

MÉMOIRE DE : BRUNO DETUNCQ

Dans le cadre des consultations pour le
Plan d'électrification et de changements climatiques (PECC)

Secteur principalement étudié : Les Transports
Région : du Québec



Présentation de Bruno Detuncq :

BAC et diplôme d'ingénieur en 1975 de l'École Polytechnique de Montréal. De 1978 à 1979, maîtrise à l'École Polytechnique portant sur l'utilisation de l'énergie solaire dans le bâtiment, puis travail comme associé de recherche dans le même domaine jusqu'en 1983. Chargé d'enseignement puis professeur adjoint au département de génie mécanique de Polytechnique. Développement en 1995 d'un nouveau cours intitulé «Combustion et pollution atmosphérique». Développement d'un laboratoire dédié à l'analyse de la combustion dans des moteurs à pistons, travaux axés principalement sur l'analyse des gaz brûlés. Plusieurs publications dans le cadre de travaux subventionnés par Transport Canada, Ministère Énergie Mines et Ressources du Canada, ainsi que par Gaz Métro. Retraite en décembre 2016.

Thématique étudiée : Le transport, son impact sur les émissions de GES, les solutions environnementales saines et adaptées aux différents besoins.

Date : 31 octobre 2019

Table des matières du mémoire

Introduction	3
Symboles et abréviations	3
Variation de la population mondiale	4
Énergie primaire consommée	4
Hypothèse d'augmentation de la consommation de combustibles fossiles	5
Production passée et future de combustibles fossiles	6
Évolution mondiale des émissions de GES	8
Courbe de Keeling : Concentration de CO ₂ dans l'atmosphère	8
Évolution de la température moyenne mondiale	9
Rapport spécial du GEC 2018	10
Scénarios d'émissions du rapport spécial du GIEC 2018	10
Utilisation des énergies primaires par secteur d'activité	11
Efficacité énergétique des différents modes de transport	12
Situation énergétique particulière au Québec	13
Transport en voiture à essence	15
Électrification des transports au Québec	16
Transport collectif au Québec	17
Conclusion : Mobilité durable	21
Bibliographie	22

INTRODUCTION

Avant d’aborder la problématique spécifique du transport, il est important de replacer cet enjeu dans le contexte plus large de l’urgence climatique et de la déplétion des ressources mondiales. Le Québec n’est pas séparé du reste du monde et doit développer sa politique énergétique en cohérence avec les impératifs de l’Accord de Paris qui découlent directement des dernières avancées scientifiques concernant le climat. Les décisions qui seront prises dans les dix prochaines années sont cruciales et il est important que ces décisions tracent la route permettant d’aborder le virage de la transition énergétique rapidement et de la bonne façon.

La première partie de ce mémoire décrit le panorama général en termes d’énergie et de climat. Puis la place du Québec y est décrite. Ensuite la problématique du transport est abordée en y décrivant l’impact du transport individuel et du transport collectif sur l’environnement et le budget familial. L’électrification est l’approche à privilégier, mais l’électrification de quoi ? Électrifier toute la flotte de voiture et de camion du Québec est une approche qui n’est pas viable en termes de budget énergétique de la province. Par contre, mettre en place un bouquet de solution passant par le transport collectif largement déployé dans les zones urbaines, suburbaines ainsi qu’interurbaines, associé au transport individuel privilégié pour les zones peu densément peuplées serait une approche porteuse d’amélioration pour le long terme.

Cette approche permettrait également un déploiement plus important du transport actif, le vélo principalement, qui pourrait alors bénéficier de plus d’espace pour développer un réseau de pistes cyclables sécuritaires et agréables.

Si le Québec veut utiliser son hydro-électricité correctement pour l’avenir, il est nécessaire de faire des choix éclairés lui permettant de garder une certaine marge de manœuvre permettant de satisfaire les besoins futurs liés à l’accroissement de la population et au transfert des énergies fossiles vers les énergies renouvelables.

Symboles et abréviations

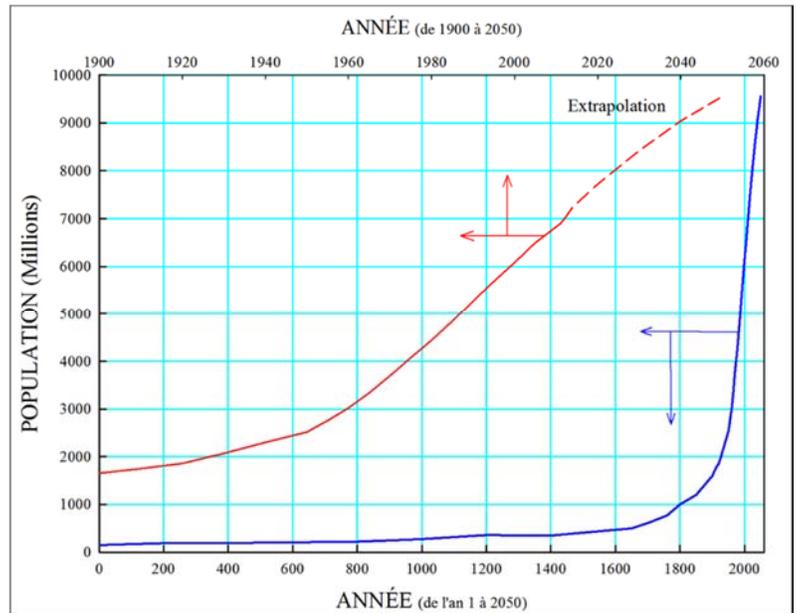
Mtep	Million de tonnes de pétrole équivalent
Gtep	Milliards de tonnes de pétrole équivalent
Gtp	Milliards de tonnes de pétrole
R/P	Rapport des réserves de pétrole divisé par la production annuelle de pétrole
Gt éq-CO ₂	Milliards de tonnes de CO ₂ équivalent
GES	Gaz à effets de serre
LULUCF	Utilisation des terres et changement d’utilisation ainsi que la foresterie
ppm	Parties par millions

VARIATION DE LA POPULATION MONDIALE (figure-1)

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 bleu est reliée à celui du bas.



