

**MEC1210 - THERMODYNAMIQUE**  
**INTRODUCTION AU PROJET**  
**CENTRALE AU CHARBON GENERAL**  
**GAVIN**

**L'INTRODUCTION EST DIVISÉE EN 4 PARTIES :**

- 1. OBJECTIFS ET ORGANISATION DU PROJET**
- 2. PRÉSENTATION DU SITE WEB (SECTION PROJET)**
- 3. CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE MONDIAL**
- 4. INTRODUCTION AU LOGICIEL EES**

# STRUCTURE DU PROJET DE THERMODYNAMIQUE

- Responsables du projet pour le **groupe # 1** : **Huu Duc Vo**  
huu-duc.vo@polymtl.ca  
pour le **groupe # 2** : **Smail Guenoun**  
smail.guenoun@polymtl.ca

- Pondération du projet sur la note totale : **15 %**

- En cas d'échec du cours et que vous le reprenez :

Si vous obtenez pour le projet une note de (12.0 / 20) ou plus

⇒ Vous n'avez pas à refaire le projet

À moins que vous le désiriez

La note du dernier trimestre sera attribuée au projet du trimestre en cours

Vous devez en faire une demande à monsieur **Huu Duc Vo**, coordonnateur du cours (envoyer un courriel).

- Alternance du projet **une semaine sur deux (en général)**, l'autre semaine est consacrée à des TD/théorie ⇒ Attention : la salle de cours est différente.

# OBJECTIFS DU PROJET DE THERMODYNAMIQUE

1. Donner un **sens concret** aux notions théoriques de thermodynamique.
2. Développer une capacité de **transposer** ces notions dans d'autres contextes énergétiques.
3. Développer une capacité d'**analyse** d'un système énergétique complexe.
4. Apprentissage d'un **outil informatique** servant à faire les calculs pour réaliser le projet : le logiciel EES.  
Logiciel utile pour les 4 années du BAC

# ORGANISATION DES 6 RENCONTRES DU PROJET

## RENCONTRE # 1 :

- Comprendre les objectifs généraux et les finalités du projet de thermo
- Contexte énergétique mondial, en Amérique du Nord, au Canada et au Québec
- Logiciel EES : Notions de base
- Travail à la maison : Finir le calcul du réservoir d'expansion ----> **Pas de travail à remettre !**

## RENCONTRE # 2 :

- Présentation de la centrale thermoélectrique au charbon « General Gavin »
- Présentation des objectifs spécifiques du projet
- Thermo : Description du Cycle de Carnot et cycle Rankine élémentaire
- Logiciel EES : Présentation de la fonction « Property Plot » et des tableaux « Lookup Table »
- Travail à la maison : Cycle Rankine élémentaire -----> **Travail # 1 à remettre !**

## RENCONTRE # 3 :

- Thermo : Cycle Rankine avec 2 Turbines ; Dégazeur ; 2 Pompes ; Loi de Henry
- Logiciel EES : Études de la fonction « Diagram Windows »
- Travail à la maison : Cycle Rankine avec 2 Turbines -----> **Travail # 2 à remettre !**
- Capsule technologique : Voiture hybride

## ORGANISATION ( SUITE)

### RENCONTRE # 4 :

- Thermo : Cycle Rankine avec Dégazeur, 3 Pompes et Irréversibilités (évolutions réelles)
- Logiciel EES : Étude des « Tableaux Paramétriques » et des Graphiques X-Y
- Travail à la maison : Cycle Rankine complet -----> **Travail # 3 à remettre !**
- Capsule technologique : Centrale nucléaire Fusion

### RENCONTRE # 5 :

- Thermo : Cycle Rankine réel complet avec Combustion
- Logiciel EES : Étude des fonctions « Duplicate » - « Min – Max »
- Travail à la maison : Cycle Rankine avec Combustion -----> **Travail # 4 à remettre !**
- Capsule technologique : Centrale électrique solaire « Nevada Solar One »

### RENCONTRE # 6 :

- Thermo : Centrale complète  
Chaleur fournie par le combustible ; Alternateur ; Puissance électrique produite ;  
Ventilateur ; Dépoussiéreur ; Rendement global de la centrale
- Logiciel EES : Sous-programme dans EES : « Function » - « Procedure »
- Travail à la maison : Cycle complet de la centrale -----> **Travail # 5 à remettre !**
- Capsule technologique : OTEC

# PRÉSENTATION DU SITE WEB (PROJET)

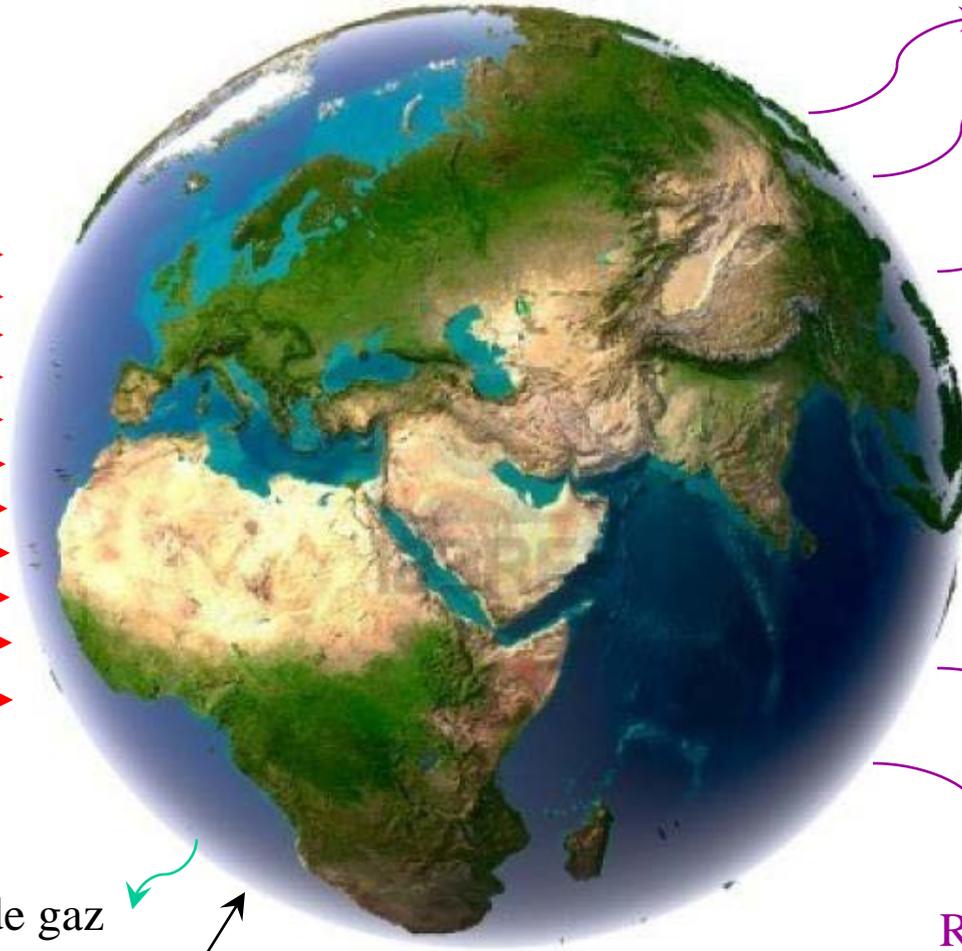
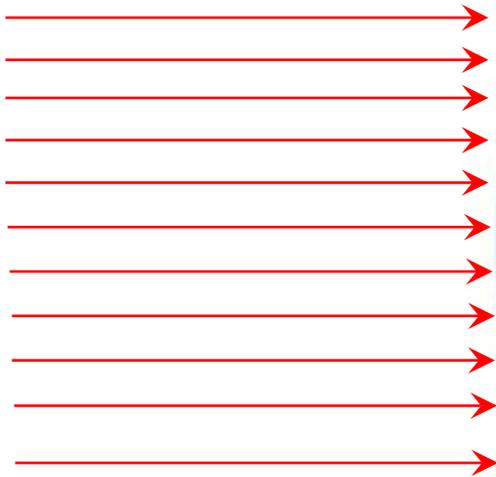
**Visiter le site WEB**

- Calendrier général du trimestre
- Logiciel EES
- Documents à récupérer (télécharger)
- Remise des travaux sur Moodle

# **CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE MONDIAL ET PRODUCTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE**

# TERRE : ENVIRONNEMENT FERMÉ MAIS NON ISOLÉ

Rayonnement  
solaire incident



La Terre perd un peu de gaz  
et reçoit très peu de matière  
sous forme de météorites

Rayonnement  
Infra Rouge quittant

# À QUOI SERT L'ÉNERGIE

## Considérations importantes : Finalité de l'énergie

- ★ *Produire de l'énergie thermique*

  - Chauffage de locaux
  - Procéder industriels - etc

- ★ *Produire du travail*

  - Transport
  - Énergie mécanique en usine
  - Transformation de l'énergie (perte de rendement)

- ★ *Cybernétique* ( USA 2012  $\approx$  2 % )

  - Communication
  - Contrôle - Calculs
  - Loisirs

1<sup>e</sup> Loi de Thermo



$$\dot{Q} - \dot{W} = \Delta \dot{E}$$

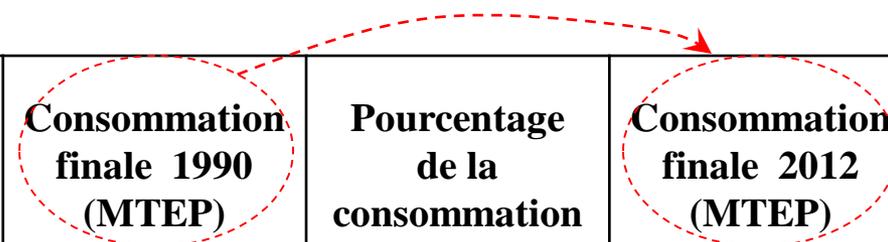


Machine à vapeur:  
J. Watt vers 1780

L'énergie est essentielle à toutes les étapes de toutes les activités humaines  
L'humain ne produit pas d'énergie, il la puise dans l'environnement et la dégrade

# CONSOMMATION FINALE D'ÉNERGIE PAR SECTEUR

## À quoi sert l'énergie ?



	<b>Consommation finale 1990 (MTEP)</b>	<b>Pourcentage de la consommation</b>	<b>Consommation finale 2012 (MTEP)</b>	<b>Variation consommation 2012 / 1990</b>	<b>Pourcentage de la consommation</b>
<b>Industrie</b>	1 814	29 %	2 541	+40 %	28 %
<b>Transport</b>	1 581	25 %	2 507	+59 %	28 %
<b>Résidentiel</b>	1 533	24 %	2 076	+35 %	23 %
<b>Tertiaire</b>	458	7 %	723	+58 %	8 %
<b>Agriculture + pêche</b>	170	3 %	194	+14 %	2 %
<b>Non spécifié</b>	261	4 %	130	-50 %	1 %
<b>Usages non énergétiques</b>	478	8 %	809	+69 %	9 %
<b>Total</b>	<b>6 293</b>	<b>100 %</b>	<b>8 979</b>	<b>+43 %</b>	<b>100 %</b>

Source : AIE 2015

MTEP : Millions de Tonne Équivalent de Pétrole (en anglais : MTOE)

# TYPES D'ÉNERGIE

## Énergie primaire : Cadeau de la nature

- **Fossiles** : Combustibles solides -----> Charbon , Bois  
Combustibles liquides -----> Pétrole  
Combustibles gazeux -----> Gaz Naturel  
Combustible Nucléaire ( **fission** )
- **Renouvelables** : Énergie Hydraulique, Solaire, Éolienne ...  
Énergie nucléaire ( **fusion ???** )

