie donnée gratuitement par la nature.

**L'énergie secondaire** est l'énergie transformée par les humains, l'électricité et l'hydrogène sont deux formes d'énergie secondaire. Ce sont des transporteurs d'énergie.

Augmentation importante de la consommation d'énergie primaire depuis 1960.

### Causes :

- Augmentation de la population mondiale.
- Augmentation de la consommation par habitant.



SOURCE : Données de BP ; Graphique de Bruno Detuncq

### En 2017 :

**85.5 %** de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles : Pétrole – Gaz naturel - Charbon  
**10 %** de l'énergie primaire provenait d'énergie renouvelable : Hydro + Solaire + Éolien

### Énergies renouvelables :

La croissance des énergies fossiles a été plus importante entre 2000 et 2017 que la croissance des énergies renouvelables. Ce fait est dû à trois causes principales :

- Augmentation du transport motorisé partout sur la planète
- L'énergie solaire et éolienne était plus chère au kWh que les énergies fossiles, ce n'est plus le cas actuellement
- Les subventions importantes que les énergies fossiles reçoivent au détriment des renouvelables

### Énergie nucléaire :

L'énergie nucléaire compte pour **4.4 %** de l'énergie totale consommée et la puissance installée n'a augmenté pas depuis 20 ans. Les problèmes de sécurité à court terme et de stockage des déchets à long terme bloquent le développement de cette filière. Fait à considérer, les réserves d'uranium permettraient de faire fonctionner les centrales au taux actuel pour une durée d'environ **90 ans**.

La fusion nucléaire est à l'étude dans différents centres dans le monde, donc le site d'ITER dans le sud de la France, mais aucune installation n'est actuellement capable de fournir de l'énergie et les pronostics ne sont pas encourageants. Parier sur cette filière serait très risqué, surtout que le prix des installations, si ce type de système fonctionne un jour, serait prohibitif, donc inaccessible pour la majorité des pays.

## HYPOTHÈSES D'AUGMENTATION DE LA CONSOMMATION COMBUSTIBLES FOSSILES : 2018 À 2050 (figure-4)

Si on en croit les économistes, il ne peut y avoir qu'une seule trajectoire pour l'économie :

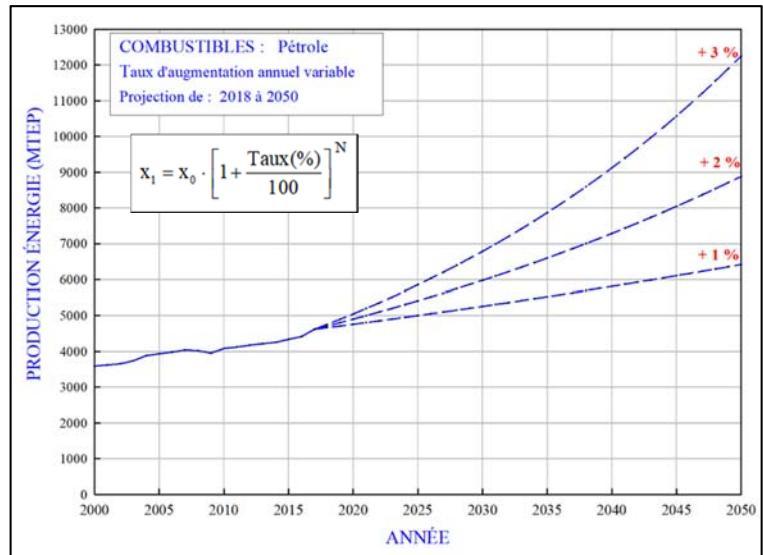
### L'augmentation du PBI

Donc il y a obligatoirement :

### Augmentation de l'énergie utilisée

En partant de la consommation de pétrole, de gaz naturel et de charbon en 2017, procérons à une extrapolation pour ces trois combustibles jusqu'en 2050 en utilisant successivement une augmentation de 1%, 2% et 3%.

Le graphique de droite présente le comportement pour le pétrole.



SOURCE : Données avant 2018 de BP  
Extrapolation et Graphique de Bruno Detuncq

### Augmentation entre 2017 et 2050 (MTEP) :

	2017	+ 1%	+ 2%	+ 3%
CHARBON	3769	5233	7244	9995
GAZ	3165	4395	6083	8393
PÉTROLE	4622	6418	8884	12259

Augmentation de 2.6 fois -----> IMPOSSIBLE  
Échec assuré et ce n'est plus un jeu !!

## PRODUCTION PASSÉE ET FUTURE DE COMBUSTIBLES FOSSILES (figure-5)

En terme thermodynamique, la Terre est un système fermé. Ce qui implique qu'il n'y a pas d'apport de matière de l'extérieur. Les réserves de combustibles fossiles sont nécessairement en diminution dès que l'on commence à les extraire.

La figure-5 représente en trait gras la partie historique de l'extraction du pétrole, du gaz naturel et du charbon, et en trait plus fin, le potentiel futur d'extraction, donc les réserves probables. Elle provient de l'étude de plus de 20 000 gisements de combustible effectuée par Jean Laherrère.

### Jean Laherrère

Ingénieur pétrolier. Coauteur d'un article remarqué dans la revue Scientific American en 1998 intitulé « The End of Cheap Oil ». Travaux importants sur les sondages de réfraction sismique. Membre actif de l'ASPO Courbes du graphique obtenues en analysant 20 000 gisements de pétrole et de gaz

Réserves ultimes : quantité d'un combustible qui sera extraite du début à la fin pour un gisement.

- Ultime pour le pétrole ..... ~ 420 Gtep avec plateau de 2005 à 2025
- Ultime pour le gaz ..... ~ 300 Gtep avec pic vers 2025
- Ultime pour le charbon ..... ~ 750 Gtep avec plateau de 2020 à 2080

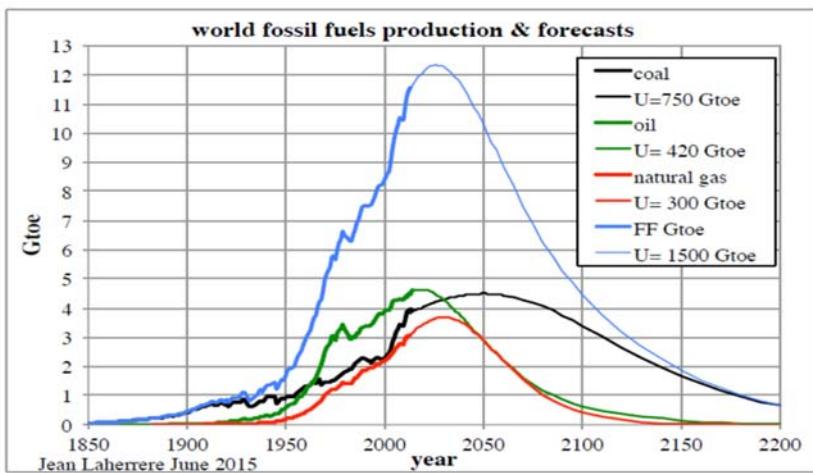
Ces données des réserves ultimes sont cohérentes avec celles fournies par le département de géologie américain (USGS)

**La courbe en vert** pour le pétrole comprend les réserves de pétrole de schiste et les huiles lourdes comme celle de l'Alberta et du Venezuela.

**La courbe en rouge**, celle du gaz naturel comprend les réserves de gaz naturel conventionnel et du gaz de schiste.

**La courbe en noir** est celle pour le charbon.

**La courbe en bleu** représente la sommation de toutes les réserves de combustibles fossiles exprimées sous la même unité (Gtoe : milliard de tonnes de pétrole équivalent).



Selon ce graphique, la production de pétrole mondial atteindra son pic vers 2025, une augmentation de 1%, 2% ou 3 % jusqu'en 2050 est impossible. De toute façon non désirable au niveau des émissions de GES. Toutes les grandes découvertes de pétrole et de gaz sont du passé, avant 1970, les nouvelles découvertes sont de plus en plus petites, de plus en plus difficiles à exploiter et de plus en plus nocives en terme écologique. Voir annexe pour les réserves.

En mettant en relation la courbe de l'accroissement de la population et la courbe des réserves de combustibles, on constate que dans le futur, plus de personnes vont lutter pour de moins en moins de combustible disponible. Les populations du Sud seront les premières à souffrir de pénuries, mais à moyen terme, tous en subiront des conséquences graves.