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

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

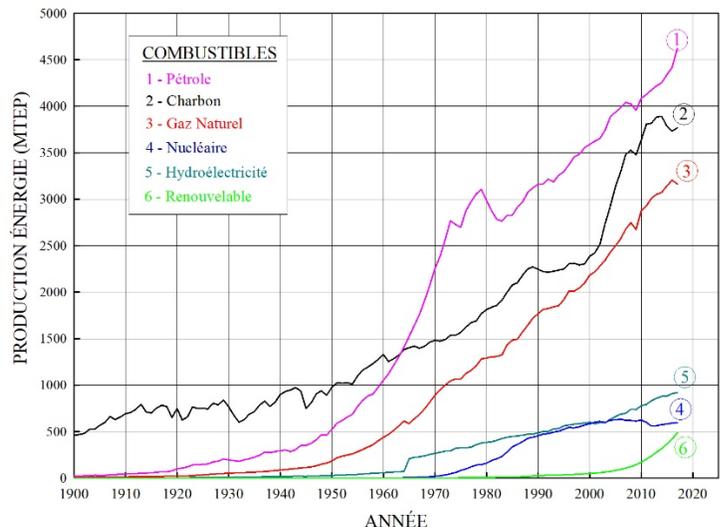
Au Québec : Selon l'Institut de la statistique du Québec, en fin 2018 la population de la province était de 8.39 millions de personnes, l'indice de fécondité est de 1.54, mais l'immigration permet de faire augmenter cette valeur. D'après le gouvernement la population devrait atteindre un maximum d'environ 10 millions de personnes entre 2050 et 2066. Cette valeur est à prendre en compte dans l'évaluation future des besoins en énergie.

ÉNERGIE PRIMAIRE CONSOMMÉE (figure-2)

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.

On observe une augmentation importante de la consommation d'énergie primaire mondiale depuis 1960. Entre 2010 et 2018, l'augmentation de la consommation de pétrole a été en moyenne de 1.56 % par année.



SOURCE : Données de BP ; Graphique de Bruno Detuncq

Causes :

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

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'augmente 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 sont évaluées à 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-3)

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

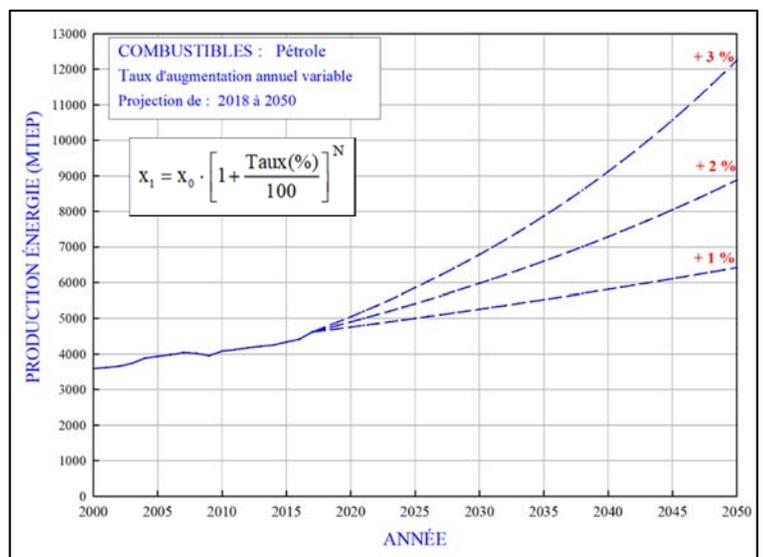
L'augmentation du PBI

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, procédons 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 !!

PRODUCTION PASSÉE ET FUTURE DE COMBUSTIBLES FOSSILES (figure-4)

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-4 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

Ingenieur 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.

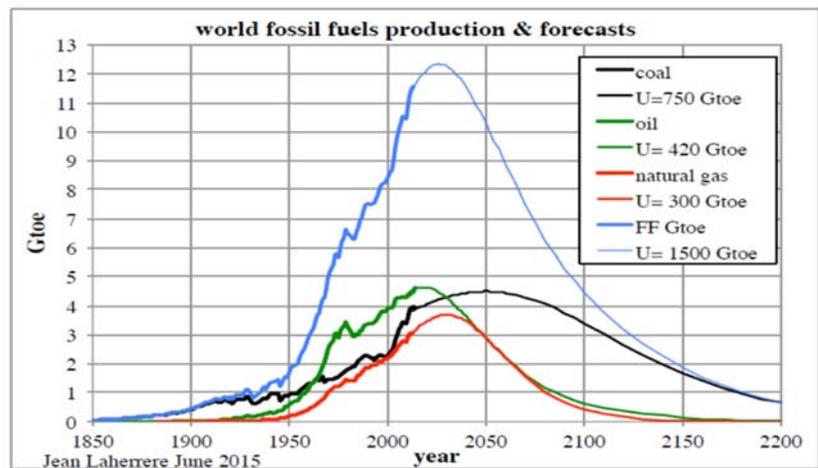
- Ultime pour le pétrole ~ **420 Gtep** avec plateau de 2005 à 2025
- Ultime pour le gaz ~ **300 Gtep** avec pic vers 2025
- Ultime pour le charbon ~ **750 Gtep** avec plateau de 2020 à 2080

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.

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. Même constat pour les sables bitumineux.

De 1980 à 2017 : selon l'Agence Internationale de l'Énergie

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)

Vouloir produire toute l'énergie en 2050 à partir d'énergies renouvelables nécessite :

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.

ÉVOLUTION MONDIALE DES ÉMISSIONS DE GES (figure-5)

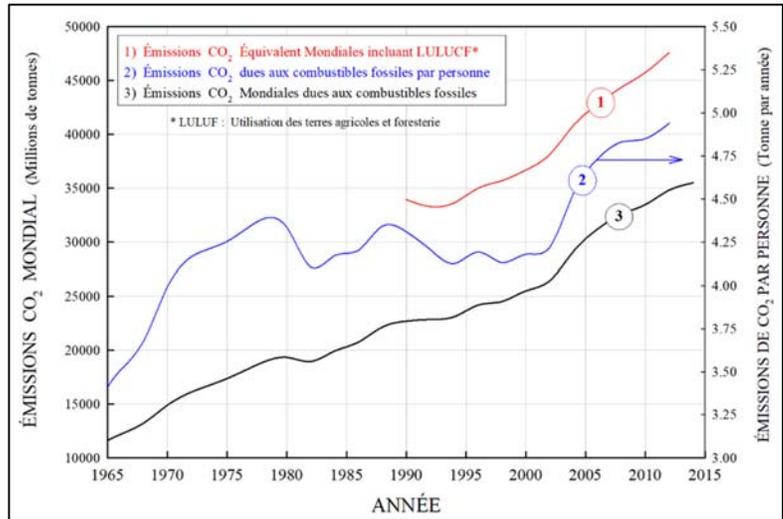
Le CO₂ équivalent correspond à l'effet combiné des gaz suivants : CO₂ – CH₄ – N₂O - Ozone

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 LULUCF 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, Chine et Inde principalement.