## Énergie secondaire : Doivent être fabriqués (perte de rendement)

L'énergie électrique et l'hydrogène sont des **énergies secondaires**

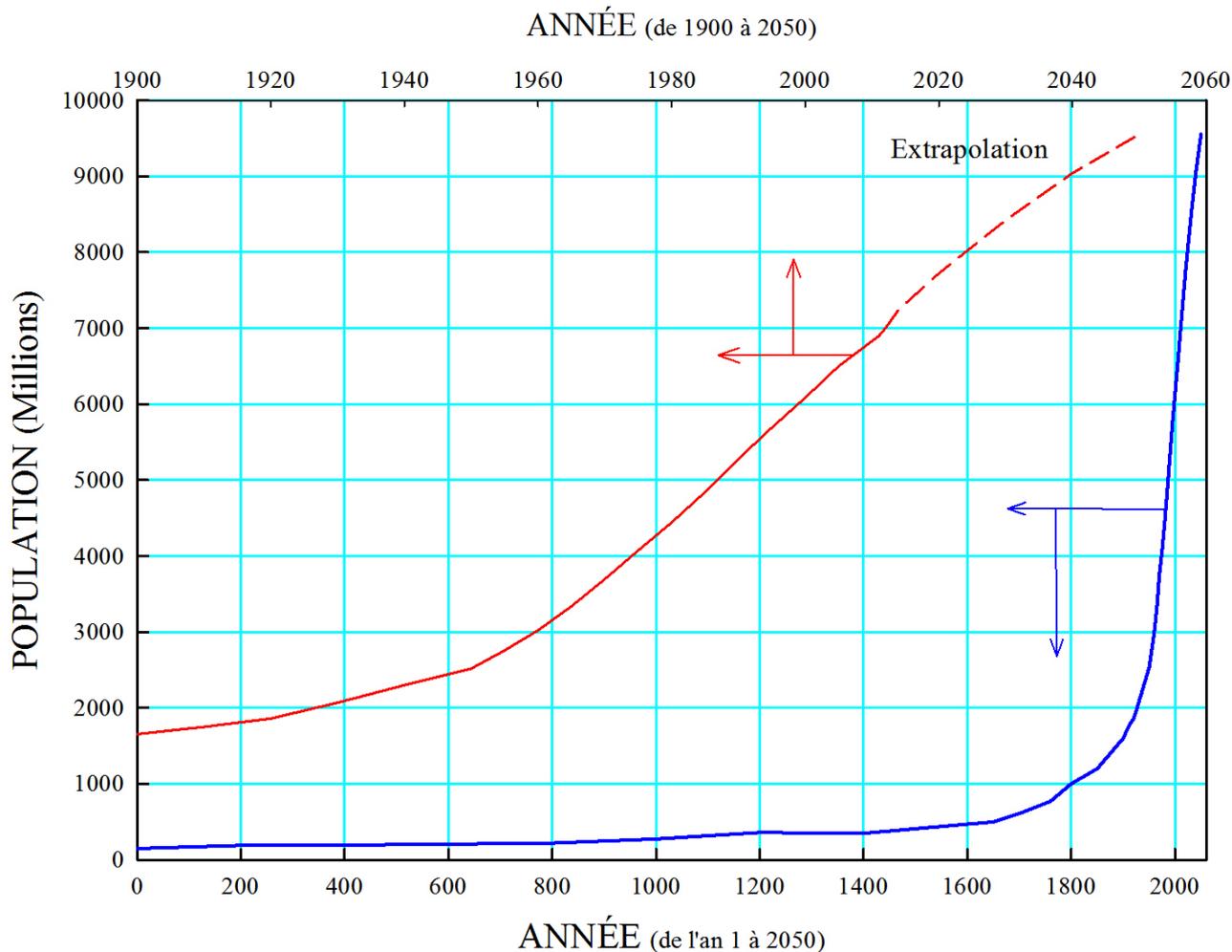
Ce sont des transporteurs d'énergie

## **Classification des types d'énergie selon la provenance :**

- Énergies concentrées (ou énergie de stock) : Énergies fossiles  
    **Tout le développement de l'industrialisation provient de cette forme !!**
- Énergie dispersées (ou énergie de flux) : Énergie renouvelables

# CROISSANCE DE LA POPULATION HUMAINE

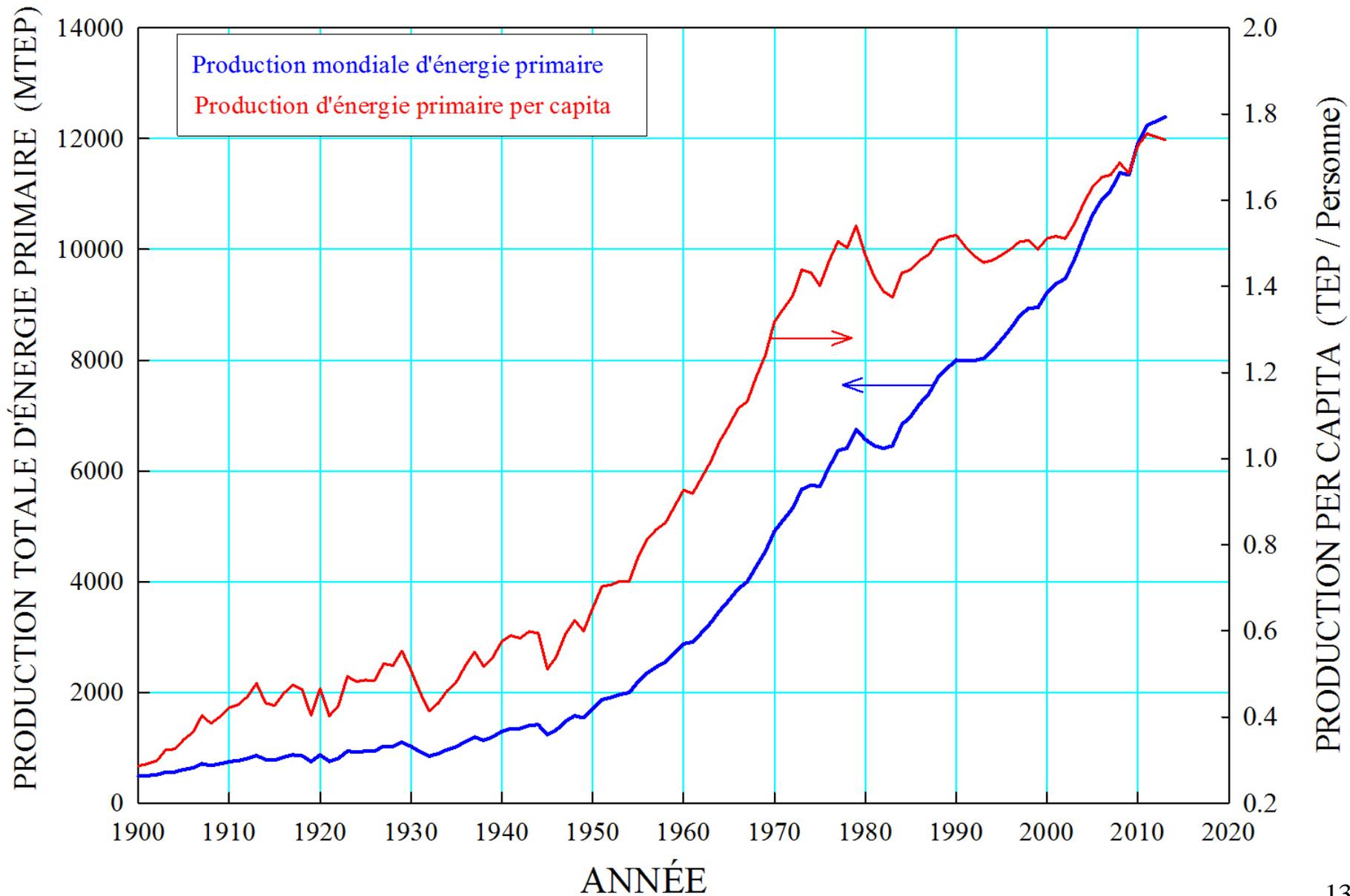
<u>Année</u>		<u>Population</u>	<u>Véhicules</u>
1950	----->	3 milliards	50 millions
2000	----->	6 milliards	500 millions
2013	----->	7 milliards	900 millions
2050	----->	≈ 9 milliards	?



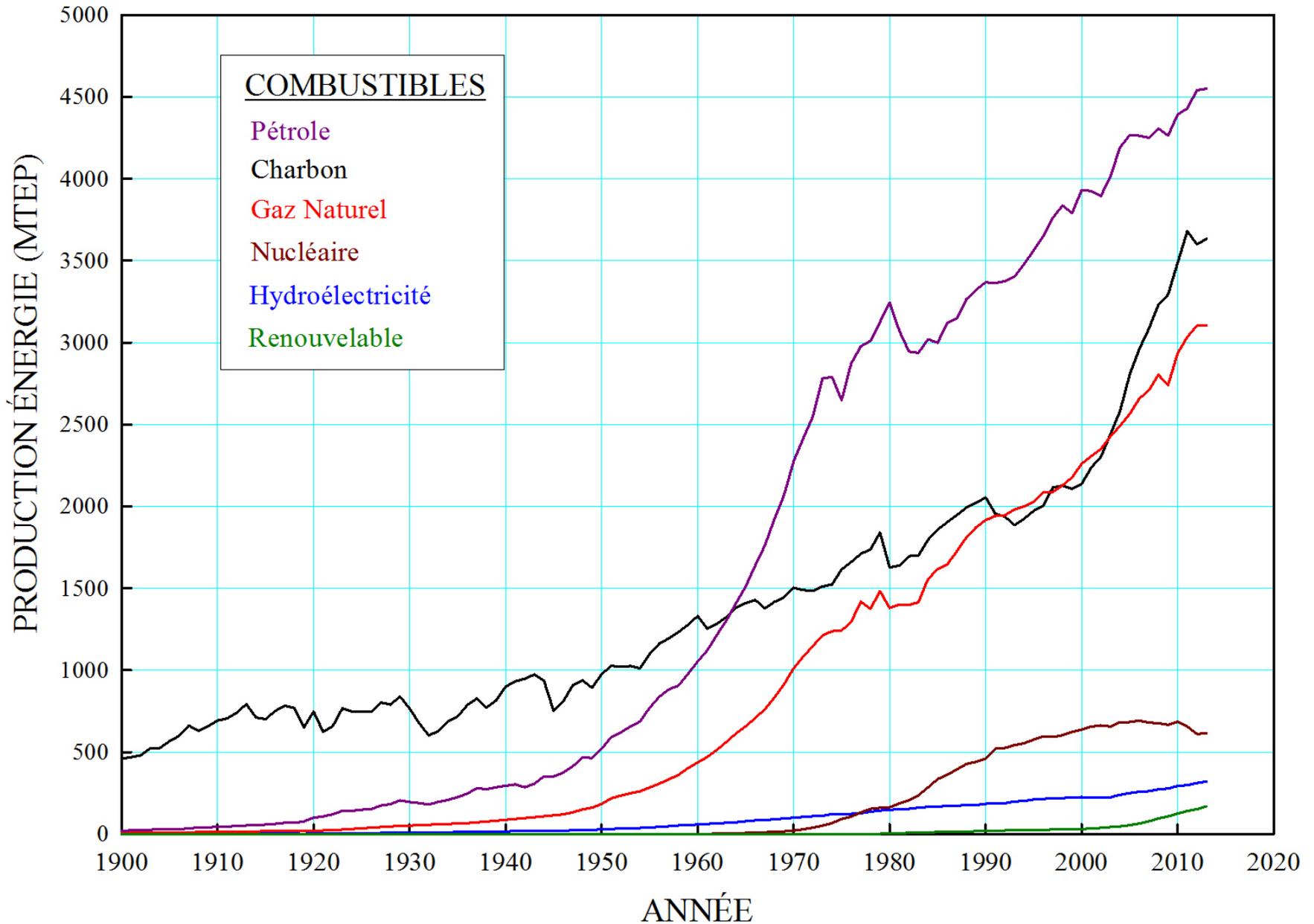
ANNÉE	Humains (millions)	Incertitude
1	300	100
500	200	10
1000	300	50
1200	400	40
1400	360	15
1600	560	15
1800	950	15
1900	1660	10
1920	1860	~ 0
1940	2300	~ 0
1960	3023	~ 0
1980	4442	~ 0
1990	5279	~ 0
2000	6085	~ 0
2010	6842	~ 0
2050	9075	-