Exploiter le pétrole et le gaz de la roche mère (combustibles non conventionnels) implique que le Taux de Retour Énergétique (TRE ou EROI en anglais) de ces sources est très bas, ce qui entraîne des émissions de GES de plus en plus importantes pour de moins en moins d'énergie utilisable. Ce n'est pas la direction à prendre. Voir Annexe pour description du TRE.

#### De 1980 à 2017 :

La population mondiale est passée de 4.46 à 7.53 milliards ----> Augmentation de **68.8 %**

La consommation totale d'énergie est passée de 6 642 à 13 511 Mtep ----> Augmentation de **103 %**

Consommation mondiale de pétrole en 2017 : 98 Millions barils / jour = 4.47 Gtp / année

Réserves prouvées de pétrole fin 2017 : 293 Gtp

Pour une consommation constante de 2017 : **R/P = 50 ans** (données de BP)

Si la consommation augmente, le nombre d'années de disponibilité du combustible diminuera.

**Hypothèse :** Si on suppose des découvertes importantes de pétrole qui augmenteraient les réserves mondiales de 25 % (ce qui est très peu probable) on augmente la durée d'exploitation de : 32 ans au taux actuel. Ce qui est très peu en regard de l'histoire de l'humanité et qui serait une façon d'augmenter le désastre climatique pour une longue période.

## En 2017 : Selon BP

Énergie primaire TOTALE consommée : **13 511 Mtep**

- Hydroélectricité = 916.6 Mtep (6.8 %)
- Énergies renouvelables = 486.8 Mtep (3.6 %)

Somme des énergies renouvelables = **1403 Mtep**

## En 2050 : Hypothèse de l'IEA (Agence Internationale de l'Énergie)

Énergie TOTALE nécessaire : **~ 27 000 Mtep**

- Hydroélectricité : possibilité de doubler en 2050 : **~ 1 800 Mtep**
- Solaire & Éolien : Croissance limitée par la rareté des matériaux disponibles  
(voir : SOURCE : « IEA – Perspectives for the energy transition » ; 2018 & Annexe)

Vouloir produire toute l'énergie en 2050 à partir d'énergies renouvelables nécessite : (voir Annexe)

**D'augmenter de 20 fois la production actuelle en seulement 31 ans**

EST-CE POSSIBLE ??



**Difficilement et il y a limitation !!**

**Notes** : Durée de vie d'un panneau photovoltaïque : environ 25 ans

Le problème du stockage de l'énergie électrique n'est pas encore résolu.

## HYPOTHÈSES : DIMINUTION DE LA CONSOMMATION COMBUSTIBLES FOSSILES (figure-6)

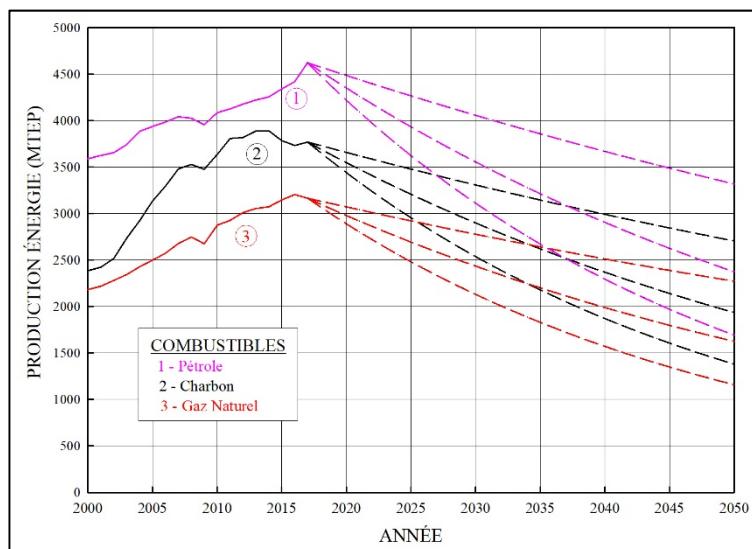
Si on fait confiance à la science, il n'y a qu'une seule trajectoire viable pour protéger le climat :

**La DÉCROISSANCE de la consommation de combustibles fossiles !**

En procédant comme pour la figure-4, mais cette fois-ci, imposons une diminution de 1%, 2% et 3% de consommation annuelle pour les trois combustibles jusqu'en 2050.

On se rend compte qu'une diminution de 1 % ou 2 % par année est **insuffisant** pour tendre vers les propositions du GIEC, soit une économie à émissions nettes de zéro en 2050.

Un effort considérable doit donc être envisagé sur une période de seulement 31 ans.



**Diminution entre 2017 et 2050 (Mtep) :**

SOURCE : Données de BP  
Extrapolation et graphique de Bruno Detuncq

	2017	- 1%	- 2%	- 3%
CHARBON	3769	2732	1974	1422
GAZ	3165	2294	1658	1194
PÉTROLE	4622	3351	2421	1744

Des changements politiques majeurs seront donc nécessaires pour tendre vers cette diminution.

L'usage de combustibles fossiles pourrait être autorisé uniquement pour les fonctions essentielles qui sont difficilement convertibles à l'électricité rapidement. Les générations futures pourront ainsi bénéficier d'un certain temps d'adaptation en faisant un usage restreint de ressources non renouvelables.

Les blocages individuels et collectifs sont à l'oeuvre pour freiner les changements nécessaires en termes de consommation énergétique, mais les bouleversements du climat devraient jouer un rôle important dans un proche avenir pour modifier les comportements.

## ÉVOLUTION MONDIALE DES ÉMISSIONS DE GES (figure-7)

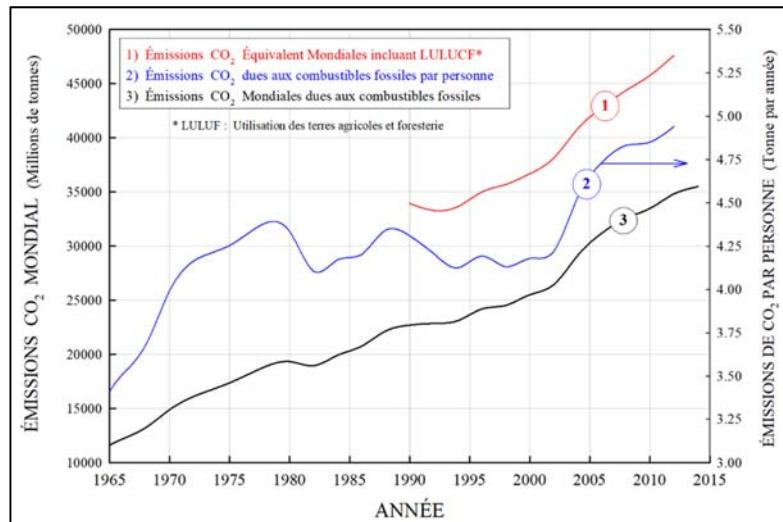
Le CO<sub>2</sub> équivalent correspond à l'effet combiné des gaz suivants : CO<sub>2</sub> – CH<sub>4</sub> – N<sub>2</sub>O - Ozone

**Courbe noire : 80 %** de tous les GES produits par les humains proviennent de l'utilisation des **combustibles fossiles**.

**20 %** proviennent de l'agriculture, principalement l'élevage, les rizières, la foresterie, les changements de vocation de sol et la déforestation.

**La courbe rouge** représente le total des émissions mondiales.

**La courbe bleue** représente les émissions dues aux énergies fossiles par personne.



SOURCE : <http://datasets.wri.org/dataset?q=Climate>  
Graphique de Bruno Detuncq

De **1990 à 2017** : augmentation des émissions mondiales de GES comprenant LULUF a été de : **57 %**

Entre les années 1980 et 2000, la population a continué à croître, mais une crise économique importante a fait en sorte de limiter la croissance de la consommation de combustible. Mais depuis 17 ans la consommation individuelle a repris une pente ascendante, principalement due à la croissance de l'économie des pays du Sud.

**En 2017 :**

Émissions mondiales pour l'année comprenant l'ensemble des GES : **53.5 Gt éq-CO<sub>2</sub>** (UNEP)

La moyenne mondiale d'émission de CO<sub>2</sub> a été de **5.0 t/an/personne**. Au Canada cette valeur est en moyenne de **21.3** et au Québec on produit **9.6 t/an/personne**. Cette quantité plus faible que pour le reste du Canada provient du grand avantage qu'à la province au niveau de la production de son énergie électrique qui est très majoritairement de source hydraulique.