En 2017 :

Émissions mondiales pour l'année comprenant l'ensemble des GES : **53.5 Gt éq-CO₂** (UNEP)

La moyenne mondiale d'émission de CO₂ 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 presque essentiellement de source hydraulique. Mais si l'on regarde la quantité d'énergie totale, comprenant l'électricité et les combustibles fossiles, les Québécois sont parmi les plus voraces consommateurs d'énergie au monde.

Au niveau mondial, 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 CO2 DANS L'ATMOSPÈRE (figure-7)

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

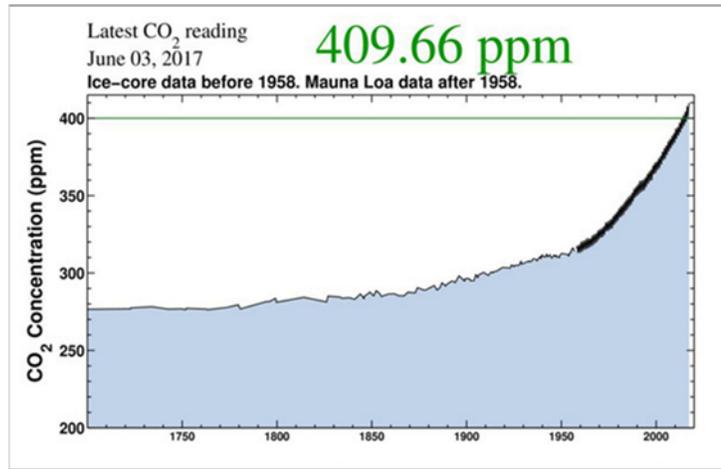
Mesures effectuées au sommet du mont Mauna Loa sur l'île d'Hawaï loin de toute perturbation industrielle.

En 1700 la concentration de CO₂ était de : **280 ppm**

Entre **1800 et 2017**, soit en 217 ans, la concentration de CO₂ a connu une augmentation de **46 %**. Du jamais vu dans le passé. Dans les derniers 800 000 ans passés, la concentration de CO₂ atmosphérique n'avait jamais dépassé la valeur de **300 ppm**.

Environ **50%** des émissions de CO₂ émis 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 CO₂ 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.



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

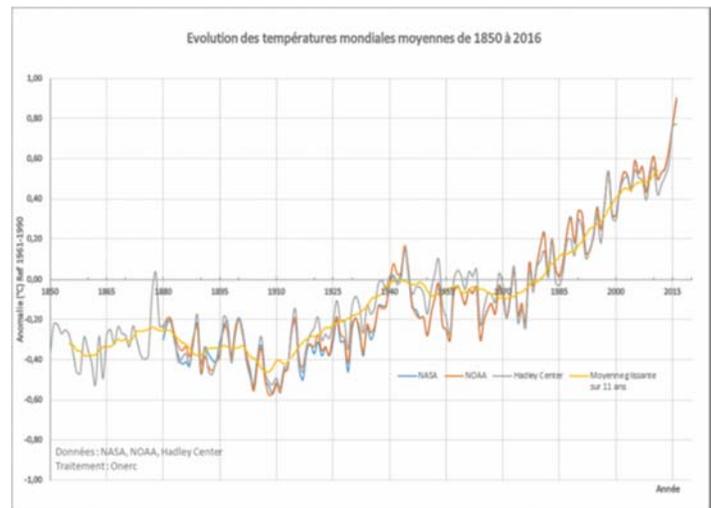
ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE MONDIALE (figure-8)

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

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.

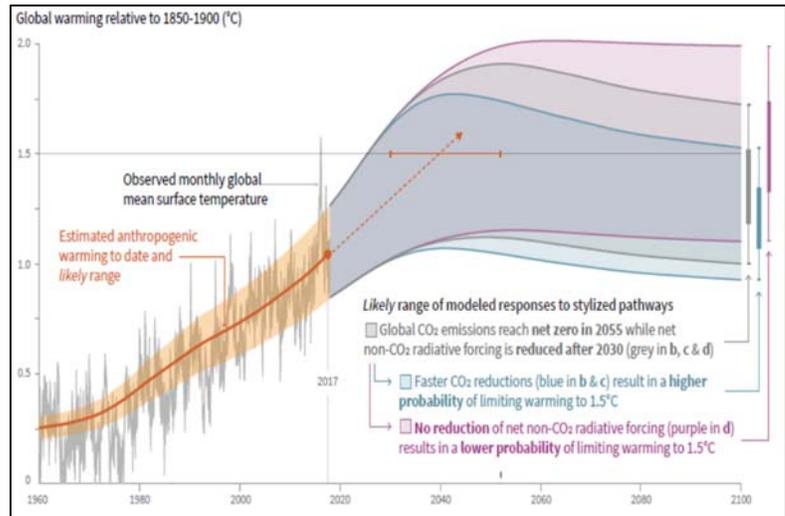
Pollution locale : un élément important à ne pas oublier est la pollution des centres urbains par les particules fines, l'ozone troposphérique, les COV et HAP, tous des produits qui pénalisent grandement la santé des habitants de toutes les villes du monde. Cette pollution est une conséquence directe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



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

RAPPORT SPÉCIAL DU GIEC 2018 (figure-11)