SOURCE :  
Statistiques de l'ONU

# Production mondiale d'énergie primaire par année



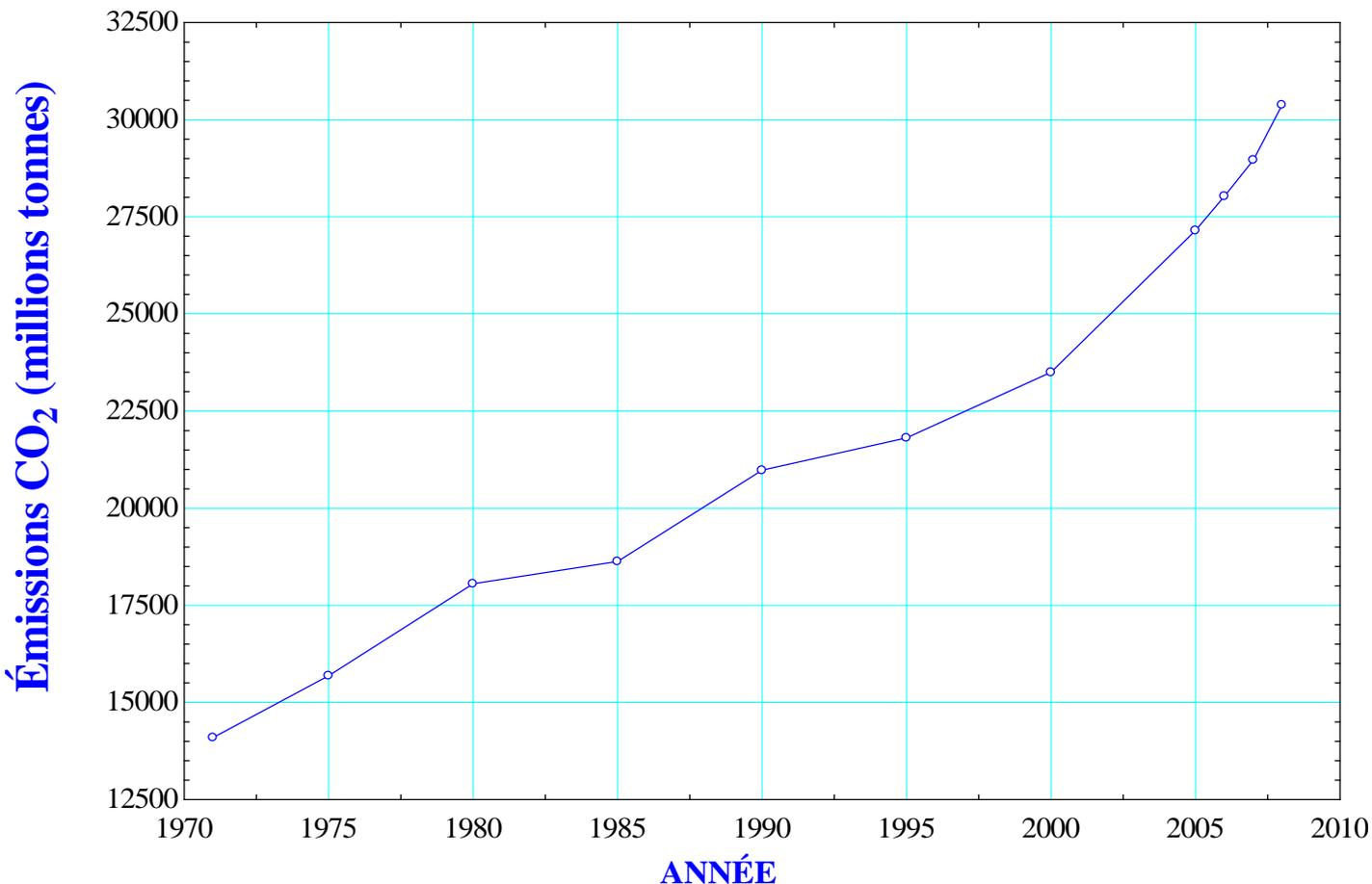
# Production mondiale d'énergie par année par source



# ÉVOLUTION DES ÉMISSIONS MONDIALE DE CO<sub>2</sub>

SOURCE : <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/company-information.html>

ÉMISSIONS MONDIALES DE CO<sub>2</sub> PAR LES HUMAINS PAR ANNÉE



1975	15690
1980	18055
1985	18628
1990	20980
1995	21810
2000	23497
2005	27147
2006	28028
2007	28962
2008	31772
2009	31460
2010	33040
2011	32353
2012	32742
2013	33248
2014	33472
2015	33508

SOURCE :  
BP – Statistical review\_2016

# RÉSERVES ET PRODUCTION DE PÉTROLE

## Potentiel ultime de production de pétrole de la planète :

Constatation : *Tant que **tout** le pétrole n'est pas extrait d'un champ, il n'est pas possible d'en connaître le **potentiel exact***

Conséquence : *Toutes les évaluations sont des extrapolations devant être associées à une **probabilité** !*

## Estimation de toutes les réserves consommées, connues et à découverte probable :

**3000 milliards de barils de pétrole conventionnel + bitumineux** (Laherrère ; 2015)

**2500 milliards de barils de pétrole conventionnel + bitumineux** (USGS ; 2011)

La différence entre les scénarios *optimistes* et *pessimistes* au niveau de nouvelles découvertes diffère de :  $\approx$  **15 ans de consommation**

## Chaque jour l'humanité : (données de BP 2015)

Consomme  $\approx$  95 millions de barils de pétrole (2015) -----> 34.7 milliards / année

Découvre  $\approx$  15 millions de barils

## Dans un avenir proche :

*De plus en plus de personnes vont compétitionner pour obtenir du pétrole qui sera de moins en moins disponible, donc de plus en plus cher !!*

## CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE PER CAPITA (tep / an)

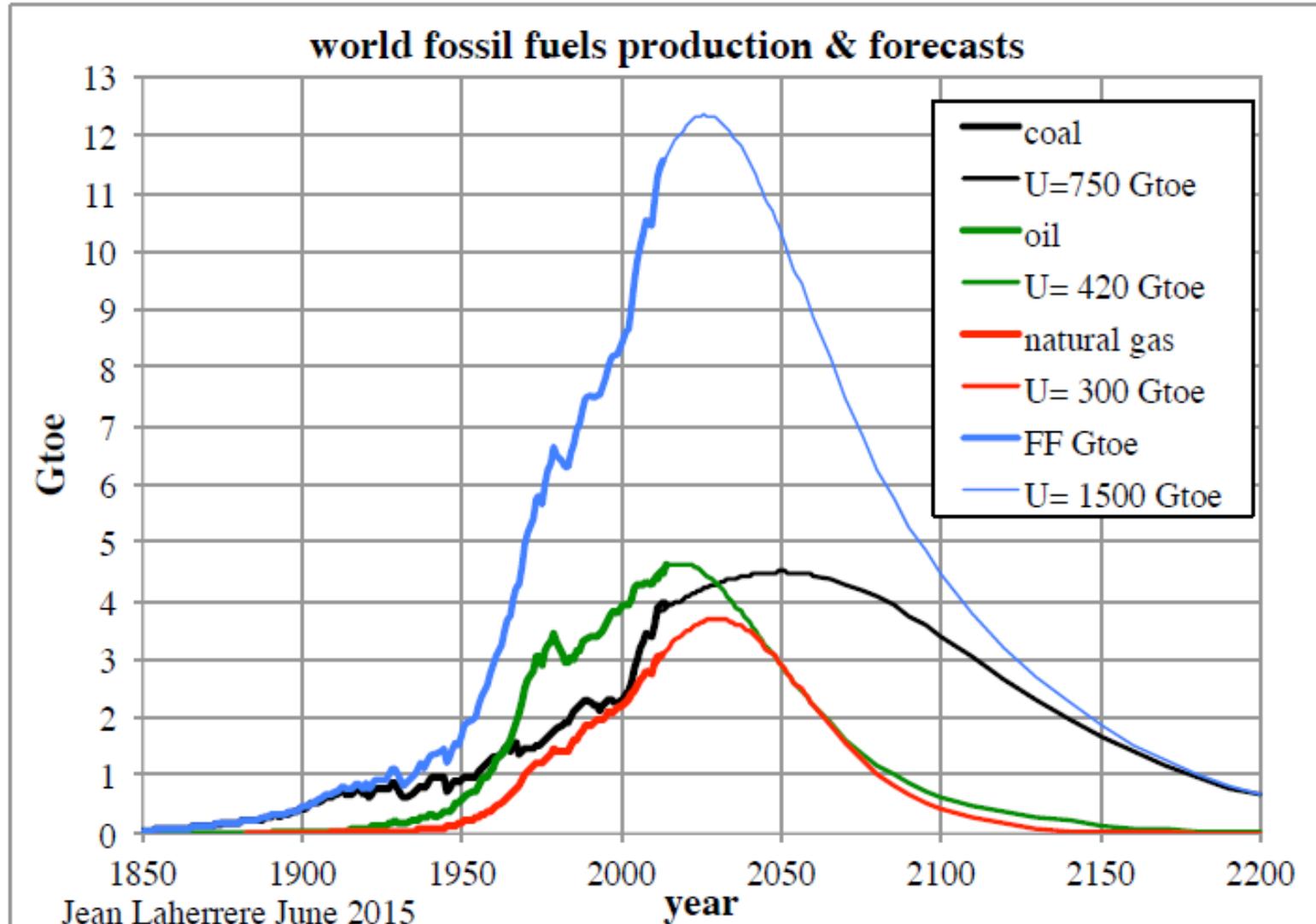
Moyenne mondiale = 1.79 tpe / an

RANG	PAYS	CONSOMMATION
1	Iceland	16.4
2	Trinidad and Tobago	15.2
3	Qatar	14.9
4	Kuwait	11.4
5	United Arab Emirates	8.6
6	Bahrain	8.1
7	Brunei Darussalam	7.9
8	Luxembourg	7.9
<b>9</b>	<b>Canada</b>	<b>7.5</b>
10	North America	7.1
11	United States	7.0
12	Finland	6.2
13	Australia	5.9
14	Saudi Arabia	5.9
15	Norway	5.8
16	Oman	5.6
17	Belgium	5.3
18	Sweden	4.9
19	Netherlands	4.7
20	Korea, Rep.	4.7
21	Russian Federation	4.6
22	Kazakhstan	4.1
23	New Zealand	4.0
24	Czech Republic	4.0
25	France	3.9