La tendance pour les années à venir sera probablement encore une croissance des émissions des GES, à moins de changements importants, ce qui nécessiterait une implication politique, industrielle et citoyenne importante.

## COURBE DE KEELING : CONCENTRATION DE CO<sub>2</sub> DANS L'ATMOSPHÈRE (figure-8)

Les données de cette courbe proviennent de deux sources :

### De 1700 à 1958

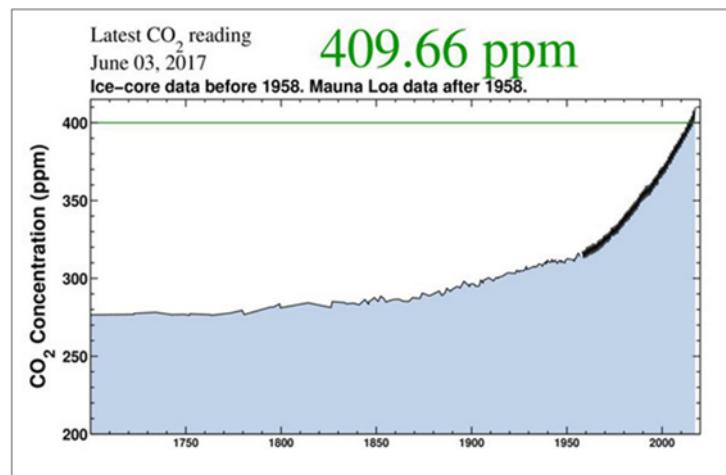
Mesures effectuées dans les glaces du Groenland et de l'Antarctique. L'air emprisonné contient encore les gaz de l'air du passé.

### De 1958 à 2017

Mesures effectuées au sommet du mont Mauna Loa sur l'île d'Hawaï loin de toute perturbation industrielle.

En 1700 la concentration de CO<sub>2</sub> était de :

**280 ppm**



SOURCE : <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/>

Entre **1800** et **2017**, soit en 217 ans, la concentration de CO<sub>2</sub> a connu une augmentation de **46 %**. Du jamais vu dans le passé.

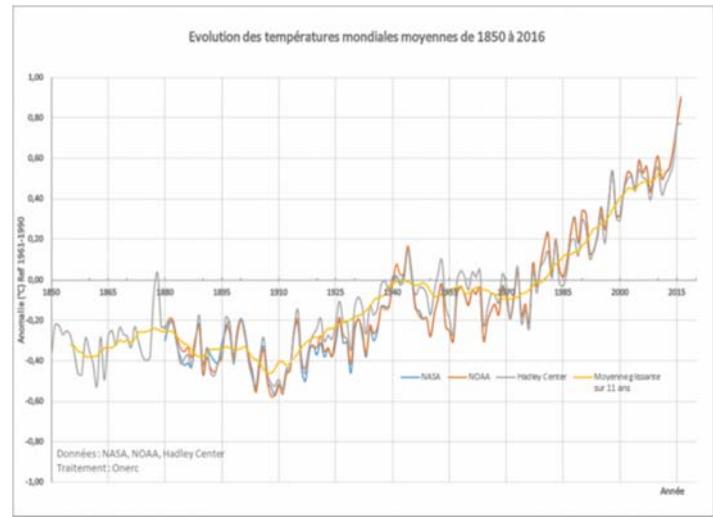
Dans les derniers 800 000 ans du passé, la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique n'avait jamais dépassée la valeur de **300 ppm**.

Environ **50%** des émissions de CO<sub>2</sub> émises chaque année sont séquestrées par les végétaux, principalement les forêts, et par les océans, par dilution de surface. Le reste s'accumule dans l'atmosphère. Le temps de résidence du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère peut être très long. Continuer à émettre de grandes quantités de GES fera en sorte de prolonger d'autant la durée des perturbations climatiques qui se compteront en centaines d'années.

## ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE MONDIALE (figure-9)

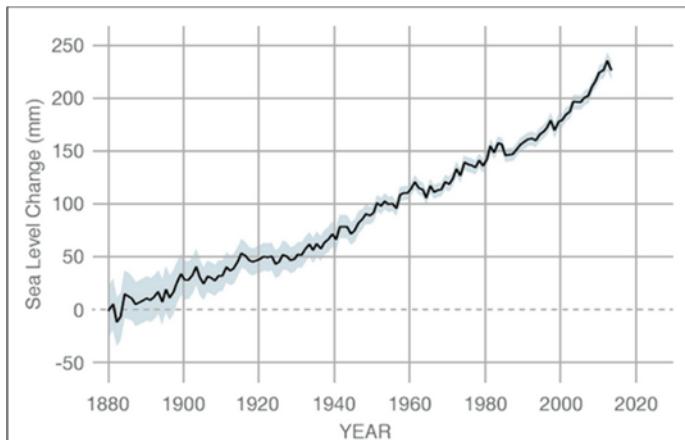
### L'augmentation des GES entraîne

- Augmentation de la température moyenne
- Élévation du niveau des océans
- Changement de la pluviosité locale
- Avancement de la saison agricole
- Déplacement de plantes et d'animaux du Sud vers le Nord
- Diminution de la production agricole de plusieurs pays du Sud
- Fonte des glaces arctiques
- Fonte des glaciers terrestres
- Acidification des océans
- Apparition de nouvelles maladies dans les pays du Nord



SOURCE : <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>

Toutes ces perturbations auront des impacts importants sur la sécurité climatique, alimentaire et politique des populations, en premier lieu, et plus fortement, sur celles du Sud.

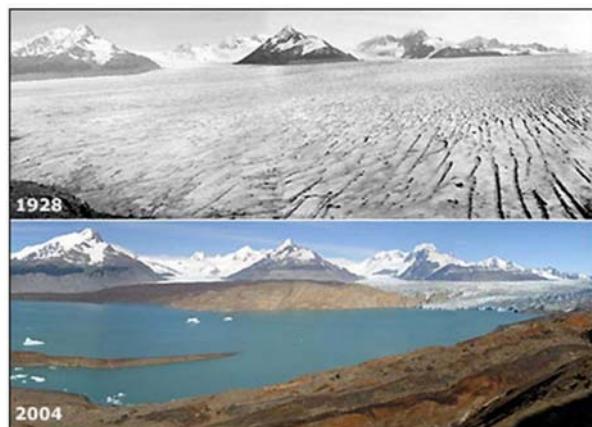


SOURCE : <https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>

Augmentation du niveau des océans est causée par :

- Dilatation de l'eau due à l'augmentation de la température.
- Fonte des glaciers terrestres (figure-11)

**Élévation du niveau des océans : (figure-10)**  
Entre 1890 et 2017 :  
Augmentation de 240 mm  
Actuellement :  
Augmentation de 3.2 mm/an

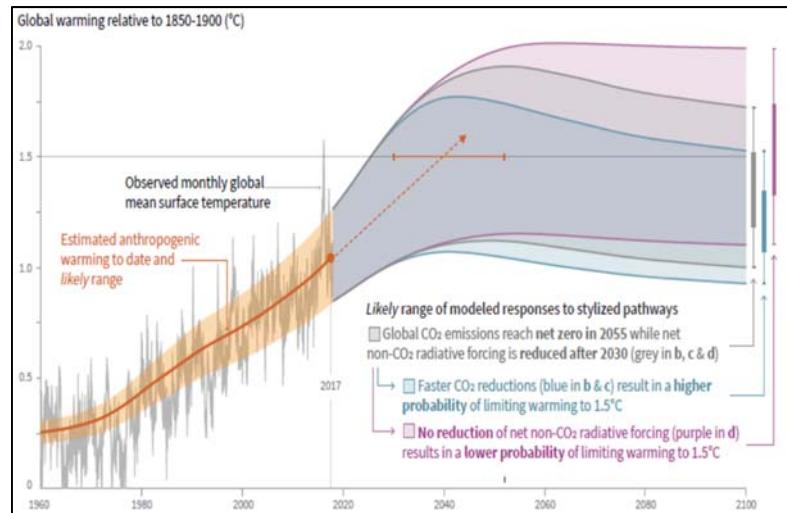


Le Glacier Upsala (sud de la Patagonie, Argentine)  
en 1928 et 2004 © Greenpeace – [www.les-crises.fr](http://www.les-crises.fr)

**Pollution locale** : un élément important à ne pas oublier est la pollution des centres urbains par les particules fines, l'ozone troposphérique, les COV et HAP, tous des produits qui pénalisent grandement la santé des habitants de toutes les villes du monde. Cette pollution est une conséquence directe de l'utilisation des combustibles fossiles.