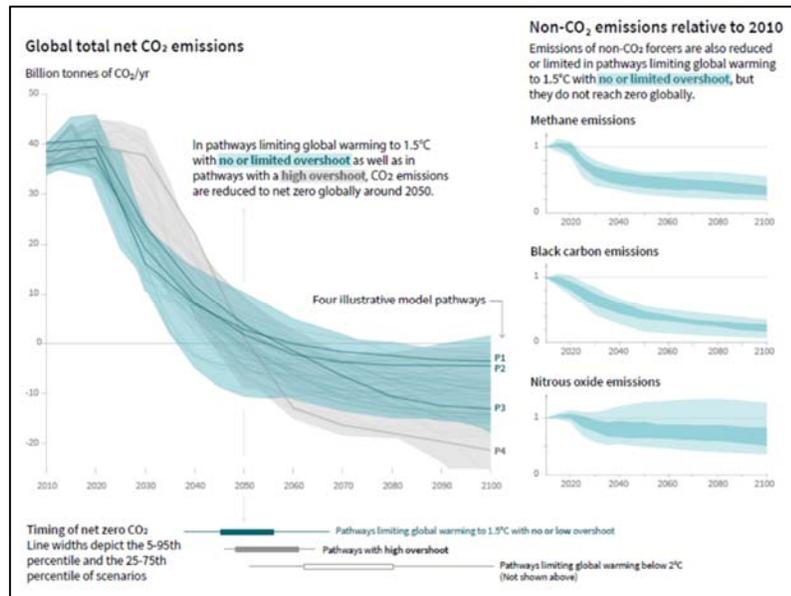
- Les émissions de GES par les **activités humaines** sont la principale cause du réchauffement climatique.
- Taux de réchauffement de **0.17 °C** par décennie depuis 1950.
- Au rythme actuel, le monde connaîtrait une hausse de **1.5 °C** de la moyenne des températures entre 2030 et 2052.
- En **2018**, 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-12)



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

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 CO₂
Émissions de CO₂ de provenance humaine moins le retrait de CO₂ par l'humain et le reboisement.

Les scénarios du GIEC prennent en compte la réduction du CO₂, mais également celle du CH₄, du N₂O et des poussières de carbone. Chaque ligne représente un scénario particulier.

L'atteinte d'une diminution aussi importante en seulement 30 ans sera très difficile, mais pas impossible. Le choix des cibles est ici essentiel, celles-ci varient d'un endroit à l'autre selon les conditions économiques, sociales et industrielles locales.

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-CO₂** (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-CO₂** (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, ailleurs de nombreux pays en émergences voient leur population croître, ce qui entraîne une croissance des besoins énergétiques. Le Québec a une chance de se démarquer de par sa richesse en hydroélectricité et la jeunesse de ses infrastructures, ce qui permet une plus grande capacité d'adaptation.

UTILISATION DES ÉNERGIES PRIMAIRES PAR SECTEUR D'ACTIVITÉ

Valeurs moyennes mondiales

	Consommation finale 1990 (Mtep)	Pourcentage de la consommation	Consommation finale 2017 (Mtep)	Variation consommation 2017 / 1990	Pourcentage de la consommation
Industrie	1 804	29 %	2 821	+56 %	29 %
Transport	1 571	25 %	2 808	+79 %	29 %
Résidentiel	1 529	24 %	2 064	+35 %	21 %
Tertiaire	453	7 %	785	+73 %	8 %
Agriculture + pêche	170	3 %	212	+25 %	2 %
Non spécifié	261	4 %	149	-43 %	2 %
Usages non énergétiques	476	8 %	879	+85 %	9 %
Total	6 264	100 %	9 717	+55 %	100 %

SOURCE : Agence Internationale de l'Énergie (AIE) ; Outlook de l'énergie ; 2019

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

- 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 CO₂ 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 ₂ 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)	2.5	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>

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 CO₂. 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
2050 ----->	≈ 9.5 milliards	2500 millions ?

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.

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 ÉNERGÉTIQUE PARTICULIÈRE AU QUÉBEC

ÉNERGIE CONSOMMÉE AU QUÉBEC EN 2017

Le Québec se distingue du reste du Canada et du reste du monde par la production de l'électricité sous forme hydraulique, sauf pour des lieux éloignés comme le Grand Nord et les îles de la Madeleine. Cette situation permet qu'environ 49 % de toute l'énergie utilisée dans la province soit produite localement et 51 % est importée sous forme de combustibles fossiles.

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

* Petajoule : 10¹⁵ Joules

SOURCES : (1) <https://www.neb-one.gc.ca/nrg/ntgrtd/mrkt/nrgsstmprfls/cda-fra.html?=&wbdisable=true>
 (2) <http://www.hydroquebec.com/developpement-durable/energie-environnement/production-achats-et-ventes-electricite.html>

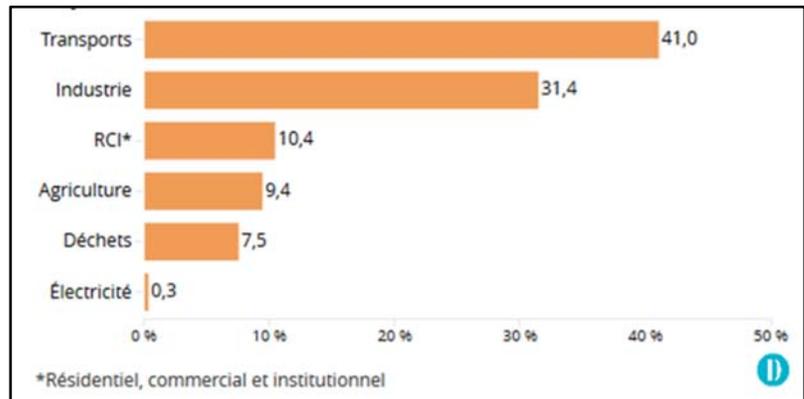
Depuis 100 ans de nombreux puits d'exploration ont été forés dans la province sans jamais donner signe d'une exploitation rentable. L'heure n'est plus à ces chimères, le climat impose une autre voie.

En réduisant considérablement la consommation de pétrole dans le futur le, Québec serait en mesure d'économiser des sommes importantes.

Émissions de GES par secteur d'activité au Québec en 2017 (%) (figure-13)

Au Québec en 2017, les émissions globales de GES ont été de l'ordre de **79 Mt éq-CO₂**, soit une diminution d'environ **9%** par rapport à 1990, ce qui est faible.

Cette diminution est principalement reliée au transfert important du chauffage des bâtiments du mazout vers le tout électrique, donc non émetteur de GES.



SOURCE : <http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/>

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

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-CO₂**, donc **41%** du total des émissions, c'est le secteur le plus pénalisant en termes d'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.

Développement futur de l'hydroélectricité :

La centrale hydroélectrique de Churchill Fall appartient qu'au tiers à Hydro-Québec et le contrat liant Terre-Neuve et le Québec se termine en 2041, dans 21 ans. L'électricité produite par cette centrale, d'une puissance installée de 5400 MW, est achetée entièrement par le Québec à un tarif très avantageux, sauf 300 MW réservés au Labrador. L'achat de l'électricité du Labrador représente environ 15% de la puissance installée d'Hydro-Québec. Un travail important a été entrepris par Terre-Neuve pour lui permettre d'offrir au marché américain la production électrique du Labrador. Ce n'est donc pas une énergie sur laquelle le Québec peut compter à long terme. Ce serait prendre des risques importants.