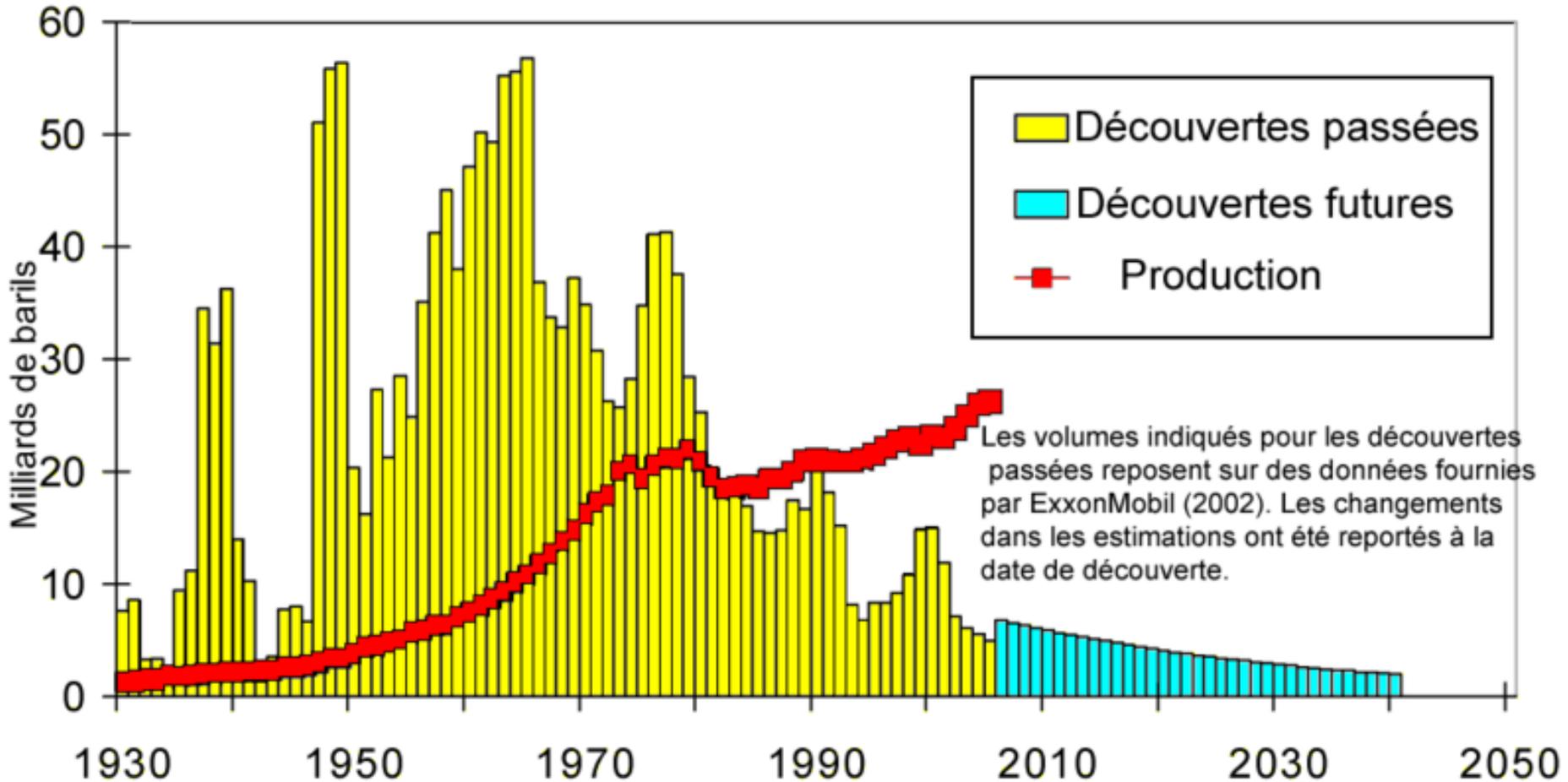
139	Mozambique	0.43
140	Philippines	0.42
141	Benin	0.40
142	Ethiopia	0.40
143	Ghana	0.39
144	Sudan	0.37
145	Cambodia	0.37
146	Cameroon	0.36
147	Congo, Dem. Rep.	0.36
148	Congo, Rep.	0.36
149	Tajikistan	0.34
150	Nepal	0.34
151	Yemen, Rep.	0.32
152	Myanmar	0.32
153	Haiti	0.26
154	Senegal	0.24
155	Bangladesh	0.20
156	Eritrea	0.14

## Production passé et futur des combustibles fossiles Selon : Laherrère

- Ultime pour le pétrole ..... ~ **3000 Gb** avec plateau de 2005 à 2025
- Ultime pour le gaz ..... ~ **2200 Gbep** avec pic vers 2025
- Ultime pour le charbon ..... ~ **5400 Gbep** avec plateau de 2020 à 2080

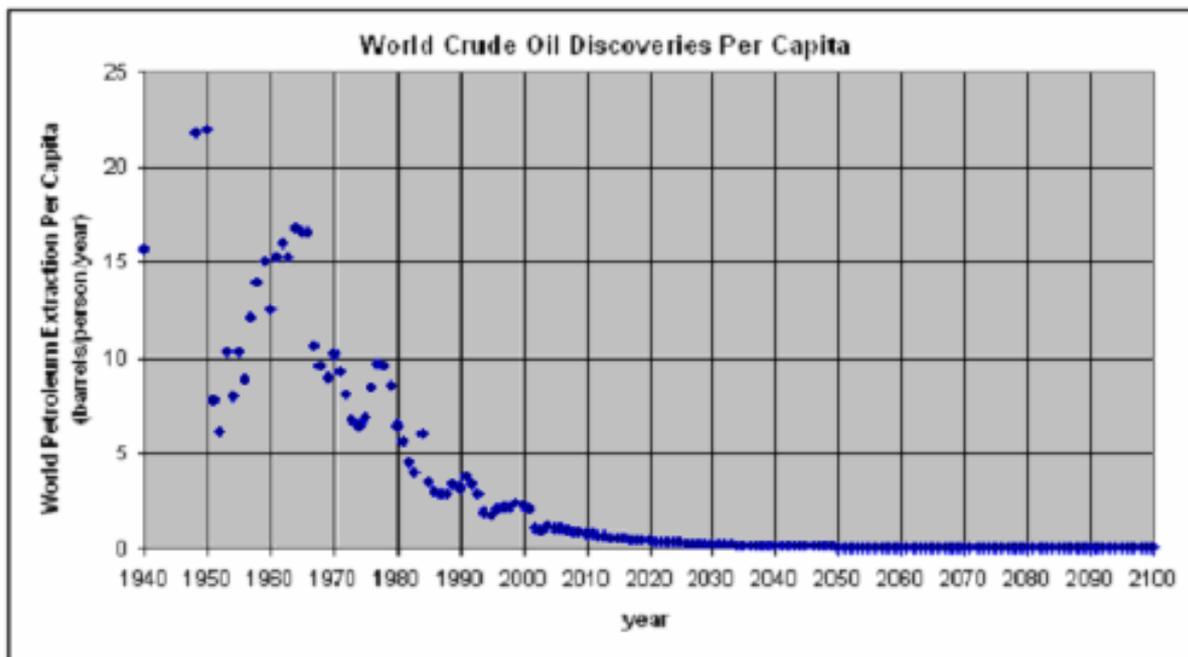
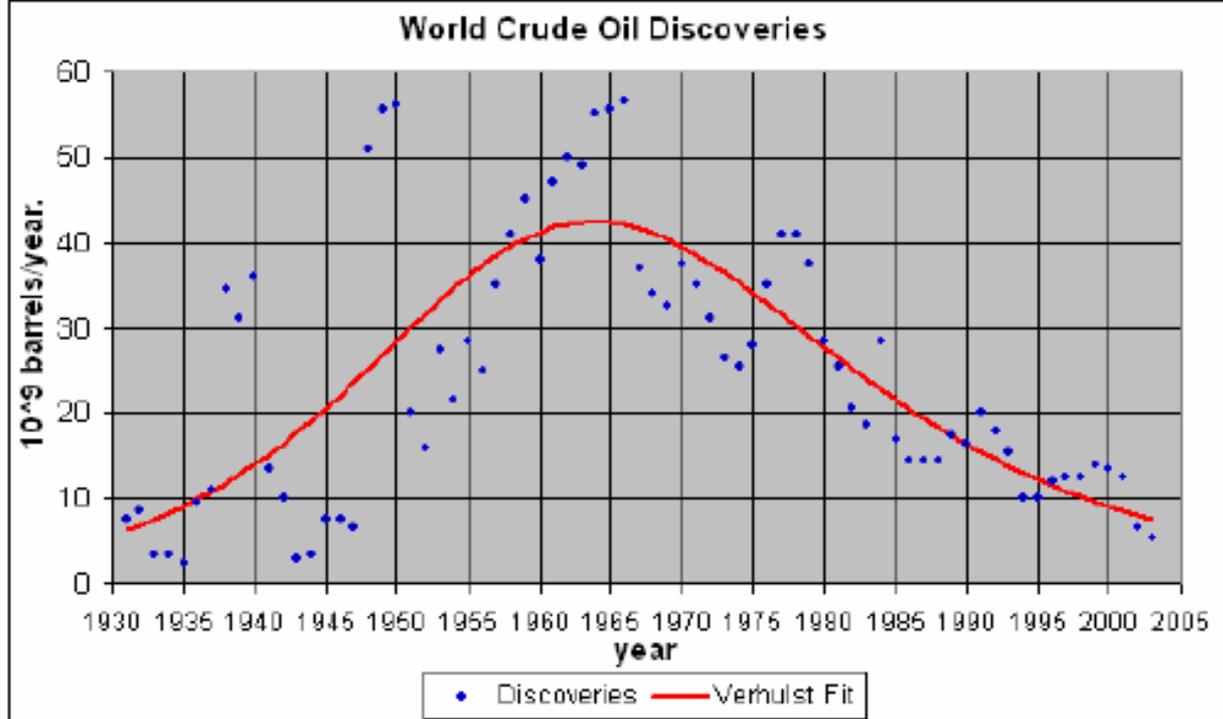


# Volume des découvertes de pétrole conventionnel (inclut l'offshore profond et le pétrole arctique) Décroissance depuis les années 1970



En moyenne depuis 1995 : On ne découvre plus qu'un baril de pétrole conventionnel  
Pour 3 barils consommés