## RAPPORT SPÉCIAL DU GIEC 2018 ET AUGMENTATION DE LA TEMPÉRATURE (figure-12)

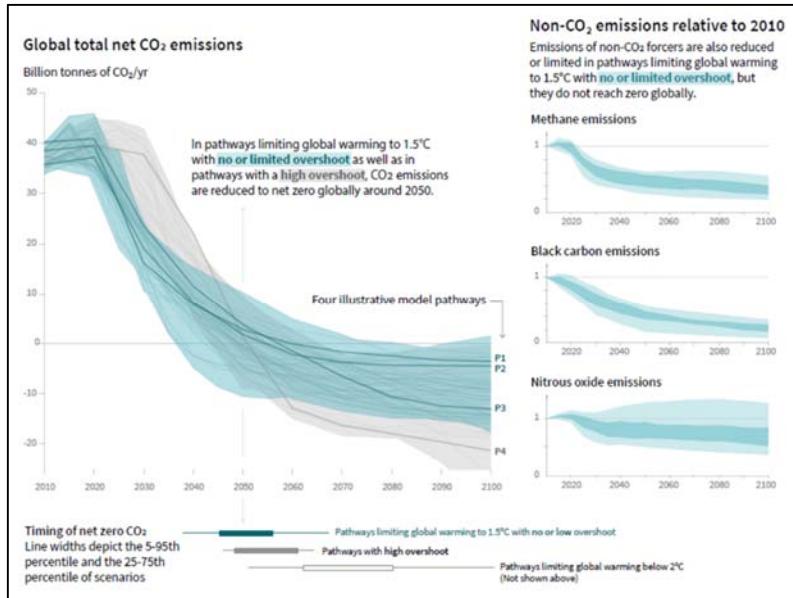
- Les émissions de GES par les **activités humaines** sont la principale cause du réchauffement climatique.
- Taux de réchauffement de **0.17 °C** par décennie depuis 1950.
- Au rythme actuel, le monde connaît une hausse de **1.5 °C** de la moyenne des températures entre 2030 et 2052.
- En **2018**, nous avons déjà atteint **1°C** d'augmentation depuis l'époque préindustrielle.
- Continuer sur la même trajectoire entraînerait une augmentation de température moyenne d'environ : **5°C en 2100**



SOURCE : Rapport spécial du GIEC du 8 octobre 2018  
« Summary for Policymakers »

Les barres d'incertitudes indiquent que différents scénarios sont envisageables au niveau de l'augmentation de la population, de la croissance de la consommation d'énergie et du type de filières énergétiques qui seront développées dans le futur proche.

## SCÉNARIOS D'ÉMISSIONS DU RAPPORT SPÉCIAL DU GIEC 2018 (figure-13)



**Pour ne pas dépasser +1.5 °C dans le futur il faut :**

**Diminuer de 45 %** les émissions de GES par rapport à leur niveau de 2010 avant 2030

Pour ensuite arriver vers **2050** à une neutralité carbone.

Donc : **arrêt** de la production de combustibles fossiles.

### **ÉMISSIONS NETTES DE CO<sub>2</sub>**

Émissions de CO<sub>2</sub> de provenance humaine moins le retrait de CO<sub>2</sub> par l'humain et le reboisement.

SOURCE : Rapport spécial du GIEC du 8 octobre 2018 - « Summary for Policymakers »

Les scénarios du GIEC prennent en compte la réduction du CO<sub>2</sub>, mais également celle du CH<sub>4</sub>, du N<sub>2</sub>O et des poussières de carbone. Chaque ligne représente un scénario particulier.

L'atteinte d'une diminution aussi importante en seulement 31 ans sera très difficile, mais pas impossible. Le choix des cibles est ici essentiel.

D'après les estimations des nouveaux scénarios de l'UNEP de novembre 2018, les émissions de l'ensemble des GES doivent être inférieures à **40 Gt éq-CO<sub>2</sub>** (fourchette : 38-45) **en 2030**, pour qu'il y ait une probabilité d'environ **66%** que l'objectif de **2°C** soit atteint. Pour avoir une probabilité de 66% de rester en deçà de 1.5°C il faudrait que les émissions de GES soient 24 Gt éq-CO<sub>2</sub> (fourchette : 22-30) en 2030.

Ce rapport de l'UNEP démontre que la cible de réduction des missions ne sera sans doute pas atteinte pour permettre à la température moyenne de ne pas dépasser les 1.5°C, car trop de pays se sont donné des cibles trop faibles et font des efforts suffisants en termes de réduction. Le Canada est un exemple typique d'une politique climatique incohérente et qui donne des résultats allant dans le mauvais sens. Les subventions aux énergies fossiles sont encore trop importantes et de nombreux pays en émergences voient leur population croître, ce qui entraîne une croissance des besoins énergétiques.

Source : <https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2018>

## UTILISATION DES ÉNERGIES PRIMAIRES PAR SECTEUR D'ACTIVITÉ (figure-14)

	Consommation finale 1990 (Mtep)	Pourcentage de la consommation	Consommation finale 2015 (Mtep)	Variation consommation 2015 / 1990	Pourcentage de la consommation
<b>Industrie</b>	1 809	29 %	2 712	+50 %	29 %
<b>Transport</b>	1 573	25 %	2 703	+72 %	29 %
<b>Résidentiel</b>	1 533	24 %	2 051	+34 %	22 %
<b>Tertiaire</b>	450	7 %	756	+68 %	8 %
<b>Agriculture + pêche</b>	166	3 %	201	+21 %	2 %
<b>Non spécifié</b>	260	4 %	124	-52 %	1 %
<b>Usages non énergétiques</b>	478	8 %	836	+75 %	9 %
<b>Total</b>	<b>6 268</b>	<b>100 %</b>	<b>9 384</b>	<b>+50 %</b>	<b>100 %</b>

SOURCE : Agence Internationale de l'Énergie ( AIE ) ; Outlook de l'énergie ; 2016

### Où réduire la consommation ?

- ✓ Tous les secteurs doivent participer, mais ...
- ✓ Commencer par là où la consommation est la plus importante
- ✓ Là où la contrainte est la moins pénalisante pour les humains

En premier lieu : **Le transport**, près de **30 %** de toute l'énergie y est consacré et principalement pour le transport des personnes, surtout par automobile, puis le transport des marchandises par camions. Le déplacement du transport individuel au pétrole vers le transport actif et collectif électrifié permettrait de diminuer de façon très importante les émissions de GES. Cette diminution devrait advenir prioritairement dans les villes et ses banlieues.

Le gain serait optimum si l'électricité utilisée pour le transport collectif était produite par des énergies non carbonées, autrement ce serait déplacé le problème.

La diminution du transport individuel entraînerait une diminution des secteurs industriels associés, c'est-à-dire l'extraction des métaux et des combustibles et l'industrie de fabrication des véhicules. Donc l'impact est démultiplié. Le transport individuel serait conservé pour les cas de nécessité de santé ou d'éloignement. Autre bienfait de cette modification du mode de transport, la dépollution des villes et une réappropriation des artères urbaines par les citoyens.

## EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DE DIFFÉRENTS MODES DE TRANSPORT (figure-15)

- Définition : c'est le rapport entre le déplacement et l'énergie consommée pour l'obtenir.
- Mesuré généralement par l'énergie consommée par personne pour 100 kilomètres parcourus.
- Corresponds à une énergie divisée par une distance : équivalente à la force de frottement, qui s'oppose à l'avancement.
- Ce paramètre permet d'effectuer une comparaison entre différents modes de transport.

Le tableau suivant présente des valeurs moyennes de consommation d'énergie et de production de CO<sub>2</sub> pour différents modes de transport. Il faut les interpréter comme des moyennes pour une classe donnée.

MODE DE TRANSPORT	ÉNERGIE DÉPENSÉE POUR 100 km par personne (kWh)	kg de CO <sub>2</sub> pour 100 km
Marche (valeur moyenne pour un adulte)	7.3	0
Course (valeur moyenne pour un adulte)	8.6	0
Vélo (valeur moyenne pour un adulte)	<b>2.5</b>	0
Voiture compacte (1.4 personne /auto)	63	17
Voiture tout électrique (1.4 personne /auto)	15 à 22	Faible au Québec
Train (occupation moyenne)	8	1.2
TGV (électrique en France)	3	0.32
Tramway (occupation moyenne)	7	Faible au Québec
Avion long-courrier	52	14

Rapport :  
14 / 1

SOURCE : ADEME – [France https://www.ademe.fr/expertises/mobilite-transports/chiffres-cles-observations/chiffres-cles](https://www.ademe.fr/expertises/mobilite-transports/chiffres-cles-observations/chiffres-cles)

Le vélo est le mode de transport le plus efficace et de loin pour la majorité des cas. Seul le TGV électrique le talonne, à la condition que les wagons soient à capacité presque maximale. On observe que la voiture individuelle détient le pire score en termes de consommation et en termes d'émission de CO<sub>2</sub>. Plus le véhicule est lourd, pire est la situation. Aucun commentaire supplémentaire concernant les VUS très tendance.