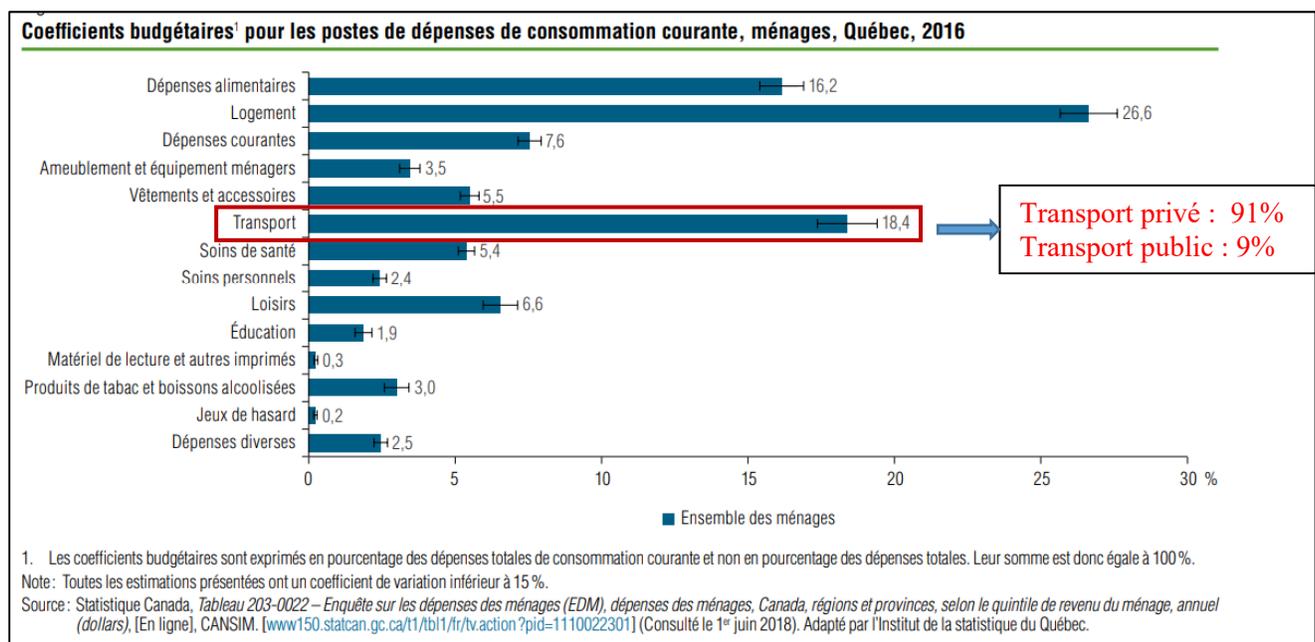
Le développement des dernières rivières qui peuvent être harnachées au Québec est de plus en plus problématique et contesté, exemple la Romaine qui pourra produire environ 1550 MW lorsque les travaux seront finis. Une certaine limitation d'approvisionnement est donc à considérer sérieusement. Ce qui nous impose un questionnement sur la meilleure utilisation de l'énergie électrique produite au Québec dans les 30 prochaines années. Les solutions faciles du tout électrique ne peuvent tenir face à la vérification des faits. Le développement de la filière éolienne n'est pas encore terminé et recèle encore un potentiel appréciable, mais ayant ses propres contraintes.

Dernier élément à considérer concernant la filière hydroélectrique, est la production de GES en considérant le cycle de vie de production de cette énergie. Une étude d'Hydro-Québec indique qu'il faut prendre en compte une production d'environ 20 gr éq. CO2/kWh, ce taux d'émission reflète le cycle de vie de l'électricité produite, transportée et distribuée par Hydro-Québec. Mais cette valeur est beaucoup plus faible que mes valeurs d'émission pour les autres sources d'électricité basée sur les combustibles fossiles.

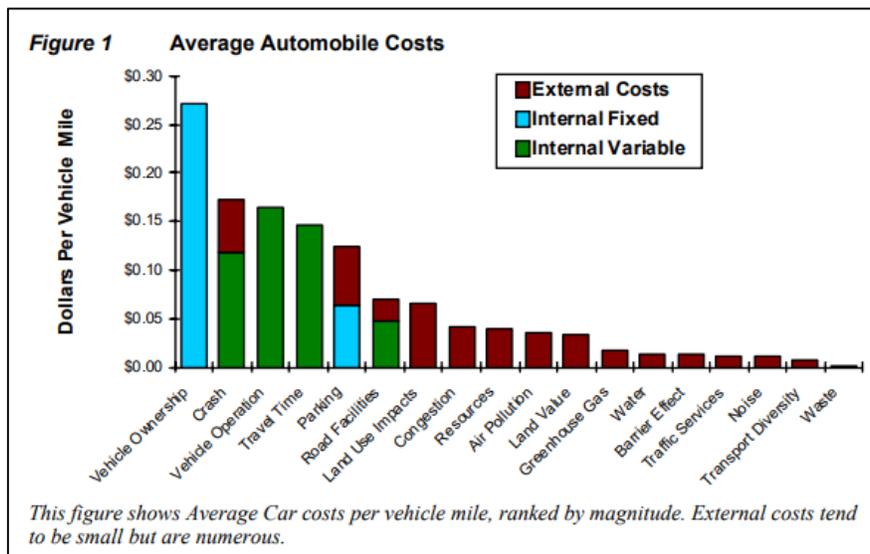
TRANSPORT EN VOITURE À ESSENCE

La presque totalité des voitures roulant actuellement sur les routes au Québec sont des voitures à essence. Sur les 5.2 millions de véhicules, on ne compte actuellement que 45 000 voitures électriques, soit 0.9 %. On est loin des 12 % de véhicules électriques en Norvège où le gouvernement a une cible de 50 % de ce type de voiture en 2030.

Cette prépondérance de la voiture conventionnelle impose des coûts individuels, collectifs et environnementaux très importants. Selon la CAA il en coûte en moyenne pour une voiture compacte un montant annuel d'environ 10 000 \$, soit plus de 27 \$ par jour, c'est énorme considérant qu'une auto dort près de 90 % de son temps. La figure qui suit présente les différents postes budgétaires d'un ménage et on voit que le transport privé est le deuxième en importance, et ceci pour une seule voiture par ménage. Dans le cas de déplacement en transport public, la charge financière diminue considérablement.