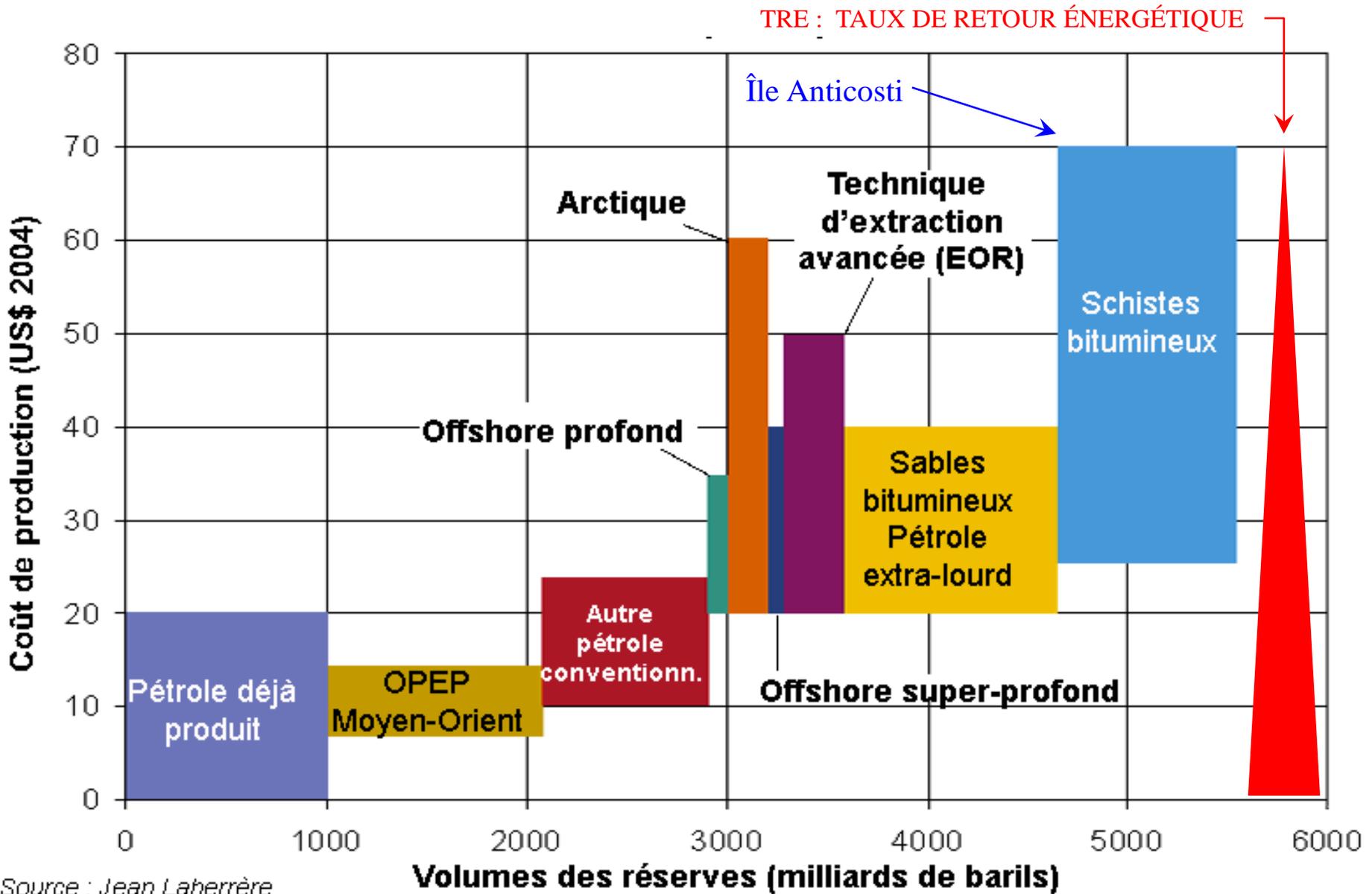
# DÉCOUVERTE DE PÉTROLE PAR ANNÉE TOTAL



# DÉCOUVERTE DE PÉTROLE PAR ANNÉE PAR HABITANT (baril/personne/an)



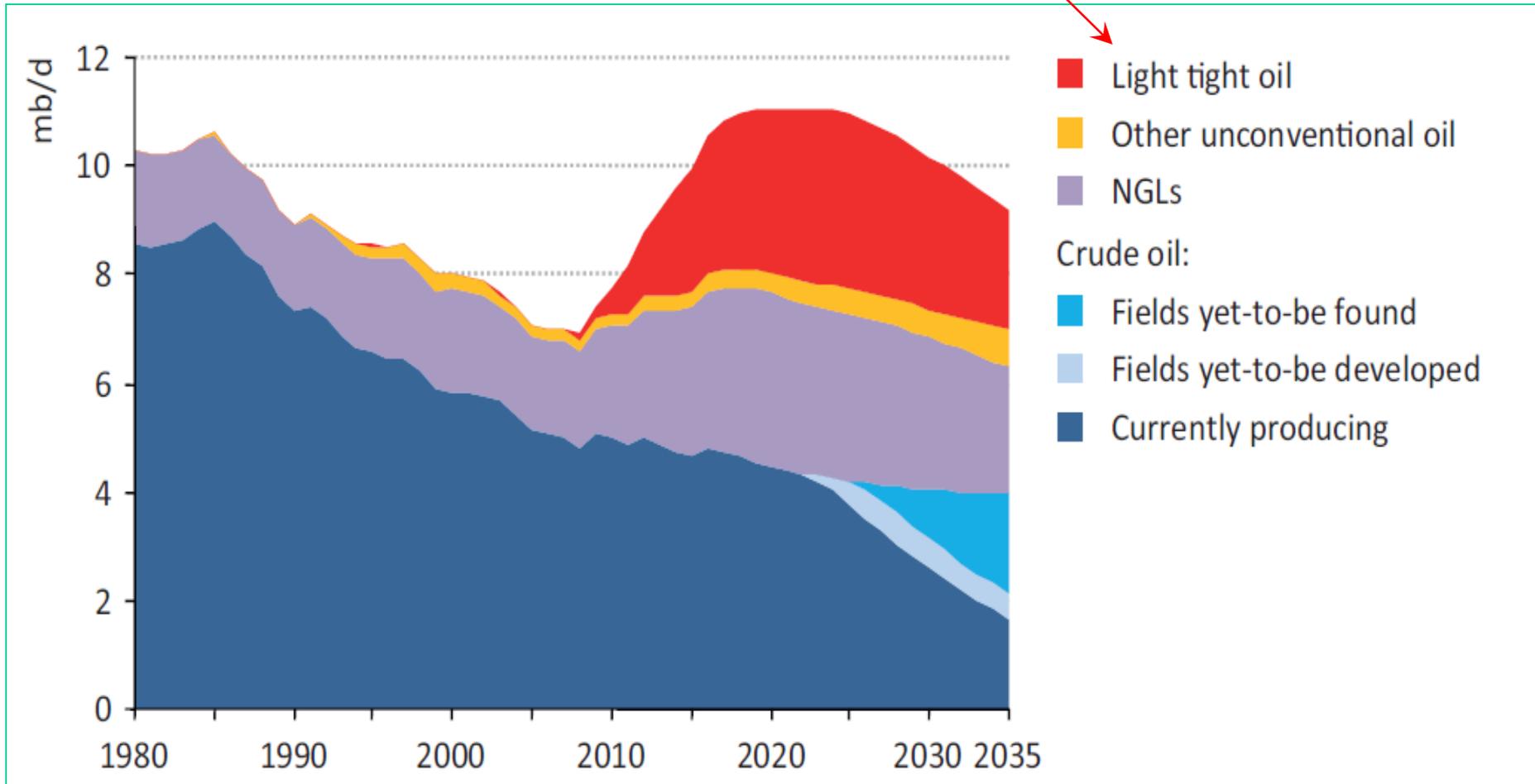
# RÉSERVES DE PÉTROLE Vs COÛT DE PRODUCTION PAR BARIL



# Production pétrolière des États-Unis par type d'ici à 2035

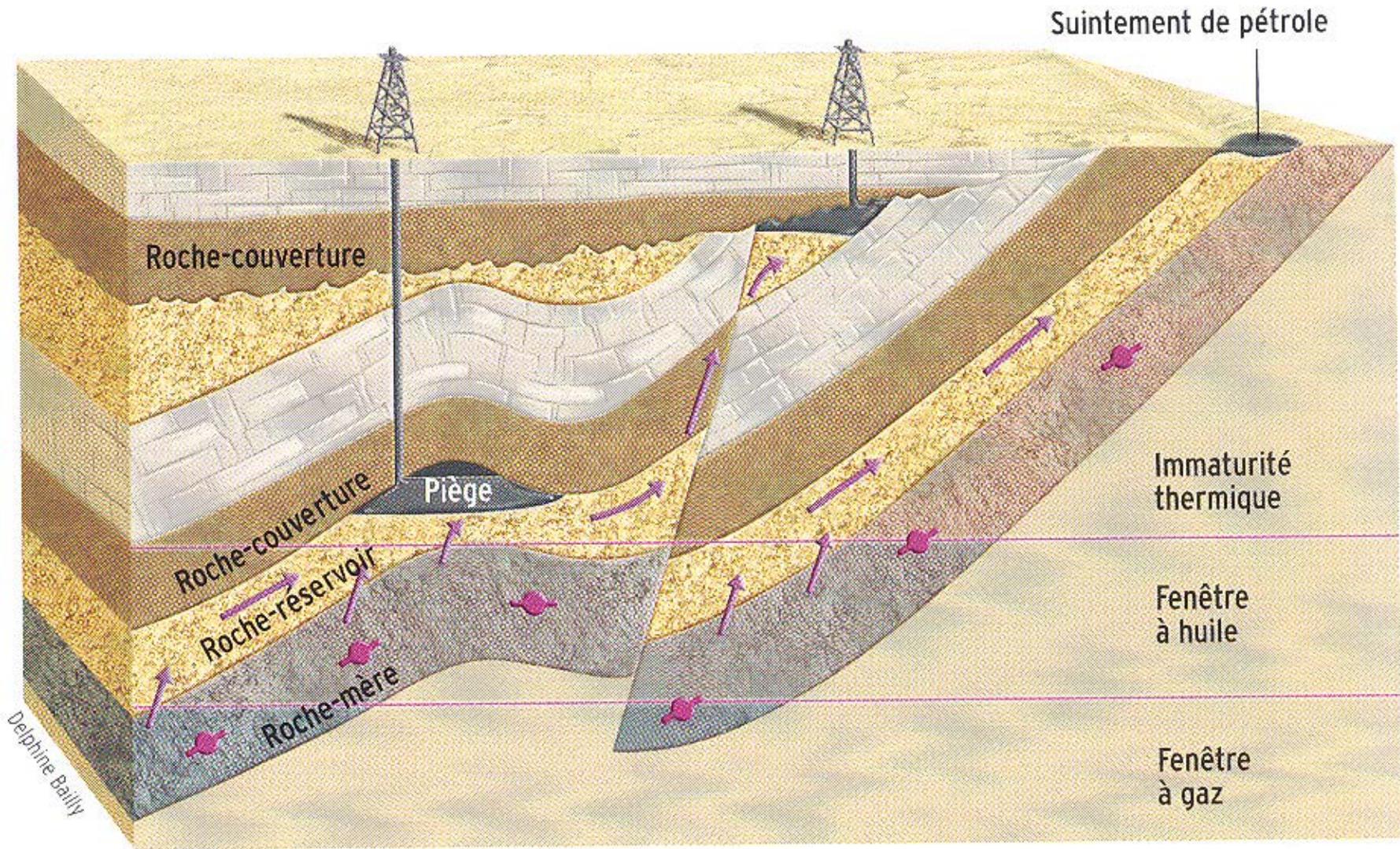
SOURCE : World Energy Outlook 2012, Agence Internationale de l'Énergie

Pétrole de schiste



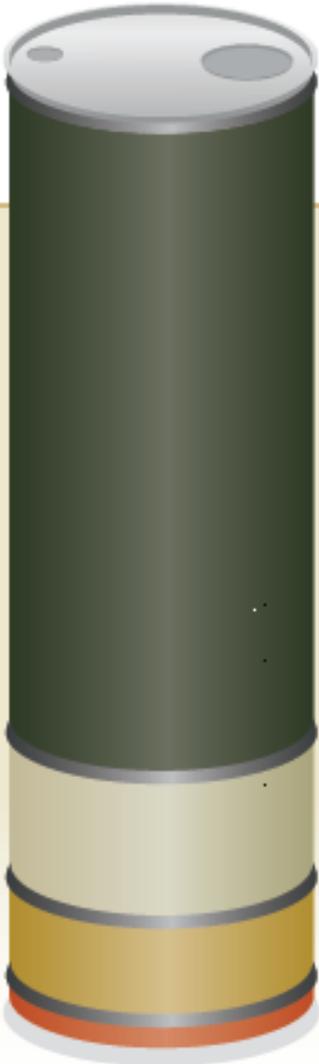
# PUIT DE PÉTROLE CONVENTIONNEL

Un réservoir de pétrole met des **millions d'années à se remplir** !  
Pour le **vider partiellement** les humains vont mettre de **20 à 100 ans** !