Donc transférer du mode auto solo vers les modes actifs et collectifs électriques serait une avenue privilégiée de réduction rapide des émissions.

**La tendance est malheureusement inverse :**

<u>Année</u>	<u>Population</u>	<u>Automobile</u>
1950 ----->	3 milliards	50 millions
2000 ----->	6 milliards	700 millions
2017 ----->	7.5 milliards	1290 millions
<b>2050 -----&gt;</b>	<b>≈ 9.5 milliards</b>	<b>2500 millions ?</b>

#### Évolution population mondiale

- Double en 50 ans
- Triple en 100 ans

#### Évolution du parc de véhicules mondial

- Augmentation de 14 fois en 50 ans
- Augmentation de 50 fois en 100 ans

Cette évolution est intenable et pénalisera l'ensemble des autres besoins humains. Les transports ne doivent pas nuire à l'accès à l'alimentation et à la santé des populations.

### CONCLUSION DU LIEN ENTRE ÉNERGIE ET ÉMISSIONS DE GES :

**Dans un monde fini, une croissance infinie est impossible !**

Conclusion du rapport Meadows 1972

**DÉCROISSANCE INÉVITABLE !**

## **ACTIONS À PRENDRE POUR PERMETTRE QUE LA TERRE RESTE VIABLE**

### ➤ DIMINUTION DES GES

#### **Menace climatique**

### ➤ DIMINUTION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE

#### **Menace énergétique**

- Abandon des combustibles fossiles.
- Amélioration de l'efficacité énergétique de tous les systèmes.
- Passage aux énergies renouvelables.
- Diminution de la consommation énergétique par habitant pour tous les gros et moyens consommateurs.

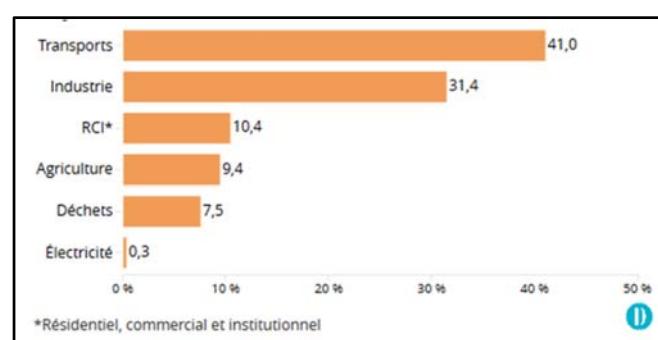
## **SITUATION PARTICULIÈRE AU QUÉBEC (figure-16)**

ÉNERGIE CONSOMMÉE AU QUÉBEC EN 2017

SOURCE	ÉQUIVALENCE (Petajoules)*	PORTION (%)	PROVENANCE
Pétrole	704 <sup>(1)</sup>	36.7	Importation
Gaz naturel	272 <sup>(1)</sup>	14.2	Importation
Charbon	12 <sup>(1)</sup>	0.6	Importation
Hydro	750.2 <sup>(2)</sup>	39.1	Local
Biomasse	147 <sup>(1)</sup>	7.7	Local
Éolienne	34.6 <sup>(2)</sup>	1.8	Local
TOTAL	1919.8	100	

\* Petajoule :  $10^{15}$  Joules

ÉMISSIONS DE GES PAR SECTEUR EN 2017 (%)<sup>(3)</sup>



SOURCES : (1) <https://www.neb-one.gc.ca/nrg/ntgrtd/mrkt/nrgsstmpfls/cda-fra.html?=&wbdisable=true>

(2) <http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/energie-environnement/production-achats-et-ventes-electricite.html>  
(3) <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/>

RCI signifie : Résidentiel, Commercial, Institutionnel, c'est donc du bâtiment.

Au Québec en 2017, les émissions globales de GES ont été de **79 Mt éq-CO<sub>2</sub>**, soit une diminution d'environ **9%** par rapport à 1990. Cette diminution est principalement reliée au transfert important du chauffage des bâtiments au mazout vers le tout électrique, donc non émetteur de GES.

Toutes les formes de transport confondues ont quant à elles vu leurs émissions augmenter de **22%** pour la même période pour atteindre la valeur de **34 Mt éq-CO<sub>2</sub>**, donc 41% du total des émissions et qui se répartissent ainsi :

Déplacement des personnes : environ 2/3

Transport des marchandises : environ 1/3

Les principaux émetteurs de GES du secteur industriel sont les alumineries et transformations des autres métaux, les pâtes et papiers, les cimenteries, l'industrie manufacturière et la pétrochimie.

**La transformation du système de transport au Québec permettra une diminution importante les émissions de GES :**

- Transport collectif -----> Diminution de l'énergie consommée par km par personne
- Électrification des transports -----> Diminution des émissions de GES par km par personne
- Diminution des distances parcourues par habitant -----> Diminution de l'énergie consommée par personne par année
- Diminution de la consommation d'objets -----> Diminution du transport de marchandises

**En 2017 :** Nombre d'automobiles au Québec : 5.2 millions

**Hypothèse :** Si toutes les voitures individuelles étaient converties à l'électricité et en utilisant les données d'Hydro-Québec pour effectuer un calcul préliminaire, on obtient :

- Consommation moyenne pour une voiture électrique : **21 kWh / 100 km**
- Distance moyenne parcourue par automobiliste au Québec : **15 000 km / année**
- Énergie consommée par les 5.2 millions de voitures électriques : **59 PJ / année**
- Rendement de conversion énergétique depuis la source jusqu'à la batterie : **~ 50%**
- Énergie électrique à produire par Hydro-Québec pour le parc d'auto électrique : **118 PJ/année**
- Augmentation de la puissance installée par Hydro-Québec serait nécessaire pour rencontrer les besoins d'électrification du parc automobile : **environ 16 %**

C'est faisable, mais il serait encore mieux de combiner le transfert d'une part des déplacements automobiles vers le transport actif et collectif et d'électrifier ensuite tous les modes de transport motorisés.

Cette approche réduirait l'impact écologique de la production et recyclage des batteries, qui peut devenir une nouvelle source de pollution importante.

**Ne pas oublier :** Le Québec est actuellement le seul endroit au monde où la conversion des transports à l'électricité puisse se faire sans aggraver la problématique des émissions de GES.

## **NE PAS PERDRE ESPOIR !!**

**Le potentiel de développement matériel est limité,**  
**mais**

**Le développement du potentiel humain est illimité !**

**C'est une invitation à créer une transformation :  
Juste - Solidaire - Créative - Ludique !**

## ANNEXES

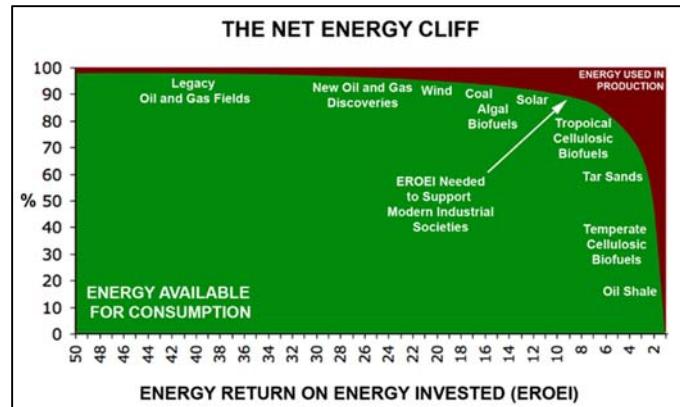
### TAUX DE RETOUR ÉNERGÉTIQUE (TRE) (figure-17)

Pour produire de l'énergie, il faut : **Dépenser de l'énergie**

L'acronyme anglais du TRE est EROI : Energy Returned On Energy Invested

Le TRE est un indicateur important du rapport entre l'énergie qu'il faut fournir pour extraire un combustible et l'énergie que donnera ce combustible lors de son utilisation.