Autre élément à ne pas négliger, le transport individuel nécessite des investissements très importants de la part des gouvernements. Que ce soit pour la construction et réfection des routes, ponts, viaducs et stationnements. Ce sont des coûts qui sont assumés par tous les citoyens, même par ceux qui n'utilisent pas de voiture individuelle. Au Québec environ un tiers des coûts de ces infrastructures sont assumés par les taxes directes et indirectes payées par les automobilistes. En comparaison c'est environ 46% des frais globaux des transports collectifs qui sont assumés par les usagers, une différence notable.



- Effets sur l'aménagement du territoire
- Accidents
- Stationnement
- Congestion
- Consommation de ressources
- Pollution de l'air
- Valeurs des sols
- Émissions de GES
- Eau
- Effets de barrière
- Gestion de la circulation
- Bruit
- Coût d'opportunité
- Déchets

Source : Transport Cost and Benefit Analysis, Todd Litman, Victoria Transport Policy Institute, 2009

Autre constat, l'automobile entraîne des externalités considérables non assurées par les usagers. On connaît bien celles dues à la production de GES, mais il y a toutes les autres, dont ceux liés aux accidents qui causent des décès et des blessures souvent graves, donc des frais individuels et collectifs par une surutilisation des services de santé. Une auto électrique c'est mieux qu'une auto à essence pour certains aspects, mais beaucoup des nuisances de l'auto à essence se retrouvent dans l'auto électrique, avec de nouvelles problématiques qui se rajoutent, comme celle des batteries.

ÉLECTRIFICATION DES TRANSPORTS AU QUÉBEC

L'électrification du transport privé et de marchandise au Québec permettra une diminution importante les émissions de GES, mais ...

Un rappel important lorsque l'on parle de transport, est que ce qu'il faut transporter ce sont les humains et non les véhicules. Il faut donc que le véhicule soit au service de l'humain pour une seule fin de déplacement, mais pas pour des fonctions inconscientes de valorisation de l'égo.

Procédons à une première hypothèse, celle de convertir entièrement le parc automobile en voiture électrique en utilisant une vision statique, c'est-à-dire, considérons que le parc d'auto reste constant aux valeurs de l'année 2017. Également, nous laissons de côté toute la partie du transport de marchandises, c'est un domaine très différent, car la gamme de camions est très large en termes de capacité et de puissance moteur.

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 %**

Même si toutes les voitures ne roulent pas en même temps, il faut considérer que la pointe sera importante le matin et le soir les jours de semaine. La recharge sera donc relativement synchronisée.

Comme ce travail de prospective se veut viable pour une longue période, au moins jusqu'en 2050, sinon plus, et en considérant la valeur de 15% de réduction potentiel de puissance du Labrador et l'augmentation nécessaire de 16% de puissance pour rencontrer les besoins du parc automobile, on se retrouve avec un déficit de **31% de puissance**. Très mauvaise planification, surtout en considérant le fait que l'on n'a pas pris en compte le transport de marchandises qui correspond à environ 35 % du total de l'énergie consommée par le secteur du transport.

L'approche qui consisterait à électrifier le transport individuel (auto solo) au Québec pourrait mener à une impasse. Même en considérant des efforts importants du côté de l'efficacité énergétique du côté des bâtiments et de l'industrie, la marge est trop importante et les risques trop grands. Il serait mieux de combiner les modes suivants :

- Le transfert d'une part importante des déplacements automobiles vers le transport actif ou collectif électrique. Cette approche permet une diminution de l'énergie consommée par km par personne par une optimisation du système de transport collectif du fait d'un plus grand achalandage réparti sur une période plus longue de la journée.
- Permettre l'usage de l'auto électrique là où les transports collectifs ne peuvent être déployés.
- Permettre l'usage d'autopartage électrique dans le milieu urbain pour des déplacements ponctuels.
- D'électrifier le transport de marchandises dans toutes les zones urbaines en favorisant l'usage de camions de petite taille.
- De mettre en place des transports interurbains électriques par trains légers ou autobus électriques.

Ces approches permettent en même temps de diminuer l'énergie consommée par personne et par tonne de marchandise déplacée, ainsi que de diminuer fortement les émissions de GES dues à cet activité. Autre avantage, cette approche réduirait l'impact écologique de la production et recyclage des batteries pour les autos individuelles, ce qui peut devenir une nouvelle source de pollution importante. Dernier avantage et non le moindre, cela permettrait de réduire énormément l'importation de pétrole de l'extérieur, ce qui favoriserait la balance de paiement de la province.

[TRANSPORT COLLECTIF AU QUÉBEC](#)

Introduction :

Les humains se déplacent depuis la nuit des temps. Au début, à pied, puis à cheval, sur le dos de buffles, d'ânes, puis en véhicules tirés par des animaux. Sans parler des transports sur l'eau, puis dans les airs. Avec le développement de villes de plus en plus étendues et densément peuplées est apparu le besoin de transport collectif pour permettre aux citoyens de se rendre à leur lieu de travail ou d'échanges. Le transport collectif a donc une très longue histoire bien plus ancienne que celle de l'automobile personnelle.

Les premières expériences sont par voie d'eau, par exemple des barges utilisées pour traverser des rivières trop larges pour y installer des ponts. Généralement c'était des particuliers qui s'adonnaient à cette tâche assez pénible et peu lucrative.

En Occident, la première idée de transport collectif en ville a été proposée par Blaise Pascal qui suggéra en 1662 au roi Louis XIV de faire circuler dans les rues de Paris, avec des passages à horaires réguliers, des « carrosses à cinq sols » comportant 8 places et tirés par 4 chevaux. À la suite de la hausse des prix, le service est délaissé et disparaît, mais l'idée est restée.



John Greenwood, en 1824, instaure en Angleterre (Manchester) un service régulier de voitures. À Nantes, en 1826, l'omnibus apparaît, et s'installe à Paris en 1828. Les premiers tramways aux États-Unis apparaissent au début du XIX^e siècle. Ces véhicules sont généralement tirés par des chevaux.

Création de la 'Montreal City Passenger Railway Company' en mai 1861, première compagnie de transport collectif à Montréal, puis en novembre de la même année, mise en service de la première ligne de tramways, sur l'actuelle rue Notre-Dame. En 1892 mise en service du premier tramway électrique, le Rocket.