# SABLES BITUMINEUX : RÉSERVES ET PRODUCTION

Partie non exploitable !



Le volume de la ressource des sables bitumineux sur place est de **1,8 billion de barils**, ce qui dépasse de beaucoup le pétrole produit dans le monde entier jusqu'à présent.

Les réserves récupérables sont à la limite évaluées à **315 milliards de barils**.

Réserves récupérables de **169 milliards de barils**

Production cumulative (1967-2010) **8 milliards de barils**

Production actuelle :  
**1.9 millions de barils par jour**

Les compagnies désire augmenter la production en 2025 à :

**5 millions de barils par jour**

Il faut environ **2 tonnes** de minerais de sables bitumineux pour produire 1 baril de pétrole (par excavation).

Il faut environ **2.5 barils d'eau** pour produire 1 baril de pétrole.

~**25%** de l'énergie contenue dans un baril de pétrole est nécessaire pour produire un baril issu des sables bitumineux.

Contre **6%** pour le pétrole classique.

Source : Office de conservation des ressources énergétiques de l'Alberta.

# RÉSERVES CONNUES ET POTENTIEL DE DÉCOUVERTES POUR LES DIFFÉRENTS COMBUSTIBLES FOSSILES

	Réserves mondiales (en unité physique)	Réserves mondiales (en Gtpe)	Réserves mondiales (en %)	Production annuelle (en Gtep)	Nombre d'années de production à ce rythme
<b>Pétrole</b>	1 653 GB1	234	23 %	4,0	58
<b>Gaz naturel</b>	208 Tm <sup>3</sup>	187	18 %	3,3	57
<b>Charbon</b>	861 Gt	564	56 %	3,95	145
<b>Uranium</b>	3,3 Mt	30	3 %	0,59	48

GB1 : Milliards de Barils

Tm<sup>3</sup> : Trillions de m<sup>3</sup>

Mt : Millions de tonnes

Gtpe : Milliard de tonne de pétrole équivalent

# TRE : TAUX DE RETOUR ÉNERGÉTIQUE

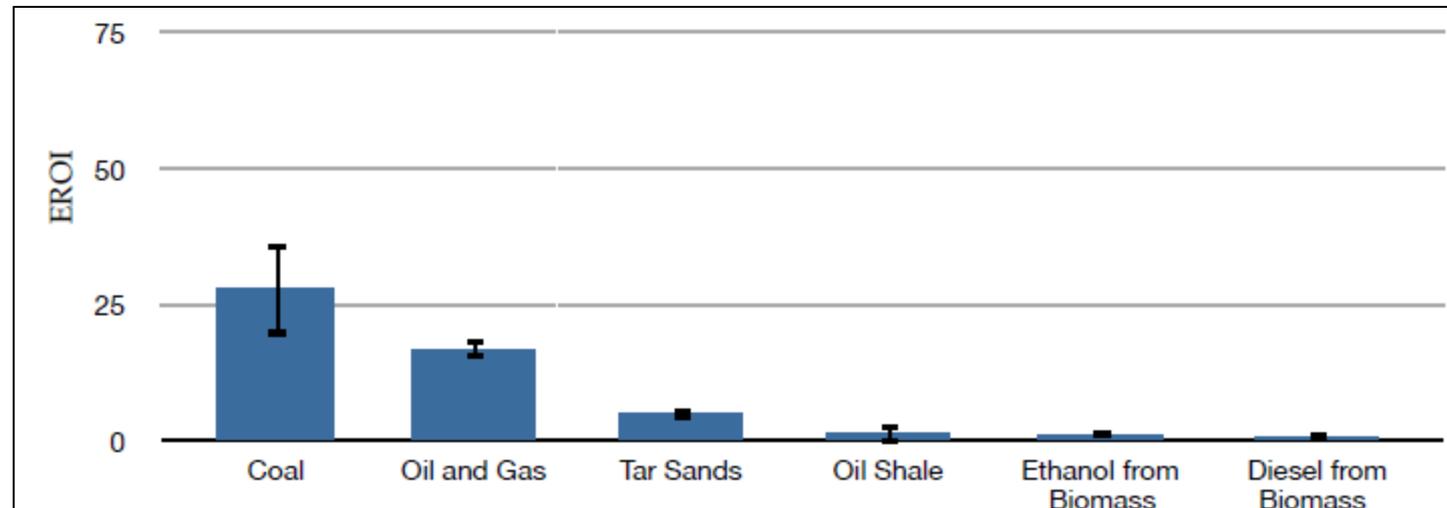
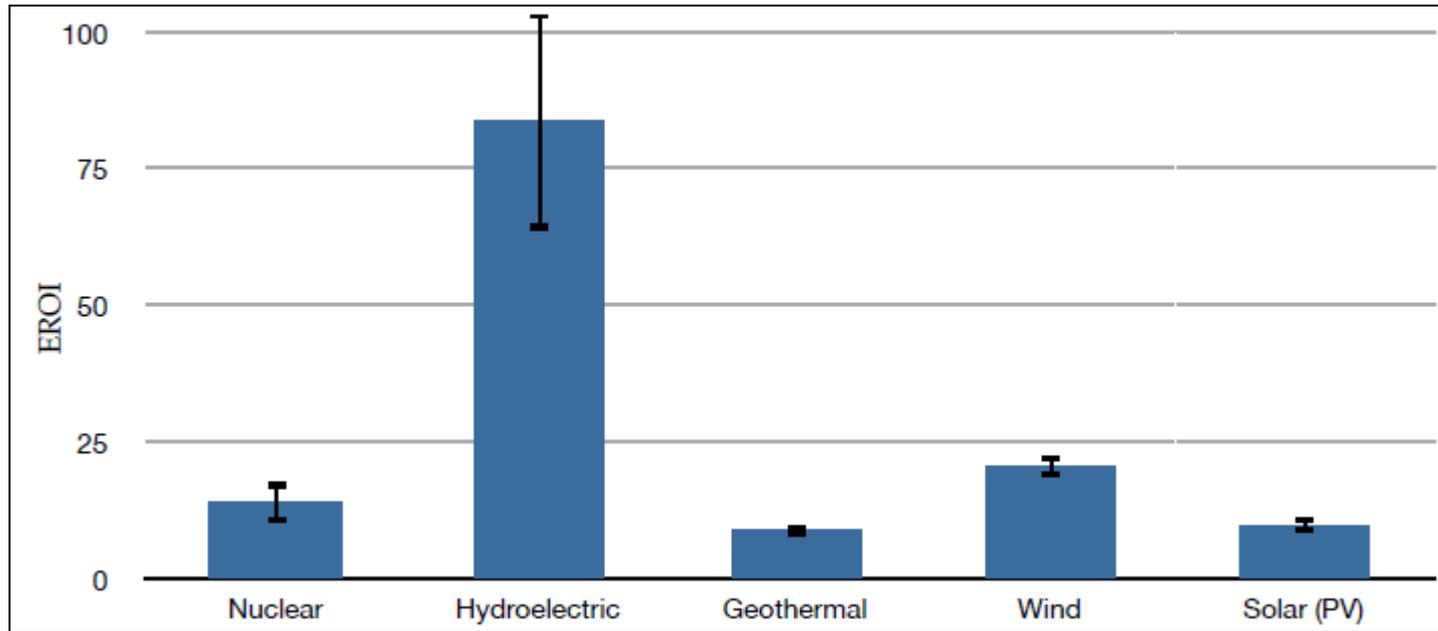
EROI : Energy Returned On Energy Invested

La production est arrêtée lorsque l'énergie nécessaire pour **extraire un litre** de pétrole dépasse celle contenue dans ce même litre en tenant compte des autres coûts d'exploitation (maintenance, coûts humains, transport)

## TRE (EROI) de quelques sources d'énergie

Source pétrole	Localisation/période	TRE (EROI)	Commentaires
Pétrole	Arabie Saoudite (2009)	≈ 18	Mais en diminution
Pétrole	États-Unis (2005)	13 à 15	Gisements plus petits, offshore profond, extraction de type tertiaire, Arctique
Biomasse	à partir de la canne à sucre (Brésil)	7 à 8	
Charbon (transformation de solide à liquide)	Afrique du Sud	3 à 4	Pétrole fabriqué
Sables bitumineux	Canada (2009)	2 à 4	Syncrude (carburant synthétique)
Biomasse (alcool)	à partir de céréales (États-Unis)	0.7 à 1.3	Pas de consensus sur le TRE

# VALEUR DE « EROI » POUR FILIÈRES ÉNERGÉTIQUES COURANTES

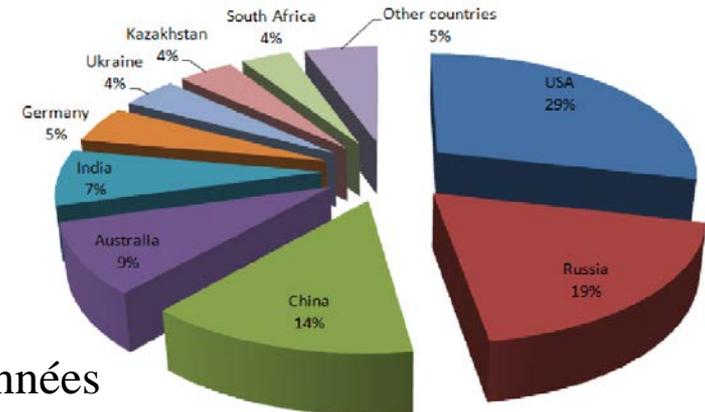


# COMBUSTIBLES SOLIDES : LE CHARBON

## - Il existe encore de grandes réserves de charbon dans plusieurs pays

Souvent facile à exploiter et faisant appel à des technologies assez rudimentaires

Distribution des réserves de charbon  
(Koryagin et al., 2014)



## - Provenance du charbon :

Dégradation des forêts du passé

Période carbonifère ⇒ 360 à 280 millions d'années

Période crétacé ⇒ 135 à 70 millions d'années

Période de formation du calcaire marin ( $\text{CaCO}_3$ )

## - Classification des charbons :

La classification se fait par rang de : **Maturité** (rank)

La maturité du charbon augmente :