En principe, la production d'un combustible est arrêtée lorsque l'énergie nécessaire pour extraire, par exemple, un litre de pétrole dépasse celle contenue dans ce même litre en tenant compte des autres coûts d'exploitation. Mais en pratique, la production est arrêtée bien avant cette limite physique.



SOURCE : <http://www.theoildrum.com/node/8625>

Paramètres en prendre en compte pour le calcul de TRE :

- Le forage : plus le puits est profond, et plus cette phase consomme de l'énergie
- Le pompage : plus la réserve diminue et plus il faut pomper vigoureusement
- Dans le cas de pétrole ou de gaz de schiste, l'énergie pour la fracturation hydraulique
- Le transport : il y a toujours une distance entre les puits et les lieux de raffinage et d'utilisation
- Transformation primaire : à la tête du puits, il est nécessaire de séparer les gaz des liquides et de retirer l'eau et les sédiments qui se trouvent dans le pétrole brut

Au début de l'ère du pétrole, fin 19<sup>e</sup> et début 20<sup>e</sup> siècle, le TRE pour le pétrole conventionnel se situait entre 50 et 100. Actuellement pour les nouvelles découvertes se situant *off-shore* ou dans la zone Arctique, cette valeur est plutôt dans l'ordre de 12 à 15. Pour le pétrole de schiste, le TRE est de l'ordre de 4 ou 5 et il est encore plus bas pour le pétrole issu des sables bitumineux, entre 2 et 4.

Plus la valeur du TRE est basse et plus l'extraction est nocive pour l'environnement, car avant de pouvoir utiliser cette énergie, il y a production importante de GES et souvent d'autres polluants.

### RÉSERVES DE COMBUSTIBLES FOSSILES

#### Réserves et Ressources

Les définitions qui suivent concernant les réserves de combustibles s'appliquent aussi bien pour le pétrole, pour le gaz naturel et pour le charbon. Le type de travaux en géophysiques nécessaires pour déterminer les probabilités d'extraction d'un combustible est les mêmes pour le pétrole et pour le gaz, mais est très différent pour le charbon, la genèse de ce combustible n'étant pas la même.

Généralement le mot **ressource** définit ce qui existe sous terre, mais il est impossible de connaître cette valeur exactement, car les travaux de prospection géophysiques ne peuvent utiliser que des méthodes

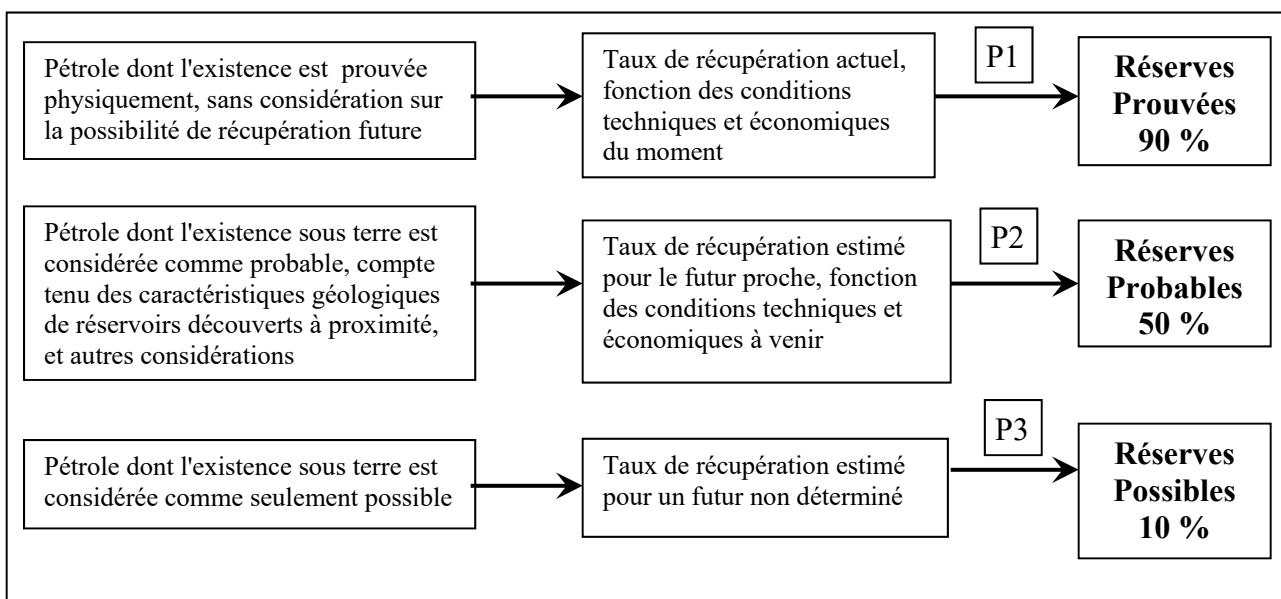
indirectes de mesure. Même si la science a beaucoup progressé depuis les années 80, il existe toujours une certaine incertitude. Et qui dit incertitude, dit probabilité.

Le mot **réserve** peut maintenant être précisé en fonction de certaines probabilités. La figure qui suit présente les définitions pour les trois classes de réserves de pétrole ou de gaz naturel :

Prouvées (P1) – Probables (P2) – Possibles (P3)

Les réserves prouvées, qui sont les seules à être publiées, sauf Jean Laherrère et le USGS, ne désignent donc pas ce qui reste encore sous terre, mais seulement la fraction de combustible, que nous pensons pouvoir extraire avec les techniques disponibles aujourd'hui (ou dans un futur proche) et dans des conditions économiques favorables (que le coût d'extraction ne soit pas supérieur au prix de vente présent ou futur). ***Une réserve prouvée est donc une notion sujette à interprétation.***

Dans le cas du pétrole : ([figure-18](#))



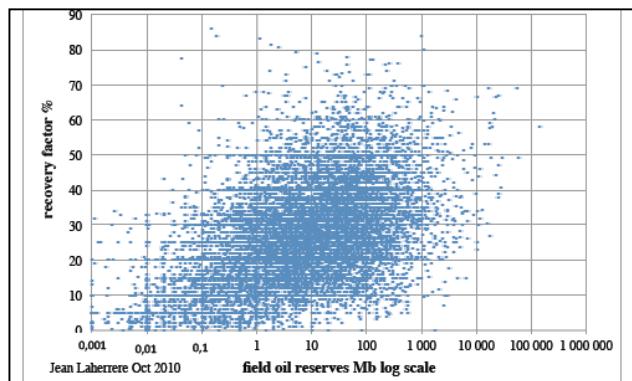
Les deux dernières classes de réserves correspondent soit à du pétrole dont la découverte n'a pas encore eu lieu, mais qui est considéré comme plus ou moins probable, soit à des réévaluations du potentiel de réservoirs déjà découverts, parce que les technologies se sont améliorées ou la taille du gisement a été réévaluée.

### Taux de récupération

Notons aussi que les réserves dépendent fondamentalement du taux de récupération, c'est-à-dire du rapport entre le pétrole présent dans le réservoir au début de l'exploitation, et la partie qu'il sera possible de remonter du début à la fin de l'extraction. Nous pouvons améliorer les conditions techniques, ce qui, en pratique, signifie que nous pensons pouvoir récupérer à l'avenir une part plus importante du pétrole contenu dans les réservoirs. Si le taux de récupération augmente suffisamment, cela peut augmenter très substantiellement les réserves et faire passer un gisement de la classe P2 à la classe P1. Ce reclassement donne l'impression que les réserves ont augmentées, mais elles n'ont fait que de se préciser.

En 2010, Jean Laherrère a cumulé les données de 17 200 champs de pétrole à travers le monde en fonction de la taille du réservoir et a tracé le graphique qui suit. Actuellement le taux moyen de récupération pour le pétrole conventionnel est de l'ordre de 35 % à 40% et, dans les cas les plus favorables, il peut atteindre la valeur de 80 %, ce qui est exceptionnel ([figure-19](#)).

Le taux de récupération pour le gaz naturel conventionnel est plus élevé, il varie généralement entre 50 à 90 % selon les gisements.



La limitation ultime du taux d'extraction est l'énergie nécessaire pour le pompage et la transformation, c'est-à-dire lorsque le taux de retour énergétique (TRE) approche de la valeur de 1.