En 1919 mise en service des premiers bus de la 'Montreal Tramways Company'. En 1950, création de la Commission de transport de Montréal (CTM), organisme public appelé à remplacer la 'Montreal Tramways Company' qui était une compagnie privée. En 1959, retrait du dernier tramway à Montréal, mais en 1961, première étude de la faisabilité d'un métro dans la métropole. C'est en octobre 1966 que le métro ouvre ses portes. Depuis cette date le transport collectif à Montréal n'a pas cessé de s'agrandir en surface et en sous-sol. C'est le même constat pour les autres grandes villes du Québec.

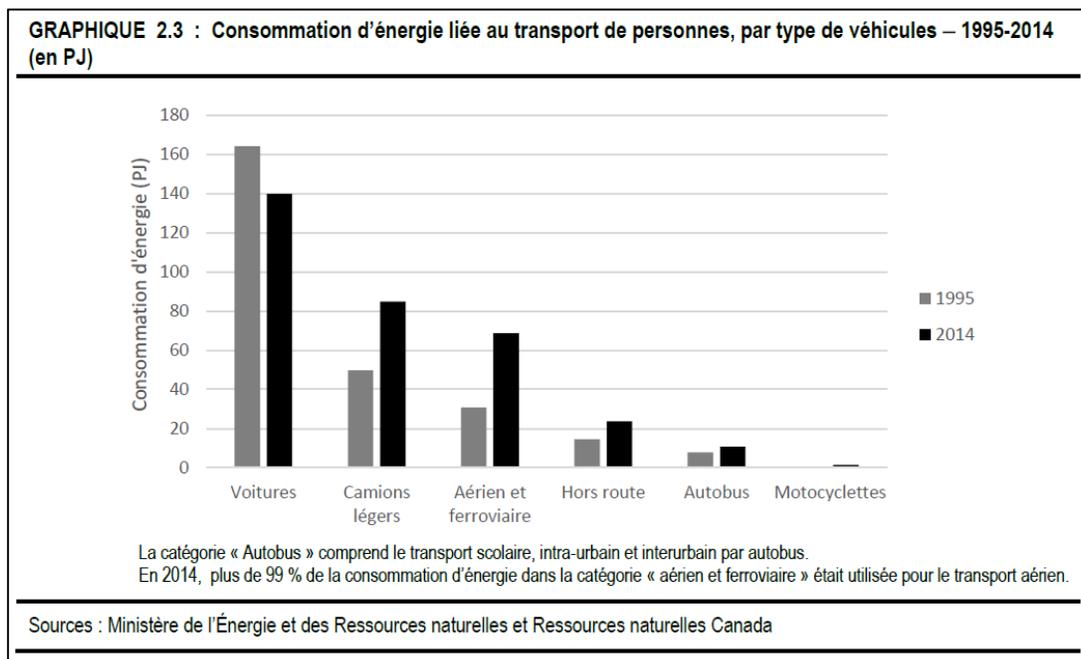
Comme on le voit, le transport collectif ne date pas d'hier, depuis le début du XIX^e siècle cette activité s'est multipliée dans toutes les grandes villes et entre les grandes villes. Malheureusement de nombreuses villes nord-américaines se sont départies de leurs systèmes de transport collectif dans les années 50 et 60 sous la pression des pétroliers et des fabricants automobiles, mais depuis le début des années 2000 elles y reviennent toutes avec des projets parfois futuristes. Ce fut un long détour qui a entraîné l'étalement urbain, la congestion, les accidents et la pollution.

Transport collectif et utilisation des ressources :

La consommation d'énergie des transports collectifs par personne et par kilomètre est en moyenne plus faible que celle d'un mode de l'auto solo. Elle dépend toutefois du taux d'occupation moyen. En dehors des heures de pointe, l'efficacité énergétique diminue, mais ce problème affecte également l'efficacité énergétique des modes de transport individuels, mais à l'inverse, car aux heures de pointe la congestion du réseau routier s'installe, ce qui implique une vitesse moyenne des voitures souvent très réduite. Plus il y a d'autos dans les rues, plus la vitesse moyenne diminue. Les moteurs tournent, mais ne font pas avancer les véhicules. Ce voyageur matin et soir a de multiples autres

conséquences négatives, entre autres, le fait que les stationnements sont remplis de véhicules qui dorment une bonne partie de la journée et qui utilisent pour cela de l'espace précieux en ville.

Une étude faite par le ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Canada a permis d'évaluer l'énergie consommée au Canada par les différents modes de transport. La figure suivante présente les résultats. On y constate que les voitures ont consommé en 2014 environ 15 fois plus d'énergie que l'ensemble des autobus de tous types. Le transport collectif a donc un impact environnemental beaucoup plus petit que les autos individuelles, le nombre de voitures électriques étant encore trop faible pour changer la donne.

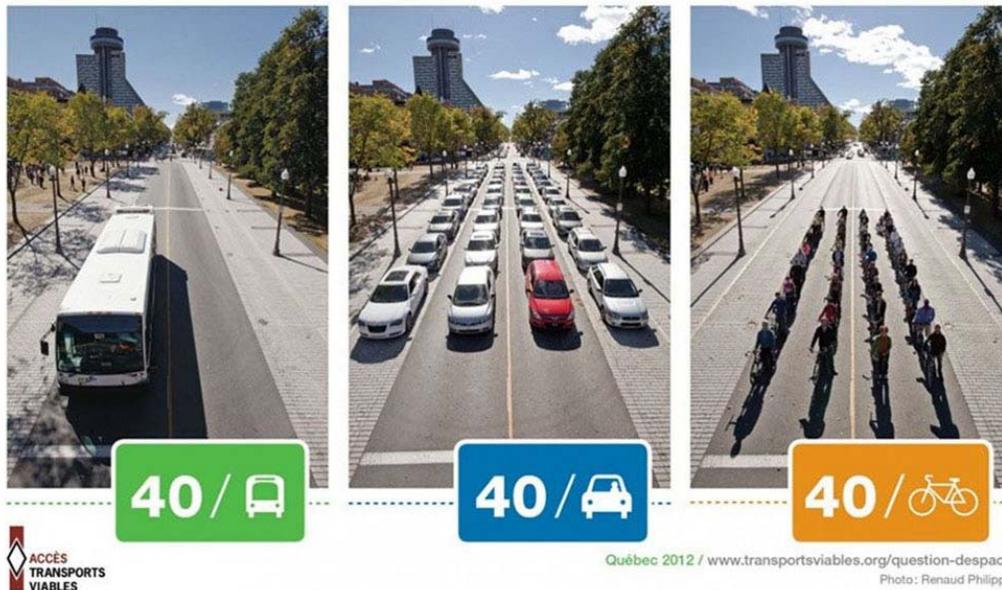


Le taux d'occupation des transports collectifs en dehors des heures de pointe, principalement sur les lignes périphériques, est souvent faible. Cela réduit l'efficacité énergétique globale de la flotte d'autobus, c'est un fait. Mais c'est le prix à payer pour assurer une déserte adéquate sur un territoire donné. Par contre, l'utilisation de plus en plus importante d'autobus hybrides ou électriques permet d'améliorer l'efficacité énergétique globale et de réduire considérablement les émissions de CO₂.