Au fur et à mesure que la proportion de 'C' augmente

Que les autres matières volatiles sont éliminées

## - Composition des charbons :

Principalement -----> Carbone - Hydrogène - Oxygène

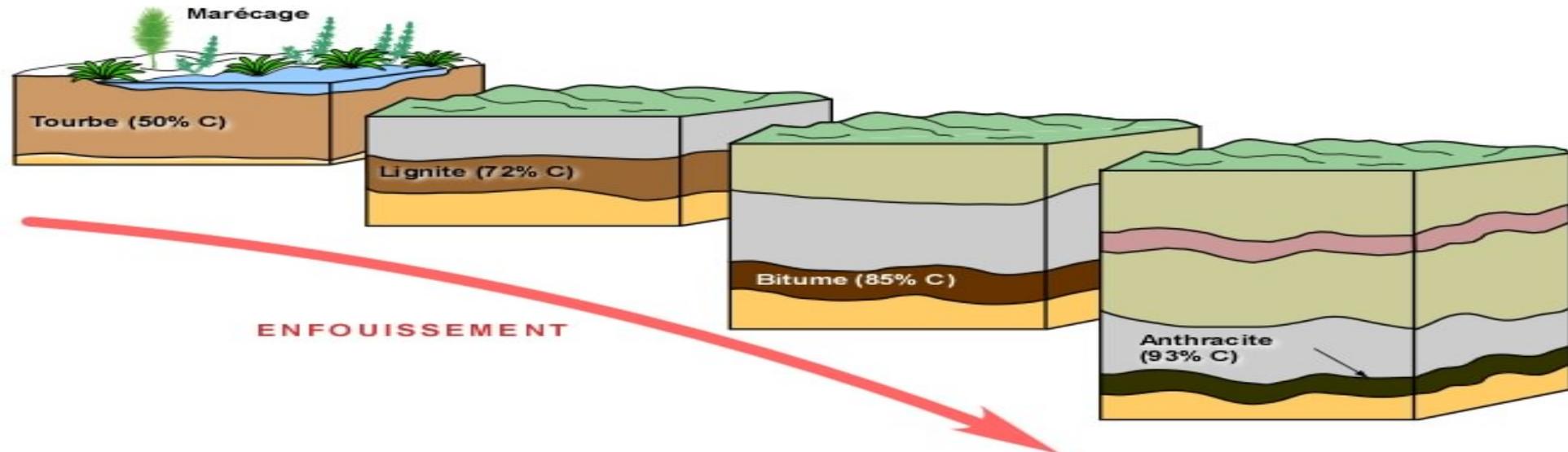
Faibles quantités -----> Azote - Soufre (Mercure - Arsenic ....)

+ Cendres (minerais)

# LE CHARBON

## Sa formation

- Période carbonifère (360 à 290 millions d'années)
- Décomposition de matières organiques végétales
- Plus le charbon est vieux et plus sa teneur en carbone est élevée (maturité)





Mine de charbon à ciel ouvert en Afrique du Sud



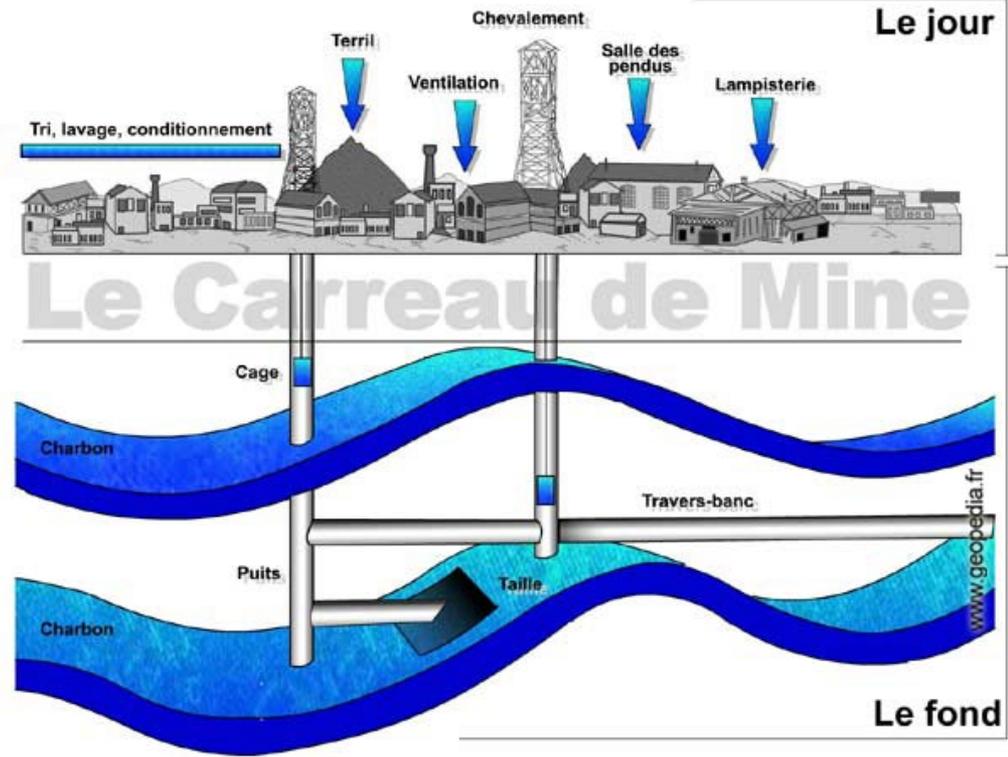
Petite mine de charbon en Inde

Excavatrice pour mine de charbon à ciel ouvert



# MINE DE CHARBON SOUTERRAINE

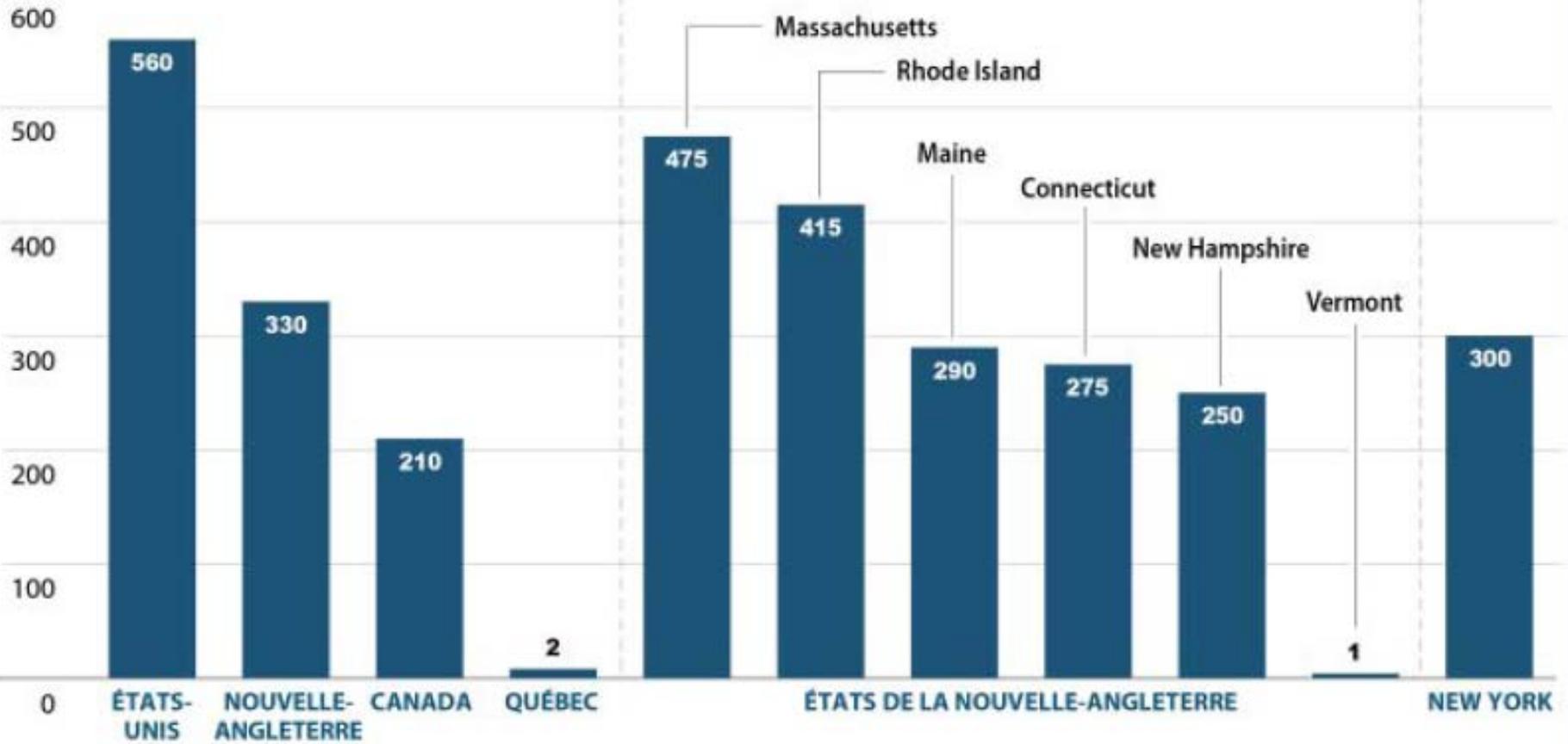
Excavatrice moderne pour  
mine de charbon souterraine



Mine artisanale de charbon en Chine

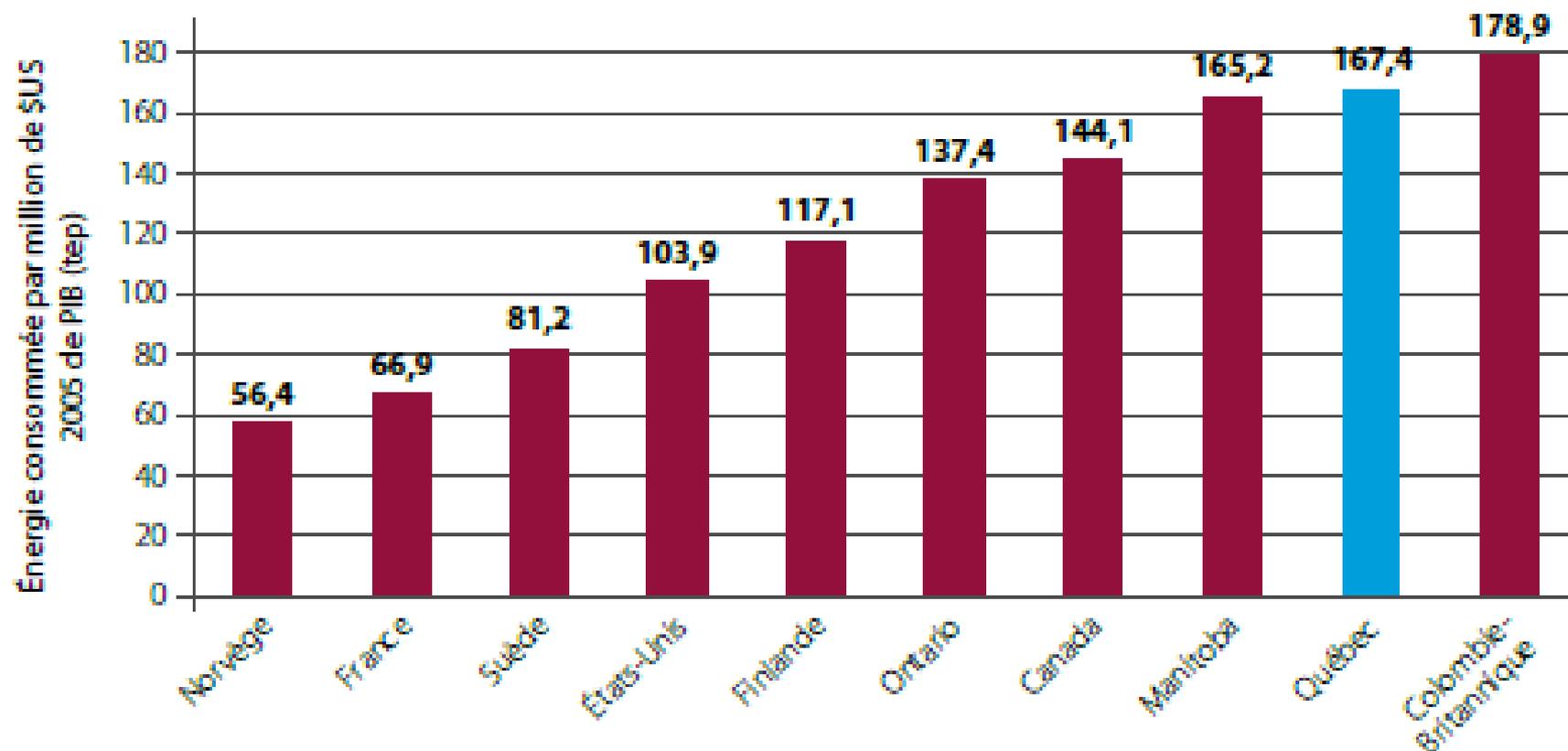
# Émissions de gaz à effet de serre attribuables à la production d'électricité en phase d'exploitation par kilowattheure produit (2010)

g éq. CO<sub>2</sub> /kWh



Sources : Environnement Canada, 2012 – Statistique Canada, 2012 – U.S. Energy Information Administration, 2012.