Depuis quelques années, l'arrivée sur le marché de pétrole non conventionnel a stabilisé un certain temps les prix, mais selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), les réserves économiquement exploitables risquent de décliner rapidement. À titre d'exemple, selon l'AIE le pétrole de schiste du Dakota verra sa production diminuer rapidement à partir de 2040, c'est la même chose pour les autres pétroles de schiste. Une raison à cela est que le taux d'extraction de ce type de pétrole est très faible, selon Marc Durand, il est économiquement possible de récupérer que 1 à 2 % de la ressource en place par la méthode de la fracturation hydraulique, mais guère plus. Dans le cas du gaz naturel, le taux de récupération pour le gaz de schiste est plus élevé, il se situe entre 10 à 20 %, ce qui reste faible.

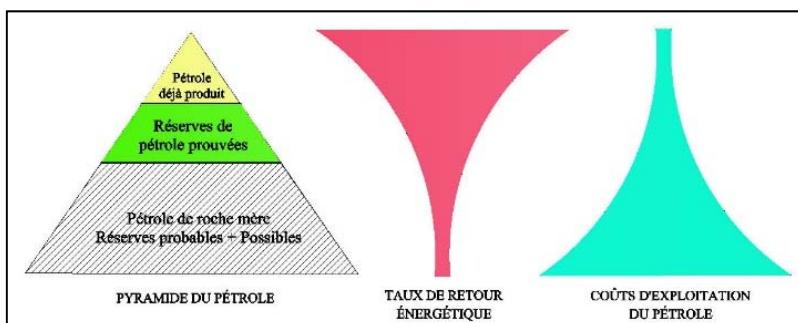
Seules les réserves des sables bitumineux de l'Alberta et du Venezuela pourront avoir une durée de vie s'approchant des 50 ans à leurs taux actuels de production, mais ceci est sujet à réévaluation à la baisse si leurs taux d'extraction augmentent.

## Réserves ultimes

Définissons un nouveau terme, celui de « **réserve ultime** ». C'est la somme de ce qui sera extrait de terre du début à la fin de l'histoire des combustibles fossiles. Il s'agit donc de l'addition de :

- ◆ Tout ce qui a déjà été consommé
- ◆ Tout ce qui est contenu dans les réserves prouvées
- ◆ Tout ce qui est contenu dans les réserves probables et possibles

La figure suivante représente le cumul, pour le cas du pétrole, des différents types de réserves pour lesquelles est associé le taux de retour énergétique (TRE) ainsi qu'une vision simplifiée, mais réaliste, de l'augmentation des coûts d'exploitation selon le type de réserve ([figure-20](#)).



Les réserves de pétrole et de gaz naturel potentiellement exploitables à l'avenir à un coût raisonnable et avec un impact environnemental pas trop élevé sont en définitive très faibles, car les réserves conventionnelles, celles qui sont les plus faciles à exploiter et qui ont un

TRE le plus élevé, sont presque toutes en phase de déclin.

Ce qui est en croissance, ce sont les formes non conventionnelles, pétrole et gaz de schiste, pétrole des sables bitumineux et pétrole ultra profond. Ce sont toutes des filières très coûteuses en termes d'investissement, et qui ont un TRE plus bas que les formes conventionnelles, et qui présentent des risques environnementaux beaucoup plus importants. Il y a donc une double pénalité à exploiter les combustibles non conventionnels.

La production mondiale de charbon est actuellement de 7.7 milliards de tonnes. Environ 50% du charbon produit sert à la production d'électricité, 16 % à la sidérurgie et 5 % aux cimenteries. Le solde, 29 %, au chauffage et aux autres industries, dont la carbochimie. Cette filière énergétique est en décroissance en Occident, mais en croissance dans plusieurs pays émergents, ce qui fait que l'extraction de ce combustible continu de croître.

## ÉNERGIE RENOUVELABLE ET MATIÈRES PREMIÈRES

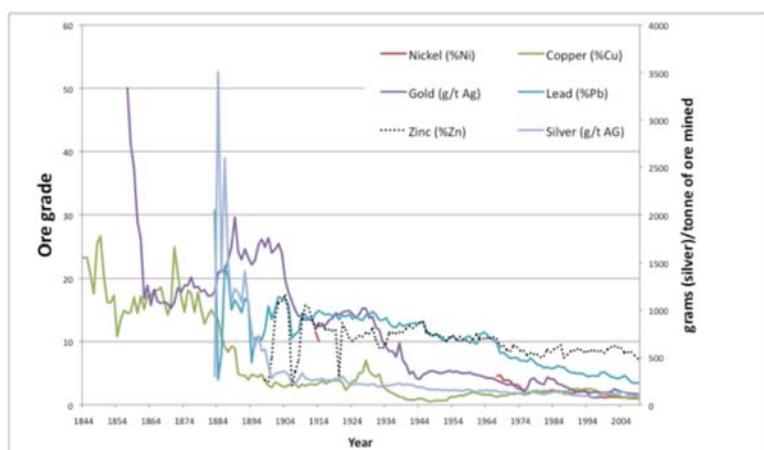
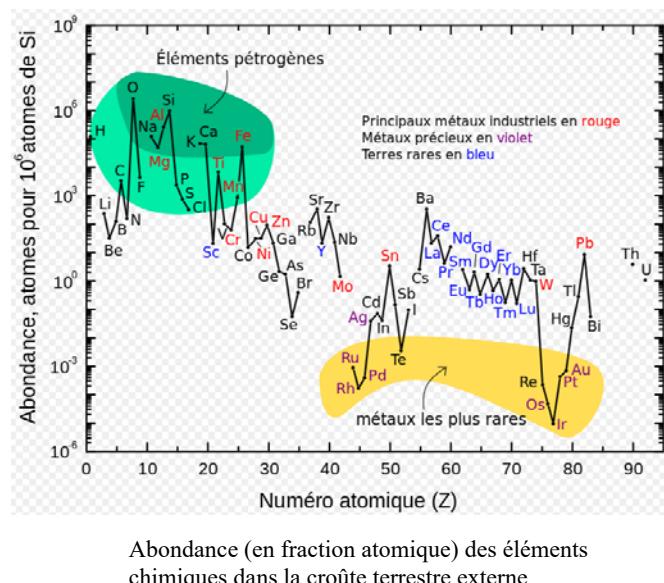
Les espèces chimiques ont des teneurs dans la croûte terrestre très variables. ([figure-21](#)).

Le graphique de droite présente l'abondance relative de différents éléments en rapport à la silice et sur une échelle logarithmique.

### Extraction des minéraux :

L'extraction des minéraux a débuté à l'âge du bronze et les mines les plus riches ont été exploitées en tout premier. Beaucoup de mines en Europe sont maintenant vides et non actives.

Plus le temps passe et plus les nouvelles mines ont des teneurs en minéraux faibles, il faut donc plus d'énergie pour en extraire un kilogramme de minéraux et plus on génère de déchets.



Évolution de la concentration de divers minéraux en Australie 1844 à 2010  
SOURCE : Livre « Le grand pillage » de Ugo Bardi ; 2015

Sauf quelques éléments comme le fer, le silicium et le calcaire, la majorité des minéraux utiles aux humains sont en baisse de teneur partout dans le monde ([figure-22](#)).

### Cas du cuivre :

En 1900 : teneur moyenne de 25%  
En 2015 : teneur moyenne de 0.5% pour les nouveaux gisements

Contrairement aux combustibles fossiles, il n'y a pas destruction de composés chimiques, la matière ne disparaît pas à la surface de la planète, mais est saupoudrée sur de grandes étendues qui rend son recyclage impossible pour une partie de ce qui est extrait.

Exemple : Dioxyde de titane ( $TiO_2$ )

Usage principal : colorant (blanc) dans la peinture, papier, céramique, dentifrice, etc

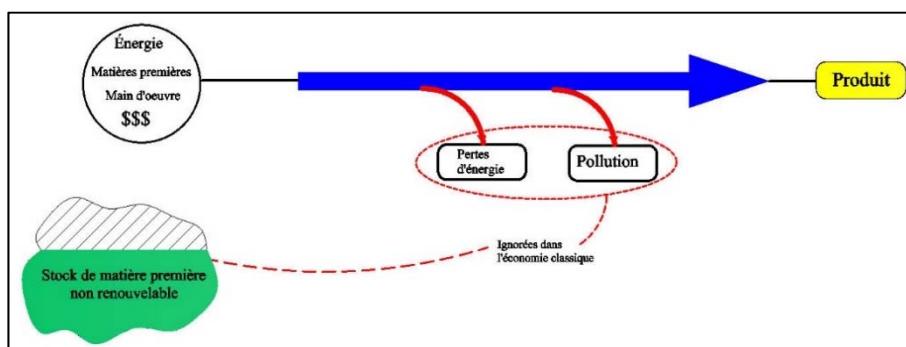
Une fois appliqué sur un mur sous forme de peinture, le titane tombera en poussière au bout de plusieurs années et sera dispersé.