De plus des incitatifs importants, comme une fréquence augmentée sur les lignes de transport collectif favorise une augmentation de l'usage des citoyens pour ce mode.

Transport collectif et flexibilité :

Les transports collectifs peuvent être plus rapides que les transports individuels pour se déplacer aux heures de pointe, à condition que les réseaux soient séparés de la circulation individuelle et que la fréquence de passage soit assez élevée, comme c'est le cas des métros et tramways. De plus, ce type de transport permettent de faciliter la circulation, un autobus peut transporter plus de 60 personnes en utilisant la même surface de sol que trois voitures qui elles sont en moyenne occupée par 1.2 personne à Montréal. Les transports collectifs occupent également beaucoup moins d'espace de stationnement.



La surface utilisée pour transporter 40 personnes sera de 800 m² en auto-solo, de 40 m² en autobus et de 80 m² à vélo. Dans cet exemple, l'autobus utilise 5 % de l'espace occupé par les voitures et les vélos utilisent 10 % de l'espace, ceci pour le même nombre de personnes transportées. On voit donc que le transport actif et collectif favorise une plus grande fluidité du transport urbain.

Autre avantage du transport collectif, est l'intermodalité. Cela permet de choisir le ou les modes de transport les mieux adaptés pour un trajet donné. Passer de vélo à métro et terminer à pied sans se soucier du stationnement est souvent un gros avantage en ville. C'est une approche qui est de plus en plus utilisée par les citoyens de centre-ville.

Un avantage important pour les usagers des transports collectifs est le coût total annuel lié à la mobilité. Les coûts fixes, comme le prix d'achat du véhicule, immatriculation et autres, sont de plus en plus élevés en plus des coûts à l'usage qui sont également à la hausse. Le gain des transports collectifs par rapport à la voiture individuelle provient de la collectivisation des dépenses sur un grand nombre d'usagers. Même si les dépenses d'infrastructures sont importantes, le nombre de passagers l'est également. À titre d'exemple, le 25 avril 2018, la STM a célébré en grande pompe les 10 milliards de déplacements dans le métro depuis son ouverture en 1966.



De plus en plus de villes à travers le monde offrent le transport collectif gratuitement. Ces expériences ont montré que l'effet est rapidement bénéfique. On note une augmentation importante du nombre d'usagers, ce qui permet d'augmenter l'offre de service, et ce qui réduit la circulation urbaine et la pollution.

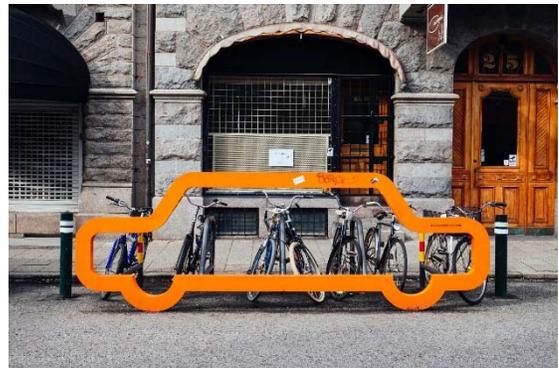
Autre avantage important de transférer le plus possible les déplacements vers le transport collectif, cela laisse plus de place aux transports actifs, principalement le vélo qui pourrait enfin obtenir des pistes cyclables larges, sécuritaires et bien entretenues. Ce mode de transport se développe rapidement, mais est limité par la prépondérance de l'auto-solo.

CONCLUSION : MOBILITÉ DURABLE

La mobilité durable est un concept qui fait référence à la mise en place d'une politique globale des transports qui applique les principes du développement durable aux déplacements en mettant en priorité les humains dans leurs besoins de mobilité dans un cadre urbain. Elle repose sur un système de transport qui a les caractéristiques suivantes :

- Permet aux citoyens de satisfaire leurs principaux besoins de déplacement d'une manière équitable, sécuritaire et favorisant la santé par l'intermédiaire du transport actif.
- Le coût est raisonnable, fonctionne efficacement, offre un choix de moyens de transport et appuie une économie locale dynamique.
- Minimise la consommation d'espace et de ressources, s'intègre au milieu et réduit les émissions de gaz à effet de serre ainsi que les déchets.

Le transport durable s'insère dans un concept plus large appelé « *Transit-oriented development* » (TOD) développé par Peter Calthorpe en 1993. Ce concept vise à favoriser l'articulation de l'urbanisation et du transport collectif pour permettre un mieux vivre en ville. Le TOD propose l'établissement de collectivités dont les habitants peuvent facilement accéder à pied (c'est-à-dire dans un rayon approximatif de 600 mètres) à des services de proximité et aux différents services de transport collectif. Ce concept permet de densifier les zones suburbaines et de réaménager les zones urbaines de densité moyenne.



1 stationnement voiture = 10 stationnements vélo

Cette approche permet de redonner aux citoyens les rues comme espaces de vie et diminue de façon importante les impacts négatifs du « tout à l'auto ». Dernier élément à ne pas négliger, est relié au stress et à la fatigue de la conduite automobile, chose qui n'existe pas, ou peu dans les transports collectifs. Oui, aux heures de pointe l'espace par personne peut être réduit, mais les passagers peuvent très bien supporter cet inconvénient en se plongeant dans un bon livre, en regardant des nouvelles sur les téléphones multifonctions ou en écoutant de la musique. Le transport peut alors être considéré comme un temps à soi et non à un temps de préoccupation pour garder l'attention sur la route, ce qui peut générer une dose de fatigue psychique dans un monde où il y en a déjà beaucoup.

BIBLIOGRAPHIE :

- ONU Population mondiale : [ONU https://population.un.org/wpp/DataQuery/](https://population.un.org/wpp/DataQuery/)
<https://www.un.org/development/desa/fr/news/population/world-population-prospects-2017.html>
- 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