Figure 2.7 Comparaison de l'intensité énergétique du Québec avec celle de divers autres territoires et pays (2009)



Sources : Ministère des Ressources naturelles du Québec, Statistique Canada, Office de l'efficacité énergétique du Canada, Ressources naturelles du Canada et Enerdata.

Note : L'intensité énergétique de l'économie témoigne de la quantité moyenne d'énergie requise, toutes sources confondues, pour générer une unité comparable de produit intérieur brut (PIB). L'unité de PIB utilisée ici est le million de dollars américains 2005 (M\$US 2005).

# POPULATION DE L'AMÉRIQUE DU NORD : 2024





# PRODUCTION ÉLECTRIQUE AU QUÉBEC

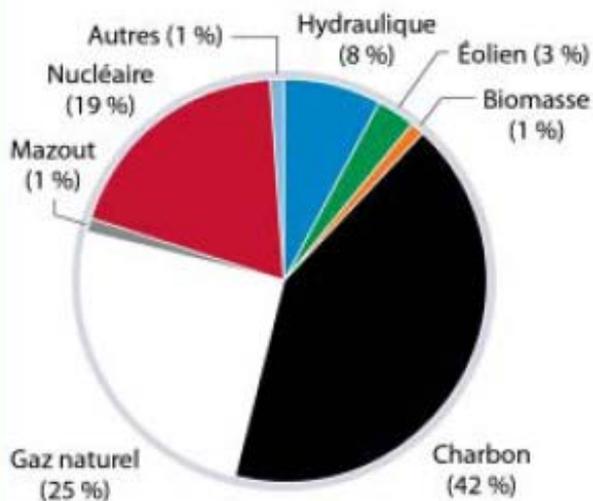


# Production électrique en 2011

## Filières de production d'électricité

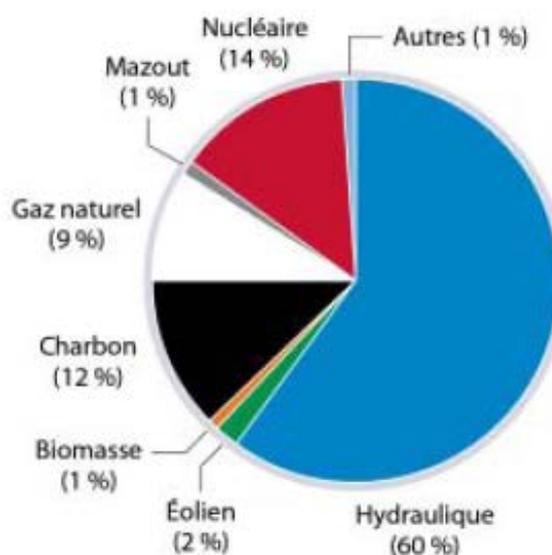
### ÉTATS - UNIS 2011 <sup>(a)</sup>

Production d'électricité : 4 105 TWh



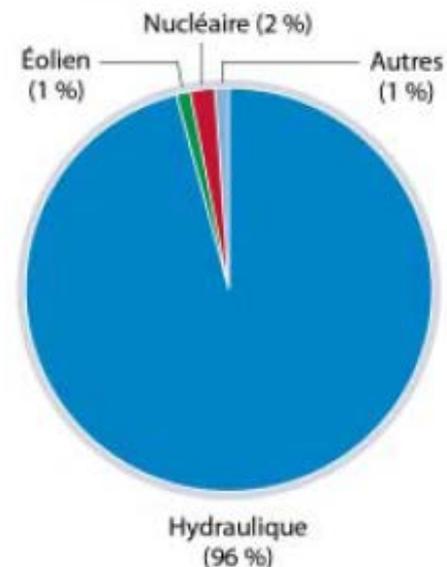
### CANADA 2011 <sup>(b)</sup>

Production d'électricité : 620 TWh



### QUÉBEC 2011 <sup>(b et c)</sup>

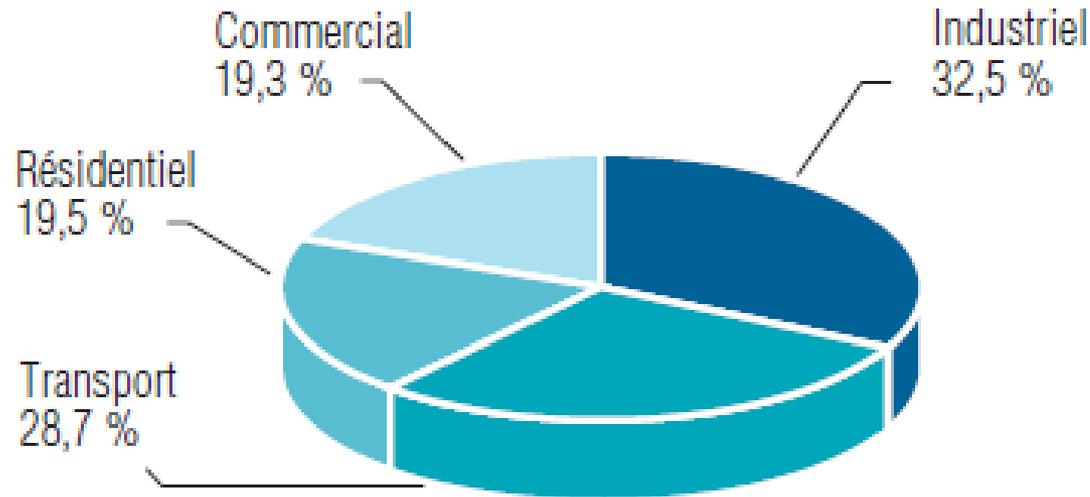
Production d'électricité : 200 TWh \*



\* Données préliminaires

Sources : (a) Energy Information Administration et Electric Power Annual, 2012 – (b) Statistique Canada, 2013 – (c) Ministère des Ressources naturelles du Québec, 2013.

# QUÉBEC : CONSOMMATION TOTALE D'ÉNERGIE SELON LE SECTEUR (2009)

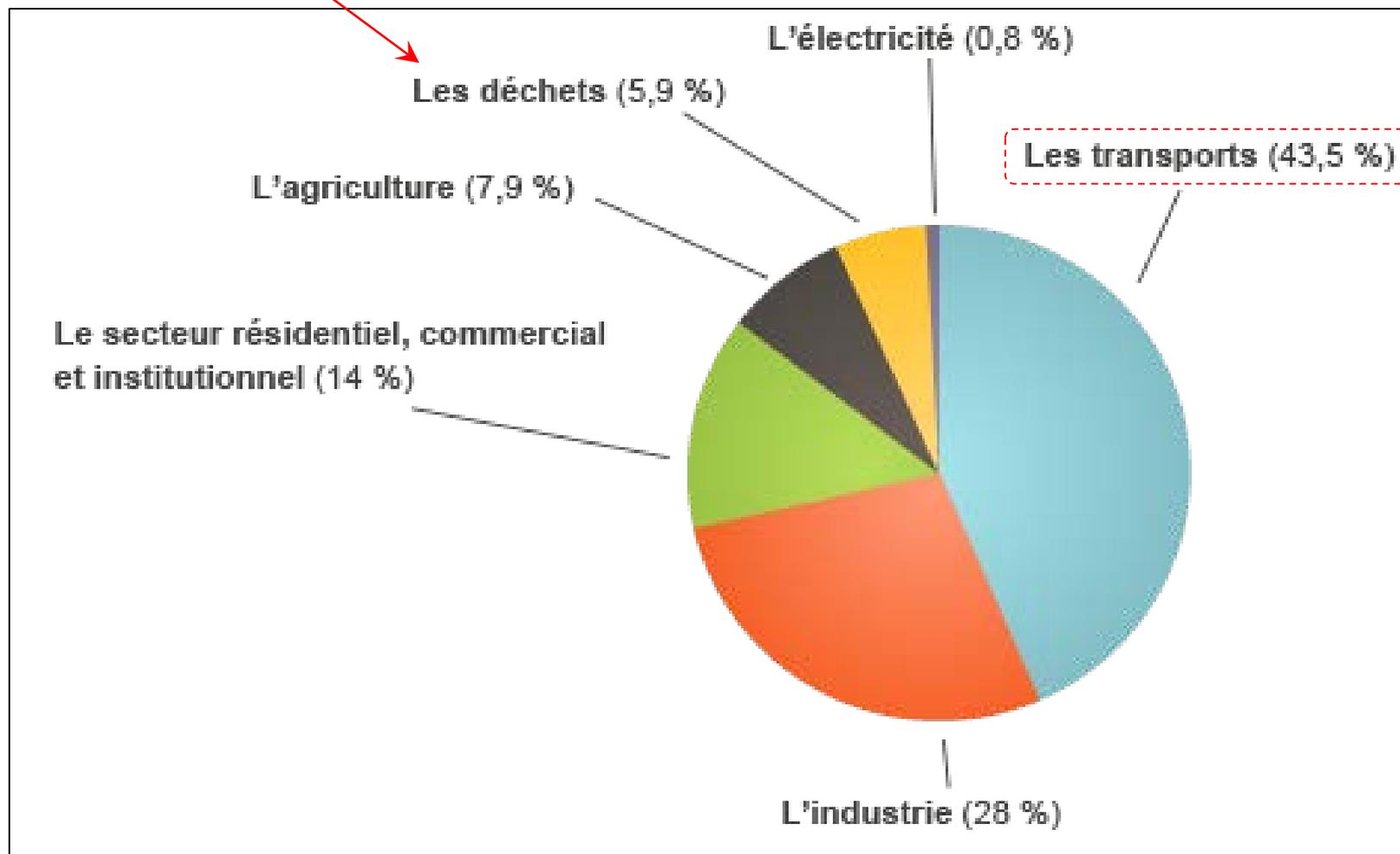


Source : Ministère des Ressources naturelles et de la Faune.

		2001	2008	2009
■ Consommation totale d'énergie	k tep	38 948,8	40 173,9 <sup>r</sup>	39 033,7
<b>Selon la forme</b>				
Électricité	%	39,0	40,7 <sup>r</sup>	40,1
Pétrole	%	38,3	38,7 <sup>r</sup>	39,1
Gaz naturel	%	12,3	10,7	12,5
Biomasse	%	9,3	8,5	7,4
Charbon	%	1,1	1,4 <sup>r</sup>	1,0

# ÉMISSION DES 'GES' AU QUÉBEC EN 2010

BIOGAZ : CH<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub>



En 2010, les émissions totales de GES au Québec se chiffraient à : 84 Mt éq. CO<sub>2</sub>

**LOGICIEL EES**  
**NOTIONS DE BASE**