Il faut également compter avec l'entropie, terme découlant de la deuxième loi de thermodynamique. Ce principe met une limite à tout procédé de récupération.

## ÉCONOMIE LINÉAIRE – CIRCULAIRE – AUTRE

**Économie linéaire :**

Depuis le début de la formalisation des principes de l'économie capitaliste, la nature a été vue comme un puits sans fond de matières premières et une poubelle extensive à l'infinie pour les déchets produits par l'industrie et par la consommation, les externalités. Cette vision n'est plus viable de par les contraintes qu'elle a elle-même engendrées.



Cette vision simpliste peut être représentée par la figure de gauche :  
 (figure-23)

Impossible de concevoir une baisse du PIB pour un économiste classique, ce serait un drame, mais la nature nous y obligera. Ce

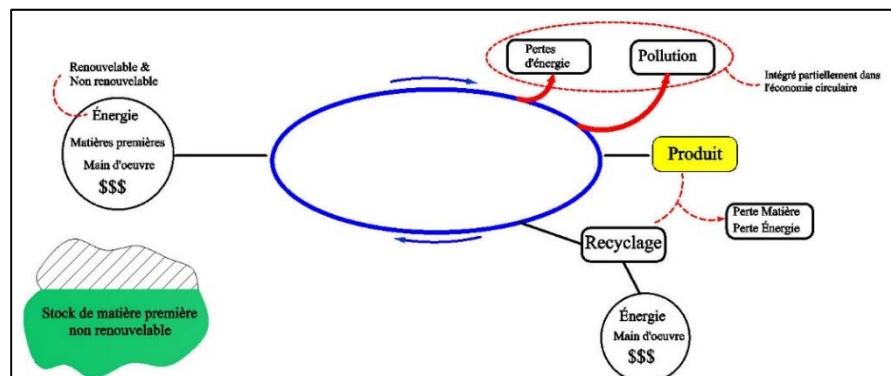
sont des limites physiques incontournables, donc évolution de la vision économique.

**Économie circulaire : (figure-24)**

La notion d'économie circulaire se développe depuis plusieurs années pour essayer de donner espoirs aux investisseurs. Cette vision a des qualités certaines, mais également des limitations.

Elle introduit une certaine conscience de limites des ressources et de responsabilité pour les déchets produits.

Elle permet de mettre en lumière des avantages d'utiliser les sous-produits, ou résidus ou des pertes d'énergie pour en faire des intras pour un autre procédé. Une certaine circularité est possible. Mais une vraie boucle fermée est une aberration, l'entropie impose ses limites.



## Économie spirale : (figure-25)

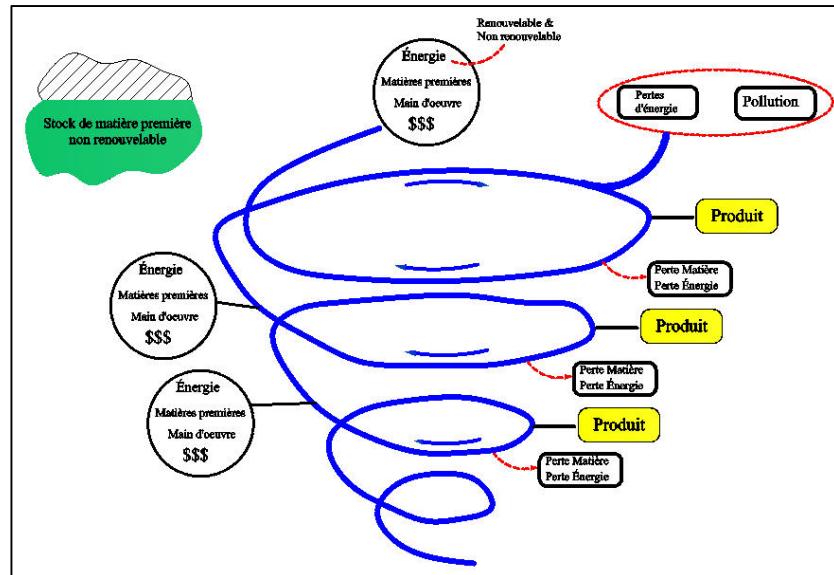
Deuxième principe de thermodynamique : l'entropie

Tout travail que l'on fait implique une certaine perte d'énergie impossible à récupérer. Exemple, le recyclage de métaux implique une certaine perte de matière, car recycler des matières premières demande de l'énergie.

La seule représentation qui est cohérente avec cette réalité est une forme en spirale décroissante pour l'économie.

À chaque niveau une certaine perte d'énergie et de matière est inévitable, ce qui impose nécessairement une diminution des stocks de matière première restant à l'état de réserve dans la nature, donc exploitable plus tard.

Le phénomène de dispersion fait que l'on passe de concentrations élevées de minéraux dans les gisements, à des concentrations très faibles et étendues sur de grandes surfaces, ce qui les rend non récupérables.



La sobriété sera donc nécessaire dans un avenir plus ou moins éloigné, et cette sobriété est une nécessité imposée par les limites physiques de la Terre.

## BIBLIOGRAPHIE :

ONU Population mondiale : [ONU https://population.un.org/wpp/DataQuery/](https://population.un.org/wpp/DataQuery/)

ASPO France : <https://aspofrance.org/>

World Resources Institute – Données sur le climat : <http://datasets.wri.org/dataset?q=Climate>

Chaire de gestion du secteur de l'énergie – HEC Montréal : « État de l'énergie au Québec » » 2018

BP : « Statistical Review of World Energy » ; Juin 2018

Marc Durand : « Lettre ouverte déposée dans le cadre de la consultation pour les ÉES Hydrocarbures ÉES-Anticosti » ; mars 2015

Jean Laherrere : « Combustibles fossiles: données, fiabilité et perspectives » ; 2011

USGS : « Assessment of potential additions to conventional oil and gas resources in discovered fields of the United States from reserve growth » ; 2012

World Energy Council : « World energy resources – Hydropower » ; 2016

Office National de l'Énergie : « Profils énergétiques des provinces et territoires – Canada » ; 2016  
<https://www.neb-one.gc.ca/nrg/ntgrtd/mrkt/nrgsstmprfls/cda-fra.html?=&wbdisable=true>

International Hydropower Association : « Hydropower status report – Sector trends and insights » ; 2018

International Renewable Energy Agency : « Global Energy Transformation, a roadmap to 2050 » ; 2018

Agence Internationale de l'Énergie ( AIE ) ; Outlook de l'énergie ; 2016

ADEME : « Bilan transversal de l'impact de l'électrification par segment » ; Projet E4T ; avril 2018

Office Nationale de l'Énergie :

<https://www.neb-one.gc.ca/nrg/ntgrtd/mrkt/nrgsstmprfls/cda-fra.html?=&wbdisable=true>

ENERDATA : « Resource Challenges for Zero-Net-Emissions » ; 20 Nov 2018

NOAA – Scripps Institution of Oceanography : <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/>

NASA : <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>

IPCC : « Global warming of 1.5°C » , Summary for policymakers ; 6 octobre 2018

<http://www.ipcc.ch/report/sr15/>

Rapport spécial de l'UNEP « Emissions gap report-2018» :

<https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2018>

Rapport Hydro-Québec sur consommation énergétique des voitures électriques :

<http://www.hydroquebec.com/electrification-transport/voitures-electriques/calculez-vos-economies.html>

« Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2016 et leur évolution depuis 1990»

Hydro-Québec :

<http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/energie-environnement/production-achats-et-ventes-electricite.html>

Ministère de l'environnement du Canada : <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/>

David Murphy : « The Energy Return on Investment Threshold » ; 2011

<http://www.theoildrum.com/node/8625>

Peter C. K. Vesborg and Thomas F. Jaramillo ; University of Denmark ; « Addressing the terawatt challenge: scalability in the supply of chemical elements for renewable energy » ; 2012

The Hague Centre for Strategic Studies ; « The geopolitics of mineral resources for renewable energy technologies » ; 2013

Livre : « Le grand pillage » de Ugo Bardi ; 2015

Livre : « La décroissance - Entropie – Écologie – Économie » ; de Nicholas Georgescu-Roegen ; 1995